



HAL
open science

Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation

Ha Duy Long

► **To cite this version:**

Ha Duy Long. Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation. Modélisation et simulation. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2007. Français. NNT: . tel-00260143v2

HAL Id: tel-00260143

<https://theses.hal.science/tel-00260143v2>

Submitted on 2 Apr 2008 (v2), last revised 18 Jun 2008 (v3)

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.

Institut Polytechnique de Grenoble

No. attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INPG

Spécialité : Automatique-Productique

préparée au Laboratoire d'Automatique de Grenoble,

et au Laboratoire des sciences pour la conception, l'optimisation et la production

dans le cadre de l'École Doctorale :

Électronique, Électrotechnique, Automatique, Traitement du Signal

par

Duy-Long HA

le 19 septembre 2007

Titre :

**UN SYSTÈME AVANCÉ DE GESTION D'ÉNERGIE DANS LE BÂTIMENT
POUR COORDONNER PRODUCTION ET CONSOMMATION**

Directrice de thèse : Mireille JACOMINO

Co-Encadrant : Stéphane PLOIX

Co-Encadrant : Éric ZAMAÏ

JURY

Seddik BACHA	Professeur de l'UJF Grenoble	Président
Pierre BAPTISTE	Professeur de l'école Polytechnique Montréal	Rapporteur
Pierre LOPEZ	Chargé de recherche au CNRS de Toulouse	Rapporteur
André ROSSI	Maître de conférence de l'Université de Bretagne Sud	Examineur
Mireille JACOMINO	Professeur de l'INP Grenoble	Directrice de thèse
Stéphane PLOIX	Maître de conférence de l'INP Grenoble	Co-Encadrant

Avant-Propos

Je tiens à remercier les personnes qui ont partagé avec moi ma vie, les bonheurs et aussi mes expériences de la recherche pendant ces trois années. J'essaie d'écrire ce que je pense et ce que je ressens, et cette partie n'est pas la plus facile de ma thèse.

Je tiens tout d'abord à remercier M. Alain Barraud (directeur du Laboratoire Automatique de Grenoble) la première personne qui m'a accueilli au sein de son laboratoire comme étudiant de Master de Recherche puis en tant que doctorant durant les deux premières années de ma thèse. Je remercie également mes professeurs de Master : C. Commault, E. Zamaï, J.M. Flaus, M.L. Espinouse, M. Jacomino et P. Ladet. Je remercie également M. Yannick Frein (le directeur du laboratoire G-SCOP) qui m'a accueilli au sein de son laboratoire depuis janvier 2007.

Je remercie M. Eric Zamaï de m'avoir accepté comme stagiaire de Master et de m'avoir lancé dans cette aventure scientifique. Malgré sa charge de directeur des études, il m'a toujours suivi et m'a donné l'assistance nécessaire. Avec tout ce qu'il a fait pour mon pays en général et pour moi en particulier, je le considérerai toujours comme un ami fidèle du Vietnam.

Mes remerciements s'adressent ensuite à Mme Mireille Jacomino, ma directrice de thèse, pour ses conseils, son esprit critique et surtout son recul par rapport à mes travaux de recherche. Elle m'a toujours aidé et compréhensive et plein d'humanité. Être conseillé par Mme Mireille Jacomino et profiter de son talent sont une expérience unique, un soutien incomparable.

La personne à qui je dois le plus est M. Stéphane Ploix. C'est toujours un plaisir de travailler avec lui, je me sens toujours à côté d'une mine d'inspiration. Son enthousiasme et sa capacité de travail sont parfois sans limite. Sans lui, il est clair que l'écriture de ma thèse aurait été beaucoup plus difficile.

C'est une chance pour moi d'avoir pu intégrer un environnement de recherche très riche, j'y ai rencontré beaucoup de gens fabuleux et constructifs. Eric Deschamps m'a beaucoup aidé durant mon Master. Florent Frizon de Lamotte, Huynh Quoc Hung, Shadi Abras, Pham Thi Thu Ha ont contribué à la construction des idées de ma thèse. Les échanges que j'ai eu avec Alexis Aubry m'ont permis d'accélérer considérablement mes travaux de recherche durant la dernière année.

J'adresse mes remerciements à M. André Rossi pour son aide pendant mon stage de Master de recherche et pour sa contribution à mon manuscrit de thèse. Sa lecture approfondie de mon manuscrit et ses suggestions pour l'améliorer méritent un remerciement spécial.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude à mes deux rapporteurs, M. Pierre Baptiste et M. Pierre Lopez d'être venus de loin pour examiner mes travaux. Leurs commentaires constructifs me seront vraiment utiles pour mes futures recherches. Je voudrais exprimer également ma gratitude à mon président du jury, M. Seddik Bacha pour sa gentillesse, sa compréhension et sa générosité.

Je tiens aussi à remercier l'équipe technique et administrative de l'ancien laboratoire LAG et en particulier Daniel, Marie-Thérèse, Virginie et Patricia. Je remercie également toutes les personnes du nouveau laboratoire G-SCOP que j'ai rejoint depuis janvier 2007.

Il est cependant impossible de déconnecter les résultats de trois ans de recherche et ma vie privée car les idées émergent, inconsciemment parfois, dans un environnement serein et chaleureux.

La distance avec ma famille a toujours été une des difficultés que j'ai eu à surmonter durant mon séjour en France. Je tiens à exprimer tous mes remerciements envers mon père, ma mère et ma soeur qui m'ont toujours soutenu tout au long de mon parcours depuis le premier jour.

L'amitié de Kien, Minh, Luong et Huyen ont été d'un réconfort incomparable, l'amitié d'Alexis et d'Eric, d'un appui par delà les frontières.

Pour mes grand-mères, je n'ai pas de mot spécial, je vous dédie ces travaux.

Table des matières

Introduction générale	13
Partie I Problématique	15
Chapitre 1 Contexte et Enjeux	19
1 Panorama	19
1.1 Contexte mondial	20
1.1.1 Impact des activités énergétiques	20
1.1.2 De la production à la consommation d'électricité	22
1.2 Contexte français	24
1.3 Conclusions sur le contexte	26
2 Problématique de la production et de la consommation	26
2.1 La structure et l'exploitation du réseau électrique	26
2.1.1 La structure du réseau électrique	26
2.1.2 Supervision, conduite et exploitation du réseau électrique	27
2.1.3 Problématique des pics de consommation	28
2.2 Maîtrise de l'énergie dans le secteur Résidentiel-Tertiaire : l'enjeu in- contournable	29
3 Conclusion	30
Chapitre 2 Caractérisation du problème	31
1 Caractérisation des besoins énergétiques dans le bâtiment	31
1.1 Chauffage et climatisation	32
1.1.1 Confort thermique	32
1.1.2 Zone thermique	33
1.2 Ventilation	33
1.2.1 Besoin de ventilation	33
1.2.2 Contrôle du système de ventilation	34
1.3 Production d'eau chaude	34
1.3.1 Besoin en eau chaude	34
1.3.2 Production de l'eau chaude	35
1.4 Éclairage	35
1.4.1 Confort visuel	36
1.5 Fonctions électrodomestiques	36

1.5.1	Production de froid alimentaire	36
1.5.2	Cuisson	36
1.5.3	Micro-informatique domestique	37
2	Production d'électricité locale, stockage	37
2.1	Production d'électricité locale	37
2.1.1	Production d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire	37
2.1.2	Production d'électricité d'origine éolienne	38
2.1.3	Production d'énergie par un group électrogène	38
2.2	Systèmes de stockage	39
2.2.1	Stockage thermique passif	39
2.2.2	Stockage thermique actif	39
2.2.3	Stockage électrique	40
3	Conclusion	40
Chapitre 3 Système de gestion de l'énergie dans le bâtiment		41
1	Les systèmes de gestion d'énergie dans le bâtiment	41
1.1	Fonctionnalités et limites des systèmes de gestion de l'énergie existants	41
1.1.1	Régulation et Programmation	42
1.1.2	Optimisation du démarrage et de l'arrêt	42
1.1.3	Accès aux données des capteurs et performance des équipements	42
2	Maîtrise de l'énergie dans les bâtiments	43
2.1	Notion de système domotique	43
2.1.1	Caractéristique d'une demande de service énergétique	43
2.1.2	Notion de degré de liberté du flux de service	44
2.2	Vers une optimisation de la gestion des flux énergétiques	44
2.3	Gestion de flux énergétiques	45
3	Conclusion	47
Partie II Modélisation du problème		49
Chapitre 4 Structuration du problème		53
1	Notations et Définitions	53
1.1	Notion de flux	54
1.1.1	Flux énergétiques	55
1.1.2	Flux d'information	55
1.2	Service	55
1.2.1	Flexibilité d'un service	56
1.2.2	Estimation de la demande du service	56
1.2.3	Fonction de satisfaction du service	56
2	Modèle de comportement du système	57
2.1	Modèle de comportement dynamique de l'environnement	57
2.2	Modèle de comportement des équipements	58
3	Conclusion	61

Chapitre 5 Formulation mathématique du problème	63
1 Principes de la transformation logique	63
1.1 Logique propositionnelle et programmation en nombres entiers	63
1.1.1 Transformation de la condition linéaire	64
1.1.2 Variables auxiliaires	65
2 Transformation des modèles comportementaux	65
2.1 Formulation du service de chauffage, climatisation	65
2.2 Modélisation d'un service temporisé non-préemptif	67
2.2.1 Formulation du problème en temps discret	67
2.2.2 Formulation en temps continu	69
2.3 Source d'énergie	70
2.3.1 Source d'énergie intermittente	70
2.3.2 Source d'énergie permanente	71
2.4 Stockage de l'énergie	71
2.4.1 Gestion de l'achat et de la revente d'énergie	72
3 Problème de planification de la production/ consommation d'énergie	73
3.1 Plan d'affectation des ressources	73
3.2 Critères d'optimisation	73
3.2.1 Critères économiques	73
3.2.2 Critères de confort	73
3.2.3 Critère écologique	74
4 Conclusion	74
Chapitre 6 Architecture de conduite retenue	75
1 Analyse des besoins pour le mécanisme de pilotage	75
1.1 Caractérisation temporelle du problème	75
1.2 Incertitudes et aléas	76
1.3 Les mécanismes de pilotage existants	76
1.4 Conséquences d'un choix de période de discrétisation	77
2 Optimisation multi-échelle	77
2.1 Principe	77
2.2 La couche d'anticipation	80
2.3 La couche réactive	80
2.4 La couche de commande locale	81
3 Conclusion	81
Partie III Approches de résolution	83
Chapitre 7 Approche de résolution pour la couche d'anticipation	87
1 Introduction	87
2 Analyse du problème vis à vis de sa réduction	89
2.1 Analyse des relations temporelles entre les services	89
2.1.1 Définition	89
2.1.2 Graphe des relations temporelles	90
2.2 Proposition d'une borne inférieure du coût de l'énergie consommée	92

3	Programmation linéaire en variables mixtes (PLVM)	93
3.1	L'approche de séparation et d'évaluation	93
3.2	Exemples d'application de la PLVM	93
4	Approche de résolution par les Métaheuristiques hybrides	95
4.1	Implémentation de la recherche tabou(RT)	98
4.2	Structure du voisinage	98
4.3	Implémentation du Recuit Simulé	100
4.4	Implémentation de l'Algorithme Génétique	102
4.4.1	Description de l'algorithme génétique	102
4.4.2	Gènes, croisement et mutation	103
5	Mise en œuvre	104
5.1	Recherche tabou	105
5.2	Recuit simulé	106
5.3	Algorithme Génétique	106
5.4	Synthèse des résultats obtenus par les métaheuristiques hybrides	107
6	Conclusion	108
Chapitre 8 Approche de résolution pour la couche réactive		109
1	Introduction	110
1.1	Approche d'ordonnancement sous contrainte de ressource	110
1.2	Approche de pilotage direct des charges	111
2	Problème d'affectation d'énergie aux services interruptibles	112
2.1	Description du problème	112
2.2	Approche prédictive par programmation dynamique	113
2.3	Affectation dynamique par l'algorithme de liste	115
3	Conclusion	117
Chapitre 9 Prise en compte des incertitudes		119
1	Analyse des incertitudes	119
1.1	Sources d'incertitudes dans le problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment	119
1.1.1	Les incertitudes venant de l'extérieur	120
1.1.2	Les incertitudes venant de l'intérieur	120
1.2	Modélisation de l'incertitude	121
2	Approche pour la prise en compte des incertitudes	122
2.1	Introduction à la programmation multi-paramétrique	122
2.2	Algorithme dans l'étape 1	124
2.3	Algorithme de l'étape 2	129
3	Conclusion	129
Partie IV Applications		131
Chapitre 10 Gestion des flux électriques dans un bâtiment photovoltaïque		135
1	Présentation du projet Multisol	135
1.1	Architecture matérielle	135

1.2	Architecture logicielle	137
2	Cas d'étude	138
2.1	Services disponibles dans l'appartement cible	139
2.1.1	Service de chauffage	139
2.1.2	L'eau chaude sanitaire	140
2.1.3	Service de lave-linge	141
2.1.4	Service du lave vaisselle	142
2.1.5	Les sources d'énergie électrique	142
2.1.6	Critères d'optimisation et modes de fonctionnement	144
2.2	Résultats	144
2.2.1	Stratégie 1 : Consommation locale de l'énergie solaire produite	144
2.2.2	Stratégie 2 : revente de l'énergie produite	145
3	Conclusion	146
Chapitre 11 Prévention des blackouts grâce au système de gestion d'énergie		149
1	Introduction	149
2	Mise en place d'un système de pilotage	150
2.1	Principe du mécanisme de prévention des blackouts	150
2.2	Mécanisme de pilotage multi-échelle	152
2.2.1	La couche de gestion d'énergie dans le bâtiment	152
2.2.2	La couche de commande du GRD	152
3	Mise en œuvre	154
3.1	Structure du simulateur	154
3.2	Exemple d'application	154
4	Conclusion	156
Conclusion générale		159
Bibliographie		163
Table des figures		173
Liste des tableaux		175

Introduction générale

Depuis toujours, l'Homme a considéré la planète comme une mine inépuisable de ressources. Il a fait preuve d'une incroyable ingéniosité pour découvrir de nouvelles ressources, de nouvelles terres à cultiver, de nouvelles énergies à exploiter. Avec le temps, l'Homme s'est posé en dominateur absolu de la nature qu'il a façonnée pour qu'elle lui soit utile. A force d'efforts et d'imagination, l'infinitude s'est révélée finie et aujourd'hui tous les experts convergent vers la conclusion qu'il faut passer d'un paradigme de conquête à un paradigme de symbiose. On parle de plus en plus de développement durable : il ne s'agit plus uniquement de construire son présent mais de considérer aussi la planète et son devenir.

Les experts s'accordent à dire que les évolutions technologiques seules ne permettront pas de changer de paradigme. L'Homme n'échappera pas à une rupture dans sa façon de se concevoir au sein de son environnement. Le problème est ainsi posé mais la solution n'en est pas pour autant facile à trouver. Outre l'aspect politique et militant, des pistes de recherche doivent être explorées. L'utilisation d'un logiciel, l'accès au Web ou la conduite d'une automobile impactent la façon qu'a l'Homme de se positionner par rapport à son environnement. Jusqu'à aujourd'hui, la plupart des produits ont conduit à des usages qui renforçaient le sentiment de toute puissance de l'Homme. Le problème qui se pose aujourd'hui est : un produit peut-il aider l'homme à se re-concevoir avec un nouveau paradigme ?

Ce travail de recherche s'appuie sur les outils de contrôle-commande pour montrer que dans le contexte du bâtiment, il est possible d'aider les occupants à changer leur comportement vis-à-vis de la consommation d'énergie. Nous proposons en effet un système de gestion de l'énergie électrique dans le bâtiment qui permet d'ajuster la consommation aux ressources énergétiques disponibles tout en maximisant le confort des occupants. Ainsi, en fonction des ressources disponibles, certains services peuvent être automatiquement retardés, adaptés ou interrompus. L'utilisateur émet des requêtes de services et le système de contrôle-commande détermine, en fonction du contexte énergétique courant, la meilleure façon de réaliser ces services.

Nous commençons par étudier le contexte énergétique global et celui de l'habitat en particulier. Après avoir examiné les systèmes de gestion d'énergie existants, nous identifions les principaux services de l'habitat, qu'ils soient consommateurs ou producteurs d'énergie, et nous proposons une formulation générique qui permet de modéliser tous les services identifiés ainsi que différents critères portant sur le confort et les coûts économiques et environnementaux.

Nous montrons qu'un système de contrôle-commande structuré en couche permet d'atteindre l'objectif recherché. Une couche anticipative permet de calculer par avance des plans d'affectation d'énergie qui tiennent compte des demandes des occupants mais aussi de données météorologiques et des contraintes et besoins des fournisseurs d'énergie. Une couche réactive permet d'ajuster les plans d'affectation à une échelle de temps plus fine en tenant compte des événements non prévus. Enfin, une couche de commande locale, permet aux équipements d'appliquer les consignes établies

par les autres couches.

Nous proposons alors des algorithmes, adaptés aux différentes couches de commande, qui reposent sur des techniques d'optimisation à base d'heuristiques et de programmation linéaire mixte. Après avoir étudié les performances de ces algorithmes et montré leur capacité à faire face à des événements imprévus, nous proposons une solution complémentaire qui permet de tenir compte d'incertitudes sous forme d'intervalles sur les modèles et les prédictions.

Nous concluons en présentant deux applications issues de collaborations avec d'autres laboratoires de recherche et des entreprises. L'une se place au niveau de l'utilisateur en facilitant la gestion de l'énergie solaire dans le bâtiment et permet par exemple d'adapter la consommation d'un logement pour faire face aux fluctuations de la ressource et du coût énergétique. Nous montrons que le système de gestion d'énergie peut aussi servir à optimiser la consommation/revente d'énergie solaire sur le réseau. Enfin, nous adoptons le point de vue du fournisseur d'énergie en montrant comment un ensemble de logements équipés de systèmes de gestion d'énergie peut aider les gestionnaires de réseaux à mieux faire face aux phénomènes de blackout.

Première partie

Problématique

Nous n'héritons pas de la terre de nos Ancêtres, nous l'empruntons à nos enfants.

St Exupery

Chapitre 1

Contexte et Enjeux

Ce chapitre analyse sommairement le contexte de la consommation et de la production énergétique, en particulier l'énergie électrique, tant au niveau mondial qu'au niveau français. Cette analyse nous permet d'éclaircir la complexité du contexte énergétique dans une phase transitoire pleine d'inquiétudes quant aux problèmes environnementaux : changement climatique, épuisement des réserves d'énergie mondiales... Dans ce contexte, il apparaît que la consommation d'énergie dans le secteur Résidentiel-Tertiaire représente de 46% de la consommation d'énergie finale et conduit à 23% des rejets de gaz à effet de serre. La deuxième partie de ce chapitre examine les moyens de maîtriser l'énergie dans ce secteur.

1 Panorama

Depuis quelque temps déjà, la communauté scientifique mondiale tend à s'accorder concernant l'influence de l'activité humaine sur le réchauffement climatique. Un consensus se dégage également concernant l'évolution de la démographie mondiale vers un pic à 9 milliards d'êtres humains aux environs de 2050 (pour environ 6 milliards aujourd'hui) suivi d'une lente décroissance pour revenir aux environs de 7 milliards vers 2100. Parallèlement, l'actualité récente (prix du pétrole, développement rapide de pays émergents à forte population tels que la Chine, l'Inde ou le Brésil) nous démontre la forte probabilité d'augmentation du coût des énergies fossiles dans un avenir proche, quelle que soit leur nature et les pénuries à moyen terme pour certaines d'entre elles. Partout dans le monde, les sources d'énergies primaires ou finales sont appelées à se diversifier à différents niveaux (état, région, villes, bâtiments, particuliers), complexifiant ainsi grandement les problèmes liés à la distribution. À cela se rajoute la libéralisation des secteurs de l'énergie au niveau Européen qui permettra à terme à tout consommateur de choisir son fournisseur d'énergie. Dans ce contexte, il s'avère que :

- Le secteur du bâtiment constitue un gisement potentiel important d'économie d'énergie, notamment par la rationalisation de l'utilisation de l'énergie finale, et plus particulièrement de l'électricité.
- De nouveaux besoins apparaissent déjà dans certaines parties du monde quant à la sécurisation de l'approvisionnement en énergie au niveau local (Black-out américains, italiens etc.)

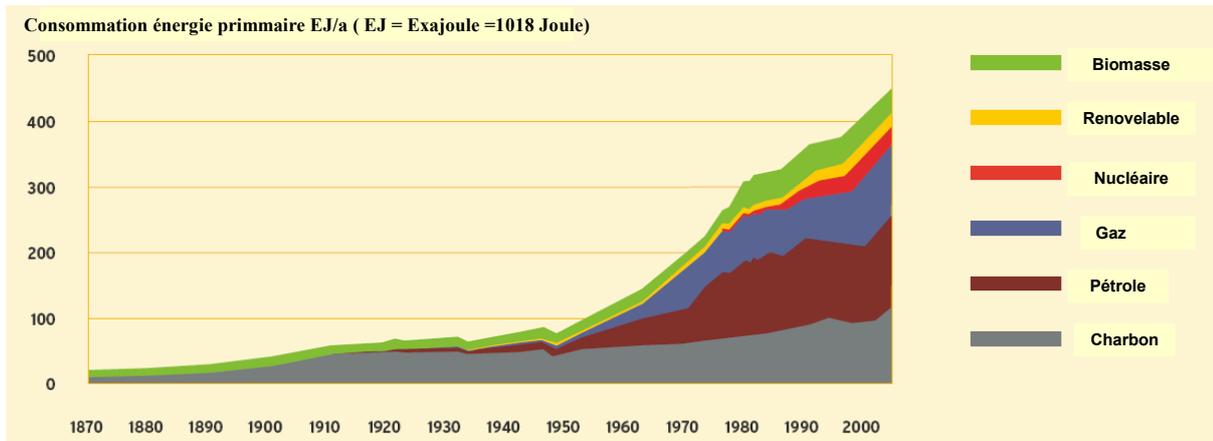


FIG. 1.1 – Consommation énergétique mondiale depuis 1870 (source IEA statistique et [BMU \(2006b\)](#))

1.1 Contexte mondial

1.1.1 Impact des activités énergétiques

Impacts environnementaux : L'Homme du vingtième siècle s'est comporté comme si l'énergie était disponible à volonté sans prendre pleinement conscience des effets induits par l'évolution de son mode de vie. Un progrès a été franchi avec la qualification sans doute critiquable, de l'impact des activités humaines sur l'écosystème. Le WWF (World Wide Fund For Nature) a proposé la notion d'*Empreinte Écologique Mondiale* (World Ecological Footprint en anglais). Il s'agit de la surface exploitée ou consommée pour les différentes activités humaines. Le rapport du [WWF \(2004\)](#) confirme que les ressources naturelles consommées par l'humanité sont plus de 20% supérieures à celles que la terre peut produire par une période donnée. L'énergie représente plus de 50% d'empreinte totale et augmente de manière continue. Si on regarde la consommation énergétique mondiale depuis 1870 (figure 1.1), on remarque qu'elle n'a cessé de croître de manière quasiment exponentielle.

Les besoins énergétiques conduisent à l'épuisement de précieuses ressources ainsi qu'à d'importantes pollutions dont les rejets de gaz à effet de serre. Une des conséquences est que la terre ne cesse de se réchauffer depuis la fin du XIX siècle. Ce sont sans aucun doute les activités humaines qui renforcent les phénomènes d'effet de serre et sont responsables du réchauffement climatique ([Multon et al., 2003](#)). Il est principalement dû au rejet de gaz carbonique dans l'atmosphère suite à l'utilisation de combustibles. Aujourd'hui, notre planète ne peut absorber que la moitié des 7 milliards de tonnes de carbone rejetés annuellement, et si la tendance n'est pas inversée, dans 20 ans, cette quantité aura encore augmenté de 50%.

Selon le rapport de l'International Energy Outlook 2006 ([IEA, 2006](#)), l'ordre de grandeur de la consommation d'énergie primaire en 2004 dans le monde est de $11,059 \cdot 10^{12}$ kWh pour une consommation totale finale de $7,1 \cdot 10^{12}$ kWh. L'énergie non-renouvelable représente 86,8% de la consommation totale. Le pétrole représente la plus grande partie (34,3%), suivi du charbon (25,1%), puis du gaz naturel (20,9%) et du nucléaire (6,5%). Évidemment, l'existence humaine dépend fortement des sources énergétiques. Pouvons-nous continuer à consommer de cette manière tout en préservant notre écosystème? Combien nous restera-t-il d'énergie primaire pour

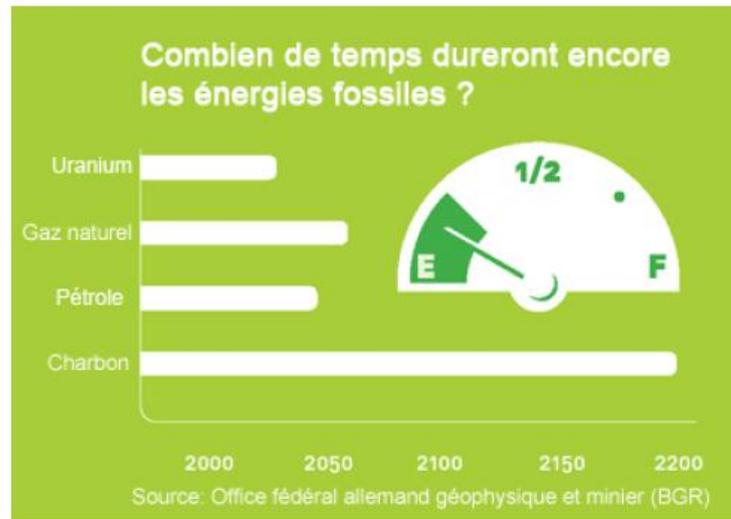


FIG. 1.2 – Réserve mondiale l'énergie fossile

notre futur ? Les scénarios d'évolution sont nombreux, il est extrêmement difficile de prévoir exactement comment l'Humanité va se développer : la population va continuer de croître, stagner ou décroître, mais d'après (Multon et al., 2004), une croissance de la consommation mondiale principalement due au développement des pays émergents (la Chine, l'Inde etc...) est très probable. Il est ainsi prévisible que nous épuiserons le gaz et le pétrole durant le XXI siècle (voire estimation des réserves de l'énergie fossile proposée figure 1.2).

Impacts sociaux : Les carburants fossiles représentent un enjeu politico-économique majeur et sont ainsi l'objet de conflits permanents, surtout pour le pétrole qui est aujourd'hui une ressource incontournable dans le domaine des transports.

La prévision de la production de pétrole (Laherrere, 2003), compte tenu du fait que les capacités actuelles de récupération du pétrole dans un gisement conventionnel sont de l'ordre de 30 à 35%. Les optimistes tablent sur la capacité d'innovation technologique permettant d'améliorer le rendement de ces gisements et de rendre exploitables les gisements non conventionnels tels que les pétroles extra-visqueux ou les sables asphaltites (réserves pratiquement équivalentes aux réserves de pétrole conventionnelles du Moyen Orient). Les optimistes n'envisagent pas de pic de production avant 2040 environ tandis que les pessimistes le prévoient aux environs de 2015, voire plus tôt. On notera également que la majeure partie des réserves de pétrole conventionnelles est située dans des pays sujets à de fortes tensions politiques. C'est la raison pour laquelle des conflits à répétition s'y déroulent. En conséquence, cela implique des perturbations sur la production et des fluctuations sur le cours du pétrole.

Concernant le gaz, les réserves sont plus importantes comparées à celles du pétrole (voir figure 1.2). Cependant, on peut constater que les importations européennes ont déjà commencé à s'amplifier fortement. Compte tenu du faible nombre de fournisseurs (principalement la Russie) et du fait que le gaz soit de 7 à 10 fois plus cher à transporter que le pétrole, on peut s'attendre également à de fortes augmentations de prix.

Par ailleurs, on peut constater l'influence grandissante du charbon pour lequel il reste des réserves mondiales assez importantes. Il est très probable que son exploitation va connaître une

forte augmentation dans le prochain siècle (Multon et al., 2004). L'utilisation trop intensive pourrait s'avérer catastrophique au niveau de l'environnement du fait de l'émission de gaz à effet de serre.

En 1997, visant à lutter contre le changement climatique en réduisant les émissions de gaz carbonique, le protocole de Kyoto a été ratifié par 165 pays industrialisés : 35 d'entre eux et l'union européenne se sont engagés à réduire d'ici 2012 leurs émissions de gaz à effet de serre de 5,2% par rapport à celles de 1990. Les engagements souscrits par les pays développés sont ambitieux. Pour faciliter leur réalisation, le protocole de Kyoto prévoit, pour ces pays, la possibilité de recourir à des mécanismes dits "de flexibilité" en complément à des politiques et mesures qu'ils devront mettre en œuvre aux plans nationaux (BMU, 2006a). Le Protocole de Kyoto est la première étape pour aller vers un développement durable de l'humanité, un développement qui consiste à répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. L'objectif du développement durable est de définir des schémas qui concilient les trois aspects économique, social et environnemental des activités humaines. Autrement dit, il concerne tous les pays, toutes les entreprises, tous les habitants de la terre qui doivent mieux utiliser les ressources de la terre en réduisant les consommations inutiles et les pollutions non justifiées.

1.1.2 De la production à la consommation d'électricité

Pour mieux appréhender les enjeux énergétiques, examinons les principaux types d'énergie électrique ainsi que la répartition de la consommation.

L'électricité provenant d'énergies non-renouvelables : L'électricité peut être produite à partir de plusieurs sources d'énergie. Selon le rapport IEA (2006), on constate la prédominance très forte au niveau mondial de la production d'électricité à partir des combustibles fossiles (39,8% par le charbon, 19,6% par le gaz et 6,7% par le pétrole). La pénurie des sources d'énergie fossile et la restriction des émissions de gaz à effet de serre causent des tensions sur l'utilisation des énergies primaires. Or, ces tensions auront inmanquablement des répercussions importantes sur les coûts de l'électricité au niveau mondial. En parallèle, il est de plus en plus sérieusement envisagé de réduire les rejets de gaz à effet de serre notamment par le traitement des gaz carboniques (capture, stockage et piégeage de CO_2). Ce coût risque d'engendrer une importante augmentation du coût de production de l'électricité.

Production de l'électricité à partir des énergies renouvelables : En considérant le contexte de réduction d'émission de gaz à effet de serre et l'incertitude sur les sources d'énergie fossile, l'utilisation de sources d'énergie renouvelable commence à être encouragée par les politiques publiques et commence à se répandre. Les énergies renouvelables représentent 13,3% de la consommation totale d'énergie comptabilisée dans le monde et 18% de la production mondiale d'électricité. L'hydraulique en occupe la plus grande partie. Cependant, une analyse détaillée de Observer (2006) montre que parmi les énergies renouvelables, la production d'électricité d'origine éolienne a connu la croissance la plus importante avec une augmentation de 28.4% par an en moyenne de 1995 à 2005. La production d'électricité d'origine solaire est au deuxième rang avec une progression annuelle de 19.5%.

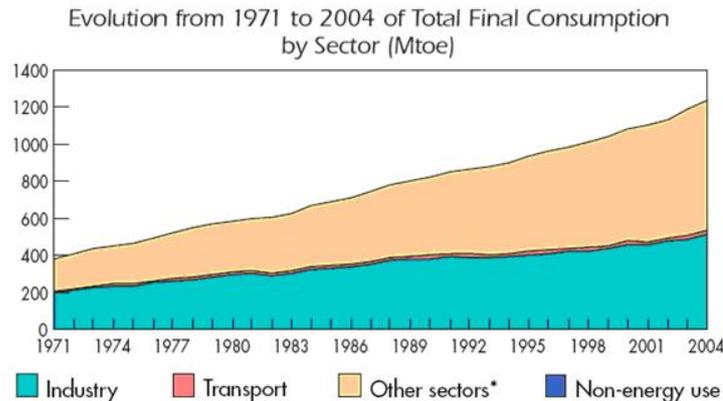


FIG. 1.3 – Consommation d’électricité par secteur dans le monde entier

L’énergie éolienne : est l’énergie tirée du vent au moyen d’un dispositif aérogénérateur tel qu’une turbine éolienne (ADEME, 2002). Parmi les ressources renouvelables, l’éolien est encore actuellement le mieux placé sur le plan de la rentabilité économique. Les améliorations technologiques réalisées au cours des deux dernières décennies rendent aujourd’hui la filière fiable sur le plan technologique. La mise en exploitation d’une turbine de 1 MW installée sur un site éolien moyen permet d’éviter un rejet annuel de 2000 tonnes de dioxyde de carbone, si l’électricité produite était issue de centrales thermiques, sachant que l’on prend en compte l’énergie et les matériaux nécessaires à la fabrication et au démantèlement des équipements de production, afin de s’assurer que son bilan énergie produite/ énergie consommée est intéressant. On étudie ainsi le cycle de vie des éoliennes. Or, selon l’association Danoise de l’industrie éolienne, une éolienne moderne produit, en seulement deux à trois mois, toute l’énergie consommée pour sa réalisation. Une éolienne de 2,5 MW a une durée de vie d’environ 20 ans dans des conditions normales d’exploitation et peut produire jusqu’à 3000 MWh par an, ce qui correspond à la consommation annuelle d’environ 1000 à 3000 foyers (suivant leur consommation).

Énergie solaire : Bien qu’étant, pour l’instant, très largement minoritaire au niveau mondial, l’énergie solaire constitue une énergie facilement exploitable en évolution très forte dans les deux domaines que sont le photovoltaïque et le solaire thermique. En effet, la croissance de l’électricité solaire photovoltaïque a été de l’ordre de 31,6% par an en moyenne. Durant ces vingt dernières années, le prix de l’énergie produite par le photovoltaïque est passé significativement de plus de cent euros à environ deux euros par watt aujourd’hui.

Le point faible des systèmes photovoltaïques est leur rendement de 3 à 12% et leur rapport important coût d’investissement/énergie produite. Selon le rapport de BMU (2006b), les systèmes photovoltaïques ont besoin de 2 à 5 ans pour amortir l’énergie consommée pour leur construction, incluant le coût de fabrication et le montage. Pour maximiser le rendement du collecteur d’énergie solaire, des collecteurs multifonctions ou systèmes photovoltaïques hybrides ont été mis au point. Ils consistent à récupérer l’énergie solaire en la transformant simultanément sous forme électrique et sous forme thermique. Cela permet d’améliorer considérablement le rendement du système.

Consommation d’électricité : Le rapport sur la production d’énergie mondiale (IEA, 2006) conteste la croissance de la production d’électricité par habitant entre 1995 et 2005 qui ne ra-

lentit que dans les pays postindustriels. Bien que la croissance de la consommation d'électricité par habitant soit beaucoup plus faible dans les régions industrialisées comme l'Europe de l'Ouest (1,6% par an en moyenne). Dans les pays en développement comme l'Asie de l'Est et du Sud Est, l'augmentation de la consommation par habitant est de plus de 5% par an en moyenne depuis 1995. En conséquence, la consommation d'électricité au niveau mondial du secteur Résidentiel-Tertiaire et de l'agriculture occupe toujours la plus grande partie de la consommation (plus de 50% de la consommation totale en 2004). Le secteur résidentiel correspond à l'ensemble des habitats individuels ou collectifs. Le tertiaire regroupe les activités de service : écoles, bureaux, commerces, hôtels. L'agriculture comprend la consommation d'énergie des engins agricoles et des bâtiments d'élevage. La part de l'agriculture est relativement faible par rapport au secteur du Résidentiel-Tertiaire. La consommation d'électricité de ces secteurs ne cesse pas d'augmenter depuis 1973. En 2004, l'électricité consommée dans ces secteurs est égale à 160% de la consommation mondiale de l'année 1973. Dans le monde, la répartition des usages énergétiques dans le Résidentiel-Tertiaire peut être estimée à 80% pour le thermique (chauffage, climatisation, eau chaude, cuisson) et 20% pour des usages spécifiques de l'électricité (éclairage, électroménager, audiovisuel).

1.2 Contexte français

La France constitue un cas un peu à part au niveau mondial. Elle est naturellement pauvre en ressources énergétiques et une grande part de ses besoins sont couverts par des énergies importées. Grâce à la forte nucléarisation du parc de centrales françaises, car la France est le deuxième producteur d'énergie nucléaire au monde (DGEMP, 2007), la France est moins dépendante que d'autres pays européens de l'évolution du coût des énergies fossiles. Il n'en va pas de même pour les heures de pointe où l'électricité est majoritairement produite par des centrales thermiques classiques. Cependant, l'évolution du contexte mondial pourrait avoir des incidences sur les coûts d'approvisionnement en uranium. Les États-Unis ont annoncé récemment la relance de leur programme nucléaire, tandis que certains pays émergeant affirment leur volonté d'accéder à cette énergie. En France en 2003, (RTE, 2003), sur les 547,7 TWh produits, 10,4 ont été autoconsommés par les producteurs, 31,7 ont été " perdus " sur les réseaux de transport, de distribution et de répartition, et 73,1 TWh ont été exportés.

La figure 1.4 représente la consommation finale d'énergie primaire par secteur depuis 1973. On constate sur le graphe de droite la prédominance des secteurs résidentiels et tertiaires pour la consommation d'énergie (43,39% en 2002). L'évolution de la consommation d'énergie du secteur résidentiel-tertiaire est en train d'accélérer rapidement. Pendant 17 ans de 1973 à 1990, l'augmentation de la consommation de ce secteur est de 4,8% mais en 2002, cette augmentation a déjà atteint 3%. Selon la prédiction de (DGEMP, 2004), la consommation de ce secteur pourrait atteindre 85,29 Mtep en 2030 (21,22% d'augmentation par rapport à celle de l'année 2002). En considérant l'importance de la consommation de ce secteur, on constate qu'il est nécessaire de favoriser la réduction de la consommation énergétique dans le secteur Résidentiel et Tertiaire.

Dès 2006, un nouveau dispositif de certificats d'économies d'énergie commence à se mettre en place en France. Il est destiné à favoriser la réduction de la consommation d'énergie dans l'habitat. S'inspirant des exemples anglais et italien, il repose sur l'obligation faite aux quelques 4 000 vendeurs d'énergie (électricité, gaz, fioul domestique, chaleur, froid), dont EDF et Gaz de France, d'inciter leurs clients, particuliers et entreprises, à mieux isoler les bâtiments, à utiliser des appareils à basse consommation, bref de réaliser des investissements conduisant à des écono-

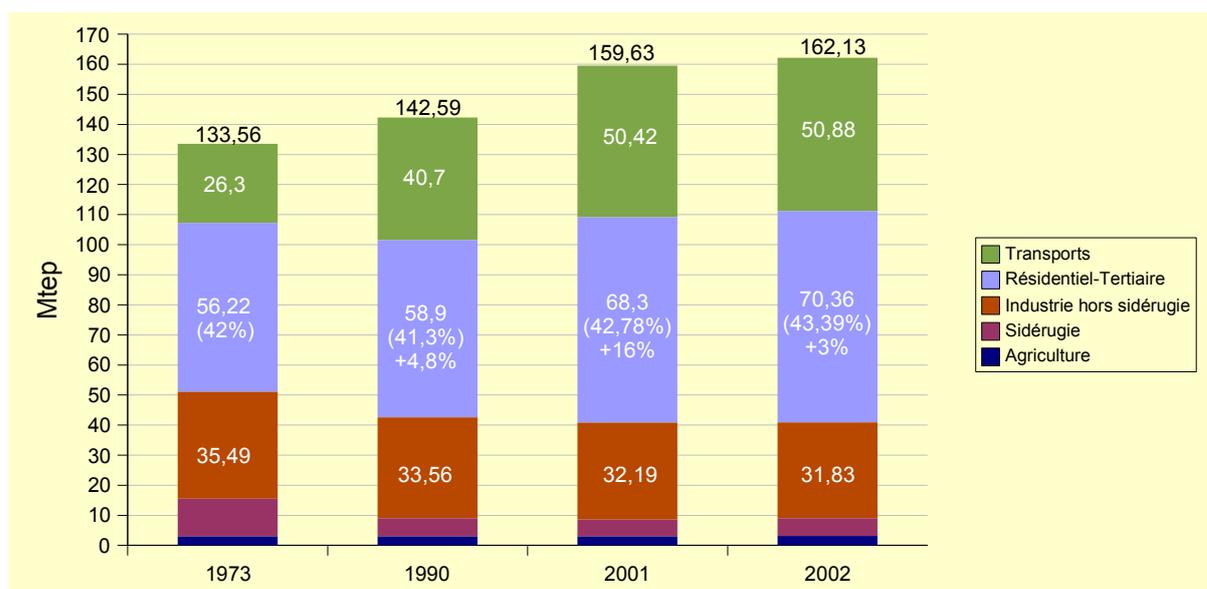


FIG. 1.4 – Évolution et répartition par secteur de la consommation finale d'énergie primaire (source (DGEMP, 2004)) en France

mies substantielles d'énergie. En contrepartie, les fournisseurs d'énergie recevront des certificats attestant du nombre de kWh ainsi économisés.

En ce qui concerne la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables, la France vise le même objectif que celui de l'Union Européenne. Le livre blanc de 1997 fixe l'objectif à 12% d'énergie renouvelable pour l'Union Européenne en 2010. La France produit 6% de son énergie à partir de sources renouvelables, 4 % provenant de la biomasse (essentiellement le bois) et 2 % de l'hydraulique. En revanche, selon (DGEMP, 2005) l'éolien est encore très peu développé bien que, dans des pays comme l'Allemagne et le Danemark, on observe une forte augmentation de 100% par an. On constate dans (DGEMP, 2005) une progression de 61 % de la production d'électricité éolienne (959 GWh contre 596 GWh en 2004) et le quasi doublement des capacités installées, mais la proportion d'énergies renouvelables par rapport à l'électricité produite est encore relativement faible. De même la France est classée très bas au niveau Européen pour la surface solaire installée par habitant. Selon le rapport (DGEMP, 2005), on observe une légère diminution des installations photovoltaïques par rapport à l'année 2004.

Un point intéressant à noter dans l'actualité récente est la volonté du gouvernement français d'augmenter les tarifs de rachat de l'électricité photovoltaïque : 30 c€/kWh avec une bonification de 25 c€/kWh en cas d'intégration de la source dans le bâtiment tout en conservant les aides à l'installation (crédit d'impôts de 50%). La France a commencé à rattraper son retard en terme d'énergies renouvelables. Si l'on considère l'exemple allemand dont les tarifs de rachat très avantageux ont fortement profité au développement des installations des panneaux photovoltaïques, on peut s'attendre à un fort développement sur le territoire français.

1.3 Conclusions sur le contexte

Au début du XXI siècle, les impacts environnementaux causés par les activités énergétiques humaines ont commencé à apparaître : la pénurie des sources d'énergie primaires, le changement climatique, la pollution, les pluies acides, etc... L'Humanité est en train de faire face à une période difficile au niveau énergétique, les capacités d'adaptation et d'innovation seront déterminantes pour l'existence même de l'Homme. Bien que réaliser un pronostic fiable sur l'évolution de la production et de la consommation d'énergie soit extrêmement délicat compte tenu de la complexité du contexte énergétique mondial et français, la demande d'énergie augmente de manière continue tandis que la production est dans une phase de transition complexe pleine d'incertitudes. Le contexte énergétique nous pose des questions fondamentales pour l'avenir : est-il nécessaire de consommer autant d'énergie pour vivre ? Comment améliorer sa manière de consommer ? Comment mettre en place un développement durable en prenant en compte les aspects environnementaux et l'aspect borné de notre planète ? Il va falloir intégrer réellement les contraintes écologiques et sociales (Brown, 2001). La complexité des problèmes posés est énorme. Le problème doit être considéré au niveau international et nécessite la coopération de plusieurs acteurs. Les solutions doivent être recherchées par plusieurs disciplines : l'économie, la politique, la physique, les nouvelles technologies. Dans ce contexte, le domaine de l'énergie joue un rôle très important avec d'une part la recherche sur des sources d'énergie propres et d'autre part, la maîtrise de la demande et de la production d'énergie. Un point essentiel de la recherche de solutions pourrait se trouver dans une meilleure gestion des systèmes de production, de distribution et de consommation d'électricité. C'est l'objet du travail décrit dans ce mémoire.

2 Problématique de la production et de la consommation

Dans cette section, nous introduisons les principes généraux des réseaux électriques avant d'aborder le problème de gestion de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel-tertiaire. Cette analyse nous permet de mettre en évidence l'enjeu de l'optimisation de consommation du secteur du bâtiment.

2.1 La structure et l'exploitation du réseau électrique

En général, pour des raisons économiques et techniques, la production d'énergie électrique actuelle est géographiquement regroupée, concentrée. Tandis que les consommateurs sont distribués et très divers. Afin de fournir l'énergie aux clients, le réseau électrique établit un lien physique entre ces deux acteurs. L'électricité est amplifiée à haute tension sur le réseau de transport et petit à petit devient à moyenne et basse tension au niveau des consommateurs. L'objectif majeur du réseau électrique est de maintenir l'équilibre en permanence entre la consommation et la production d'électricité .

2.1.1 La structure du réseau électrique

Quel que soit le pays considéré, les systèmes de production d'énergie électrique sont interconnectés. Ils comportent alors les quatre grandes parties suivantes :

- les systèmes de production composés de plusieurs groupes (hydrauliques, thermiques classiques ou nucléaires) chargés de fournir de l'énergie au réseau. Ces groupes sont eux-même des ensembles complexes de gros matériels, mais aussi de régulations et de protections.

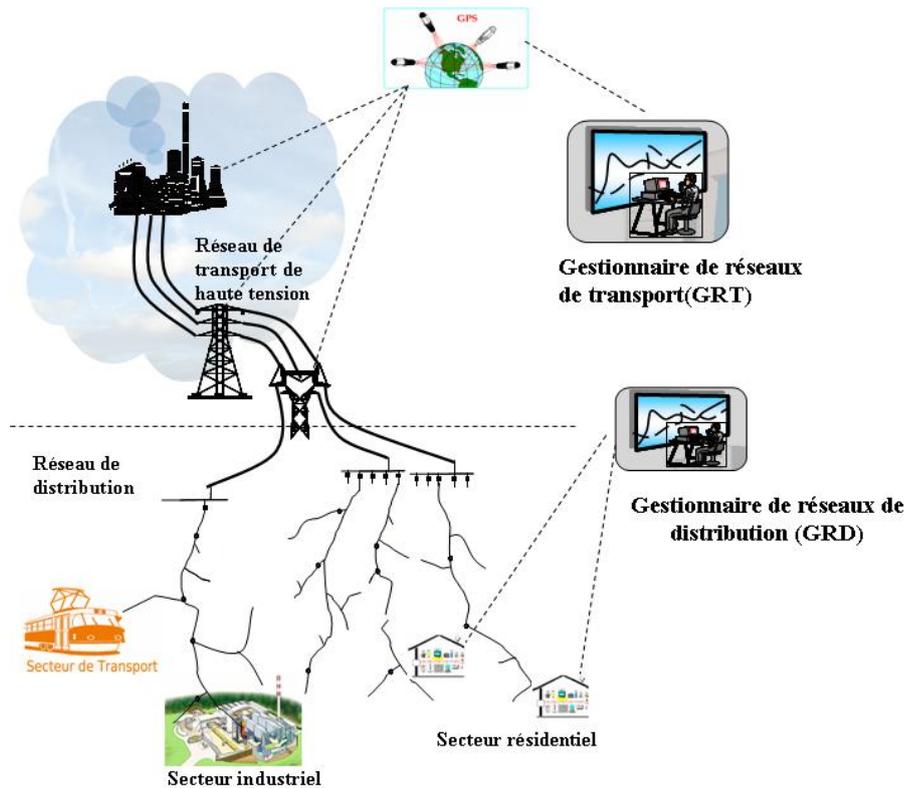


FIG. 1.5 – Structure du réseau de production et de distribution d'électricité

- le réseau de transport à haute tension, chargé de transporter massivement l'énergie sur de grandes distances et d'assurer l'interconnexion entre les centrales de production. Il faut compter également un nombre important de protections et d'automates qui visent à protéger le réseau contre des aléas de fonctionnement comme les surcharges ou bien les court-circuits.
- les réseaux de distribution à moyenne et basse tension, chargés de livrer l'énergie aux utilisateurs.
- les centres de conduite et de supervision des réseaux qui peuvent être séparés en deux niveaux selon leurs fonctions : le gestionnaire du réseau haute tension (GRT) et les gestionnaires de réseaux de distribution (GRD) (voire la figure 1.5) .

En particulier, selon le rapport (RTE, 2004) , le réseau électrique français est un ensemble de plus de 100.000 MW de puissance installée et qui délivre aux consommateurs finaux plus de 80.000 MW. La gestion du réseau est composée d'un centre de conduite national et de sept centres de conduite régionaux exploitant, chacun dans sa zone d'action et conformément à ses responsabilités, le système électrique. Outre les interventions des opérateurs, des régulations centralisées sont mises en œuvre pour régler la fréquence et les échanges avec les gestionnaires des réseaux de transport voisins. Le réseau français fait partie d'un système de réseaux interconnectés européen et favorise la mise en place d'un marché unique de l'électricité en Europe.

2.1.2 Supervision, conduite et exploitation du réseau électrique

RTE (2004) a identifié trois objectifs principaux à l'exploitation des réseaux électriques :

- assurer la sûreté de son fonctionnement. Le principe est de maîtriser l'évolution et les réac-

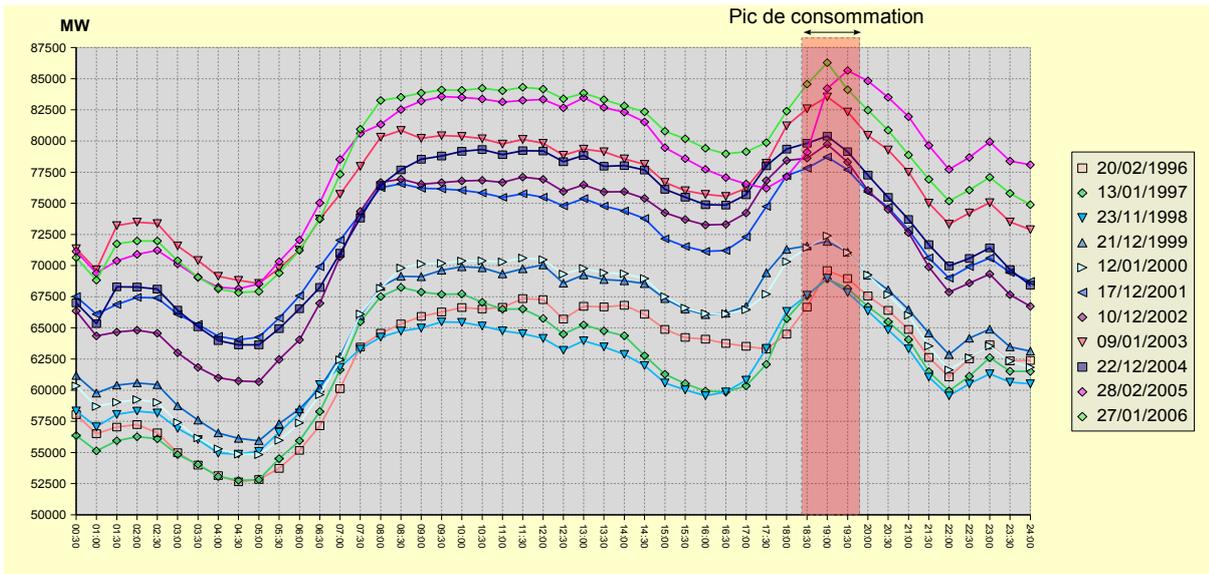


FIG. 1.6 – Les records de pic de consommation en France de 1996 à 2006 (source RTE)

tions du système électrique face aux différents aléas (cours-circuit, évolution imprévue de la consommation, indisponibilité de la production ou du transport). Il faut en même temps réduire autant que possible les risques d'incidents pouvant conduire à une interruption de la distribution électrique pour l'ensemble du pays ou pour de vastes zones.

- favoriser la performance économique en assurant une meilleure utilisation du réseau
- satisfaire les engagements contractuels vis-à-vis des clients raccordés au réseau de transport

2.1.3 Problématique des pics de consommation

Le problème majeur de l'exploitation du réseau électrique est donc de maintenir, en permanence, l'équilibre entre l'offre disponible et la demande potentielle, étant entendu que l'équilibre instantané entre production et consommation est une condition nécessaire de fonctionnement du système production-transport-consommation (que nous appellerons aussi système électrique, plutôt que réseau, terme qui peut avoir diverses acceptions et que nous réserverons à l'ensemble des moyens de transport et de transformation de l'électricité).

Notamment, le problème de la planification de la production d'énergie vise à gérer les pics de consommation. Différents moyens peuvent être mis en œuvre lorsque des pics de consommation sont prévus, en particulier en s'appuyant sur des données climatiques ou statistiques d'usages. Chaque source d'énergie a sa propre contrainte de capacité et sa contrainte de temps de réponse. Par exemple, une tranche nucléaire d'une centrale produit de très grandes quantités d'électricité de 900 à 1450 MW en comparaison d'un barrage hydro-électrique, mais il faut plusieurs jours pour démarrer un réacteur nucléaire, alors qu'il ne faut que quelques heures pour un barrage hydro-électrique et encore moins pour une centrale thermique. Les pics de consommation nationaux sont généralement couverts par des énergies très polluantes (turbines à gaz, centrales thermiques,...).

La figure 1.6 représente les journées ayant le plus grand pic de consommation en France pour les années 1996 à 2006. Ce record n'arrête pas d'être battu alors que les années passent. En 2006, le record du pic de consommation a atteint 86280MW ce qui signifie une augmentation

de 23% en 10 ans. En conséquence, la production doit suivre la consommation en augmentant la capacité de production, cela demande souvent de gros investissements pour construire des centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires. Il faut également développer le système de distribution. Or, du fait de l'augmentation perpétuelle des pics de consommation, l'impact négatif sur l'environnement va croissant (Boivin, 1995; G. Thomas, 2000).

Ces pics de consommation se sont produits en hiver entre 18h30 et 20h. Cela révèle l'importance de la consommation du secteur résidentiel, mais aussi, des secteurs industriels et du transport qui n'ont pas encore fini leurs activités dans ce créneau horaire.

En analysant la courbe de charge nationale, la différence moyenne entre la période de pic de consommation et la période creuse (de 2h à 6h du matin) est d'environ 18200MW soit la puissance produite par **12 réacteurs nucléaires** ou encore la consommation totale de plusieurs grandes villes. Réduire le pic de consommation représente donc un enjeu majeur. Schématiquement, il faudrait faire glisser la consommation de la période de pic vers la période creuse. Il en résultera une réduction de l'impact environnemental ainsi qu'une réduction du coût de production. La solution peut venir de l'exploitation de la flexibilité des besoins en transférant une partie de la consommation en période creuse ou bien en coordonnant les différents consommateurs pour arriver à mieux gérer la consommation globale.

2.2 Maîtrise de l'énergie dans le secteur Résidentiel-Tertiaire : l'enjeu incontournable

Les 28,9 millions de logements du parc résidentiel français représentent les deux tiers de la consommation énergétique du bâtiment. 70% de la consommation est due au chauffage. Ce parc est très hétérogène d'un point de vue énergétique, notamment à cause de la présence d'une importante part de logements anciens (environ 2/3 du parc). Le taux de renouvellement de l'habitat est quant à lui de l'ordre de 1% par an. Ces deux éléments conduisent naturellement à considérer comme particulièrement importants la rénovation et l'aménagement de l'habitat ancien à l'aide de technologies innovantes. Le secteur tertiaire se caractérise par une grande diversité des usages de l'énergie et par des consommations variables selon la fonction du bâtiment (enseignement, bureaux, commerces, santé). L'enjeu majeur du tertiaire est l'intermittence des consommations, du fait d'une occupation intermittente des locaux.

Les changements de comportement et de technologies nécessaires dans le secteur de l'habitat ne pourront se faire que grâce à une coopération entre les acteurs du secteur industriel, des collectivités, du grand public, à travers des campagnes d'information et de sensibilisation.

Ménézo et al. (2007) présentent le portrait d'un bâtiment du futur avec les solutions technologiques qui permettent d'intégrer au bâtiment des systèmes de production d'énergie à partir de sources d'énergies renouvelables : la pompe à chaleur remplace le système de chauffage électrique. Ménézo et al. (2007) ont montré la nécessité du développement de la production d'électricité décentralisée dans le secteur du bâtiment. Progressivement, grâce à ces sources locales, le bâtiment est de plus en plus autonome au niveau énergétique, il devient un producteur d'énergie plus efficace pour lui-même au lieu d'être un simple consommateur. Pourtant, la production et la consommation d'énergie doivent être anticipées et coordonnées en fonction de la charge du bâtiment.

Même dans ce cas là, pour exploiter efficacement ces sources d'énergie, ces sources locales devront être contrôlées et suivies par un système de surveillance et de pilotage intelligent prenant en compte le critère de confort de l'utilisateur et le coût. Ce système doit être capable d'antici-

per l'intermittence caractéristique des sources locales en satisfaisant la contrainte de sécurité d'approvisionnement de l'énergie.

L'intérêt de la maîtrise de la consommation et de la production dans le secteur résidentiel-tertiaire est double. D'une part, le consommateur final peut bénéficier d'avantages pour réduire sa facture énergétique tout en ayant une meilleure garantie d'approvisionnement en électricité. D'autre part, le producteur d'énergie peut optimiser son plan de production en façonnant la courbe de charge en limitant par exemple les pics de consommation. La tarification par tranche dynamique pourra être proposée, modulable suivant l'heure, elle aura certes un effet dissuasif, mais elle ne sera vraiment efficace qu'avec une adaptation en temps réel et surtout une coopération des consommateurs.

Que ce soit dans le cadre d'un habitat "classiquement" connecté au fournisseur national (EDF) ou bien d'une maison autonome en matière de production d'énergie, ou encore dans celui d'un habitat connecté au réseau national mais disposant de sources d'énergie d'appoint, maîtriser sa consommation est une nécessité pour plusieurs raisons : s'adapter aux ressources énergétiques disponibles (en particulier pour une installation autonome), s'adapter aux fluctuations du coût des énergies et limiter les rejets de gaz à effet de serre dans l'environnement.

3 Conclusion

Le pouvoir de l'Homme sur la nature n'a cessé de croître sans que l'Homme ne prenne conscience que son environnement était à capacité finie. Aujourd'hui, après avoir accru son confort depuis des millénaires, l'Homme doit faire preuve d'une ingéniosité sans précédent pour rendre son mode de vie compatible avec les finitudes de son contexte, et plus encore, puisqu'il doit aussi rattraper l'inconscience de ses aînés. Le réchauffement climatique est le problème majeur auquel l'Homme doit faire face aujourd'hui. Pour y remédier, il vaut inventer une façon de se développer durablement, certains parlent même de décroissance soutenable. Outre la réduction de la consommation d'énergie, de nombreuses pistes liées à la manière de consommer doivent être explorées. Un consommateur peut-il encore puiser de l'énergie à tout moment du jour? En effet, jusqu'à présent, les fournisseurs d'énergie se sont équipées pour être capables de faire face à toutes les demandes des usagers, même en période de pic de consommation et ce, sans considération pour l'impact environnemental. Depuis les accords de Kyoto, des progrès ont été accomplis. Néanmoins, les secteurs du transport et du résidentiel-tertiaire n'ont cessé d'accroître leurs rejets de gaz à effet de serre. Ce travail se focalise sur le secteur résidentiel-tertiaire, et en particulier sur le bâtiment. Il examine le moyen de coordonner automatiquement les producteurs d'énergie avec les consommateurs pour permettre aux fournisseurs d'avoir plus de souplesse quant à la gestion de leurs installations pour mieux intégrer l'impact environnemental.

Chapitre 2

Caractérisation du problème

Ce chapitre présente une analyse des différentes activités énergétiques dans le bâtiment. Dans un premier temps, une analyse des charges nous permettra d'avoir une vision globale des différents services existants dans le bâtiment avec leur flexibilité d'utilisation ainsi que l'ordre de grandeur de leur consommation. Ensuite, nous étudierons les sources d'énergie locales au bâtiment qui permettent à l'utilisateur de produire sa propre énergie.

1 Caractérisation des besoins énergétiques dans le bâtiment

En général, un bâtiment est constitué de plusieurs fonctions énergétiques et d'équipements. [Angioletti et Despretz \(2004\)](#) proposent de classer les charges dans le bâtiment en deux catégories principales (voir la figure 2.1) :

- Les fonctions générales, qui correspondent à 80% de la consommation totale, ont les caractéristiques suivantes :
 - Elles consomment une grande quantité d'énergie, elles sont présentées habituellement dans plusieurs types de bâtiment différents.
 - Elles correspondent aux besoins essentiels des usagers. Elles sont constituées des systèmes de chauffage, de climatisation, de ventilation, d'éclairage et d'eau chaude sanitaire.
- Les fonctions spécifiques ou auxiliaires comme la cuisson, la production de froid (congélateur) et les services électroménagers. Ces fonctions correspondent à des besoins spécifiques de l'utilisateur.

Dans le secteur résidentiel, les études sur l'ensemble des logements construits en France depuis vingt ans ([Sidler, 2002a](#)) montrent une forte augmentation de la consommation due aux appareils électro-ménagers. Dans certains logements, cette consommation peut être deux fois plus importante que la consommation due au chauffage. ([Castagnoni, 2003](#)) montre une forte évolution de l'achat d'appareils ménagers : augmentation de 45% pendant dix ans (1985–1994) contre une réduction des achats de 28% en appareils de chauffage (chauffage électrique et chauffe-eau). Les fonctions spécifiques jouent donc un rôle aussi très important dans la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment.

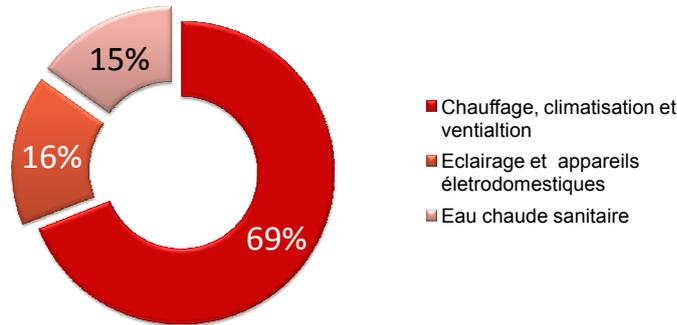


FIG. 2.1 – La répartition de la consommation de l'électricité par les différentes fonctions énergétiques dans le bâtiment (source [Angioletti et Despretz \(2004\)](#))

1.1 Chauffage et climatisation

1.1.1 Confort thermique

La "satisfaction thermique" est un besoin fondamental pour l'homme du vingt et unième siècle. Tous les types de bâtiments sont équipés de systèmes de chauffage ou de refroidissement permettant de contrôler la température intérieure. Ces systèmes donnent la possibilité aux occupants d'ajuster la température et parfois le degré d'humidité en fonction de leurs besoins.

Le confort thermique est une grandeur subjective qui dépend non seulement des conditions extérieures mais également de la physiologie d'usage. En 1994, la norme internationale ISO 7730 ([ISO, 1994](#)) a été conçue à partir d'études expérimentales validées principalement aux États-Unis et en Scandinavie. Les conditions qui ont servi à l'élaboration de la norme sont résumées dans ([Candas, 2000](#)) :

- mille personnes ont été recrutées
- une centaine de conditions thermiques ont été testées
- dans un ensemble de climats homogènes (les expositions vont de 1 à 2 heures)

La norme ISO7730 propose une sensation thermique humaine au sens prédictif en tenant compte de différents aspects tels que la température ambiante, l'humidité relative, la vitesse de l'air, l'effet métabolique humain ou l'effet vestimentaire. Toutes ces données permettent d'établir des paramètres caractérisant le confort thermique par :

- le **PMV** (Predict Mean Vote) Le PMV est un indice qui donne la valeur moyenne des votes d'un groupe important de personnes exprimant leur sensation thermique sur l'échelle comprenant 7 niveaux :

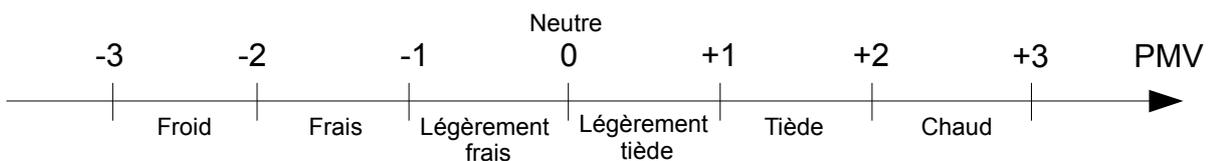


FIG. 2.2 – PMV : sensation thermique sur un échelle de 7 niveaux

Le PMV est basé sur le bilan thermique du corps humain. L'équilibre est atteint lorsque la production interne de chaleur dans le corps humain est égale à la perte de chaleur vers le milieu ambiant. L'indice de PMV est souvent utilisé pour vérifier si une ambiance thermique donnée est conforme aux critères de confort et pour formuler les différents niveaux d'acceptabilité.

- le **PPD**(Predicted Percentage of Dissatisfied) Puisque tous les questionnaires ne comportaient pas forcément de réponses relatives à l'estimation effective des conditions climatiques, les votes individuels sont dispersés autour de la valeur moyen(mean vote). L'indice PPD est utilisé pour estimer le pourcentage des personnes insatisfaites avec les conditions courantes de climat (trop chaud ou trop froid $|PMV| \geq 2$). Lorsque la valeur du PMV a été déterminée, le PDD est calculé à partir l'équation 2.1 :

$$PPD = 100 - 95 \times \exp(-0.03353 \times PMV^4 - 0.219 \times PMV^2) \quad (2.1)$$

Les propositions de cette norme ont ensuite servi dans les recherches sur la simulation thermo-aérodynamique des bâtiments. Dans un autre objectif (Fraisie, 1999) a mis en place un système de contrôle commande favorisant le confort thermique et la consommation énergétique basé sur la logique floue. En 2004, Olesen et Brager (2004) ont proposé l'amélioration de la norme ISO 7330 pour obtenir de meilleurs résultats pour la prédiction du confort thermique.

1.1.2 Zone thermique

Dans un bâtiment, on distingue deux types de locaux différents :

- les locaux climatisés sont les pièces et couloirs, dans lesquels, la température doit être maintenue à un niveau défini par une ou plusieurs consignes.
- les locaux non-climatisés sont les pièces et couloirs dans lesquels la température n'est pas contrôlée ou qui ne sont pas équipés de générateurs thermiques.

1.2 Ventilation

Dans les bâtiments du secteur résidentiel et tertiaire, la ventilation répond avant tout à un besoin d'hygiène et de santé des occupants :

- un apport d'air neuf pour la respiration
- l'élimination des pollutions intérieures liées à la présence et aux activités humaines. La conservation du bâti nécessite également une aération maîtrisée pour éviter, en particulier, l'humidité excessive dans des enveloppes de plus en plus étanches.

1.2.1 Besoin de ventilation

Le système de ventilation utilise généralement l'énergie électrique, l'installation et le dimensionnement du système dépendent les besoins de ventilation. Ces besoins sont très variés suivant le type de bâtiment. La norme de la ventilation dans les bâtiments est définie dans le Règlement Sanitaire Départemental Type (J.O., 1983) ou par le Code du Travail (J.O., 1984), l'estimation du besoin en débit de l'air évacué par heure est donnée par le tableau 2.1.

Type de bâtiment	Débit de ventilation nécessaire
logement moyen	120m ³ /h
chambre d'hôtel	45m ³ /h
bureau(15m ²)	25m ³ /h

TAB. 2.1 – Besoin de ventilation de différents types de bâtiment ([Angioletti et Despretz, 2004](#))

1.2.2 Contrôle du système de ventilation

Le système de ventilation permet d'assurer le renouvellement d'un certain volume d'air toutes les heures. En conséquence, il existe une déperdition d'énergie thermique dans les zones climatisées ou chauffées. Il est donc possible de conclure que

- les débits d'air neuf sont fixés
- les consommations d'énergie liées à la ventilation sont limitées (déperditions par renouvellement d'air, consommation électrique des ventilateurs) par la réglementation thermique.

En termes purement énergétiques, et compte tenu notamment de l'augmentation progressive de l'isolation des bâtiments, les déperditions liées à la ventilation représentent une part relative de plus en plus importante des besoins de chauffage des bâtiments (jusqu'à 30% parfois selon ([ADEME, 2006a](#))). Il est d'autant plus important d'adapter au mieux la ventilation aux besoins. C'est aussi le moyen, dans les bâtiments climatisés, de limiter les consommations d'énergie en été ou en mi-saison. ([Bernard et Lemaire, 2005](#)) propose une méthode de ventilation rationnelle. Des études récentes ([ADEME, 2006b](#)) montrent que la solution de ventilation dans le bâtiment peut venir de l'utilisation d'une ventilation double flux avec récupération de chaleur par échangeur statique sur l'air extrait. Elle permet d'économiser au moins 50 % des déperditions par ventilation.

1.3 Production d'eau chaude

L'eau chaude sanitaire représente environ 3% de la consommation nationale d'énergie, et environ 10 à 15 % de la consommation d'énergie à l'intérieur des bâtiments du secteur résidentiel et tertiaire. Les besoins d'eau chaude sanitaire varient également en fonction du type de bâtiment, du nombre d'occupants et des habitudes d'utilisation de l'eau chaude.

1.3.1 Besoin en eau chaude

Trois facteurs principaux caractérisent le besoin en eau chaude :

- le besoin en eau exprimé soit en litres par heure ou par jour, soit en mètres cubes par an
- la température au robinet dont le niveau dépend de l'usage : 40 °C pour un lavabo, un bidet, une baignoire ou une douche, 60 °C pour un grand évier, ou une buanderie ou une machine à laver
- la fréquence de puisage, avec l'importance de chacun de ces puisages. En particulier, dans l'habitat, on observe deux grandes périodes de pointe pour l'utilisation : le matin et le soir et les petites consommations en milieu de journée.

Le tableau 2.2 fournit quelques estimations de besoin énergétique pour la production de l'eau chaude.

Équipements par logement	Besoin énergétique ($kWh/Jour$)
1 évier	$1,3 + 0,3 \times N$
1 évier +1 lavabo	$2,5 + 0,9 \times N$
1 évier +1 lavabo+1 douche	$3,5 + 0,9 \times N$
1 évier +1 lavabo +1 petite baignoire	$2,0 + 1,3 \times N$
1 évier +1 lavabo +1 grande baignoire	$3,8 + 1,3 \times N$
1 évier +1 lavabo +1 grande baignoire+2e cabinet de toilette	$3,8 + 1,8 \times N$

TAB. 2.2 – Besoin en eau chaude sanitaire dans le bâtiment (N est le nombre des personnes) (Angioletti et Despretz, 2003a)

1.3.2 Production de l'eau chaude

Comme pour le système de chauffage, les systèmes de production d'eau chaude peuvent être de différents types :

- distribués si les installations sont près des points de puisage
- centralisés au niveau d'un logement
- centralisés au niveau d'un immeuble
- centralisés et distribués à chaque immeuble par un réseau de distribution de l'eau chaude.

Dans le bâtiment, la production d'eau chaude peut être une sous-production du chauffage. Combiner les productions de chauffage et d'eau chaude sanitaire peut réduire le coût d'investissement, elle est souvent utilisée pour les petites installations individuelles ou collectives ainsi que pour de petits immeubles. Les sources d'énergie utilisées pour la production d'eau chaude sont de deux types principaux :

- Production instantanée par combustion (gaz, fioul domestique), la régulation de la température de l'eau chaude est contrôlée par le débit de gaz. Cependant, cette régulation s'adapte mal aux variations de débit d'eau. La température de l'eau chaude obtenue est assez variable.
- Production à accumulation thermique, il s'agit d'un thermostat qui commande le fonctionnement du générateur. La production d'eau chaude peut être programmée en fonction du tarif de l'énergie électrique. En pratique, le ballon d'accumulation fonctionne la nuit pour profiter des heures creuses.

Pour le stockage de l'eau chaude individuelle, un ballon de forme cylindrique verticale, avec une arrivée d'eau froide à la base et un départ d'eau chaude en tête, permet un fonctionnement du stockage avec effet piston : l'eau froide déplace l'eau chaude avec un front à fort gradient de température et sans mélange ; cette disposition permet une fourniture continue d'eau à la température désirée malgré un chauffage périodique de durée limitée. En stockage collectif, un effet voisin peut être obtenu par l'emploi de deux ballons en série, le premier servant au préchauffage et le second au chauffage définitif.

1.4 Éclairage

L'éclairage regroupe l'ensemble des moyens qui permettent à l'homme de maintenir les conditions de luminosité dans ses environnements. Toutes nos activités ont besoin de conditions lumineuses pour éviter la fatigue oculaire qui est une partie de notre confort visuel. La consommation

énergétique moyenne de l'éclairage dans les logements est d'au moins 15% de la consommation totale (Sidler, 2002b). Elle représente également 10% la consommation nationale.

1.4.1 Confort visuel

Contrairement au confort thermique, le confort visuel a été peu étudié dans la littérature. Beaucoup d'études ont été faites sur la réduction de l'éclairage dans les bureaux pendant la journée notamment. Calasiu et Veitch (2006) résument les 60 sujets de recherche concernant la satisfaction en terme de luminosité dans les bureaux avec lumière naturelle du soleil, mais peu de normes ou de standards portent sur le confort visuel.

Cependant, nous pouvons retenir les deux éléments principaux pour caractériser un service d'éclairage :

L'ambiance lumineuse L'ambiance lumineuse varie en fonction de deux paramètres la température de couleur exprimée en kelvin et le niveau d'éclairement.

L'Indice de rendu des couleurs On appelle "rendu des couleurs" l'aptitude de la lumière à restituer les couleurs. De façon plus précise, le rendu des couleurs désigne l'effet d'une source de lumière sur l'aspect coloré des objets qu'elle éclaire, cet aspect étant comparé consciemment ou non à celui des mêmes objets éclairés par une source de référence, en général le corps incandescent. Le rendu des couleurs se mesure de façon scientifique et donne lieu à une notation conventionnelle de la Commission Internationale de l'éclairage : l'IRC ou "Indice de Rendu des Couleurs" qui apparaît sur la notice des produits.

1.5 Fonctions électrodomestiques

1.5.1 Production de froid alimentaire

Le but de la production de froid domestique est généralement de conserver des aliments. La production de froid entraîne la présence de deux catégories d'appareils : le réfrigérateur et le congélateur. La tendance de cette catégorie est d'améliorer l'efficacité par imposition d'étiquettes d'efficacité énergétique. Le compte-rendu proposé dans (Menanteau, 2006) présente une réduction significative de l'énergie consommée par la production de froid domestique grâce à la mise en place de politiques d'amélioration de l'efficacité énergétique. L'impact du système de chauffage sur la production de froid est non-négligeable, (Sidler, 1999) démontre que des économies d'énergie de 36 % sont réalisables simplement en installant un appareil de froid dans un cellier non chauffé plutôt que dans une cuisine.

1.5.2 Cuisson

La consommation énergétique due à la cuisson représente une partie non-négligeable de la consommation mais elle est peu présentée dans la littérature. Une estimation de la consommation habituelle pour la cuisson collective (Angioletti et Despretz, 2004) conduit à un ordre de grandeur de 1kWh par repas préparé. Cependant, des écarts sont très importants : de 0,5 à 2,5 kWh. La cuisson est alimentée soit par une source d'énergie combustible (gaz, bois), soit par de l'énergie électrique. Le potentiel d'économie d'énergie reste important. L'étude de (Sidler, 1999) s'appuie sur l'ensemble des analyses d'une base de données de 517 appareils de 32 types différents qui

couvrent les usages de la cuisson électrique (plaques, fours, micro-ondes, cafetières, bouilloires, etc.). Elle montre que 50 % de l'énergie totale du poste cuisson est absorbée par les plaques et 42 % par les fours (tous types confondus) et 99 % des puissances appelées simultanément par l'ensemble des appareils de cuisson électriques sont inférieures à 3 kW.

1.5.3 Micro-informatique domestique

L'augmentation continue des applications de la micro-informatique dans le secteur résidentiel-tertiaire produit de nouvelles demandes d'énergie. En 1994, EDF estimait qu'en France, la consommation annuelle d'électricité par l'informatique était de 3,5TWh. Or, des technologies de l'information et de la communication contribuent à la consommation d'électricité à hauteur de 3TWh en 1998 soit 4,1% de la consommation du secteur tertiaire. Il est d'ailleurs intéressant de noter que 7% de la consommation annuelle propre aux micro-ordinateurs correspond à une consommation de veille.

Le fonctionnement des micro-ordinateurs constitue un apport thermique supplémentaire interne qui conduit à un accroissement des consommations pour la climatisation dans les locaux climatisés.

2 Production d'électricité locale, stockage

2.1 Production d'électricité locale

Un système de production d'énergie local intégré au bâtiment permet d'ajouter une source d'énergie supplémentaire au système. Dans un site connecté (le bâtiment est raccordé au réseau de distribution électrique), les sources d'énergie locales peuvent remplacer une partie de l'énergie provenant du réseau (voire la totalité). Une source d'énergie supplémentaire comme un groupe électrogène peut aider à garantir la sécurité d'approvisionnement d'énergie lorsqu'il y a une indisponibilité de la source d'énergie principale.

2.1.1 Production d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion appelée effet photovoltaïque, s'effectue sans pièce mobile, sans fluide sous pression, sans pollution ni production de déchets. Plusieurs cellules photovoltaïques sont connectées entre elles afin de fournir au récepteur extérieur une tension et une puissance adéquate. L'intégration du photovoltaïque est réalisée assez facilement soit sur une toiture inclinée couverte d'éléments discontinus, soit sur toiture-terrasse ou une toiture revêtue d'une étanchéité, soit sur un mur isolé ou non, soit sur une façade ou sur un garde-corps de balcon.

Le courant de sortie, et donc la puissance, est généralement proportionnel à la surface du module installé. Un onduleur transforme le courant continu produit par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif compatible avec le réseau de distribution électrique. L'électricité produite peut être utilisée par les services énergétiques du bâtiment ou exportée vers le réseau en partie ou en totalité.

Le projet européen HIP HIP ([ADEME, 2005](#)) a réalisé une expérimentation d'intégration de systèmes photovoltaïques au bâtiment dans sept pays européens. Ce projet montre la faisabilité

et la rentabilité des systèmes photovoltaïques. L'intégration du système photovoltaïque au bâtiment dans le contexte actuel bénéficie d'une subvention pour l'investissement et l'installation et également un tarif de rachat l'énergie produite. Depuis mars 2002, un dispositif tarifaire a été mis en place pour l'achat de l'électricité produite à partir de générateurs photovoltaïques (15 c€/kWh en France continentale et 30 c€/kWh dans les DOM et en Corse). Suite à cette décision, 450 kW ont été installés sur une centaine de bâtiments en France continentale.

2.1.2 Production d'électricité d'origine éolienne

S'il est exploité, le vent, qui est l'une des ressources énergétiques renouvelables de la nature, peut devenir une source d'énergie écologique et fiable. Les systèmes éoliens existent en plusieurs dimensions. Leur coût d'investissement varie en fonction de leur dimension :

- 2000€ pour une installation micro-système d'une centaine de watts
- 15000€ pour une installation mini-système capable de couvrir les besoins d'un ménage ayant une consommation d'électricité de 2500kWh par an auxquels il faut ajouter également les frais d'entretien annuels de 3% du coût d'investissement. En sachant qu'une éolienne a une durée de vie de 15 ans, une installation donne un prix du kWh de 65 centimes (4 fois plus grand que le coût de l'électricité du réseaux aux heures pleines).
- Cependant, une éolienne de moyenne puissance de 10kW à 50kW donne un coût de production de 4 centimes par kWh. C'est la raison pour laquelle les éoliennes de grande puissance sont préférées aux petites unités individuelles.

L'intégration de systèmes éoliens dans le bâtiment est plus difficile que le photovoltaïque à cause de son exigence de régularité sur la vitesse du vent. Les grandes éoliennes sont conçues de manière à "enclencher" lorsque la vitesse du vent atteint 15km/h et à "déclencher" lorsque la vitesse du vent est très élevée, et ce pour que le vent ne les endommage pas. Lorsqu'on détermine si l'énergie éolienne d'un site est suffisante pour faire fonctionner efficacement un système éolien, il est très important de prendre en compte la vitesse annuelle moyenne du vent et le nombre de jours pendant lesquels la vitesse du vent est supérieure à la vitesse d'enclenchement. De plus, pour atteindre la condition de stabilité de la vitesse du vent, l'installation doit généralement être éloignée d'une centaine de mètres des obstacles ayant la même hauteur qu'elle et placée 10 mètres plus haut que ce qui est à proximité.

Le point faible de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne est leur caractère intermittent et leur dépendance vis à vis des éléments météorologiques. Cela rend difficile leur utilisation sans autre source d'énergie complémentaire ou sans un système de stockage, à moins bien sûr d'avoir recours aux systèmes de gestion d'énergie que nous évoquerons dans les chapitres suivants.

2.1.3 Production d'énergie par un group électrogène

Un groupe électrogène est un dispositif autonome capable de produire de l'électricité. La plupart des groupes sont constitués d'un moteur thermique qui entraîne un alternateur. Les groupes électrogènes sont utilisés soit dans les zones isolées, soit dans certains bâtiments afin de pallier à d'éventuelles coupures de courant. Dans le deuxième cas, ils sont alors souvent utilisés en parallèle avec une alimentation par batterie ou par un système inverseur de source d'énergie. Ils fonctionnent généralement à partir de l'énergie fossile.

2.2 Systèmes de stockage

2.2.1 Stockage thermique passif

Les matériaux utilisés pour la construction du bâtiment, pour son installation thermique et pour son ameublement, possèdent une capacité thermique non négligeable. En régime permanent, cette capacité ne joue aucun rôle mais, en régime transitoire, elle ralentit toute variation de température intérieure. On dénomme également ce phénomène inertie thermique. Le terme "stockage passif" est introduit dans (Henze et al., 2004b) pour désigner cette capacité d'accumuler de l'énergie sous forme thermique dans l'enveloppe du bâtiment. Le terme "passif" est utilisé pour faire la différence avec le stockage thermique "actif" comme le ballon d'eau chaude.

La mesure de l'inertie d'une structure est faite expérimentalement : par exemple, en laissant dériver la température du local à flux de chauffage constant (nul par exemple) ; les régulateurs modernes procèdent de cette façon pour réguler la température intérieure. On classe parfois les bâtiments au moyen de leur inertie ; le CSTB utilise la masse surfacique p_s pour définir ce classement. L'inertie du bâtiment s'exprime alors par une pondération surfacique de chaque paroi du bâtiment en trois classes qui sont alors définies :

- inertie faible $fp_s < 150kg/m^2$ de surface habitable
- inertie moyenne $150 < p_s < 400kg/m^2$ de surface habitable
- inertie forte $p_s > 400kg/m^2$ de surface habitable

A l'exception de bâtiments très légers et compte tenu du mobilier, la plupart des bâtiments ont une inertie moyenne ou forte. Cette inertie doit être prise en compte dans la mise en œuvre d'une régulation. On peut, en particulier, constater deux comportements inertiels des bâtiments selon l'origine de la perturbation :

- si elle est d'origine extérieure (variation rapide de la température), l'inertie concerne essentiellement l'enveloppe du bâtiment ; le phénomène se traduit par une constante de temps plus ou moins longue, mais avec peu d'influence sur la consommation ou le confort des occupants ;
- si elle est d'origine intérieure (apport gratuit, défaut de régulation, etc.), l'inertie concerne essentiellement la structure interne du bâtiment (y compris le mobilier). Elle amortit plus ou moins bien les variations de température. Quantitativement, l'effet de l'inertie mal prise en compte augmente la consommation par surchauffe ; cette perte n'excède pas 3 % en saison froide, mais peut atteindre de 10 à 20% en mi-saison.

2.2.2 Stockage thermique actif

Le stockage thermique actif se trouve dans le système de production d'eau chaude sanitaire ou le stockage de froid dans les systèmes de climatisations (Henze et al., 2004b).

Pour le stockage, on considérera une inertie volumique IV ($Whm^{-3}K^{-1}$) qui se caractérisera par :

- sa capacité thermique volumique CV ($Whm^{-3}K^{-1}$) ;
- sa puissance ou capacité de restitution (Wm^{-3}), laquelle s'exerce à court terme (heure), à moyen terme (jour) ou à long terme (mois) ;
- son rendement, qui est lié à sa forme (laquelle doit être compacte), à son isolation et à sa période d'utilisation.

Les techniques les plus employées utilisent la capacité thermique volumique d'un fluide ou de matériaux connexes :

- pour l'eau, on emploie un ballon cylindrique vertical isolé
- pour l'air, on emploie une cavité remplie de matériaux solides (galets, par exemple)

Certaines techniques utilisent l'enthalpie de changement d'état (ou chaleur latente) :

- stockage par congélation de l'eau : c'est le cas de certaines pompes à chaleur où l'on stocke ainsi de l'énergie thermique, sous forme de glace, dans la source froide
- utilisation de boules remplies d'un liquide congelable : paraffine, cryolithe, etc.

Le rendement d'un stockage augmente avec son volume et son isolation. Par contre, il diminue avec sa durée. En pratique, on utilise des cycles différents selon l'heure, le jour pour s'adapter à des variations tarifaires (production d'eau chaude sanitaire la nuit).

2.2.3 Stockage électrique

La batterie est souvent intégrée au générateur photovoltaïque. Elle permet le stockage de l'électricité solaire pour les systèmes isolés et sert de conditionneur de puissance. La batterie peut permettre également de restituer la nuit le courant accumulé durant la journée.

Par contre, les accumulateurs électriques sont généralement chers, encombrants (environ 30kg pour 1kWh stocké) ils ont une durée de vie limitée, et posent des problèmes de pollution (métaux lourds) lors de leur fin de vie.

La batterie réduit l'efficacité du système car son rendement énergétique est faible. Son prix est élevé et sa durée de vie peut atteindre 10 à 15 ans si elle est construite de manière adéquate et entretenue régulièrement. Le développement de pile Li-Ion à grande puissance donne une piste prometteuse pour le stockage électrique.

3 Conclusion

Nous avons examiné les différentes charges et services dans le bâtiment pour mettre en évidence leur impact sur la consommation globale et sur le confort pour l'utilisateur. Nous avons étudié les différentes possibilités de produire et de stocker de l'énergie localement dans le contexte du bâtiment. Ceci nous a permis d'identifier les équipements dont les consommations sont les plus importantes. Si nous concevons le bâtiment comme un système à commander, il nous faut déterminer les moyens de le piloter en jouant sur les flexibilités qui permettront l'adaptation aux contraintes externes ou imposées par l'utilisateur tout en lui garantissant un bon niveau de confort.

Chapitre 3

Systeme de gestion de l'énergie dans le bâtiment

La notion de système domotique ou immotique (le terme en anglais est Home Automation System ou Building Automation System) est apparue dès les années 80. A l'origine, la domotique ne visait qu'à offrir à l'utilisateur plus de confort : plus de loisirs et plus de services, grâce à l'existence d'un réseau domestique de communication et de dialogue permettant la coopération inter-services. Cela relevait plus de la fiction que du souci de rationaliser la gestion énergétique. Progressivement, les protocoles de communications entre les équipements du bâtiment ont été standardisés. On trouve notamment trois protocoles reconnus qui sont **BatiBUS**, **EIBus** et **LonWorks** (Palensky et Posta, 1997), lesquels possèdent tous leur association. Enfin, la norme de **Konnex** basée sur **BatiBUS** qui devient progressivement le standard européen. Un système domotique est capable de réaliser plusieurs fonctions, parmi celles-ci se trouvent notamment l'économie et la gestion technique, l'information et la communication, la maîtrise du confort, la sécurité et l'assistance.

1 Les systèmes de gestion d'énergie dans le bâtiment

La gestion de l'énergie n'est pas une nouvelle application des systèmes domotiques et immotiques (Wacks, 1991) et (Wacks, 1993) ont commencé à introduire la maîtrise de la demande d'énergie dans l'habitat en utilisant un système domotique. La notion de système de gestion d'énergie dans le bâtiment (SGEB, en anglais "**Energy management and control system**") est présentée dans (Stum et al., 1997). Ce système consiste en un ensemble d'équipements dotés de micro-contrôleurs ayant des capacités de communication via des protocoles standards, un système de contrôle-commande centralisé et une interface homme-machine permettant de réaliser certaines fonctions d'optimisation, de conduite et de suivi de la consommation d'énergie. Généralement, ces systèmes visent les bâtiments tertiaires commerciaux pour gérer la consommation des services de chauffage, de climatisation, d'eau chaude sanitaire et d'éclairage.

1.1 Fonctionnalités et limites des systèmes de gestion de l'énergie existants

(Hatley et al., 2005) a résumé les fonctionnalités et les capacités des SGEB. L'auteur a classé ces fonctions dans trois catégories :

- Les fonctions basiques sont des fonctions générales équipant la plupart des systèmes de gestion de l'énergie dans le bâtiment. Elles sont considérées par leur facilité d'implémentation. Citons par exemple la régulation et la programmation du chauffage.
- Les fonctions intermédiaires sont des fonctions en développement qui peuvent être implémentées dans un futur proche, certaines fonctions intermédiaires comme le délestage sont déjà implémentées dans certains SGEB.
- Les fonctions avancées sont en phase de développement et sont notamment l'objet de ce travail. La complexité de l'implémentation est aussi une des raisons pour lesquelles ces fonctions ne sont pas encore disponibles dans le SGEB.

La plupart des SGEB sont capables de fournir des fonctions basiques qui vont être présentées dans la suite de cette section.

1.1.1 Régulation et Programmation

La régulation thermique dans le bâtiment est souvent réalisée par un thermostat. Il s'appuie en général sur la température ambiante selon le principe de la boucle fermée. Le système de régulation d'ambiance présenté dans (Mérieux et Pleynet, 1992) se compose de trois éléments principaux : capteur, unité de traitement et actionneur. L'unité de traitement ou bien l'organe de conduite fonctionne de deux façons différentes : le tout ou rien non modulé ou le tout ou rien modulé. Cette fonction permet de régler la température ambiante autour d'une température de consigne fixe.

La fonction programmation est une fonction essentielle du système de gestion de l'énergie. Elle permet de gérer l'occupation d'un bâtiment entier ou de zones thermiques. Dans des bâtiments occupés une partie du temps seulement comme les écoles, les bureaux ou les bâtiments commerciaux, cette fonction permet de réduire la consommation inutile en réduisant ou en arrêtant le chauffage, la climatisation et l'éclairage. Dans les SGEB existants, l'utilisateur doit définir ou pré-programmer lui-même les périodes de l'occupation, les vacances et les weekends. Pour réagir à des événements spéciaux, lorsque les bâtiments sont occupés hors des périodes prédéfinies, une fonction "override" force la mise en route des services concernés.

1.1.2 Optimisation du démarrage et de l'arrêt

La fonction d'optimisation du démarrage et de l'arrêt est une fonction complémentaire à la fonction de programmation des services énergétiques. Elle permet d'améliorer la consommation du système thermique dans le bâtiment en tenant compte de l'inertie du bâtiment et des conditions météorologiques extérieures. Elle peut permettre d'arrêter les systèmes de chauffage ou de climatisation avant la fin de la période d'occupation (de 10 à 15 minutes environ). Grâce à l'énergie accumulée, la température ambiante diminue en maintenant un confort acceptable pour l'utilisateur jusqu'à son départ. De la même façon, l'optimisation "juste à temps" est capable de démarrer les systèmes de chauffage et de climatisation au bon moment pour arriver à atteindre une température ambiante acceptable pour les occupants.

1.1.3 Accès aux données des capteurs et performance des équipements

Cette fonction est une fonction très importante qui permet d'implémenter certaines fonctions intermédiaires et avancées. Il faut que des informations soient accessibles et exploitables pour que le système de contrôle-commande puisse réaliser l'optimisation ou le suivi de la consommation

d'un bâtiment. Ces informations sont aussi importantes pour surveiller et diagnostiquer des défauts, en particulier dans les systèmes de chauffage et de refroidissement.

2 Maîtrise de l'énergie dans les bâtiments

2.1 Notion de système domotique

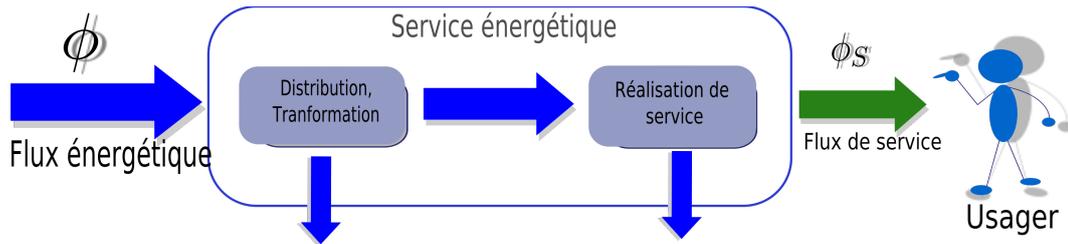


FIG. 3.1 – Service énergétique

Définition 1 *Un système domotique est un système qui transforme, distribue l'énergie consommée (mesurée) en un flux de services correspondant aux besoins des usagers. La réalisation des services demande des ressources énergétiques suffisantes et des équipements supports.*

Exemples : Un radiateur transforme de l'énergie électrique en énergie thermique pour maintenir la température de confort pour les occupants. Une machine à laver transforme de l'énergie électrique en énergie thermique et mécanique pour réaliser le service : laver le linge.

Efficacité énergétique : *Elle est définie par le rapport entre le besoin utile en énergie et la quantité ou le coût total de l'énergie consommée. Ce rapport est souvent difficile à établir mais les indices de performance énergétique permettent d'établir une efficacité relative.*

2.1.1 Caractéristique d'une demande de service énergétique

La demande de l'utilisateur pour un service résulte en une quantité d'énergie qui doit être apportée, appelée également énergie utile. Cependant, le besoin en l'énergie n'est généralement pas constant, il est caractérisé par

- une expression du besoin en puissance
- une expression du besoin en énergie

Le besoin de l'utilisateur varie également en fonction du temps. Dans ([Angioletti et Despretz, 2004](#)), la demande est définie par des périodes qui correspondent à l'intensité du besoin :

- des sous-périodes d'usage normal
- des sous-périodes d'usage réduit
- des sous-périodes renforcées
- des sous-périodes de non-usage

([Angioletti et Despretz, 2004](#)) parlent du terme d'intermittence, défini comme le rapport entre la durée de la période d'usage normal et la durée d'usage totale.

Nom du service	Décalable	Interruptible	Modulable	Accumulable
Chauffage, climatisation	oui	oui	oui	oui
Ventilation	oui	oui	oui	non
Production de l'eau chaude	oui	oui	oui	oui
Éclairage	non	non	non	non
Cuisson	oui	non	oui	non
Appareil électroménager	oui	oui	non	non
Source d'énergie intermittente	non	non	oui	non
Source d'énergie permanente	oui	oui	oui	oui
Stockage	oui	oui	oui	oui

TAB. 3.1 – Caractérisation du degré de liberté pour différents services énergétiques

2.1.2 Notion de degré de liberté du flux de service

Dans l'ensemble des services du bâtiment, certains services disposent de flexibilités qui peuvent être contrôlées ou modifiées. Ces flexibilités sont des éléments nécessaires pour implémenter les fonctions de gestion de l'énergie.

Définition 2 *Les degrés de liberté d'un service énergétique dans un bâtiment sont les possibilités de modifier les paramètres de flux énergétiques tout en garantissant une performance du service demandée par l'utilisateur.*

Les degrés de liberté d'un service énergétique peuvent être de 4 types différents :

- **Décalable** : Une flexibilité temporelle permet de décaler le service par rapport à la demande.
- **Interruptible** : Il est possible d'arrêter le flux énergétique et de le redémarrer après un certain temps.
- **Modulable** : Il est possible de moduler le flux énergétique mais sans aller jusqu'à l'arrêt complet (on parlerait dans ce cas de modifiable interruptible).
- **Accumulable** : Le flux énergétique peut être stocké pour être récupéré plus tard.

Le tableau 3.1 propose un classement des services énergétiques dans le bâtiment selon leurs degrés de liberté.

2.2 Vers une optimisation de la gestion des flux énergétiques

La **Maîtrise De l'Énergie**(MDE) au sens large est un problème de gestion de flux qu'ils soient énergétiques soient informatiques

- transformation, stockage, répartition, coordination des différentes sources d'énergie avec différentes charges
- les informations sur la fluctuation du tarif de l'énergie, des données météorologiques.

La gestion des flux énergétiques dans le bâtiment vise à satisfaire plusieurs besoins, que l'on peut diviser en trois catégories principales présentées dans la figure 3.2 :

- besoins de confort de l'utilisateur qui consistent à réaliser un ensemble de fonctions énergétiques dans le bâtiment pour satisfaire la demande de l'utilisateur. Le système de gestion de flux énergétique dans le bâtiment doit garantir au minimum la sécurité d'approvisionnement en

ressource ou une partie essentielle des besoins qui peuvent être caractérisés par des critères de confort (thermique, visuel, acoustique).

- besoins économiques et financiers qui correspondent aux coûts d'investissement et de fonctionnement du système. Les critères considérés peuvent être le retour sur investissement et le coût d'exploitation. Ces critères sont fortement tributaires du coût d'achat et de rachat de l'énergie mais aussi de l'investissement des appareils.
- besoins environnementaux qui correspondent à la réduction de la pollution et au respect des contraintes écologiques. Dans le contexte actuel, les contraintes écologiques liées aux émissions de gaz à effet de serre n'existent pas encore dans le secteur résidentiel-tertiaire. Le développement durable doit se baser sur la responsabilité de chacun. On peut ainsi imaginer par l'application du protocole de Kyoto, un quota sur les émissions de gaz polluants pour chaque bâtiment, ou bien un système de certificats d'utilisation de l'énergie propre pour chaque bâtiment.

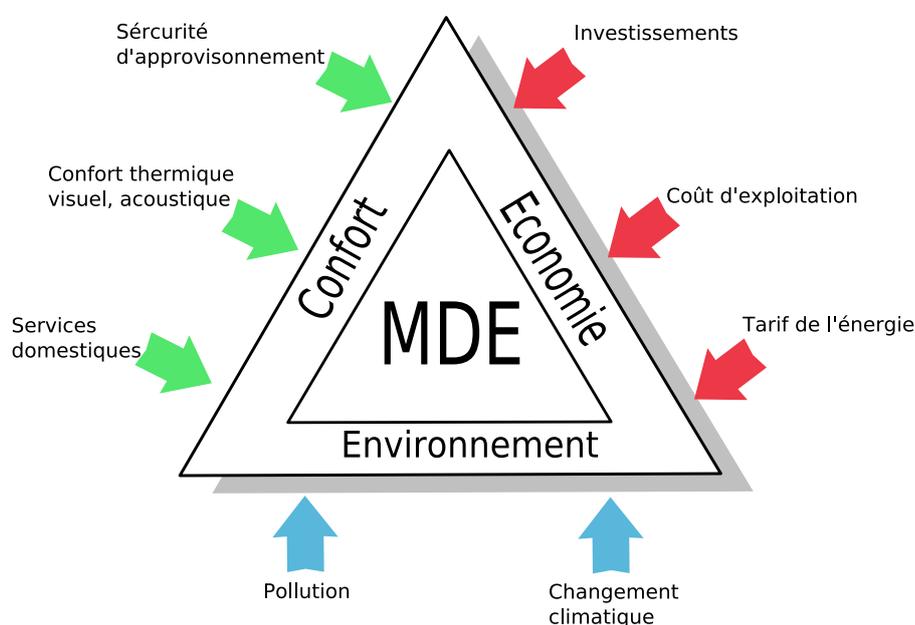


FIG. 3.2 – Les trois critères de la Maîtrise De l'Énergie(MDE)

2.3 Gestion de flux énergétiques

La gestion de flux énergétiques vise à affecter les ressources énergétiques aux équipements dans le bâtiment afin de répondre à la demande de l'utilisateur. Naturellement, les activités énergétiques dans le bâtiment sont quasi indépendantes les unes des autres. Pour répondre aux trois critères de MDE, on a besoin d'un niveau de coordination entre les services s'appuyant sur les techniques d'ordonnancement et de planification. Nous commençons notre démarche par l'étude des travaux consacrés à la gestion des systèmes de production de biens dont les problématiques d'ordonnancement et de planification sont proches. Afin de mettre en évidence ces similarités, nous proposons une comparaison entre les deux types de systèmes. Dans un cas, on gère des flux physiques, dans l'autre cas des flux d'énergie (voir comparaison dans le tableau 3.2).

- **Objectif :** Un système de production transforme des matières premières en produits finis. Un système domotique ou immotique vise à transformer de l'énergie en services répondant

Notion	Système production de biens	Système de gestion de l'énergie
Ressource	manœuvre, machines	source énergétique, équipement
Flux physique	matière première \Rightarrow produit	sources d'énergie \Rightarrow services
Stock	stock de produit, matière première	stockage thermique, électrique
Entrée du système	matière première, la demande	source d'énergie, besoin utile
Sortie du système	flux de produit	flux de service
Performance	la productivité	efficacité énergétique
Activité	la tâche	la consommation

TAB. 3.2 – Comparaison entre un système de production de biens et un système de gestion de l'énergie

au besoin de l'utilisateur.

- **Ressources** : Les ressources dans un système de production sont souvent des *ressources disjointes* (manœuvre et les machines). Par contre, l'énergie est une ressource cumulative et les équipements sont aussi des ressources mais un service n'est généralement rendu que par un seul équipement. Il n'y a aucune flexibilité à ce niveau et donc pas d'ordonnement à réaliser. Dans un système de production, la disponibilité de la ressource dépend de la maintenance préventive ou bien d'aléas comme des pannes de machine, ou l'absence d'opérateur. Dans le bâtiment, la disponibilité dépend fortement de la météo et des contraintes amenées par le fournisseur d'énergie.
- **Activités** : Dans un système de production de biens, la plupart des activités sont organisées par des outils comme la planification, la gestion de projet, l'ordonnement. Les activités dans un système domotique dépendent beaucoup des habitudes de l'utilisateur, il est donc difficile de tout prévoir et d'ordonner. Les outils utilisés pour la production de biens doivent donc être adaptés au contexte du bâtiment.
- **Stock** : Les stocks existent dans presque tous les systèmes de production de biens. Ils peuvent être des stocks d'entrée de matières premières ou bien des stocks sorties de produits finis. En revanche, le stockage d'énergie surtout électrique dans le bâtiment est loin d'être facile à réaliser en raison du coût d'investissement et d'encombrement. De plus, la nature du problème de gestion de stock dans un système de production de biens et dans un système domotique est complètement différent : l'entrée et la sortie d'un produit ne cause aucun problème au stock pourtant le cycle de charge et décharge d'une batterie par exemple doit respecter la consigne du fabricant pour garantir une durée de la vie satisfaisante.
- **Dynamique** : L'horizon à considérer pour la gestion d'un système de production peut être court, moyen ou long terme allant de semaine à plusieurs années. A cause de la nature du problème, la gestion de flux d'énergie dans le bâtiment se fait à des échelles de temps journalière, hebdomadaire ou saisonnière. Le système de gestion des flux énergétique doit répondre non seulement par des actions en temps réel (surcharge ponctuelle, service demandant un temps de réponse très court comme l'éclairage) mais également à des phénomènes relativement lents qui sont souvent liés aux systèmes de chauffage et à l'accumulation thermique. Par exemple, la constante de temps thermique d'un bâtiment peut atteindre 6 mois et celle de l'environnement intérieur 24h. La constante de temps d'un système de capteur solaire thermique du bâtiment est de l'ordre de la semaine. Il

faut également prendre en compte les fluctuations périodiques de coût de l'électricité qui peut être journalière, hebdomadaire ou saisonnière. L'architecture du système de planification, d'ordonnancement et de l'affectation retenue doit être composée de plusieurs niveaux correspondant aux différentes échelles de temps.

- **Nature continue-intermittente** : Dans le problème de gestion des flux énergétiques, il existe à la fois des phénomènes continus et des phénomènes intermittents. Les intermittences de flux énergétiques se situent dans la demande des services à l'utilisateur comme la période d'occupation du bâtiment et les services électroménagers. La ressource énergétique est une variable continue et une ressource cumulative, consommable ([Esquirol et Lopez, 1999b](#)). Cependant, les consommations d'énergie peuvent aussi être intermittentes et discrètes puisque la plupart des équipements dans le bâtiment fonctionnent en tout ou rien. La nature continue-intermittente du problème de gestion de flux énergétique constitue une extension intéressante du problème de gestion de flux dans un système de production. Il est néanmoins nécessaire d'aller vers une démarche de formulation et de résolution plus appropriée à la nature de ce problème.
- **Contexte incertain** : comme tous les problèmes de gestion de flux, la gestion de flux énergétiques est caractérisé par un contexte incertain. Les aléas sont non seulement dus à des problèmes de disponibilité des ressources (coupure d'électricité, conditions météorologiques) mais également à la demande de services (comportement de l'utilisateur). Les grandes perturbations peuvent mettre en cause des résultats d'affectation de ressources optimisées au niveau de la planification et de l'ordonnancement. La possibilité de traiter les incertitudes et les aléas peuvent être appréhendé en suivant deux voies complémentaires :
 - Amélioration de la prédiction par un mécanisme d'apprentissage qui vise à comprendre et mettre à jour une base de connaissances. En général, ces études demandent une longue période d'apprentissage.
 - Aller vers une démarche robuste pour garantir une performance malgré les perturbations. Une telle démarche pour le système de production de biens peut être consultée dans ([Rossi, 2003](#))

3 Conclusion

Ce chapitre a examiné les solutions existantes pour la gestion de l'énergie dans le bâtiment. Nous avons mis en évidence les fonctionnalités et les limites de ces systèmes et nous avons commencé à introduire notre vision de système domotique en introduisant la notion de service et de critère de confort, d'économie et d'environnement. Nous avons montré qu'il y avait des analogies intéressantes entre les systèmes de production de biens et les systèmes de gestion de l'énergie dans le bâtiment. Il est temps de formuler précisément le problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment.

Deuxième partie

Modélisation du problème

La formulation du problème est souvent plus essentielle que sa résolution.

Albert Einstein

Chapitre 4

Structuration du problème

L'objectif de ce travail est de montrer qu'en dotant les équipements domotiques et immotiques d'algorithmes d'optimisation et de facultés de communication, il est possible de mieux maîtriser la consommation d'énergie dans le bâtiment en exploitant des degrés de liberté offerts par l'utilisateur et les degrés de liberté liés au fonctionnement des équipements.

Ce chapitre est consacré à l'établissement de la structure des données du problème pour préparer l'étape de formulation. La structure de données détermine des modèles comportementaux qui permettent de modéliser l'évolution du système. Cette étape commence par la récupération et l'analyse des informations provenant du cahier des charges de l'utilisateur. Ces informations peuvent être saisies manuellement par l'utilisateur ou bien par un mécanisme d'apprentissage des habitudes de l'utilisateur à travers des données enregistrées. On considère que chaque composant du système embarque une carte d'identité de lui-même avec des informations sur son profil de consommation et son efficacité énergétique. En analysant la demande de l'utilisateur et les conditions externes, chaque composant du système peut estimer ses besoins futurs en énergie, déterminer son profil de consommation en spécifiant ses degrés de liberté, et transmettre ses prévisions à un solveur qui aura le rôle de construire un plan d'affectation des ressources énergétiques sur un horizon moyen et long termes. Toutes les informations sur l'estimation et la production doivent être organisées et standardisées pour que les différents composants du système puissent communiquer. Ces informations se servent non seulement de la procédure d'optimisation prévisionnelle mais également d'un système réactif du système de pilotage en temps réel.

1 Notations et Définitions

Dans un bâtiment ayant besoin d'un système de gestion de l'énergie, on trouve un ensemble de services énergétiques existants. Pourtant, il n'y a aucun lien de coordination entre leurs activités. Un système de gestion d'énergie va être intégré dans le système pour apporter des nouvelles fonctions de gestion d'énergie. Ces fonctions permettent de mieux synchroniser et coordonner les différentes activités énergétiques en exploitant les degrés de liberté du système. L'existence de degrés de liberté de l'utilisateur quant à l'utilisation des services donne la possibilité de mieux gérer la consommation dans le bâtiment. Le diagramme des classes UML du système de gestion de l'énergie est présenté figure 4.1. Ce diagramme UML se compose de quatre éléments principaux :

- les services énergétiques existants dans le bâtiment qui sont présentés dans le chapitre 2.
- les équipements qui constituent des supports à la réalisation des services. Un service peut nécessiter plusieurs équipements tout comme un équipement peut répondre à plusieurs

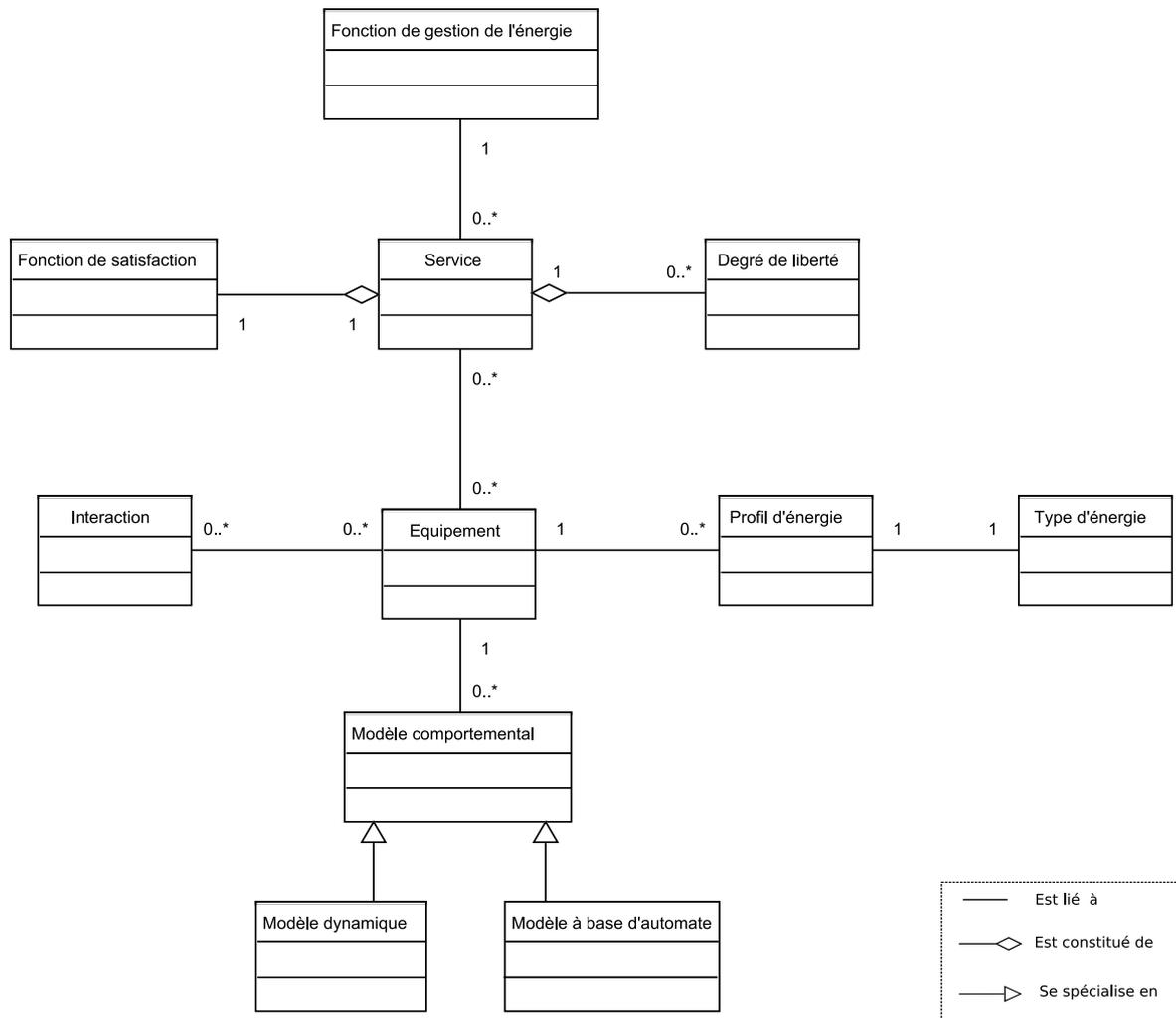


FIG. 4.1 – Diagramme de classe UML du système

services.

- les interactions entre les équipements peuvent prendre la forme d'échanges de flux énergétiques ou de flux d'information.
- afin de gérer les différentes activités énergétiques, les modèles de comportement du système jouent un rôle très important pour l'exploitation des degrés de liberté du système. Ces modèles se composent de deux types de modèles : les modèles dynamiques et les modèles automates à états finis.

1.1 Notion de flux

Le mot flux désigne en général un ensemble d'éléments (informations, données, énergie, matière, ...) évoluant dans un sens donné. Plus précisément dans un contexte de gestion d'énergie dans le bâtiment, on distingue deux types de flux : les flux énergétiques et les flux d'informations.

1.1.1 Flux énergétiques

Définition 3 *les flux énergétiques sont les transferts d'énergie*

Dans le contexte de gestion de l'énergie dans le bâtiment, les flux énergétiques comprennent les flux thermiques et les flux électriques. On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur qui traverse une surface, pendant une unité de temps. Cette définition s'applique aussi aux flux d'énergie électrique qui correspondent aux courants électriques.

Définition 4 *Une source d'énergie est un équipement qui fournit une ressource énergétique sur le site du bâtiment. Une source d'énergie fournit de l'énergie à l'ensemble des services énergétiques. On distingue deux types de source d'énergie les sources permanentes et les sources intermittentes*

Source permanente : C'est une source d'énergie dans le bâtiment qui a une capacité constante.

Source intermittente : Une source intermittente est une source d'énergie dont la capacité varie en fonction du temps. Les sources d'énergie intermittentes sont des ressources supplémentaires qui exploitent généralement des énergies renouvelables sur le site du bâtiment, par exemple les panneaux solaires ou bien les éoliennes.

1.1.2 Flux d'information

Définition 5 *Les flux d'information sont des échanges d'information entre différents éléments dans le système. Les informations transférées peuvent être liées au contrôle/commande et aux demandes d'accès à l'énergie.*

Les flux d'information permettent au système de gestion d'énergie dans le bâtiment de coordonner les différentes activités énergétiques afin de trouver un équilibre entre production d'énergie et consommation.

1.2 Service

Les services énergétiques dans le bâtiment sont variés car les besoins de l'utilisateur sont multiples. Nous mettons en évidence les caractéristiques communes aux différents services dans le bâtiment. En utilisant ces caractéristiques, nous proposons de classer les services en différentes catégories selon les types de degré de liberté et les types de profils énergétiques.

Définition 6 *Le service i est noté $Srv(i)$. Il permet de transformer de l'énergie pour répondre à un besoin spécifique de l'utilisateur.*

En caractérisant les services par leur comportement dans le temps, nous divisons les services en deux groupes principaux :

Définition 7 *Un service est dit **permanent** lorsque ses activités énergétiques (consommation, production) interviennent sur tout l'horizon d'un plan d'affectation de ressources d'énergie.*

Définition 8 *Le service dit **temporisé** lorsque ses activités énergétiques sont localisées sur un horizon temporel qui est inclus dans l'horizon du plan d'affectation des ressources énergétiques.*

1.2.1 Flexibilité d'un service

Interruptible La préemption est définie comme la possibilité d'interrompre temporairement la consommation énergétique d'un service.

Interruptible avec contrainte certains services peuvent être interrompus mais l'interruption doit respecter certaines contraintes qui sont souvent liées à la capacité physique de l'équipement ou aux aspects de sécurité. Nous considérons trois types de contraintes de préemption :

- Contrainte de fenêtre de temps : on peut découper la consommation d'un service comme on le souhaite mais le service doit finir dans cette fenêtre de temps donnée.
- La durée de l'interruption ne doit pas dépasser une durée maximale d'interruption
- Entre deux interruptions, il peut exister une contrainte qui détermine qu'entre deux préemptions du service, il faut un temps d'attente minimal fixé.

Décalable Un service est décalable(par exemple le lavage du linge) s'il peut être ordonné librement dans une fenêtre de temps donnée.

Modifiable un service modifiable offre la possibilité de modifier son profil énergétique, par exemple en réduisant ou en augmentant sa consommation à moment donné.

1.2.2 Estimation de la demande du service

En ce qui concerne la possibilité de prévoir la demande d'un service, nous nous intéressons plutôt aux deux caractéristiques de la demande : la caractéristique temporelle (la durée et la date d'exécution souhaitée) et la caractéristique de quantité énergétique de la demande (puissance consommée maximale, énergie consommée). Dans (Ha, 2004) on a établi trois catégories qui permettent de distinguer les possibilités de prédiction de la demande de l'utilisateur : *les services prévisibles, les services semi-prévisibles et les services imprévisibles*.

- La catégorie des services prévisibles correspond aux services ayant des caractéristiques temporelles et des profils d'énergie (consommation ou production) bien connus
- Un service est considéré comme semi-imprévisible lorsque son profil d'énergie est connu mais pas ses caractéristiques temporelles.
- Finalement, un service est classé dans la catégorie non-prévisible dans le cas où aucune information sur ses caractéristiques temporelles et son profil d'énergie n'est disponible.

Les services des deux premières catégories permettent de prédire une partie des caractéristiques temporelles et profil d'énergie. En revanche, la spécificité de ce problème est que la part d'incertitude est très importante comparée à d'autres problèmes plus commun comme la fabrication de biens.

1.2.3 Fonction de satisfaction du service

Pour tenir compte du niveau de satisfaction du service, la fonction $U(Srv(i))$ de satisfaction du service est exprimée par un réel compris entre 0 et 1 : L'importance du service $Srv(i)$ par rapport aux autres services est exprimé par une pondération $w(i)$. Cette notion aide l'utilisateur à définir lui-même la priorité des différents services. La configuration de la priorité peut être utilisée pour pondérer des critères dans la procédure d'optimisation.

Notion	Notation
Service i	$Srv(i)$
Estimation de la demande	
Durée de consommation	$D(i)$
Date de début du service	$s(i)$
Puissance maximale demandée	$P_{max}(i)$
Énergie consommée durant la période k	$E(i, k)$
Degrés de liberté	
Préemption du service	$Pmtn$
Réduction, augmentation	$Mode$
Décalage temporel	Dec
Fonction de satisfaction	
Pondération du service	$w(i)$
Fonction de satisfaction	$U(Srv(i))$

TAB. 4.1 – Structure d’information du besoin utile d’un service

2 Modèle de comportement du système

Pour gérer le bâtiment comme un système, il est important de structurer les modèles comportementaux des différents services avec leurs équipements support. Dans cette section, nous mettons en évidence l’existence de deux types de modèles comportementaux : le premier regroupe les modèles dynamiques qui permettent de décrire l’évolution continue de certains services comme le chauffage, la climatisation. Cependant, ces modèles ne permettent pas de modéliser les comportements de certains dispositifs comme une machine à laver. Nous proposons d’utiliser un modèle simplifié basé sur un automate à états finis pour ce type de comportements.

2.1 Modèle de comportement dynamique de l’environnement

Le modèle de comportement dynamique de certaines variables d’état de l’environnement peut être écrit sous la forme d’un système d’équations différentielles :

$$\frac{dX}{dt} = A \times X + B \times P + C \times W \quad (4.1)$$

- t est le temps
- X est un vecteur de variables d’état
- P est un vecteur d’affectation de puissance
- W est un vecteur de perturbations externes
- A, B, C sont des matrices de coefficients

Ce type de modèle peut être obtenu à partir d’une procédure d’identification ou à partir de paramètres physiques de l’équipement. Étudions le comportement des environnements thermiques qui correspondent à ce type de modèles.

L’estimation de modèles thermiques dans le bâtiment est un sujet largement étudié dans la littérature. On peut trouver des modèles très complexes et très détaillés comme des modèles thermodynamiques issus de la mécanique des fluides présentés dans la thèse de [Bellivier \(2004\)](#). La

méthode présentée dans cette thèse est très précise et permet de détailler des écoulements à l'intérieur des pièces. Mais ce modèle coûte très cher en terme de ressources de calcul et est difficile à implémenter dans des contextes multi-zones thermiques. De surcroît, ce modèle est trop complexe pour permettre de construire un modèle de contrôle/commande du système. La méthode traditionnelle pour estimer ce type de modèle thermique est basée sur les paramètres physiques du bâtiment mais selon [Madsen \(1995\)](#), cette approche ne permet pas d'aborder une description précise de la dynamique du bâtiment à court terme. [Madsen \(1995\)](#) propose une méthode d'identification pour estimer ce type de modèle en considérant qu'une pièce se compose de deux nœuds. [Andersen et Klaus \(2000\)](#) essaient de combiner la méthode traditionnelle par estimation des paramètres physiques du bâtiment avec l'identification par des modèles stochastiques.

Une alternative est d'utiliser des modèles construits par analogie avec les circuits électriques. ([Fraisie et al., 2002](#)) en a proposé un en utilisant le principe de l'analogie de circuit électrique simple mais qui permet également de donner des informations assez précises sur la modélisation thermique globale d'une pièce. Les résultats de validation dans ([Madsen, 1995](#); [Andersen et Klaus, 2000](#)) ont montré que le degré d'exactitude de ce type de modèle pour la modélisation de la dynamique thermique est très pertinente. Récemment, [Kampf et Robinson \(2006\)](#) ont utilisé ce type de modèles simplifiés pour analyser les transmissions des flux énergétiques dans un bâtiment multi-zone.

Soit le modèle simplifié de la température d'une pièce ayant une fenêtre et équipée d'un radiateur comme générateur thermique. En considérant que la capacité thermique des murs est relativement faible, le modèle par analogie avec un circuit électrique est présenté dans la figure 4.2. Ce modèle comporte deux constantes de temps :

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_a}{dt} \\ \frac{dT_m}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ \frac{1}{r_i C_e} & \frac{1}{r_i C_e} \\ 1 & -\frac{1}{r_a C_i} & -\frac{1}{r_i C_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{r_a C_i} & \frac{1}{C_i} & \frac{W}{C_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ \phi_r \\ \phi_s \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Avec

- T_m la température de l'enveloppe de la pièce
- T_a la température intérieure de la pièce
- T_{ext} la température extérieure
- ϕ_r le flux thermique généré par le radiateur
- ϕ_s le flux énergétique apporté par le rayonnement radiant solaire
- C_e la capacité thermique de l'enveloppe de la pièce
- C_i la capacité thermique du volume d'air dans la pièce
- r_i, r_a les résistances thermiques
- W la superficie de la fenêtre

Ce modèle est très convenable pour notre objectif. D'une part, il est compatible avec notre exigence du contrôle/commande. D'autre part, la performance de prédiction avec ce modèle est validée dans la littérature. Nous choisissons donc ce modèle pour la suite de ce travail.

2.2 Modèle de comportement des équipements

Nous devons choisir des modèles de comportement à haut niveau d'abstraction puisque nous cherchons à prédire des comportements. Nous avons choisi de modéliser les comportements des

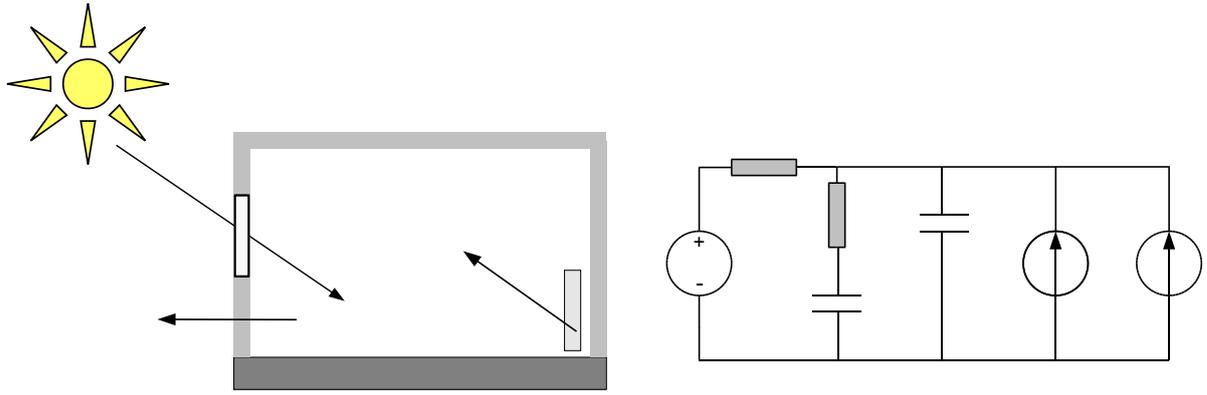


FIG. 4.2 – Modèle thermique de la température dans une pièce munie d’une fenêtre et d’un radiateur (Madsen, 1995)

équipements par des automates à états finis.

Un automate à états finis déterministe est constitué d’états notés $\{\mathcal{S}\}$ et de transitions $\{T\}$. Le comportement évolue selon les valeurs de variables de transition : l’automate passe d’état en état, suivant les transitions activées par les variables. Lorsque la condition de transition est satisfaite, la transition est franchie et le nouvel état est atteint.

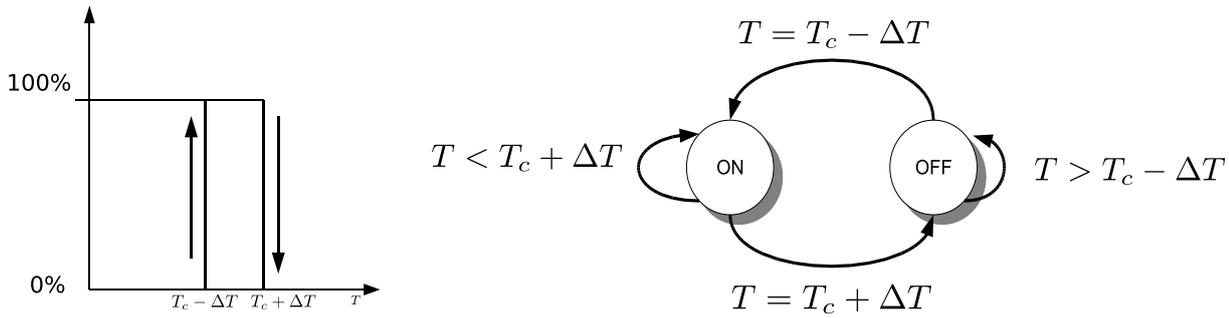
Un automate forme naturellement un graphe orienté étiqueté, dont les états sont les sommets et les transitions les arêtes étiquetées par des conditions de changement d’état. Dans certaines catégories d’équipements, la modélisation par automate à états résume naturellement le comportement de l’équipement.

Pour définir un modèle de comportement de type automate, on décompose le fonctionnement en plusieurs phases qui correspondent à un ensemble d’états $\{\mathcal{S}\}$. Parallèlement, on doit également définir les conditions de changement d’état qui correspondent à l’ensemble des transitions $\{T\}$ de l’automate. La condition de changement d’état dépend de trois types de variables :

- les variables temporelles, qui correspondent à des durées d’exécution de certaines phases de fonctionnement de l’équipement
- les variables d’état de l’environnement
- les variables de contrôle/commande

Exemple 1 : Régulation thermostatique La régulation thermique dans le bâtiment utilise souvent une méthode de régulation tout ou rien de type thermostatique. Le thermostat est le type de régulation le plus répandu dans les équipements de chauffage. Il fonctionne en général suivant la température ambiante mesurée selon le principe de boucle fermée. Supposons que T est la variable représentant la température ambiante, T_c est la température de consigne $T_c - \Delta T$ est la température d’enclenchement et $T_c + \Delta T$ est la température de déclenchement. Deux états dans l’automate correspondent à l’état allumé (ON) et arrêté (OFF) (voir la figure 4.3) du générateur thermique. Supposons que l’automate démarre à l’état allumé. Lorsque la température atteint la température de déclenchement, la transition vers l’état OFF est effectuée. L’automate à état continue de rester dans cet état et retourne à l’état précédent lorsque la condition $T = T_c - \Delta T$ est satisfaite.

Ce principe de régulation thermique se trouve souvent dans les équipements qui jouent le



T Température ambiante
 $T_c + \Delta T$ Température de déclenchement
 $T_c - \Delta T$ Température d'enclenchement

FIG. 4.3 – Modélisation de la régulation thermique tout ou rien par automate à états

rôle de régulation de température en utilisant la source d'énergie électrique, comme par exemple la production de froid ou le service de climatisation. D'autres types de régulations thermiques existent comme la régulation proportionnelle, (plus d'informations sur la régulation thermique peuvent être trouvées dans (Mérieux et Pleyne, 1992)).

Exemple 2 : Modèle du comportement d'une batterie Voici un exemple de modèle comportemental d'une accumulation électrochimique (batterie) souvent utilisé pour stocker l'énergie produite par des sources intermittentes. On distingue trois phases : charge, décharge et déconnexion du réseau. Dans le mode de charge, la batterie consomme de l'énergie et est considérée comme une charge. En revanche, en état de décharge la batterie est considérée comme une source d'énergie supplémentaire du système. Un modèle de batterie simplifié est présenté dans (Muselli et al., 2000). $x(t)$ est la quantité d'énergie stockée dans la batterie à l'instant t , $u(t)$ est le vecteur de contrôle/commande qui représente le flux énergétique en entrée ou en sortie de la batterie. L'automate à état représentant le comportement d'une batterie est représenté figure 4.4. Il s'agit d'un automate hybride puisqu'il contient l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dx(t)}{dt} = x(t) + u(t) \quad (4.3)$$

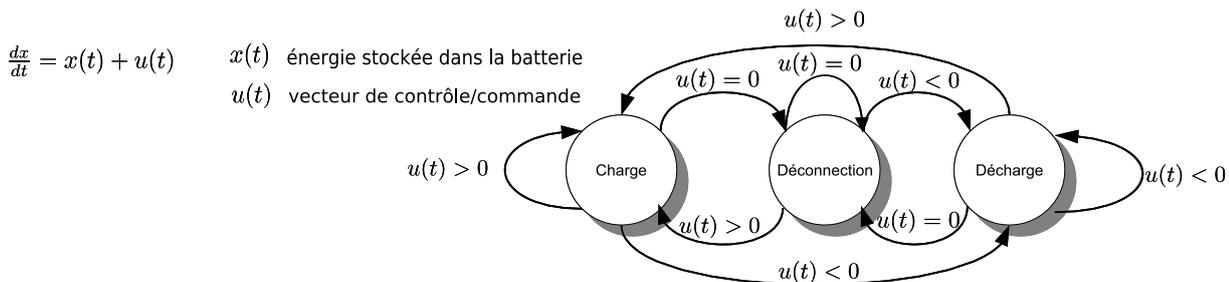


FIG. 4.4 – Modèle de l'automate à l'état d'une batterie

Exemple 3 : Modèle d'un lave linge L'automate à état du fonctionnement d'une machine à laver comporte trois phases principales : chauffage de l'eau, lavage et essorage (voir la figure 4.5). Supposons qu'à chaque état la consommation est modélisée de manière approchée avec :

$s_{i,j}$, $f_{i,j}$, $p(i,j)$ respectivement les dates d'exécution, de fin et la durée de la phase j de l'équipement i . L'équipement i durant la phase j a une quantité d'énergie consommée ou produite moyenne notée $E_{i,j}$. On peut simplifier la courbe de consommation pour une activité énergétique temporisée avec la puissance consommée moyenne $P_{i,j}$:

$$P_{i,j} = \frac{E_{i,j}}{p(i,j)} \quad (4.4)$$

L'automate à états finis de la machine à laver commence à l'état arrêté. Sur ordre d'exécution par le mécanisme de pilotage ou bien par l'utilisateur, elle passe dans l'étape de chauffage de l'eau, la transition entre chaque étape est activée par la fin de l'étape précédente.

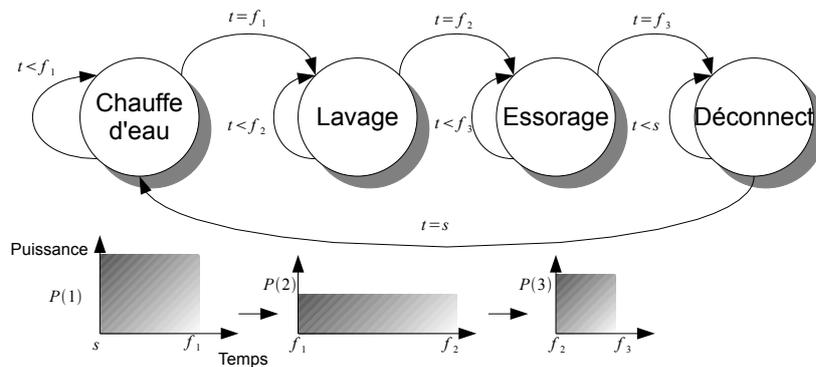


FIG. 4.5 – Machine à états finis du comportement d'une machine à laver

3 Conclusion

Nous avons détaillé les différents services que l'on rencontre dans l'habitat. Pour chaque service, nous avons montré qu'il était possible de standardiser leurs caractéristiques. Nous avons en particulier montré que la notion de qualité de service se traduit pour l'utilisateur par ce que l'on appelle le confort qui peut être modélisé par une fonction de satisfaction. Un service peut appartenir à deux grandes catégories : permanent ou temporisé, suivant sa nature. Pour chacune de ces catégories, on distingue les services interruptibles, décalables et modifiables. Certains services sont prédictibles, soit à partir d'information météorologiques, soit par une programmation des utilisateurs ou même par un apprentissage des habitudes des occupants. Les différents types de modèles de comportement approprié au contexte ont été présentés parmi lesquels les modèles continus dynamiques, les modèles sous forme d'automate à états finis mais aussi les modèles hybrides continus / discrets. La prochaine étape est de trouver une formulation mathématique ad hoc pour chacun des services.

Chapitre 5

Formulation mathématique du problème

Ce chapitre est consacré à la formulation des différents éléments du problème de maîtrise de l'énergie dans le bâtiment. La résolution d'un problème d'optimisation nécessite tout d'abord une phase de modélisation du système réel. Cette phase a été décrite dans le chapitre précédent. Lorsque ces modèles sont construits, les paramètres des modèles sont instanciés par des valeurs numériques afin de construire des scénarios qui représentent au mieux la réalité. Nous envisageons une formulation générale du problème qui couvre tous les éléments de la gestion de l'énergie dans le bâtiment. Cependant, les modèles comportementaux et les contraintes des équipements sont de natures différentes. Comme cela a été montré dans le chapitre 4, ces modèles sont soit des modèles dynamiques, soit des modèles à événements discrets sous la forme d'automate à états finis soit une hybridation de ces deux types de modèles.

Dans la littérature, la notion de "système hybride" a été introduite dans (Branicky et al., 1994) et complétée par (Bemporad et Morari, 1998). En automatique, les systèmes hybrides sont des systèmes qui impliquent à la fois une dynamique continue et à la fois des phénomènes discrets. Les phénomènes discrets peuvent être exprimés par la logique booléenne. Bemporad et Morari (1998) ont proposé la notion de système mixte logique et dynamique (en anglais : **Mixed Logical Dynamical (MLD) System**). Grâce à la transformation de la logique booléenne en variables binaires et en contraintes auxiliaires, la logique peut être intégrée aux équations différentielles du système. Dans ce chapitre, nous adaptons cette démarche pour formuler le problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment dans un cadre général sous forme de la programmation linéaire mixte en optimisant trois critères : écologique, économique et confort de l'utilisateur.

1 Principes de la transformation logique

1.1 Logique propositionnelle et programmation en nombres entiers

Nous nous intéressons d'abord à l'intégration de la logique booléenne au modèle d'évolution du système. L'intérêt est d'assembler les deux types de modèles présentés dans le chapitre 4 : les modèles dynamiques et les modèles automate à états dans une formulation unique. De plus, grâce à cette transformation, on peut intégrer des propositions logiques de type *si-alors* pour introduire les contraintes logiques dans la formulation générale du problème.

Une proposition logique notée \mathcal{X} a pour valeur de vérité soit *vraie*(V), soit *fausse* (F). On

\mathcal{X}_1	\mathcal{X}_2	$\neg\mathcal{X}_1$	$\mathcal{X}_1 \wedge \mathcal{X}_2$	$\mathcal{X}_1 \vee \mathcal{X}_2$	$\mathcal{X}_1 \oplus \mathcal{X}_2$	$\mathcal{X}_1 \rightarrow \mathcal{X}_2$	$\mathcal{X}_1 \leftrightarrow \mathcal{X}_2$
V	V	F	V	V	F	V	V
V	F	F	F	V	V	F	F
F	V	V	F	V	V	V	F
F	F	V	F	F	F	V	V

TAB. 5.1 – Table de vérité de fonctions booléennes

peut agréger plusieurs propositions logiques avec les opérateurs de " \wedge "(et), " \vee "(ou), " \oplus " (ou exclusif), " \neg " (non), " \rightarrow " (implique), " \leftrightarrow " (si et seulement si). La table de vérité des opérateurs de la logique booléenne se trouve dans le tableau 5.1

La proportion logique booléenne \mathcal{X}_i peut être associée à une variable binaire $\delta_i \in \{0, 1\}$ telle que la proportion \mathcal{X}_i soit vraie si et seulement si $\delta_i = 1$ et \mathcal{X}_i soit fausse si et seulement si $\delta_i = 0$:

$$\begin{cases} \mathcal{X}_i = V & \leftrightarrow \delta_i = 1 \\ \mathcal{X}_i = F & \leftrightarrow \delta_i = 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

Ainsi, les opérateurs binaires peuvent être reformulés pour la programmation en nombres entiers (Williams, 1993) :

$$\begin{aligned} \neg\mathcal{X}_1 & \leftrightarrow \delta_1 = 0 \\ \mathcal{X}_1 \wedge \mathcal{X}_2 & \leftrightarrow \delta_1 + \delta_2 = 2 \\ \mathcal{X}_1 \vee \mathcal{X}_2 & \leftrightarrow \delta_1 + \delta_2 \geq 1 \\ \mathcal{X}_1 \oplus \mathcal{X}_2 & \leftrightarrow \delta_1 + \delta_2 = 1 \\ \mathcal{X}_1 \rightarrow \mathcal{X}_2 & \leftrightarrow \delta_1 - \delta_2 \leq 0 \\ \mathcal{X}_1 \leftrightarrow \mathcal{X}_2 & \leftrightarrow \delta_1 - \delta_2 = 0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

1.1.1 Transformation de la condition linéaire

Dans les modèles, on trouve souvent des conditions de changement d'état liées à une contrainte portant sur des variables physiques du système. Par exemple, le changement de sensation thermique PMV est lié au changement de valeur de la température intérieure. En général, ce type de logique peut être formulé sous la forme linéaire $ax \leq b$: la variable continue $x \in \text{dom}(x)$ est bornée pour que m et M soient respectivement la borne inférieure et la borne supérieure de la fonction $f(x) = ax - b$ avec $\{a, b\} \in \mathbb{R}^2$. On suppose que m et M soient des constantes.

$$\begin{aligned} m &= \text{Min}_{x \in \text{dom}(x)}(ax - b) \\ M &= \text{Max}_{x \in \text{dom}(x)}(ax - b) \end{aligned} \quad (5.3)$$

Supposons que la proportion logique \mathcal{X} implique la condition $f(x) \leq 0$. La transformation s'écrit :

$$\begin{cases} \mathcal{X} \triangleq [ax - b \leq 0] \\ m = \text{Min}_{x \in \text{dom}(x)}(ax - b) \\ M = \text{Max}_{x \in \text{dom}(x)}(ax - b) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} m \leq ax - b \leq 0 & \leftrightarrow \delta_i = 1 \\ M \geq ax - b > 0 & \leftrightarrow \delta_i = 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

Pour exprimer cette condition, on peut utiliser deux inégalités linéaires mixtes comme suit :

$$[ax - b \leq 0] \leftrightarrow [\delta = 1] \text{ si et seulement si } \begin{cases} ax - b \leq M(1 - \delta) \\ ax - b > m\delta \end{cases} \quad (5.5)$$

Pour plus d'informations sur la démonstration de la transformation, le lecteur est renvoyé vers (Bemporad et Morari, 1998). Le seul souci de la transformation (5.5) est que $ax - b$ ne peut jamais atteindre m . On peut ajouter un coefficient positif ϵ de tolérance qui correspond souvent à la précision du calculateur utilisé. La transformation devient :

$$[f(x) \leq 0] \leftrightarrow [\delta = 1] \text{ si et seulement si } \begin{cases} ax - b \leq M(1 - \delta) \\ ax - b \geq \epsilon + (m - \epsilon)\delta \end{cases} \quad (5.6)$$

1.1.2 Variables auxiliaires

Dans l'étape précédente, on transforme une proposition logique en une formulation mixte en nombres entiers. Dans la suite de ce chapitre, nous allons rencontrer des cas où l'on multiplie une variable continue et une variable binaire ou bien deux variables binaires. Les variables auxiliaires doivent être ajoutées pour compléter la transformation.

Multiplication de deux variables binaires : Considérons le cas où la multiplication de deux variables binaires δ_1 et δ_2 conduit à une troisième variable binaire $\delta_3 \triangleq \delta_1 \times \delta_2$. La transformation équivalente s'écrit sous la forme :

$$\begin{cases} -\delta_1 + \delta_3 & \leq 0 \\ -\delta_2 + \delta_3 & \leq 0 \\ \delta_1 + \delta_2 - \delta_3 & \leq 1 \\ \delta_1, \delta_2, \delta_3 \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (5.7)$$

Variable semi-continue : une variable semi-continue résulte de la multiplication d'une variable binaire par une variable continue : $z \triangleq \delta \times (ax - b)$ qui doit satisfaire deux conditions : $[\delta = 0] \rightarrow [z = 0]$ et $[\delta = 1] \rightarrow [z = ax - b]$. La variable semi-continue est transformée sous la forme de système d'inéquations mixtes :

$$\begin{cases} z = f(x) & \text{Si } \delta = 1 \\ z = 0 & \text{Si } \delta = 0 \\ m = \text{Min}_{x \in \text{dom}(x)}(ax - b) \\ M = \text{Max}_{x \in \text{dom}(x)}(ax - b) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} z \leq M \times \delta \\ z \geq m\delta \\ z \leq f(x) - m(1 - \delta) \\ z \geq f(x) - M(1 - \delta) \end{cases} \quad (5.8)$$

2 Transformation des modèles comportementaux

2.1 Formulation du service de chauffage, climatisation

Le modèle de comportement du système de chauffage climatisation a été présenté dans le chapitre précédent sous la forme d'un système d'équations différentielles :

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + B_c u_c(t) + C_c P_c(t) \\ y_c(t) = D_c x_c(t) \end{cases} \quad (5.9)$$

où $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ et $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$. La discrétisation de ce système d'équations par la période d'échantillonnage Δ_a conduit à :

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + CE(k) \\ y(k) = Dx(k) \end{cases} \quad (5.10)$$

Pour cette partie du modèle, aucune transformation n'est nécessaire.

Selon la norme de confort 7730 (AFNOR, 2006), on distingue trois niveaux de confort thermique : A, B, C. Dans chaque catégorie, AFNOR (2006) propose des domaines de valeurs caractéristiques pour la température, la vitesse de l'air et l'humidité de l'air dans une zone occupée.

Pour mesurer l'inconfort thermique sur une longue période, nous choisissons le critère d'agrégation de la valeur absolue du vote prédictif PMV . La sensation est exprimée en fonction du PMV . L'objectif de service de chauffage/climatisation est de régler la température ambiante autour d'une température de consigne où la température "idéale" est T_{opt} pour l'utilisateur. Le domaine de valeur pour la température ambiante est limitée par T_{max} et T_{min} qui sont imposées par la norme de confort 7730.

Par exemple, en hiver, dans un bureau individuel, les caractéristiques de confort dans la catégorie A sont : la température opérative $T_a = 22 \pm 1^\circ\text{C}$, la vitesse moyenne maximale de l'air étant de 0,10m/s ($T_{opt} = 22^\circ\text{C}$ et $T_{max} = 23^\circ\text{C}$, $T_{min} = 21^\circ\text{C}$).

Dans cette étude, nous nous intéressons plutôt à l'inconfort thermique causé par des variations de température ambiante, en considérant que les autres paramètres physiques sont constants et dans la norme. Dans ce cas, le critère de vote prédictive PMV peut être réécrit uniquement en fonction de la température ambiante $T_a(k)$ sous forme simplifiée avec deux constantes $(a_1, a_2) \in \mathbb{R}^2$ qui reflètent la différence entre les sensations de froid et de chaud. Nous nous intéressons à la valeur absolue du PMV :

$$|PMV(T_a(k))| = \begin{cases} a_1 \times \frac{(T_a(k) - T_{opt})}{T_{opt} - T_{Min}} & \text{Si } T_a(k) \leq T_{opt} \\ a_2 \times \frac{(T_{opt} - T_a(k))}{T_{Max} - T_{opt}} & \text{Si } T_a(k) > T_{opt} \end{cases} \quad (5.11)$$

Le critère de satisfaction du service de chauffage et climatisation $Srv(i)$ dans la période k est défini par

$$U(k) = |PMV(T_a(k))| \quad (5.12)$$

On introduit la variable $\delta_a(k)$ vérifiant $[\delta_a(k) = 1] \Leftrightarrow [T_a(k) \leq T_{opt}] \forall k$. La fonction de PMV (5.11) peut être réécrite sous une forme linéaire mixte avec variables binaires :

$$\begin{aligned} |PMV(T_a(k))| &= \delta_a(k) \times a_1 \times \frac{(T_a(k) - T_{opt})}{T_{opt} - T_{Min}} + (1 - \delta_a(k)) \times a_2 \times \frac{(T_{opt} - T_a(k))}{T_{Max} - T_{opt}} \\ &= F_1 \delta_a(k) + F_2 T_a(k) + \underbrace{F_3 T_a(k) \times \delta_a(k)}_{z_a(k)} + F_4 \\ &= F_1 \delta_a(k) + F_2 T_a(k) + F_3 z_a(k) + F_4 \end{aligned} \quad (5.13)$$

En utilisant (5.6), la transformation équivalente de la proposition logique $T_a(k) \leq T_{opt}$ par la variable binaire $\delta_a(k)$ s'écrit :

$$\begin{cases} T_a(k) - T_{opt} \leq (T_{max} - T_{opt})(1 - \delta_a(k)) \\ T_a(k) - T_{opt} \geq \epsilon + (T_{min} - T_{opt} - \epsilon)\delta_a(k) \end{cases} \quad (5.14)$$

Une variable semi-continue $z_a(k)$ est ajouté pour remplacer la multiplication $\delta_a(k) \times T_a(k)$ dans (10.2), selon (5.8) la transformation de cette variable semi-continue $z_a(k) \triangleq \delta_a(k) \times T_a(k)$ conduit

à :

$$\begin{cases} z_a(k) \leq (T_{max} - T_{opt})\delta_a(k) \\ z_a(k) \geq (T_{min} - T_{opt})\delta_a(k) \\ z_a(k) \leq T_a(k) - (T_{min} - T_{opt})(1 - \delta_a(k)) \\ z_a(k) \geq T_a(k) - (T_{max} - T_{opt})(1 - \delta_a(k)) \end{cases} \quad (5.15)$$

En rassemblant les équations (5.10), (4.2), (5.14) et (5.15), on peut obtenir le modèle hybride du système de chauffage et climatisation :

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + CE(k) \\ U(k) = F_1x(k) + F_2\delta(k) + F_3z_a(k) + F_4 \\ T_a(k) - T_{opt} \leq (T_{max} - T_{opt})(1 - \delta_a(k)) \\ T_a(k) - T_{opt} \geq \epsilon + (T_{min} - T_{opt} - \epsilon)\delta_a(k) \\ z_a(k) \leq (T_{max} - T_{opt})\delta_a(k) \\ z_a(k) \geq (T_{min} - T_{opt})\delta_a(k) \\ z_a(k) \leq T_a(k) - (T_{min} - T_{opt})(1 - \delta_a(k)) \\ z_a(k) \geq T_a(k) - (T_{max} - T_{opt})(1 - \delta_a(k)) \end{cases} \quad (5.16)$$

En rassemblant les équations de transformation équivalente on obtient le modèle réduit :

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + CE(k) \\ U(k) = F_1x(k) + F_2\delta(k) + F_3z_a(k) + F_4 \\ E_1\delta(k) + E_2z_a(k) + E_3T_a(k) + E_5 \leq 0 \end{cases} \quad (5.17)$$

Ce modèle nous permet non seulement d'exprimer l'évolution de la température ambiante mais également le critère de confort thermique de l'utilisateur. Continuons à appliquer ce type de transformation aux services temporisés.

2.2 Modélisation d'un service temporisé non-préemptif

Ordonnancer des services temporisés peut être vu comme un problème d'ordonnancement sous contrainte de ressources en gestion de projet (Esquirol et Lopez, 1999b) ou comme un problème d'ordonnancement cumulatif présenté dans la thèse de Neron (1999). Ces problèmes consistent à instancier dans un espace temporel un ensemble d'activités ou de tâches afin d'optimiser certains critères. Ces instanciations temporelles doivent respecter un ensemble de contraintes de capacité limitée de la ressource, par exemple des machines, de la main d'œuvre. Dans ce type de problème, on s'intéresse plutôt au critère de minimisation de la durée du projet ou de minimisation de la somme des retards pondérés des tâches.

Cependant, pour la gestion de l'énergie dans le bâtiment, les instanciations des services temporisés sont effectuées pour satisfaire les exigences de l'utilisateur et en même temps minimiser le coût de l'énergie consommée dans le bâtiment. Le décalage temporel des services temporisés peut être le résultat d'un compromis entre les deux critères de confort et de coût pour l'utilisateur. Ces critères ne sont pas forcément liés à la durée totale ou au retard pondéré dans l'ordonnancement classique.

2.2.1 Formulation du problème en temps discret

Nous avons adopté ici une formulation du problème de gestion de projet (Esquirol et Lopez, 1999b). Cette formulation est largement utilisée dans la littérature. On considère que le temps est

discretisé par des période ayant la même durée Δ_a . Les services temporisées $Srv(i)$ avec l'index $i \in \{1, \dots, I\}$ partagent une ressource cumulative ayant une capacité $P(k)$ et un coût de l'énergie $C(k)$, avec I le nombre total de services temporisées. $C(k)$ varie en fonction de k . Voici la liste des notations adoptées

- $s_{min}(i)$, date de disponibilité
- $s_{max}(i)$, date d'exécution au plus tard
- $s(i)$, date d'exécution effective du service
- $f_{min}(i)$, date de fin au plus tôt
- $f_{max}(i)$, date de fin au plus tard
- $f_{opt}(i)$, date de fin souhaitée par l'utilisateur
- $d(i)$ durée de l'activité
- $U(i)$ satisfaction liée au service temporisé $Srv(i)$
- $P(i)$ puissance demandée par le service temporisé $Srv(i)$
- $s_{min}(i)$, $s_{max}(i)$, $s(i)$, $f_{min}(i)$, $f_{opt}(i)$, $d(i)$ sont des variables en nombres entiers.

La date de fin du service temporisé est limitée par la date de fin au plus tôt et la date de fin au plus tard :

$$f_{min}(i) \leq f(i) \leq f_{max}(i) \forall i \in \{1, \dots, I\} \quad (5.18)$$

La satisfaction de l'utilisateur peut être estimée par une fonction linéaire par morceaux qui dépend du décalage du service par rapport à la date de fin souhaitée par l'utilisateur :

$$U(i) = \begin{cases} \frac{f(i) - f_{opt}(i)}{f_{max}(i) - f_{opt}(i)} & \text{Si } f(i) > f_{opt}(i) \\ \frac{f_{opt}(i) - f(i)}{f_{opt}(i) - f_{min}(i)} & \text{Si } f(i) \leq f_{opt}(i) \end{cases} \quad (5.19)$$

La fonction de satisfaction associée au service est transformée sous une forme linéaire mixte grâce à l'introduction de la variable binaire $\delta_u(i) \in \{0, 1\}$ pour que $[\delta_u(i) = 1] \leftrightarrow [f(i) \leq f_{opt}(i)]$:

$$U(i) = \delta_u(i) \times \frac{f_{opt}(i) - f(i)}{f_{opt}(i) - f_{min}(i)} + (1 - \delta_u(i)) \frac{f(i) - f_{opt}(i)}{f_{max}(i) - f_{opt}(i)} \quad (5.20)$$

On introduit une variable binaire $x(i, k) \in \{0, 1\}$ associée au service qui satisfait :

$$x(i, k) = \begin{cases} 1 & \text{Si le service temporisé } Srv(i) \text{ se termine à la période } k \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (5.21)$$

Il s'ensuit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \sum_{k=1}^K x(i, k) = 1 & \forall i \in \{1, \dots, I\} \\ f_{min}(i) \leq \sum_{k=1}^K x(i, k) \times k \leq f_{max}(i) & \forall i \in \{1, \dots, I\} \\ \sum_{i=1}^I \sum_{s=k}^{k+d(i)-1} P(i) \times x(i, s) \leq P_{max}(k) & \forall k \in \{1, \dots, K\} \\ x(i, k) \in \{0, 1\} & \forall i \in \{1, \dots, I\}, k \in \{1, \dots, K\} \end{array} \right. \quad (5.22)$$

La première contrainte assure qu'un service temporisé est exécuté exactement une fois. La deuxième sert à limiter le décalage en respectant la contrainte de fenêtre de temps $[f_{min}(i), f_{max}(i)]$. La troisième contrainte garantit que la contrainte de capacité de ressource est respectée. L'énergie consommée du $Srv(i)$ durant la période k est $E(i, k)$ qui est calculée par :

$$E(i, k) = \sum_{s=k}^{k+d(i)-1} P(i) \times x(i, s) \times \Delta_a \quad (5.23)$$

Le critère de coût du plan d'affectation de la ressource énergie totale est :

$$J_c = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I E(i, k) C(k) \quad (5.24)$$

2.2.2 Formulation en temps continu

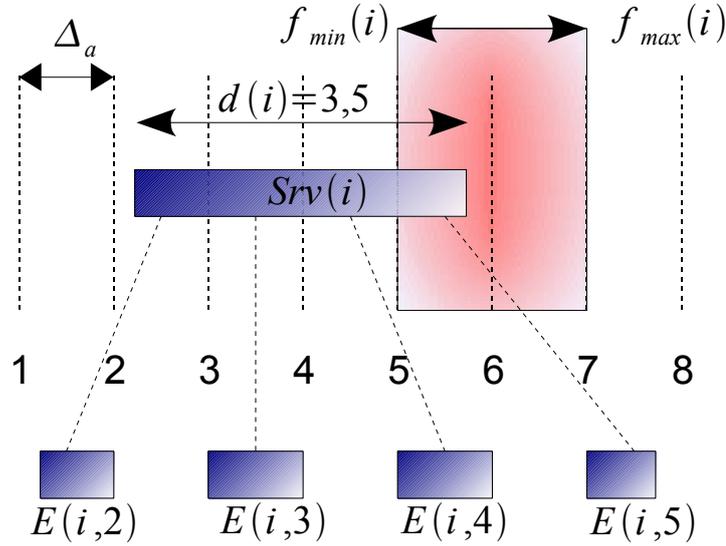


FIG. 5.1 – Formulation continue du service temporisé

Après une formulation en temps discret, nous proposons une amélioration de cette formulation mieux adaptée à la nature du problème. Le désavantage de la formulation en temps discret est la date de fin effective $f(i)$ liée à la période de discrétisation du système $f(i) = n \times \Delta, n \in \mathbb{N}$. En réalité, ce n'est qu'une approximation. Avec la transformation précédente, nous allons proposer une formalisation qui permet de rendre continues les variables $f(i), d(i), s(i), f_m(i)$.

Dans la littérature, la formulation en temps continu du problème d'ordonnancement existe. Les travaux sur les modèles continus se trouvent dans (Pinto et Grossmann, 1995, 1998; Castro et Grossmann, 2006) mais dans le problème d'ordonnancement sous la contrainte de ressources disjonctives. Au lieu de déterminer la date de début des tâches, ce type de formulation détermine la séquence d'exécution des tâches sur une ressource partagée. La variable binaire $\gamma(i, j)$ est introduite pour représenter cette relation : $\gamma(i, j) = 1$ lorsque la tâche i est finie avant l'exécution de la tâche j .

Pourtant, ce type de formulation ne convient pas pour le problème d'ordonnancement sous contrainte de ressource cumulatif que nous voulons traiter. La position de deux tâches dans un

problème cumulative ne se réduit pas à i avant ou après j . Une variable binaire $\gamma(i, j)$ n'est plus suffisante pour représenter cette relation. Nous proposons d'utiliser les transformations (5.6) et (5.8) pour une formulation du problème d'ordonnancement appropriée au problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment. L'évènement de changement de coût énergétique peut arriver à chaque période k . Par conséquent, la formation en temps continu est liée à la grille temporelle découpée en intervalles uniformes de durée Δ_a sachant que les variables $s(i), f(i), p(i)$ restent des variables continues.

Selon (Esquirol et Lopez, 1999a), la consommation d'un service durant un intervalle Δ_a est décrite (voir l'illustration dans la figure 5.1) par :

$$E(i, k) = \begin{cases} E'(i, k) = (\text{Min}[f(i), (k+1)\Delta_a] - \text{Max}[s(i), k\Delta_a]) P(i) & \text{Si } E'(i, k) > 0 \\ 0 & \text{Si } E'(i, k) \leq 0 \end{cases} \quad (5.25)$$

On considère que la variable binaire $\delta_{t1}(i, k) \in \{0, 1\}$ définie par :

$$\delta_{t1}(i, k) = \begin{cases} 0 & \text{Si } f(i) > k\Delta_a \\ 1 & \text{Si } f(i) \leq k\Delta_a \end{cases} \quad (5.26)$$

et la variable binaire $\delta_{t2}(i, k) \in \{0, 1\}$ défini par :

$$\delta_{t2}(i, k) = \begin{cases} 0 & \text{Si } s(i) > k\Delta_a \\ 1 & \text{Si } s(i) \leq k\Delta_a \end{cases} \quad (5.27)$$

La transformation utilisant $\delta_{t1}(i, k)$ et $\delta_{t2}(i, k)$ est similaire à (5.6). La façon la plus simple de formuler $E(i, k)$ à partir de (5.25) est la suivante :

$$\text{Min}[f(i), (k+1)\Delta_a] = [1 - \delta_{t1}(i, k+1)](k+1)\Delta_a + \delta_{t1}(i, k+1) \times f(i) \quad (5.28)$$

Nous devons ajouter une variable semi-continue pour compléter la transformation $z_{t1}(i, k) \triangleq \delta_{t1}(i, k) \times f(i)$

$$\text{Max}[s(i), k\Delta] = [1 - \delta_{t2}(i, k)] \times s(i) + \delta_{t2}(i, k) \times k \times \Delta_a \quad (5.29)$$

Comme dans le cas précédent, on ajoute une variable semi-continue $z_{t2}(i, k) \triangleq \delta_{t2}(i, k) \times s(i)$. Il vient :

$$E'(i, k) = ([1 - \delta_{t1}(i, k+1)](k+1)\Delta_a + \delta_{t1}(i, k+1) \times f(i) + [1 - \delta_{t2}(i, k)] \times s(i) + \delta_{t2}(i, k) \times k) \Delta_a P(i) \quad (5.30)$$

En fait, $E(i, k)$ est un variable semi-continue, donc on ajoute encore une variable binaire : $[\delta_{t3}(i, k) = 1] \leftrightarrow [E(i, k) \leq 0]$. Dans ce cas, $E(i, k)$ s'écrit sous la forme :

$$E(i, k) = [1 - \delta_{t3}(i, k)]E'(i, k) \quad (5.31)$$

2.3 Source d'énergie

2.3.1 Source d'énergie intermittente

Les sources d'énergie intermittentes existent dans le bâtiment. Elles sont généralement liées à l'énergie solaire et à l'énergie éolienne. On suppose qu'à partir de données statistiques et des

prévisions météorologiques, on est capable de prédire la capacité de production moyenne sur un intervalle de discrétisation Δ_a . Généralement, le fonctionnement de la source intermittente peut être résumé par $W(k)$, le flux d'énergie affecté au bâtiment durant la période k , l'énergie produite par la source locale est proportionnelle par rapport à l'énergie $W(k)$:

$$E(i, k) = \eta_i W(k) \quad (5.32)$$

$\eta_i \in \mathbb{R}, \eta < 1$ est le rendement de la source énergétique i .

2.3.2 Source d'énergie permanente

Contrairement aux sources d'énergie intermittentes, l'utilisateur peut connaître l'énergie produite par le service fournisseur d'énergie $Srv(i)$ à chaque période. Ces sources émanent de l'EDF ou bien des groupes électrogènes. L'énergie fournie par le service de source d'énergie $Srv(i)$ durant la période k est notée également $E(i, k)$. La contrainte de capacité de source est écrite sous la forme :

$$E(i, k) \leq E_{max}(i, k) \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (5.33)$$

2.4 Stockage de l'énergie

L'énergie produite par les sources d'énergie peut être stockée dans un accumulateur. L'utilisation d'un accumulateur obéit généralement à une stratégie qui garantit la durée de vie et le bon fonctionnement. Supposons que la batterie i ait une capacité maximale $C_{max}(i)$, $C(i, k)$ est l'énergie stockée dans l'accumulateur i durant la période k . La discrétisation de l'équation (4.3) conduit à :

$$C(i, k + 1) = C(i, k) + E(i, k) \quad (5.34)$$

Dans ce cas, l'accumulateur est idéal avec un rendement unitaire. Un modèle de comportement de l'équipement qui représente trois phases de fonctionnement : charge, décharge et déconnexion, est donné par :

$$\begin{array}{ll} C(i, k + 1) = C(i, k) + E(i, k) & \\ E(i, k) > 0 & \text{Si l'accumulateur est dans l'état charge} \\ E(i, k) = 0 & \text{Si l'accumulateur est dans l'état déconnexion} \\ E(i, k) < 0 & \text{Si l'accumulateur est dans l'état décharge} \end{array} \quad (5.35)$$

Par contre si le rendement de l'accumulateur η_i est inférieur à un, on doit distinguer les deux phases de charge et de décharge par une variable $\delta_b(i, k) \in \{0, 1\} : [\delta_b(i, k) = 1] \leftrightarrow [E(i, k) \leq 0]$. Pour simplifier la notation, on suppose que le rendement de l'accumulateur des états charge et décharge sont égaux. L'équation suivante exprime l'évolution de la batterie avec le rendement $\eta_i < 1$:

$$C(i, k + 1) = C(i, k) + \eta_i \times \delta_b(i, k) E(i, k) + \frac{1}{\eta_i} (1 - \delta_b(i, k)) E(i, k) \quad (5.36)$$

La vie d'un accumulateur dépend de ses cycles de charge/décharge. Pour limiter le cycle de charge/décharge de la batterie, la gestion de la batterie doit intégrer une contrainte supplémentaire qui limite le cycle de décharge de l'accumulateur. Un seuil d'énergie stockée limite C_{lim} est utilisé. Lorsque $C(i, k) < C_{lim}$, il faut que l'accumulateur reste dans l'état de charge. La variable $\delta_c(i, k) \in \{0, 1\}$ est introduite pour représenter cette logique $[C(i, k) \leq C_{lim}] \Leftrightarrow [\delta_c(i, k) = 0]$. En

conséquence, rester dans l'état de charge jusqu'à ce que l'énergie stockée soit supérieure ou égale à C_{lim} est exprimé sous la forme $[\delta_c(i, k) = 0] \Rightarrow [\delta_b(i, k) = 1]$. Selon (5.2), la transformation conduit à :

$$1 - \delta_c(i, k) - \delta_b(i, k) \leq 0 \quad (5.37)$$

2.4.1 Gestion de l'achat et de la revente d'énergie

Dans le bâtiment, l'énergie produite par un système de production d'énergie locale peut être gérée différemment. Au lieu d'utiliser un moyen de stockage, l'énergie peut être utilisée directement par les services ou revendue à un distributeur d'énergie. Al-Hasan et al. (2004) ont proposé une stratégie d'exploitation de l'énergie locale sans système de stockage. Bakos et al. (2003) ont montré que l'énergie produite par les sources locales peut être vendue sur le réseau : la rentabilité de cette stratégie dépend de la stratégie du distributeur d'énergie. Salas et al. (2006, 2007) ont proposé un critère de qualité de l'électricité revendue pour garantir la qualité du voltage, et de la fréquence.

Dans le contexte actuel, le fournisseur d'énergie est obligé d'acheter l'énergie "propre" d'origine renouvelable à un prix favorable pour encourager la production de ce type d'énergie distribuée. On suppose que $E^{im}(k)$ est l'énergie achetée au réseau durant la période k , $E^{ex}(k)$ est l'énergie exportée vers le réseau. Finalement, l'énergie consommée par le bâtiment est notée $E^{co}(k)$. L'énergie produite localement durant la période k est notée $E^{pr}(k)$.

Il existe deux modes de connexion entre le bâtiment et le réseau :

Mode de revente totale : Toute l'énergie produite par les sources locales est revendue vers le réseau. Toute la consommation d'énergie dans le bâtiment est achetée au fournisseur. Dans ce cas, l'équation d'équilibre de la consommation et de la production s'écrit :

$$\begin{cases} E^{ex}(k) = E^{pr}(k) & \forall k \in \{1, \dots, K\} \\ E^{co}(k) = E^{im}(k) & \forall k \in \{1, \dots, K\} \end{cases} \quad (5.38)$$

Mode de revente partielle : Ce mode permet de revendre une partie de la production locale au distributeur d'énergie. La revente peut être faite lorsque l'énergie produite localement est supérieure à celle consommée. On a $[E^{pr}(k) > E^{co}(k)] \rightarrow [E^{ex} > 0]$, ce qui peut se traduire en $\delta_{im}(i, k) = 1 \Leftrightarrow E^{pr}(k) - E^{co}(k) \leq 0$. Cette transformation est effectuée de la même manière qu'en (5.6). On définit une variable semi-continue $E'_{ex}(k)$ comme dans (5.8) :

$$E'_{ex}(k) = [1 - \delta_{im}(i, k)] \times E^{ex} \quad (5.39)$$

Dans ce mode, l'équation d'équilibre entre la production et la consommation s'écrit :

$$E^{co}(k) + E^{ex}(k) = E^{po}(k) + E^{im}(k) \quad (5.40)$$

3 Problème de planification de la production/ consommation d'énergie

3.1 Plan d'affectation des ressources

On rencontre classiquement ce problème dans les systèmes de production, mais aussi en informatique ou en gestion de projet. En général, on se base sur les concepts de tâche, de ressource, de contrainte et d'objectif pour définir un problème d'ordonnancement. "Ordonnancer un ensemble de tâches, c'est programmer leur exécution en leur allouant les ressources requises et en fixant leur date de début". Pour le problème de gestion de flux énergétiques on définit **le plan d'affectation des ressource**.

Définition 9 *Le plan d'affectation des ressources énergétiques correspond à une affectation des ressources énergétiques à l'ensemble des équipements pour réaliser un ensemble de services.*

Le plan d'affectation des ressources énergétiques est formulé dans le cadre de la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment. Il est calculé grâce à un ensemble de méthodes de coordination des activités de consommation et de production d'énergie pour optimiser des critères de coût, de confort et d'écologie en respectant les contraintes imposées dans le système.

On suppose que le bâtiment dispose d'un ensemble de I services $Srv(i), i \in \{1, \dots, I\}$. Le problème d'affectation de ressource consiste à chercher l'énergie affectée sur tout l'horizon du plan d'affectation. On doit chercher $E(i, k)$ avec $i \in \{1, \dots, I\}, k \in \{1, \dots, K\}$ pour optimiser les critères détaillés ci-dessous.

3.2 Critères d'optimisation

Le problème de gestion de l'énergie est un problème d'optimisation multi-critères dont les critères sont contradictoires. Il faut déterminer une solution satisfaisant l'ensemble des contraintes du système et atteindre le meilleur compromis entre les différents critères.

3.2.1 Critères économiques

Critère du coût total Supposons qu'on a un ensemble de I' sources, l'énergie produite par la source i durant la période k est notée $E(i, k)$. L'énergie vendue au réseau est notée $E^{ex}(k)$. Le critère de coût énergétique s'écrit :

$$J_1 = \sum_{i=1}^{I'} \sum_{k=1}^K C(i, k) \times E(i, k) - \sum_{k=1}^K C^{ex}(k) \times E^{ex}(k) \quad (5.41)$$

Avec $C(i, k)$ est le coût unitaire d'énergie produite par la source i , $C^{ex}(k)$ le coût d'énergie de revente d'énergie locale produite au réseau.

3.2.2 Critères de confort

Critère de confort pondéré Chaque service énergétique a une fonction de satisfaction $f(S_i)$ et sa pondération $w(i)$. Le critère de pondération de la satisfaction des services est défini par :

$$J_2 = \sum_{i=1}^I w(i) \times U(Srv(i)) \quad (5.42)$$

3.2.3 Critère écologique

L'effet de serre est causé par la présence, dans l'atmosphère, de gaz qui absorbent et réémettent une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, conduisant ainsi à un échauffement de la partie basse de l'atmosphère. Le critère écologique est défini en fonction des ressources utilisées. Par exemple, l'électricité livrée par le réseau donne une émission de $66g/kWh$ de CO_2 dans l'atmosphère dans la période creuse et $383g/kWh$ en période pleine (Angioletti et Despretz, 2003b). Au lieu d'utiliser l'énergie importée par le réseau, l'utilisateur peut choisir d'utiliser l'énergie qu'il produit ou bien réduire sa consommation en période pleine.

Supposons qu'on a un ensemble de I' sources, $\tau_{CO_2}(i, k)$ est le volume de CO_2 émis durant la période k . Ce critère s'exprime sous la forme :

$$J_3 = \sum_{i=1}^{I'} \sum_{k=1}^K E(i, k) \times \tau_{CO_2}(i, k) \quad (5.43)$$

4 Conclusion

Nous avons proposé un formalisme général au contexte du bâtiment qui permet de modéliser sous une forme standardisée tous les services qui peuvent correspondre soit à des charges électriques, soit à des sources. Cette structure générique est un modèle dynamique comportant des variables binaires. Ce modèle s'adapte aussi bien aux services permanents comme le chauffage, qu'aux services temporisés tel que le lavage du linge. Plus encore, cette structure permet de modéliser les services de fourniture d'énergie tout autant que les moyens de stockage. Nous avons aussi montré que l'achat et la revente d'énergie pouvait se représenter de la même manière. Les différents critères d'appréciation de performance d'un système domotique ont été formalisés. Cette formulation mathématique permet de poser rigoureusement et sous une forme générale à tout type de logement, le problème de coordination de la production d'énergie avec la consommation.

Chapitre 6

Architecture de conduite retenue

Ce chapitre est consacré à la définition d'une architecture de conduite adaptée au problème de gestion d'énergie dans le bâtiment. L'architecture de conduite doit être adaptée à différentes échelles de temps. En conséquence, la maîtrise de la consommation instantanée doit être appréhendée par un mécanisme de prédiction / ordonnancement prévisionnel et complétée par un système d'ordonnancement temps réel. Le rôle du mécanisme de prédiction / ordonnancement prévisionnel est de rechercher des ordonnancements à moyen/long terme s'appuyant sur les prévisions de consommation pour chacun des équipements ou agrégats d'équipements domotiques, afin d'éviter le recours au délestage dynamique. Pour chaque équipement du système, on estimera les besoins futurs en énergie, en spécifiant ses degrés de liberté, ses prévisions seront transmises au système d'ordonnancement prévisionnel qui aura rôle de construire une organisation des consommations à l'horizon d'une journée. Lorsqu'une contrainte est violée, un mécanisme d'ordonnancement temps-réel ajuste le plan d'affectation des ressources en tenant compte des aspects de sécurité et de confort des usagers. Au cas où les contraintes de confort ne pourraient pas être satisfaites, le système de gestion d'énergie devra être en mesure de rechercher et d'évaluer les différentes options possibles pour ouvrir une négociation avec l'utilisateur.

1 Analyse des besoins pour le mécanisme de pilotage

1.1 Caractérisation temporelle du problème

La plus grande difficulté dans un problème d'affectation de ressources énergétiques dans le bâtiment est la modélisation du temps. Il existe des phénomènes qui exigent un temps de réponse très court, comme la contrainte de ressource maximale qui demande une gestion instantanée des conflits de demande d'énergie. Un mécanisme de pilotage offrant ces propriétés est dit à **capacité réactive**.

En conséquence, l'architecture de contrôle/commande doit avoir une capacité réactive avec un temps de réponse court. Pourtant, il existe également des phénomènes physiques relativement lents comme l'inertie du bâtiment, des variations périodiques comme le prix de l'énergie achetée ou la capacité de production locale d'énergie comme l'énergie solaire par exemple. Le problème est donc périodique. Ainsi, l'architecture de contrôle/ commande doit permettre de gérer ce qui se passe à ces différentes périodes caractéristiques d'un habitat. Cette capacité du mécanisme de pilotage est appelée **capacité anticipative**.

1.2 Incertitudes et aléas

Les perturbations et les incertitudes sont particulièrement importantes dans un problème de gestion d'énergie dans l'habitat. La méthodologie de prédiction présentée dans (Mondol et al., 2007) a montré que l'incertitude de production d'énergie solaire par rapport à la valeur mesurée dans une journée est de 10% à 45%. L'incertitude sur la météorologie cause également des erreurs de prédiction de comportement des services de chauffage et climatisation.

Les aléas existent dans le comportement de l'utilisateur : ils dépendent de ses habitudes et de ces choix. Pour faire face aux aléas et aux incertitudes, le mécanisme de pilotage doit tenir compte des différents types de perturbations de manière explicite ou implicite. Cette capacité est la capacité de **prise en compte des perturbations**.

1.3 Les mécanismes de pilotage existants

L'analyse des exigences pour le mécanisme de pilotage a conduit à retenir les trois caractéristiques suivantes : **la capacité anticipative, la capacité réactive et la capacité de prise en compte des perturbations**.

La plupart des études de la littérature (House et Smith, 1995; Henze et al., 2004b; Zhou et Krarti, 2005) utilisent la commande prédictive pour anticiper une solution pour le système de chauffage et de climatisation dans le bâtiment. Ce mécanisme de contrôle/commande propose une solution pour une journée et souvent est mis à jour en fonction des prévisions météorologiques. Ce type de mécanisme ne tient compte que d'une partie de la consommation dans le bâtiment. La seule capacité anticipative est suffisante pour contrôler le système de chauffage et de climatisation. Pourtant, lorsque la fonction de gestion de l'énergie porte sur toutes les charges et les sources d'énergie locales au bâtiment, la seule commande prédictive n'est pas suffisante pour garantir l'optimalité ou même la faisabilité de la solution face à différents types de perturbations.

Henze et Dodier (2003) se sont intéressés au problème de gestion de l'énergie produite par des panneaux photovoltaïques dans un habitat isolé. Le critère de performance de la solution est la différence entre la production et la consommation modélisé par une fonction quadratique. Dans ce problème, les auteurs considèrent la consommation de l'utilisateur et les conditions météorologiques sont des perturbations. Les moyens d'action sont la charge et la décharge d'une batterie. Pour tenir compte des perturbations, Henze et Dodier (2003) ont mis en place un mécanisme d'apprentissage. Les auteurs ont proposé une stratégie de contrôle/commande adaptative en tenant compte de la consommation et de la prédiction de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques. Le résultat a montré que cette stratégie n'a pas significativement amélioré la gestion de production de l'énergie. Un point faible de cette approche est qu'elle requière des données sur la consommation et la production de plusieurs années pour que la procédure d'apprentissage commence à converger.

La gestion réactive existe sous la forme de systèmes de délestage (Mérieux et Pleynet, 1992) qui permettent de garantir le respect de la limite d'abonnement. Le principe de fonctionnement d'un système de délestage est simple : lorsqu'il détecte la violation de la contrainte de ressource d'énergie, le mécanisme de contrôle / commande désactive successivement des lignes électriques connectées généralement aux radiateurs et au chauffe-eau jusqu'à ce que cette contrainte soit à nouveau respectée.

1.4 Conséquences d'un choix de période de discrétisation

Dans la littérature, les mécanismes de pilotage utilisent un temps de discrétisation unique Δ . Ce temps de discrétisation varie selon l'objectif de gestion de l'énergie. Par exemple, pour un problème d'optimisation d'un système de chauffage et de climatisation, le temps d'échantillonnage est égal à 1 heure dans la plupart des études. En revanche, le mécanisme de pilotage direct s'appuie souvent sur une période de discrétisation d'une quinzaine de minutes.

Choisir un petit Δ : On peut choisir un mécanisme de pilotage cadencé par un petit Δ pour garantir la capacité réactive. Néanmoins, il faut considérer des horizons longs pour les aspects anticipation. En d'autres termes, le problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment devient un problème d'optimisation très complexe et le temps de calcul d'une solution peut dépasser la limite du temps de réponse. Un autre problème apparaît avec les incertitudes et les perturbations qui interviennent et la solution calculée est remise en cause. Une nouvelle solution doit être recalculée et remplacer l'ancienne solution. De plus, travailler sur des périodes courtes requiert des prédictions précises qui ne sont pas disponibles. Comment en effet prévoir le niveau d'ensoleillement qu'il y aura entre 17h et 17h+ Δ alors qu'il est 6 heures du matin ? Comment prévoir le comportement des occupants avec une telle précision ?

Choisir un grand Δ : Pour résoudre les problèmes abordés, on peut choisir un temps d'échantillonnage Δ suffisamment long pour réduire le temps de calcul. Or, dans ce cas, on ne peut pas garantir que le phénomène de violation de contrainte de ressource totale caractérisé par un temps de réponse plus court que Δ est correctement géré.

Choisir les paramètres adaptés : Dans la littérature, le problème du choix de la période d'échantillonnage Δ et d'un horizon temporel adaptés au problème traité existe. (Binder et al., 2001) a proposé une méthode de réglage de Δ pour la commande prédictive d'un procédé chimique. L'objectif est d'obtenir une variable Δ qui puisse garantir la performance de la solution tout en offrant un temps de discrétisation raisonnable et une limite temporelle raisonnable de la procédure d'optimisation. Pourtant, ces études conviennent aux systèmes dans lesquels les phénomènes physiques ont des temps de réponse assez proches. En conséquence, ces études ne sont pas applicables à notre cas. Pour arriver à traiter ces diverses échelles de temps, nous proposons dans la prochaine section, une conception de l'architecture de contrôle/commande multi-échelle.

2 Optimisation multi-échelle

Le terme d'optimisation multi-échelle signifie qu'un problème d'optimisation complexe est décomposé en plusieurs niveaux. Une optimisation multi-échelle est un algorithme hiérarchisé suivant différentes échelles de temps.

2.1 Principe

Définition 10 *Une couche de commande est une partie d'une architecture de pilotage multi-échelle qui est caractérisée par ses objectifs, ses degrés de liberté, son temps de réponse et son horizon temporel. Les couches de commande interagissent par le flux d'information.*

Définition 11 *Une architecture d'optimisation multi-échelle se compose de plusieurs **couches de commande** pour diviser le problème d'optimisation en sous-problèmes. Entre les couches de commande, un flux d'information est utilisé pour échanger contraintes, consignes et messages d'urgence.*

La conception d'un système d'optimisation multi-échelle permet de répondre aux trois besoins propres aux systèmes de gestion de l'énergie dans le bâtiment. Résoudre un problème par couches de commande permet de construire une solution intégrant les informations disponibles à différents niveaux d'abstraction. En calculant une solution au niveau le plus élevé, c'est-à-dire avec la période d'échantillonnage la plus longue, on peut prendre en compte les prédictions les moins précises. Ensuite, la solution du problème est affinée du niveau de la couche de commande ayant un niveau d'abstraction plus bas en mettant à jour la solution déjà calculée. En descendant les couches de commande, on réduit ainsi petit à petit le niveau d'abstraction. La solution tend de plus en plus vers la consommation réelle des équipements dans le bâtiment.

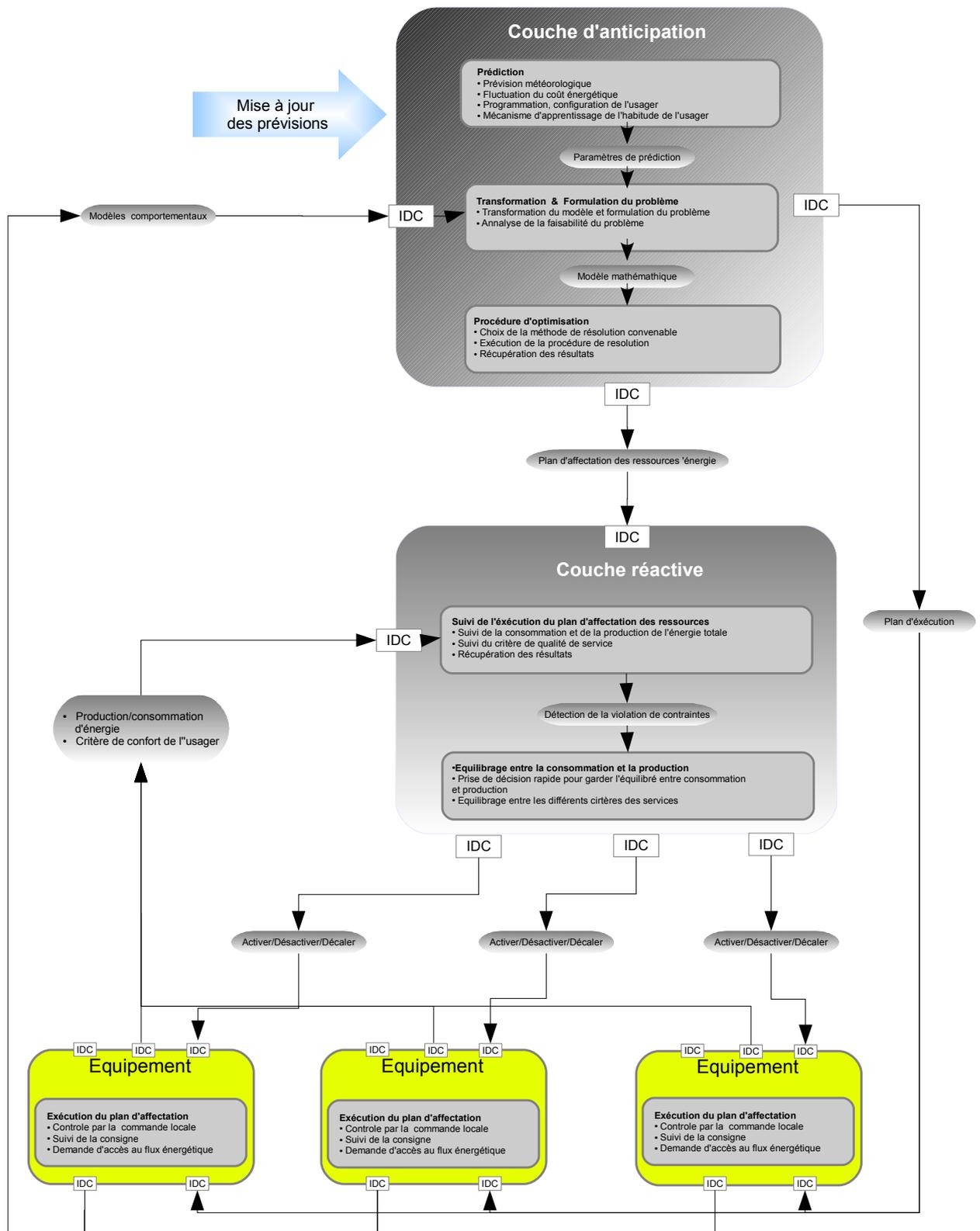


FIG. 6.1 – Mécanisme de pilotage multi-échelle pour le système de gestion de l'énergie dans le bâtiment (IDC : Interface de communication)

Ce mécanisme se compose de plusieurs couches de commande. On les distingue en fonction de l'horizon d'optimisation et des différentes périodes d'échantillonnage :

- on peut introduire des couches de commande plus abstraites pour intégrer des informations couvrant des horizons d'une semaine ou plus. La couche d'anticipation vise à planifier la consommation et la production d'énergie lorsque des événements sont prévus quelques heures ou une journée à l'avance. L'horizon de cette couche de commande est typiquement d'une journée et la période d'échantillonnage est de l'ordre de l'heure.
- la couche réactive est un complément à la couche anticipative. Elle aide la couche anticipative à réaliser le plan d'affectation des ressources d'énergie en tenant compte des contraintes énergétiques et du confort de l'utilisateur. La couche réactive a un horizon temporel court de l'ordre de la minute mais un temps de réponse beaucoup plus rapide que celui de la couche anticipative pour absorber les perturbations.
- la couche de commande locale est liée au système de contrôle/commande de l'équipement. Son rôle est d'appliquer les consignes provenant de la couche réactive.

2.2 La couche d'anticipation

Le mécanisme d'anticipation est la couche de commande ayant le niveau d'abstraction le plus haut dans l'architecture de conduite. Cette couche joue le rôle de planification et d'affectation des ressources énergétiques pour des valeurs globalisées (sur des périodes de temps longues). Le temps de discrétisation de cette couche de commande est noté Δ_a . Il s'occupe de préparer à l'avance un plan de consommation et de production d'énergie pour un horizon temporel noté H qui est la durée du plan de planification. Le principe de cette couche de commande est d'organiser la production et la consommation d'énergie de manière prédictive ou proactive lorsque des événements sont prévus. La prédiction repose sur des prévisions météorologiques et des programmations des services par l'utilisateur. Le mécanisme d'anticipation va fonctionner sur un horizon H . Le calcul d'anticipation sera repris lorsque de nouvelles prévisions seront disponibles. Cela revient à faire glisser l'horizon de cette couche de commande. Il y a, d'une part certains services capables d'emmagasiner de l'énergie sous forme thermique et d'autre part, certains services qui disposent d'un délai variable quant à leur exécution. À partir de ces constatations préliminaires, il est possible d'imaginer que si la consommation de l'ensemble des équipements peut être prévue, il existe alors un moyen de mieux l'organiser. Par exemple, pour un environnement thermique, il est possible de calculer la durée et la quantité de surchauffe "anticipée" qui permettrait de réduire la consommation pendant une période où l'énergie est indisponible ou restreinte. De même, si un service peut être retardé ou avancé, il y a là encore moyen d'organiser la consommation globale.

2.3 La couche réactive

Du fait que la couche d'anticipation travaille sur des valeurs moyennes, un niveau plus proche de l'équipement est nécessaire pour tenir compte des valeurs réelles de consommation. Une échelle de temps très courte est nécessaire pour éviter que ponctuellement les contraintes soient violées : c'est le mécanisme de protection, son rôle est de distribuer la ressource moyenne affectée par le niveau anticipatif en prenant en compte également le critère de confort et le respect des contraintes de capacité de ressource en temps réel. C'est le mécanisme qui donne le droit d'accès aux flux énergétiques mais sans intervenir au niveau de la commande locale de l'équipement. Pratique-

ment, si la ressource d'énergie est indisponible ou restreinte, la couche réactive va intervenir en désactivant la consommation de certains services et en équilibrant la consommation et la production d'énergie. Puisque l'échelle de temps est faible comparée à la couche d'anticipation, les ajustements calculés par la couche réactive restent, si les prédictions sont bonnes, négligeables pour la couche anticipative qui ne calcule que des valeurs moyennes.

2.4 La couche de commande locale

Un équipement comporte souvent un système de contrôle/commande embarqué lors de sa fabrication. Cette couche de commande est la couche de commande ayant le plus bas niveau d'abstraction. Par exemple dans les environnements thermiques, c'est une boucle de contre-réaction propre à l'équipement, fonctionnant en commande tout ou rien pour maintenir la température d'un environnement thermique à des valeurs proches de la température de consigne.

Les objectifs de cette couche de commande sont d'exécuter les consignes qui ont été calculées par la couche d'anticipation, éventuellement ajustées par la couche réactive.

Du fait des perturbations et de la précision du modèle de comportement de l'équipement utilisé dans la couche de contrôle/commande, la solution calculée peut être différente de la solution exécutée en réalité.

3 Conclusion

Ce chapitre expose l'architecture de conduite que nous proposons pour la gestion de l'énergie dans le bâtiment. Cette architecture se décompose en trois couches. La couche de commande locale est propre aux équipements et n'est pas remise au cause : elle reste de la responsabilité du fabricant. La couche réactive fonctionne à une échelle de temps rapide de l'ordre de la minute. Elle constitue une forme de délestage dynamique et a pour fonction d'adapter les consignes déterminées par la couche d'anticipation. Cette dernière couche travaille à une échelle de temps lente, de l'ordre de l'heure, pour être compatible avec la précision des prédictions qu'il est possible d'obtenir. La fonction de cette couche est de déterminer des plans d'affectation de la ressource d'énergie en raisonnant sur des grandeurs moyennes. L'ajustement du plan en temps réel est assuré par les deux couches inférieures : réactive et locale. Cette architecture permet d'appréhender des phénomènes décrits avec différentes échelles de temps. Les couches d'anticipation et réactive vont être examinées en détail dans la suite du mémoire.

Troisième partie

Approches de résolution

Il faut tenir à une résolution parce qu'elle est bonne, et non parce qu'on la prise.

La Rochefoucauld

Approche de résolution pour la couche d'anticipation

1 Introduction

La commande prédictive ([Richalet et al., 1978](#)), déjà très utilisée dans l'industrie, reste un thème de recherche actuel dont la théorisation est plus récente que les applications. Le point faible de la commande prédictive est qu'elle demande une grosse quantité de calcul. En conséquence, elle est convenable pour des systèmes ayant un temps de réponse qui est relativement grand ou qui ont une complexité faible.

Dans la littérature, il y a eu plusieurs études qui ont identifié l'intérêt du décalage des charges de périodes pleines à des périodes creuses pour réduire le coût énergétique. L'idée de profiter de l'inertie des bâtiments pour décaler une partie de la consommation des systèmes de chauffage et de refroidissement a été premièrement publiée dans ([Hartman, 1980](#)). L'auteur est persuadé que le bâtiment peut profiter des "refroidissements gratuits" la nuit. Dans une certaine mesure cette énergie peut être stockée dans l'enveloppe du bâtiment et déchargée dans la journée. La première comparaison entre le contrôle conventionnel et la stratégie de pré-refroidissement de bâtiment a été publiée dans ([Nizet et al., 1985](#); [Kintner, 1995](#)). Les auteurs ont constaté que le gain économique de cette stratégie peut atteindre de 6% à 18% (les résultats ont montré que le gain économique varie en fonction de conditions météorologiques et tarifaires). Ensuite, des études dans ([Kintner, 1995](#); [Henze et al., 2004a](#)) et ([Henze et al., 2004b](#)) ont montré que les résultats peuvent être améliorés par l'utilisation de systèmes de stockage thermique actifs, comme le ballon d'eau froide, pour augmenter l'inertie du système.

Ces études ont souvent pour point commun, la formulation du problème en un problème d'optimisation en temps discret. Toutes les variables de contrôle-commande sont calculées à chaque période d'échantillonnage. La durée d'une période échantillonnage est Δ . Le critère économique J est composé de deux parties : le coût cumulé de la consommation d'énergie J_1 et le coût supplémentaire pour le pic de consommation J_2 (certaines études ont traité seulement ou séparément de J_1 et J_2 , certaines traitent les deux en même temps).

$$J = \underbrace{\sum_{k=1}^K C_k \times E_k}_{J_1 : \text{Coût de la consommation d'énergie totale}} + \underbrace{E_{max} \times C_{pic}}_{J_2 : \text{Coût du pic de consommation}} \quad (7.1)$$

Où

- k est l'index de la période échantillonnage et K le nombre de périodes d'échantillonnage
- E_k est l'énergie consommée totale dans durant période $[k \times \Delta, (k + 1) \times \Delta]$,
- C_k est le coût de l'énergie durant la période $[k \times \Delta, (k + 1) \times \Delta]$
- $E_{max} = \text{Max}(E(k), \forall k \in \{1, \dots, K\})$ est la puissance consommée maximale dans une période (en général 24h)
- C_{pic} est le coût supplémentaire pour la demande de puissance maximale du bâtiment

Hypothèses utilisées

- Les études dans la littérature ont choisi généralement un cas particulier : le bureau commercial dans (Zhou et Krarti, 2005) et (Henze et al., 2004b), les pièces d'un logement dans (Nagai, 2001).
- Les services énergétiques pris en compte sont la climatisation et le refroidissement centralisé du bâtiment. La thermodynamique dans les bâtiments sont différents mais en général, les modèles sont relativement simplifiés. Le plupart des auteurs ont modélisé la zone thermique par un modèle continu du deuxième ordre.
- En général, les études réalisées se basent sur des simulations de 24h en utilisant deux hypothèses fortes : la prédiction des conditions météorologiques (la variation de température externe et le rayonnement solaire) est parfaite et le modèle thermique du bâtiment correspond parfaitement au modèle utilisé pour l'estimation.
- Les variables de contrôle sont souvent les températures des environnements thermiques (Kintner, 1995) a proposé de tenir compte de l'humidité de l'air dans la zone occupée.

La méthode d'optimisation utilise le contrôle optimal basé sur une optimisation linéaire quadratique. Pour appliquer cette méthode, le critère J_1 doit être transformé :

$$J_1 = \alpha \sum_{k=0}^K C_k^2 + \beta (T_{in,k} - T_{ref,k})^2 \quad (7.2)$$

- $T_{in,k}$ est la température intérieure de la zone thermique durant la période k
- $T_{ref,k}$ est la température demandée par l'utilisateur.

La limite de cette méthode est que le critère doit être transformé en une forme quadratique. Cette méthode ne permet pas de minimiser le pic de consommation.

Pour éviter ces désavantages, (Nagai, 2001) a utilisé la technique de la programmation dynamique. La programmation dynamique a été inventée dans (Bellman, 1957). Elle est l'une des méthodes les plus appliquées dans la résolution du contrôle optimal. Pour utiliser cet algorithme, on doit discrétiser les variables continues en variables discrètes. Les détails sur l'application de cet algorithme se trouve dans (Ha et al., 2006) ou (Henze et al., 2004b). Cette discrétisation peut conduire à une solution approchée.

Ces études ont souvent utilisé des cas d'études simples composés d'une seule pièce, la contrainte de ressource d'énergie maximale n'étant pas prise en compte. Par contre, on trouve rarement des études expérimentales pour le contrôle de systèmes de chauffage, refroidissement. L'impact de l'incertitude des prévisions sur la solution obtenue est aussi analysé dans (Henze et al., 2004a). Les résultats montrent qu'une mauvaise prédiction peut conduire à la remise en cause de l'optimalité de la solution obtenue. Dans une étude d'expérimentation en Floride (États-Unis), (Ruud et al., 1996) a montré que le gain économique obtenu par la stratégie de

pré-refroidissement du bâtiment ne peut pas atteindre le gain calculé théoriquement. La raison principale est que l'humidité importante dégrade les performances.

Remarques : Dans la littérature, les méthodes d'anticipation pour la gestion de l'énergie traitent souvent un cas particulier. Aucune méthode ne conduit à une solution globale. Dans la suite de ce chapitre, nous allons présenter notre proposition pour la méthode d'optimisation dans la couche d'anticipation. Nous voulons développer une méthode de résolution globale qui permette de couvrir la plupart des cas rencontrés dans un problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment.

2 Analyse du problème vis à vis de sa réduction

Dans cette section, nous effectuons une analyse complète du problème avant de proposer une méthode de résolution. L'analyse de l'interaction entre les différents éléments du problème permet de mieux traiter le problème en le découpant en sous-problèmes pour faciliter la procédure d'optimisation. Une borne inférieure est également introduite pour mesurer la performance de l'heuristique proposée.

2.1 Analyse des relations temporelles entre les services

2.1.1 Définition

Tout d'abord, en analysant la nature intermittente de la consommation et de la production d'énergie dans le bâtiment, nous cherchons à découper le problème d'affectation des ressources énergétiques en sous-problèmes indépendants. Nous commençons par définir la notion d'horizon d'un service.

Définition 12 *L'horizon du service $Srv(i)$, noté $Hoz(i)$ est un intervalle de temps au cours duquel l'activité énergétique du service peut avoir lieu, soit de production, soit de consommation.*

De par la nature du problème, les activités énergétiques du service $Srv(i)$ couvrent un horizon temporel $Hoz(i) = [\underline{Hoz}(i), \overline{Hoz}(i)]$. Par exemple un service temporisé non-préemptif couvre un horizon temporel délimité par sa date d'exécution au plus tôt $\underline{Hoz}(i) = s_{min}(i)$ et sa date de fin au plus tard $\overline{Hoz}(i) = f_{max}(i)$. Par contre pour un service permanent, la couverture temporelle est tout l'horizon du plan d'affectation des ressources. Les activités énergétiques de deux services différents peuvent interagir directement si et seulement si leurs horizons temporels se croisent. Dans ce cas, la procédure d'optimisation doit tenir compte des deux services en même temps.

Définition 13 *Les deux services $Srv(i)$ et $Srv(i')$ sont considérés comme ayant une relation temporelle directe lorsque $Hoz(i) \cap Hoz(i') \neq \emptyset$. La relation temporelle entre $Srv(i)$ et $Srv(i')$ est notée $\overbrace{Srv(i), Srv(i')} = 1$ si cette relation existe et $\overbrace{Srv(i), Srv(i')} = 0$ sinon.*

Une relation temporelle est une relation qui concerne une paire de services. Même si deux services $Srv(i)$ et $Srv(i')$ n'ont pas de relation temporelle directe, il existe peut-être une relation fictive par transitivité. Par exemple $\overbrace{Srv(i), Srv(i'')} = 1$, $\overbrace{Srv(i'), Srv(i'')} = 1$ bien que $\overbrace{Srv(i), Srv(i')} = 0$. On dit alors que $Srv(i)$ et $Srv(i')$ ont une relation temporelle indirecte.

2.1.2 Graphe des relations temporelles

Les relations temporelles entre les services nous amènent à une représentation des relations temporelles par un graphe non orienté composé d'un ensemble de sommets qui représentent l'ensemble des services concernés et d'arcs connectant les sommets, représentant les relations temporelles entre les services.

Définition 14 *Graphe temporel* $G = \{Arcs, Sommets\}$ est un graphe non orienté composé d'un ensemble de sommets qui représente l'ensemble des services $\{Srv(i)\}$ correspondant et d'un ensemble d'arcs, chaque arc $Arc(i, i')$ représentant une relation temporelle entre les services $Srv(i)$ et $Srv(i')$.

La génération du graphe se fait par l'algorithme 1. Pour illustrer cette transformation, nous proposons un exemple composé de 6 services (voir figure 7.1). L'horizon temporel de chaque service est illustré par un rectangle. La longueur de ce rectangle représente la durée de l'horizon temporel du service. A droite de la figure 7.1, on trouve le graphe des relations temporelles résultant de l'algorithme 1. Avec cette représentation, on arrive à exprimer les relations temporelles de manière explicite.

```

Fonction Génération Graphe de relation temporelle directe( $\{Srv(i)\}, i \in [1, \dots, N]$ ) :
Graphe
   $G$  : Graphe ;
  Pour (i=0 ; i<N ; i++) faire
    Sommet(i) : Sommet ;
    [Créer un nouveau sommet correspondant à un service  $Srv(i)$ ]
    Sommet Sommet(i)  $\leftarrow$   $Srv(i)$  ;
    Ajouter Sommet(i) au  $G$  ;
  Fin Pour
  Pour (i=0 ; i<N-1 ; i++) faire
    Pour (j=1 ; j<N ; j++) faire
      Si ( $\max(\overline{Hoz}(i), \overline{Hoz}(j)) \leq \min(\overline{Hoz}(i), \overline{Hoz}(j))$ ) Alors
        Arc(i, j) : Arc ;
        Ajouter Arc(i, j) au  $G$  ;
      Fin Si
    Fin Pour
  Fin Pour
  Retourner  $G$  ;
Fin

```

ALG. 1: Fonction de génération du graphe des relations temporelles directes

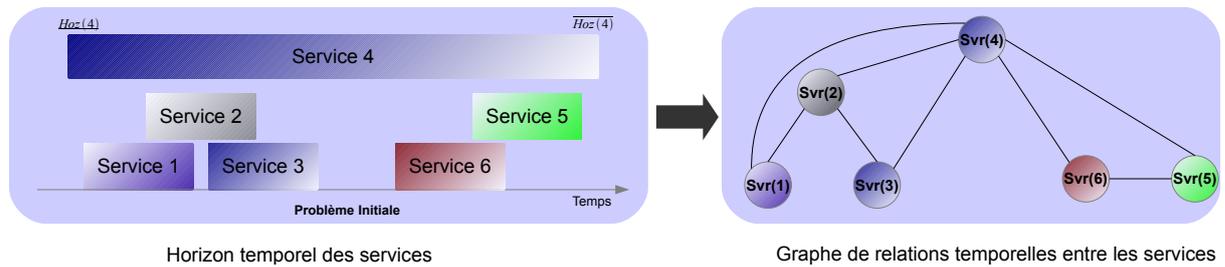


FIG. 7.1 – Transformation d'un problème en graphe de relations temporelles directes

Théorème 1 *Si le graphe de relations temporelles G n'est pas un graphe connexe, le problème initial peut être découpé en sous-problèmes indépendants. La solution optimale du problème initial peut être obtenue à partir de l'assemblage des résultats de la solution optimale de chaque sous-problème.*

Démonstration : Si le graphe G n'est pas connexe (Diestel, 2005), cela signifie qu'à partir d'un sommet quelconque, on ne peut pas parcourir tous les sommets du graphe et retourner au sommet initial. Il existe donc une ou plusieurs parties du graphe qui sont déconnectées. Autrement dit, il n'y a aucune relation temporelle entre ces parties du graphe. En conséquence, chaque partie indépendante du graphe correspond à un sous problème indépendant. On peut obtenir la solution du problème initial par optimisation de chacun des sous problèmes indépendamment en garantissant l'optimalité globale.

Un corollaire du théorème 1 est que sur l'horizon d'un plan d'affectation de ressources, on peut découper en sous-plans ayant des horizons moins grands. Cela permet de réduire de façon significative la complexité en terme de calcul d'optimisation. En appliquant le théorème 1, nous proposons l'algorithme 2 de marquage pour couper le problème initial en sous-graphes indépendants résultants de l'ensemble des services issus de la liste des sommets \mathcal{L}_i .

```

i = 1
Tant que (Tous les sommets ne sont pas marqués) faire
    |  $\mathcal{L}_i$  : Liste des sommets ;
    |  $\mathcal{L}_i \leftarrow$  Choisir un sommet quelconque qui n'est pas marqué ;
    | Tant que (Il existe encore un sommet voisin d'un sommet dans la liste  $\mathcal{L}_i$ ) faire
    | | Ajouter ce voisin dans la liste  $\mathcal{L}_i$  ;
    | Fin Tq
    | i = i + 1 ;
Fin Tq

```

ALG. 2: Algorithme de marquage pour chercher les sous problèmes indépendants

Type de Service	Type de relaxation	Contrainte origine	Relaxation
Service permanent	Relaxation sur la sensation thermique	$T_{min} \leq T_a(k) \leq T_{max}$ $\forall k = 1, \dots, K$	$T_a(k) \leq T_{opt}$ or $T_a(k) \geq T_{opt}$
Service temporisé non préemptif	Relaxation sur la préemption	$E(i, k) = A_{i,k}\delta(i, k)$ $+ B_{i,k}\alpha(i, k)$	$\sum_{i=K1}^{K2} E(i, k)$ $= P(i) \times p(i)$
Service stockage	La batterie a un rendement unitaire	$C(i, k + 1) = C(i, k) +$ $\eta_i \times \delta_b(i, k)E(i, k) +$ $\frac{1}{\eta}(1 - \delta_b(i, k))E(i, k)$	$C(i, k + 1) =$ $C(i, k) + E(i, k)$
Service de revente d'électricité	Mode série \Rightarrow Mode en parallèle	$E'_{ex}(k) = [1 - \delta_{im}(i, k)] \times E^{ex}$ $E^{co}(k) + E^{ex} =$ $E^{po}(k) + E^{im}(k)$	$E^{ex}(k) = E^{pr}(k)$ $E^{co}(k) = E^{im}(k)$

TAB. 7.1 – Relaxation de certains services pour calculer une borne inférieure

2.2 Proposition d'une borne inférieure du coût de l'énergie consommée

Certains problèmes d'optimisation demandent de grosses ressources de calcul. Dans certains cas, il est nécessaire d'interrompre la procédure d'optimisation (temps de calcul trop long, mémoire saturée) sans connaître la meilleure solution obtenue. Une borne inférieure (pour le critère à minimiser) est nécessaire pour avoir une idée de la performance de la meilleure solution courante. Pour les problèmes de gestion d'énergie dans le bâtiment que nous traitons, la formulation est réalisée sous la forme d'une programmation linéaire mixte dans le cas général.

Une relaxation pour réduire le nombre de variables en nombres entiers est proposée (voir le tableau 7.1). Dans le cas des services permanents, en évitant d'ajouter une variable binaire pour distinguer les sensations thermiques froide et chaude, on considère que pour le service de chauffage, la température dans la zone occupée est contrôlée en dessous de la température idéale dans la période à l'énergie coûte cher. Un cas similaire est le service de refroidissement, on cherche à conserver un niveau de température supérieur ou égal à T_{opt} . En conséquence, on peut réduire un nombre important de variables binaires.

Le service temporisé non-préemptif est considéré comme un service préemptif en guise de relaxation. Dans le cas d'un stockage d'énergie, on modélise la batterie idéale comme une batterie optimale en supprimant les variables binaires $\delta_b(i, k)$ qui sont utilisées pour distinguer entre le mode de charge et de décharge. Finalement, le service de revente d'énergie est mis dans le mode parallèle au lieu du mode série pour réduire le nombre de variables binaires $\delta_{im}(i, k)$ qui sont utilisées pour distinguer le choix de vendre de l'énergie au réseau ou non.

Après avoir appliqué ces relaxations, on peut utiliser la programmation linéaire mixte pour calculer une borne. Ces relaxations nous permettent d'avoir une estimation de la solution optimale du problème avant de lancer la procédure de résolution. Bien entendu, on ne pourra peut-être jamais atteindre cette borne en réalité. La solution obtenue par ces relaxations peut être non réalisable si on prend en compte toutes les contraintes. Pourtant cela nous permet d'avoir un indice permettant de décider si on poursuit ou non la procédure d'optimisation.

3 Programmation linéaire en variables mixtes (PLVM)

Après le découpage en plusieurs sous-problèmes indépendants, cette section présente la méthode de résolution du problème par programmation linéaire en variables mixtes. Nous essayons de l'implémenter et de montrer les points forts et également les points faibles de cette méthode. Dans le chapitre 5, nous avons proposé une formulation mathématique qui couvre tous les éléments du problème de gestion de l'énergie dans l'habitat. Pour résumer, si on considère la formulation générale, PLVM est une méthode appropriée pour résoudre ce type de problème. Il est possible d'utiliser des solveurs de programmation linéaire en nombres entiers, comme par exemple le solveur gratuit GLPK (Makhorin, 2006) ou des solveurs commerciaux comme CPLEX (ILOG, 2006) ou encore le solveur de programmation linéaire intégré dans Matlab. Les solveurs ont fait énormément de progrès dans la résolution des problèmes d'optimisation complexes de grande taille. Plusieurs auteurs, dans la littérature, utilisent des solveurs commerciaux pour traiter leur problème d'optimisation.

3.1 L'approche de séparation et d'évaluation

La complexité de la programmation linéaire en nombres entiers est $\mathcal{NP} - \text{Complet}$. Cela signifie que l'on n'a pas trouvé d'algorithme qui permette d'obtenir une solution optimale dans un temps polynomial. La Procédure de Séparation et d'Évaluation (PSE) ou Branch and Bound en anglais (Lawler et Wood, 1966) est une méthode de résolution exacte appropriée à ce type de problème. Cette méthode repose sur deux phases différentes :

- Phase de séparation : il s'agit de diviser l'espace des solutions en plusieurs régions. Dans le cas où les variables en nombres entiers sont des variables binaires, une méthode de séparation souvent utilisée consiste à construire un arbre binaire dans lequel chaque nœud correspond à une variable binaire.
- Phase d'évaluation : dans cette phase, pour chaque région de l'espace des solutions, on essaie d'évaluer une borne inférieure du critère de minimisation. Lorsque cette borne est dépassée par la meilleure solution courante, cela signifie qu'il n'est pas intéressant de continuer de chercher à améliorer la solution dans cette région. Cette procédure d'évaluation permet d'éliminer des branches de l'arbre pour éviter d'explorer tout l'espace des solutions.

Nous commençons notre démarche par l'utilisation de ces solveurs en profitant de leur plus gros avantage : implémentation rapide en utilisant les procédures de séparation et d'évaluation intégrée au solveur, en sachant que pour l'approche PSE, dans le pire des cas, le temps de calcul peut devenir exponentiel en fonction du nombre de variables binaires. Dans une première étape, nous avons implémenté une méthode de résolution en utilisant la méthode de PSE intégrée à GLPK.

3.2 Exemples d'application de la PLVM

Exemple 1 : Considérons l'exemple d'un plan d'affectation de l'énergie dans le bâtiment durant 24h, il s'agit d'affecter la ressource énergie à 4 services différents :

- $Srv(1)$ est un service de chauffage. Le modèle de la zone thermique a été proposé dans le chapitre 4, le temps d'échantillonnage T_e égal à 1 heure. La zone thermique est occupée dans la période de 18h à 6h du matin. On suppose que cette période d'occupation est donnée par l'utilisateur par la pré-programmation. Dans cet intervalle, le critère de sensation

thermique $U(1)$ de l'utilisateur n'est pris en compte.

$$\begin{bmatrix} T_a(k+1) \\ T_m(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2993 & 0,6855 \\ 0,2025 & 0,7936 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a(k) \\ T_m(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,015 & 1,264 & 0,44 \\ 0,004 & 0,336 & 0,116 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ \phi_r \\ \phi_s \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

- le service $Srv(2)$ est un service temporisé préemptif. L'horizon temporel de $Srv(2)$ est $Hoz(3) = [3, 22]$. Ce service simule la consommation électrique d'un chauffe-eau. La puissance consommée maximale est de 2kW et l'énergie nécessaire pour stocker est de 7,5kWh. On a la flexibilité de découper sa consommation dans son horizon temporel.
- le Service $Srv(3)$ est un service non-préemptif, mais on a la possibilité de décaler ce service en respectant la contrainte temporelle $f_{min}(3) = 10,5$, $f_{max}(3) = 16$, $f_{opt} = 13,6$. La durée du service est de 1h et $P(3) = 2kW$. Le décalage de la date de fin f par rapport à la date de fin optimale f_{opt} induit une dégradation du confort pour le service $Srv(3)$. Ce confort est représenté par le variable $U(3)$.
- finalement, $Srv(4)$ est un service de source permanente, le coût de production varie en fonction de l'horaire creuse ou pleine. Le coût de l'énergie dans la période k est $C(4, k)$ et $E(4, k)$ est l'énergie produite par cette source durant la période k . La capacité de production maximale est fixée à $E_{max}(4) = 2kW$ par période.
- La consommation des services ne doit pas dépasser cette limite :

$$\sum_{i=1}^3 E(i, k) \leq E_{max}(4) \quad (7.4)$$

L'objectif est de minimiser le coût total du plan d'affectation des ressources en gardant le confort à un bon niveau, en jouant sur la température de $Srv(1)$, le décalage du service $Srv(3)$ et en utilisant la préemption du service $Srv(2)$. Le critère retenu est donné par :

$$J = \sum_{k=1}^K (E(4, k) \times C(4, k)) + U(1) + U(3) \quad (7.5)$$

Après l'analyse des relations temporelles, on obtient un graphe de relations temporelles fortement connexe. Donc, on ne peut pas découper ce problème en sous problèmes indépendants. Ce problème est formulé comme dans le chapitre 5. On obtient un programme linéaire mixte composé de 474 variables dont 24 variables binaires et un nombre de contraintes égal à 470. L'implémentation de la résolution de ce problème avec le solveur GLPK donne une solution optimale (voir la figure 7.2) après 142s de calcul en utilisant un ordinateur de type Pentium IV 3,2Ghz. Le résultat montre l'adaptation du plan d'affectation des ressources en fonction de la prédiction des éléments externes. Par rapport au prix de l'énergie, une forte consommation dans la période creuse peut être observée. La température dans la pièce est anticipée en fonction de la température extérieure concernant le coût de service, $Srv(1)$ commence à consommer de l'énergie avant la période d'occupation de la zone thermique pour profiter du prix de l'énergie favorable en période creuse.

Nous continuons avec différents exemples générés aléatoirement. On peut constater que le temps de calcul de GLPK augmente rapidement en fonction du nombre de variables binaires du problème. Le temps de calcul est assez difficile à prédire, sur les deux exemples de même taille, on peut aboutir des temps de calcul très différents (exemple 3 et exemple 4 sur le tableau 7.2).

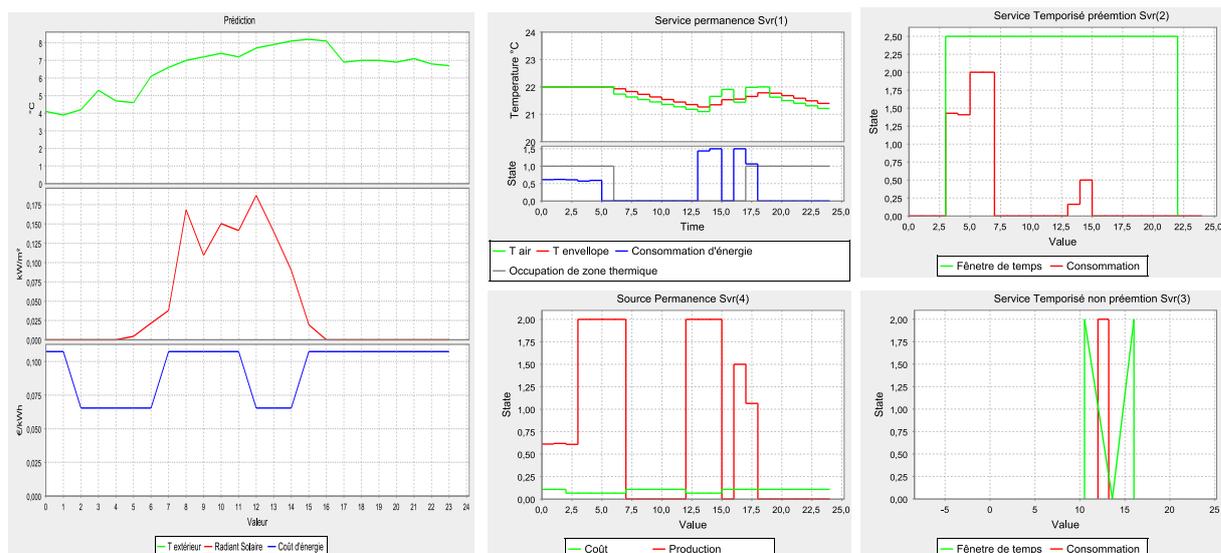


FIG. 7.2 – La solution optimale pour l'exemple 1 en utilisant GLPK

Exemple	Nombre de variables	Nombre de contraintes	Temps de calcul
Exemple 1	201 variables, 12 variables binaires	204	1,2s
Exemple 2	316 variables, 20 variables binaires	318	22s
Exemple 3	474 variables, 24 variables binaires	479	144s
Exemple 4	474 variables, 24 variables binaires	479	32m
Exemple 5	1792 variables, 91 variables binaires	1711	>24h

TAB. 7.2 – Résultats de la programmation en nombres entiers

Sur l'exemple 5, après une journée de calcul, la recherche se termine à cause d'une saturation de la mémoire du calculateur.

Nous constatons que la programmation en nombre entier est très efficace pour les problèmes de petite taille. Par contre, elle demande souvent un gros espace de mémoire vive pour effectuer les calculs pour les problèmes de moyenne à grande taille. Dans certains cas, la procédure de résolution peut tomber dans une phase de saturation et ne permet plus d'améliorer la solution après des heures de calcul. Nous allons donc chercher à améliorer la méthode de résolution du problème. Nous abordons alors la notion de métaheuristique hybride dans la section suivante.

4 Approche de résolution par les Métaheuristiques hybrides

Continuons avec pour objectif de toujours améliorer la performance de la méthode de résolution. La tendance actuelle est de combiner plusieurs méthodes de résolution pour obtenir de meilleurs résultats. Dahal et al. (2006) ont introduit une combinaison entre l'algorithme génétique et la méthode de résolution exacte pour résoudre le problème d'ordonnancement dans le système de production d'électricité. Dans (Glover et Laguna, 1997), la combinaison entre la programmation en nombres entiers et la recherche tabou est abordée par plusieurs types de

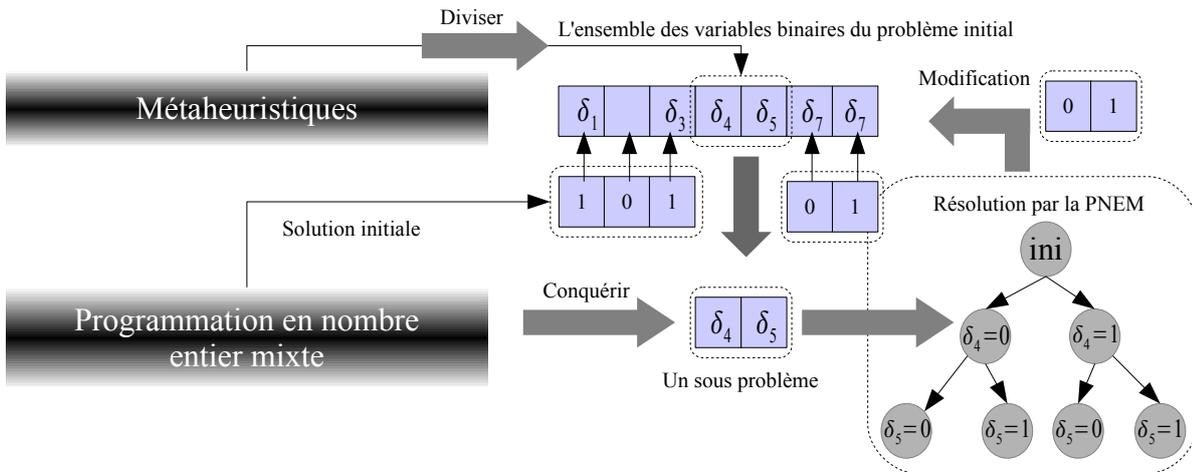


FIG. 7.3 – Principe de "Diviser et Conquérir" des métaheuristiques hybrides

techniques.

Du fait des nombreuses définitions de *métaheuristique hybride* existant dans la littérature, nous précisons la façon dont nous l'entendons dans ce chapitre.

Définition 15 Une *métaheuristique hybride* est une approche résultant de la combinaison d'une *métaheuristique* et d'une *méthode de résolution exacte*. La *métaheuristique* consiste à décomposer le problème complexe en un ensemble de sous problèmes de complexité moindre. La *méthode exacte* permet ensuite de trouver la meilleure solution ou la solution optimale aux sous-problèmes.

Bien évidemment, cette approche est développée en visant une adaptation à la nature du problème de maîtrise de l'énergie dans le bâtiment. Mais, elle reste suffisamment générale pour être appliquée dans d'autres problèmes d'optimisation combinatoire. Nous proposons une démarche générale pour la conception de l'approche hybride qui est composée de trois phases principales (voir illustration de l'algorithme 3) :

- **Phase 1 - Recherche d'une solution admissible** On utilise la PLVM pour trouver rapidement une solution admissible. Dans cette phase, la méthode de branchement par la recherche en profondeur d'abord est préférée.
- **Phase 2 - Convergence rapide vers une bonne solution** Pour améliorer la performance de la méthode, l'idée principale est de partir de la meilleure solution courante en appliquant le principe de "diviser et conquérir" (voir la figure 7.3) en s'appuyant sur un algorithme hiérarchisé combinant métaheuristique et PLVM : on fige l'assignement de valeur pour un certain nombre de variables en nombres entiers pour créer un ensemble de sous-problèmes. Un sous-problème correspond au problème initial mais dans lequel certaines variables en nombres entiers ont déjà été assignées avec la valeur trouvée dans la meilleure solution courante. Le reste des variables en nombres entiers va être déterminé par la PLVM. Cependant, le nombre de variables en nombres entiers restant doit être un nombre acceptable pour éviter l'explosion combinatoire. Dans cette phase, les métaheuristiques ou les heuristiques vont intervenir pour construire un ensemble de sous-problèmes à partir d'un problème initial et de la meilleure solution courante.

- **Phase 3 - Amélioration éventuelle de la solution et validation** Avec la nouvelle solution obtenue à partir de l'algorithme hiérarchisé de la phase 2, on peut poursuivre la procédure d'optimisation par une nouvelle PLVM. En utilisant la borne supérieure trouvée dans la **Phase 2**, la PLVM peut plus facilement éliminer les branches qui ne mènent pas à la solution optimale. Dans cette phase, la recherche en largeur est utilisée. Lorsque la PSE retombe dans une phase de saturation (mesurée souvent par le nombre d'itérations sans amélioration), on retourne dans la phase 2.

```

P : Problème [Le problème initial]
S* : Solution [La meilleure solution courante]
Phase 1 : Chercher une solution admissible
Tant que ( $S^*$  n'est pas une solution admissible) faire
    [Continuer la recherche en profondeur d'abord]
     $S \leftarrow \text{PLVM}(P)$  ;
    Si ( $S$  est meilleure que  $S^*$ ) Alors
         $S^* \leftarrow S$  ;
    Fin Si
Fin Tq

Phase 2 : Améliorer la solution obtenue par les métaheuristiques
Tant que (La condition d'arrêt n'est pas satisfaite) faire
    [Créer un sous-problème en limitant le nombre de variables en nombres entiers]
     $\{P'\} \leftarrow \text{Métaheuristique}(P, S^*)$  ;
     $S' \leftarrow$  la meilleure solution de  $\text{PLVM}(\{P'\})$  ;
    Si ( $S'$  est meilleure que  $S^*$ ) Alors
         $S^* \leftarrow S'$  ;
    Fin Si
Fin Tq

Phase 3 : Reprendre la PLVM
Tant que (La condition d'arrêt n'est pas satisfaite) faire
     $S \leftarrow \text{PSE}(P, S \text{ soit mieux que } S^*)$ 
    Si ( $S$  est meilleure que  $S^*$ ) Alors
         $S^* \leftarrow S$  ;
    Fin Si
    [Après un certain temps, la PSE n'améliore pas la solution]
    Si (La condition de saturation est satisfaite) Alors
        Retourner à Phase 2 ;
    Fin Si
Fin Tq
Exporter  $S^*$  ;

```

ALG. 3: Conception de la métaheuristique hybride composée de trois étapes

Suivant ce principe, pour résoudre la phase 2, nous avons implémenté les trois métaheuristiques connues que sont la recherche tabou, le recuit simulé et l'algorithme génétique. Ces trois

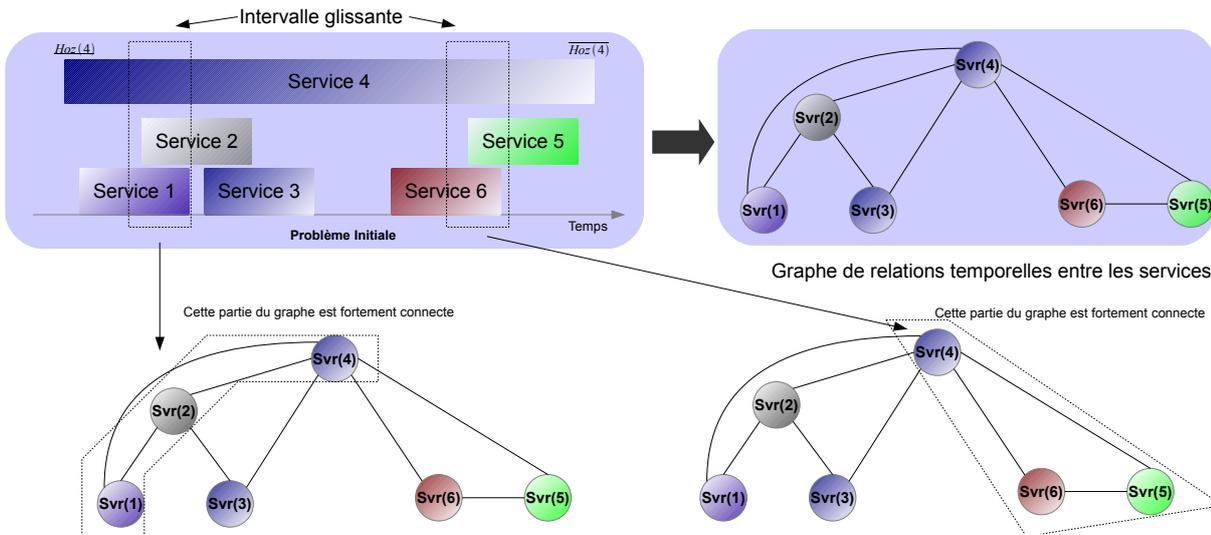


FIG. 7.4 – Illustration de la génération des voisinages par l’algorithme 4

approches reposent sur la notion de structure de voisinage.

Examinons maintenant les trois métaheuristiques que nous avons adaptées.

4.1 Implémentation de la recherche tabou(RT)

4.2 Structure du voisinage

La structure du voisinage détermine comment on crée un nouveau voisinage à partir d’une solution. Cette structure est un élément essentiel dans la conception de RT. Dans cette section, nous proposons une conception adaptée aux problèmes d’optimisation de flux énergétiques dans les bâtiments. Cette conception de la structure du voisinage n’intervient pas au niveau de la programmation linéaire mixte comme dans (Glover et Laguna, 1997) mais à un niveau d’abstraction plus élevé. Il s’agit de déterminer le voisinage à travers une analyse des dépendances temporelles des services. Nous reprenons la notion de graphe des relations temporelles pour expliquer la génération de voisinage : notre idée principale est d’optimiser les services liés par des relations temporelles directes.

Notons $\mathcal{S} = \{Srv(i)\}$ l’ensemble des services du problème considéré.

Définition 16 Une structure de voisinage \mathcal{S}_l est un sous-ensemble de \mathcal{S} .

Soit $Vstruct$ une fonction définissant l’ensemble des structures de voisinage à explorer :

$$Vstruct : \mathcal{S} \mapsto \{\mathcal{S}_l; \mathcal{S}_l \subseteq \mathcal{S}\}$$

Pour construire une fonction $Vstruct$ pertinente et générer les structures de voisinage à explorer, on peut utiliser une fenêtre de temps glissante d’une durée d_{itv} qui permet de vérifier la relation temporelle entre différents services.

A partir d’une solution courante S et d’une structure de voisinage \mathcal{S}_l , on peut calculer grâce à un algorithme PLVM la meilleure solution du voisinage : $S' = PLVM(S, \mathcal{S}_l)$.

L'algorithme 4 pour la génération de voisinage est illustré par la figure 7.4. Deux voisinages sont générés suivant la position de la fenêtre glissante Hoz_H . La partie entourée dans le graphe de relations temporelles correspond à ce qui doit être optimisé par la PLVM pour trouver une nouvelle solution.

```

Fonction Générer des voisinages( $S_{ini}$ ) :  $N(S_{ini})$ 
   $k \leftarrow 0$ ;
  Tant que ( $k \times d_{itv} < H$ ) faire
     $Hoz_H \leftarrow [k \times d_{itv}, (k+1) \times d_{itv}]$ ; [Horizon temporel de la fenêtre glissante]
    Pour ( $i=0 ; i < N ; i++$ ) faire
      Si ( $Hoz_H \cap Hoz(i) \neq \emptyset$ ) Alors
        | Ajouter  $Srv(i)$  dans la liste de modification de  $\{Srv(i)\}$ ;
      Fin Si
    Fin Pour
    [Pour éviter les solutions redondantes]
    [ $N\{Srv(i)\}$  l'ensemble de voisinage de  $S_{ini}$ ]
    Si (Si la liste de modifications de  $\{Srv(i)\}$  n'est pas dans  $N\{Srv(i)\}$ ) Alors
      | Ajouter  $S$  dans  $N(\{Srv(i)\})$ ;
    Fin Si
     $k++$ ;
  Fin Tq
  Retourner  $N(S_{ini})$ ;
Fin

```

ALG. 4: Fonction de génération du voisinage de la solution S_{ini}

La **Recherche Tabou** (RT) a été inventée par Glover (1989, 1990). Suite à la proposition de cette méthode, elle a été adaptée pour traiter différents problèmes d'optimisation combinatoire tel le problème d'ordonnancement minimisant le retard pondéré d'une machine (Bilge et al., 2006). Une adaptation de cette méthode pour résoudre les problèmes de satisfaction de contraintes a été implémentée dans (Koji et Toshihide, 1998). Le problème de l'optimisation de la trajectoire de véhicules a été traité par la RT dans (Gendreau et al., 1994, 1999).

La méthode de recherche tabou est une méthode de recherche locale. A chaque itération, elle tente d'améliorer la solution courante. A chaque pas, un voisinage de la solution courante noté $N(S_{ini})$ est généré. On choisit la meilleure solution parmi ce voisinage $S \in N(S_{ini})$ pour remplacer la solution S_{ini} . Pour éviter de tomber dans une solution déjà visitée, une liste de tabou, notée \mathcal{L} , est utilisée. Elle permet de mémoriser les solutions qui ont récemment été visitées par la recherche tabou. La longueur de cette liste est une variable notée \mathcal{T} qui détermine le nombre de solutions stockées dans la liste tabou.

La phase d'intensification consiste à déterminer rapidement une ou plusieurs solutions intéressantes. Autrement dit, elle est utilisée pour chercher un optimum local et effectuer une analyse approfondie pour améliorer la solution courante. Lors de la phase d'intensification, on utilise souvent une liste Tabou courte. La longueur de la liste tabou est choisie arbitrairement de 5% à 10% du nombre de voisinage généré à chaque itération.

La phase de diversification La Recherche Tabou est un cas particulier de recherche locale, comme son nom l'indique, elle a tendance à rester dans un optimum local. La phase de diversification est un mécanisme pour forcer la recherche tabou à explorer des régions qui ne sont pas explorées. En général, ce mécanisme est basé sur une longue liste tabou. Après avoir mémorisé toutes les solutions dans la liste tabou, la recherche doit s'orienter vers des solutions moins intéressantes. A partir de là, on peut atteindre un nouvel optimum local. On considère que la longueur de la liste tabou doit représenter 30% à 50% du nombre de voisinages générés à chaque itération.

Lorsque la longueur de la liste tabou est fixée, la recherche tabou est implémentée selon l'algorithme 5.

```

Fonction Recherche tabou( $S_{ini}$  : Solution,  $\mathbb{T}$  : entier) :  $S'$  : Solution
   $S_k^* \leftarrow S_{ini}$ ;
   $k \leftarrow 1$ ;
  Tant que (La condition d'arrêt n'est pas satisfaite) faire
     $N(S_{k-1}^*) = \text{Génération des voisinages}(S_{k-1}^*)$ ;
    Évaluation  $N(S_{k-1}^*)$  par la PNEM;
    Supprimer les éléments de  $N(S_{k-1}^*)$  qui existent dans la liste Tabou  $\mathcal{L}$ ;
    Si ( $N(S_{k-1}^*) \neq \emptyset$ ) Alors
      Choisir la meilleure solution  $S_k^*$  parmi  $N(S_{k-1}^*)$ ;
      Ajouter  $S_k^*$  dans la liste Tabu  $\mathcal{L}$ ;  $k = k + 1$ ;
    Sinon
      Vider la liste Tabou  $\mathcal{L}$ ;
    Fin Si
    Si (Nombre des éléments dans  $\mathcal{L} > \mathbb{T}$ ) Alors
      Supprimer le premier élément dans  $\mathcal{L}$ ;
    Fin Si
  Fin Tq
Fin

```

ALG. 5: Implémentation de la recherche tabou hybride

4.3 Implémentation du Recuit Simulé

Le **Recuit Simulé** (RS) est une autre métaheuristique basée sur une recherche locale comme la recherche tabou. Par rapport à la RT, le RS est inspirée par un processus utilisé en métallurgie. Ce processus alterne des cycles de refroidissement lent et de réchauffage (recuit) qui tendent à minimiser l'énergie du matériau.

Partant d'une solution donnée, en la modifiant, on en obtient une seconde : soit celle-ci améliore le critère que l'on cherche à optimiser, on dit alors qu'on a fait baisser l'énergie du système, soit celle-ci le dégrade. Si on accepte une solution améliorant le critère, on tend ainsi à chercher l'optimum dans le voisinage de la solution de départ. L'acceptation d'une solution plus mauvaise que la solution de départ permet alors d'explorer une plus grande partie de l'espace de solutions et tend à éviter de s'enfermer trop vite dans la recherche d'un optimum local.

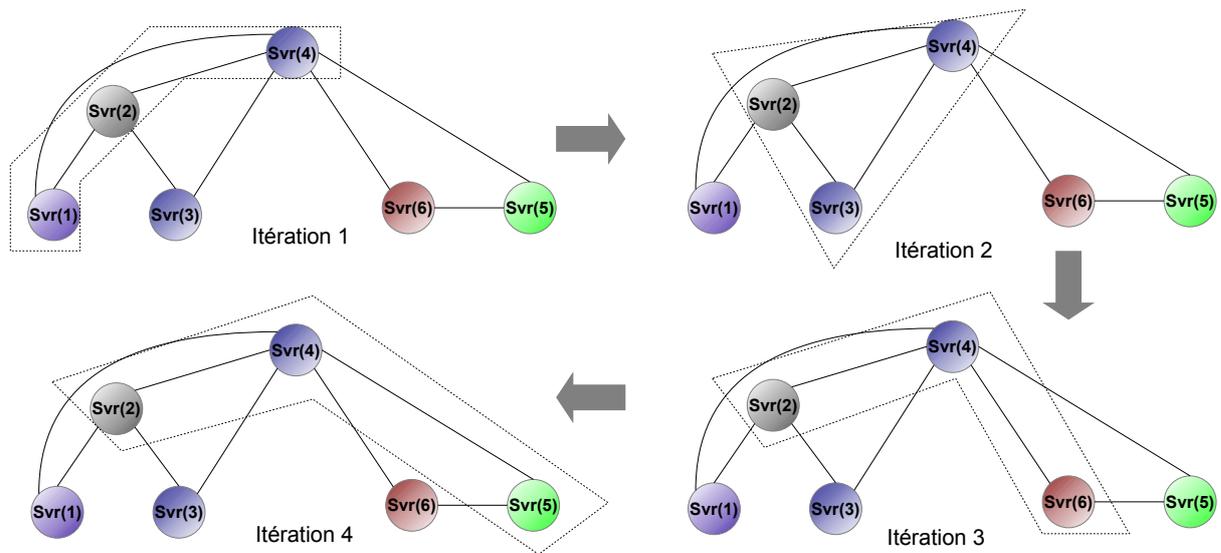


FIG. 7.5 – Évolution du recuit simulé après 4 itérations

La décision d'acceptation ou de rejet d'une solution moins performante dépend d'une procédure de métallurgie fictive. Par analogie avec le processus physique, la fonction à minimiser devient l'énergie \mathcal{E} du système qui est souvent le critère mesurant la performance de la solution. On introduit également un paramètre fictif : la température \mathcal{T} de métallurgie.

En partant de la solution initiale obtenue par l'étape 2 de l'algorithme 3, la procédure de génération de voisinages de la solution initiale est la suivante. On fixe d'abord le nombre de services qui vont être modifiés par la PSE. Ensuite, on choisit un groupe de services quelconque, pourvu que ce groupe forme un graphe de relations temporelles fortement connexe. À chaque itération, on change dynamiquement la structure de ce groupe de services. On ajoute et on supprime quelques services dans le groupe des services à modifier. Ces services sont choisis aléatoirement mais il faut respecter la forte connexité du graphe de relations temporelles.

Une illustration de l'évolution de la modification du recuit simulé sur un exemple est présentée dans la figure 7.5. Le polygone qui couvre une partie du graphe signifie que le groupe de services va être modifié par la PSE dans cette itération. Dans la première itération de RS, le groupe se compose de trois services $Srv(1)$, $Srv(2)$, $Srv(4)$. Dans la deuxième itération, ce groupe se transforme en trois services $Srv(2)$, $Srv(3)$, $Srv(4)$. Avec cette conception du voisinage, on espère guider le recuit simulé pour qu'il modifie la solution d'une manière pertinente.

En comparaison avec la recherche tabou, le recuit simulé est aussi composé de deux phases, l'une d'intensification et l'autre de diversification. Mais le RS a tendance à accélérer la phase de diversification. Lorsque la température \mathcal{T} est haute, le RS est libre de se déplacer dans l'espace des solutions en choisissant des solutions ne minimisant pas forcément l'énergie du système. À basse température, les modifications baissant l'énergie du système sont plus souvent choisies, mais d'autres peuvent être acceptées, empêchant ainsi l'algorithme de tomber dans un minimum local. Dans l'algorithme 6, on laisse la température \mathcal{T} tomber de manière continue pour permettre au RS d'aller progressivement de la phase de diversification à la phase d'intensification. Comme toutes les métaheuristiques, le RS a le même inconvénient par rapport au problème de configuration des paramètres initiaux. Dans cet algorithme, on doit déterminer la température

initiale, et γ , le paramètre qui fixe comment la température \mathcal{T} tombe. Nous avons choisi arbitrairement après expérimentation $\mathcal{T}_{ini} = 20, \gamma = 0.98$. Nous considérons également un cas particulier du recuit simulé dans lequel la température est initialisée à zéro. Dans ce cas là, le RS devient un algorithme glouton qui n'accepte que des solutions améliorant le critère d'optimisation.

```

Fonction Recuit simulé(  $S_{ini}$  : Solution ) :  $S'$  : Solution
   $\mathcal{T} \leftarrow$  Température initiale du recuit simulé ;
  Tant que (La condition d'arrêt n'est pas satisfaite) faire
    Générer le groupe de services  $\{Srv(i)\}$  ;
     $S_{ini} \xrightarrow{\{Srv(i)\}}$   $S'$  ;
     $\mathcal{P} = \begin{cases} 1 & \text{Si } \mathcal{E}(S') < \mathcal{E}(S_{ini}) \\ \exp(-\frac{\Delta\mathcal{E}}{\mathcal{T}}) & \text{Si } \mathcal{E}(S_{ini}) \leq \mathcal{E}(S') \end{cases}$  ;
    Si (aléatoire() $\leq \mathcal{P}$ ) Alors
      |  $S_{ini} \leftarrow S'$  ;
    Fin Si
     $\mathcal{T} = \mathcal{T} \times \gamma$  |  $\gamma$  est une constante,  $\gamma < 1$  ;
  Fin Tq
  Retourner  $S'$  ;
Fin

```

ALG. 6: L'implémentation du recuit simulé

4.4 Implémentation de l'Algorithme Génétique

L'algorithme génétique est une métaheuristique très connue qui a été proposée par (Holland, 1975) comme un modèle de systèmes adaptatifs complexes capables de simuler notamment l'évolution des espèces. Suite aux résultats proposés par cette technique, de très nombreux travaux sur les problèmes d'optimisation combinatoire ont été traités.

4.4.1 Description de l'algorithme génétique

Les algorithmes génétiques s'appuient sur le principe de sélection naturelle, développée au XIX^e siècle par le scientifique Darwin, appliqué à une population de solutions potentielles pour un problème donné. Il consiste à déterminer un ensemble d'individus. Chaque individu correspond à une solution du problème. Ces solutions sont codées de manière appropriée. Un vecteur codant une solution et ses coordonnées est appelée gène. Partant d'une population initiale qui est souvent générée aléatoirement, on essaie de faire évoluer cette population par la reproduction des individus à chaque itération. C'est au cours de cette phase que la loi du plus fort est appliquée : les individus les plus performants ont plus de possibilité pour se reproduire. Le principe de la reproduction se base sur le croisement entre des individus. C'est un élément très important de l'algorithme génétique : il consiste à déterminer comment se mélangent les "gènes" de deux solutions différentes en faisant en sorte que les enfants résultant du croisement constituent des solutions réalisables si leurs parents le sont.

```

Fonction Algorithme génétique( $S_{ini}$  : Solution) :  $S'$  : Solution
   $n \leftarrow 0$   $\mathcal{P}_0 \leftarrow$  Générer la population initiale ;
  Tant que (La condition d'arrêt n'est pas satisfaite) faire
    Sélectionner dans  $\mathcal{P}_n$  des paires solutions performantes ;
    Appliquer l'opérateur de "croisement" qui produit une ou plusieurs solutions
    enfants de chacune des paires ;
    Créer la population  $\mathcal{P}_{n+1}$  en supprimant les individus moins performantes ;
    Appliquer un opérateur de mutation aux solutions obtenues ;
     $n \leftarrow n + 1$ 
  Fin Tq
Fin

```

ALG. 7: Algorithme génétique considéré

4.4.2 Gènes, croisement et mutation

Les "gènes" sont une manière de structurer l'information de la solution pour que l'on puisse les échanger dans la phase de croisement pour obtenir de nouvelles solutions. Le fait de choisir un type de codage approprié est une étape très importante dans l'application d'un AG pour n'importe quel problème. Le fait de modéliser le problème de gestion d'énergie sous la forme d'un graphe temporel nous a donné l'idée de coder les gènes selon une structure binaire. Une structure de codage similaire peut être trouvée dans le problème d'optimisation par les graphes comme par exemple le problème du voyageur de commerce dans (Schmitt et Amini, 1996; Chatterjee et al., 1996), ou le problème d'optimisation de trajectoire de véhicules dans (Malmborg, 1996).

A la différence du problème du voyageur de commerce, nous ne cherchons pas un chemin complet dans un graphe mais une ou plusieurs parties du graphe à optimiser. D'abord, nous devons expliciter quel type d'information doit être codé dans un chromosome d'un individu. Effectivement, on a deux types d'information à intégrer dans les chromosomes :

1. Contrairement à la RT et au RS, avec l'AG, on obtient un ensemble de solutions courantes au lieu d'une seule solution à chaque itération. Chaque individu contient une solution. Cette solution est symbolisée par un losange dessiné au début du chromosome dans la figure 7.6.
2. Un individu contient aussi une méthode de génération de voisinages qui interviendra lors de la phase de croisement. Cette méthode définit est un groupe de services à modifier suivant la démarche de la section 4.2. Ce type d'information peut être représentée par un vecteur binaire illustré dans la figure 7.6. Le parent 1 dans la figure 7.6 a un groupe de services modifiés par la PSE composé de $\{Srv(1), Srv(2), Srv(4)\}$, donc le gène du parent 1 est $\mathcal{G} = \{1, 1, 0, 1, 0, 0\}$. La solution enfant S' est obtenue par $S_{ini} \xrightarrow{\{Srv(1), Srv(2), Srv(4)\}} S'$.

Croisement Le croisement est effectué par des échanges aléatoires de gènes entre deux parents. Pour le gène i correspondant au service $Srv(i)$, il y a 50% de chance pour qu'il corresponde au parent 1 et 50% de chance pour qu'il corresponde au parent 2. A chaque reproduction, deux chromosomes sont ainsi générés (pour éviter les explosions de population), l'un affecté à la solution courante du parent 1 et l'autre affecté à la solution du parent 2. On peut trouver une

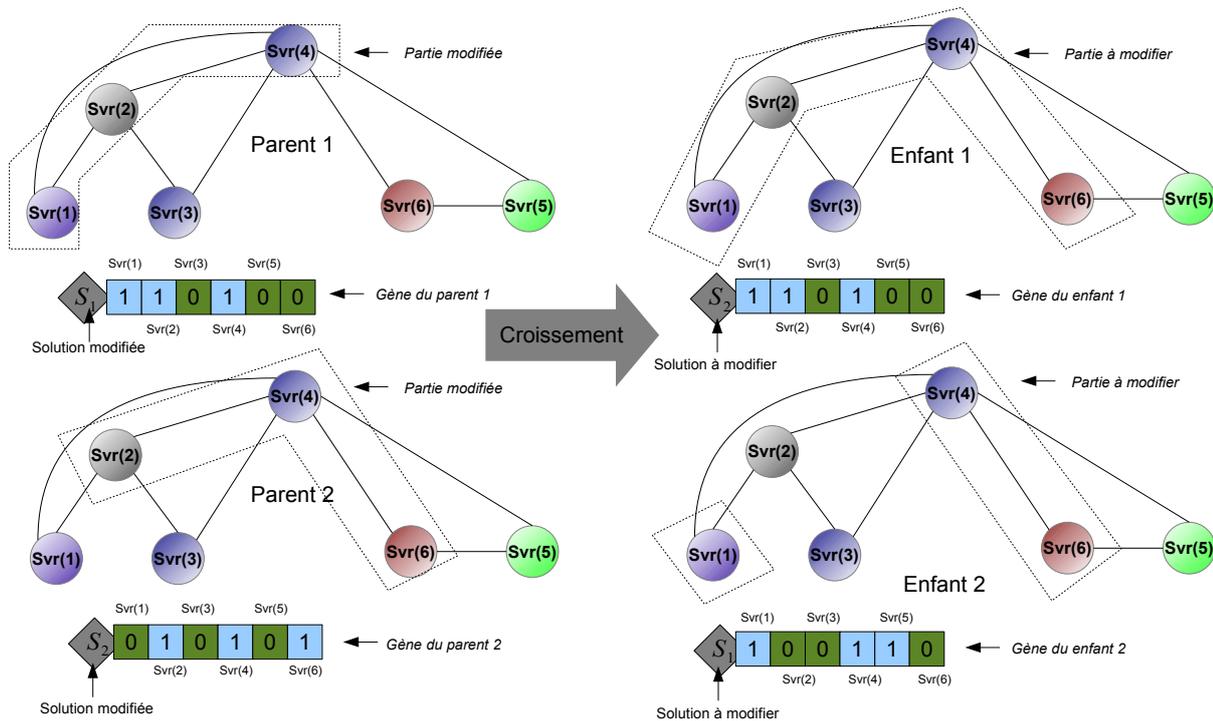


FIG. 7.6 – Illustration du croisement de l'algorithme génétique

illustration de croisement entre deux parents pour reproduire les deux enfants dans la figure 7.6. Ce type de croisement permet de garantir que les enfants sont des solutions réalisables lorsque leurs parents le sont. Dans le pire des cas, la modification est irréalisable et on retrouve les deux solutions des parents.

Mutation La mutation est réalisée en ajoutant ou en enlevant un ou plusieurs services dans le groupe de services à modifier. Cet opérateur agit en changeant aléatoirement les gènes du chromosome de l'individu en ajoutant ou en enlevant un service dans le groupe de services à optimiser.

5 Mise en œuvre

Les métaheuristiques présentées sont implémentées en Java en utilisant une interface communiquant avec le solveur de programmation mixte GLPK. Nous commençons par traiter l'exemple 5 du tableau 7.2 dans lequel la programmation linéaire mixte n'a pas abouti à une solution optimale après 24 heures de calcul. La solution obtenue par la PLVM est de 34% plus grande que la borne inférieure trouvée.

Cet exemple est composé de 5 services temporisés : $Srv(1)$, $Srv(2)$, $Srv(3)$, $Srv(4)$, $Srv(5)$ et de 3 services permanents constitués de 2 services de chauffage $Srv(6)$, $Srv(7)$ et d'un service permanent de fourniture d'énergie $Srv(8)$. L'objectif de cet exemple est de trouver un plan d'affectation de ressources. Il s'agit de fixer la température dans les zones thermiques et la date

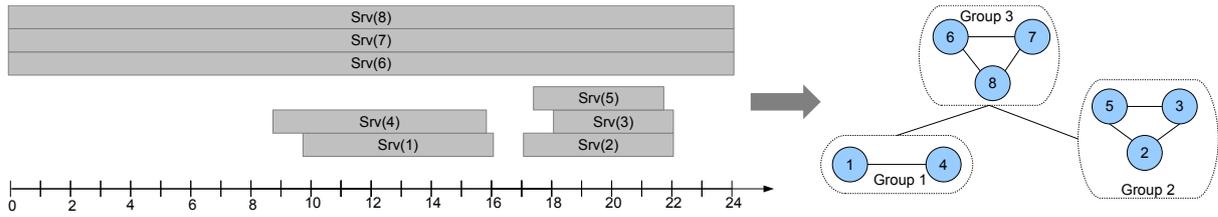


FIG. 7.7 – Graphe des relations temporelles pour l'exemple 5

d'exécution des services temporisés pour minimiser le critère suivant :

$$J = \left(\underbrace{\sum_{k=1}^K (E(8, k) \times C(8, k))}_{\text{Critère économique}} + \underbrace{\sum_{i=1}^4 U(i)}_{\text{Critère du confort}} \right) \quad (7.6)$$

Ce critère résulte de l'agrégation de deux types de critères : le critère économique calculé par le coût de l'énergie produite par le service de source $Srv(8)$ et le critère de confort fonction de la sensation thermique du service de chauffage et du décalage des services temporisés.

On obtient le graphe de relations temporelles de la figure 7.7. Pour faciliter la visualisation, on simplifie le graphe en regroupant certains services. Les liens entre les groupes représentent la forte connexité entre les sommets des groupes. Le groupe 1 est composé de 2 services $\{Srv(1), Srv(4)\}$. Le groupe 2 est composé de 3 services $\{Srv(2), Srv(3), Srv(5)\}$ tandis que $\{Srv(6), Srv(7), Srv(8)\}$ constitue le dernier groupe.

5.1 Recherche tabou

En utilisant la fenêtre glissante de la recherche tabou, 5 voisinages peuvent être générés à chaque itération. Chaque voisinage correspond à un problème de programmation linéaire mixte :

- voisinage 1, engendré par la structure $\{Srv(6), Srv(7), Srv(8)\}$.
- voisinage 2, engendré par la structure $\{Srv(4), Srv(6), Srv(7), Srv(8)\}$
- voisinage 3, engendré par la structure $\{Srv(1), Srv(4), Srv(6), Srv(7), Srv(8)\}$
- voisinage 4, engendré par la structure $\{Srv(2), Srv(5), Srv(6), Srv(7), Srv(8)\}$
- voisinage 5, engendré par la structure $\{Srv(2), Srv(3), Srv(5), Srv(6), Srv(7), Srv(8)\}$

Les tailles des sous-problèmes sont effectivement moins grandes que le problème initial (92 variables binaires). Le sous-problème ayant la plus grande taille est le voisinage 5 (46 variables binaires). La plus petite taille est celle du sous-problème du voisinage 1 (16 variables binaires). Cette méthode de génération de voisinages permet d'éviter de chercher à évaluer des combinaisons inutiles, par exemple, entre les deux groupes de services 1 et 2, les activités énergétiques sont quasiment indépendantes les unes des autres. C'est la raison pour laquelle, la PNEM seule a du mal à résoudre ce problème : elle perd beaucoup de temps à évaluer des combinaisons d'activités des groupes de services 1 et 2.

L'exécution de la RT hybride a duré 131s pour aboutir à une solution approchée (voir la figure 7.8). La différence entre le critère de la solution approchée et celui de la borne inférieure est de 0,4%. Cette déviation est tout à fait acceptable en utilisant un temps de calcul beaucoup

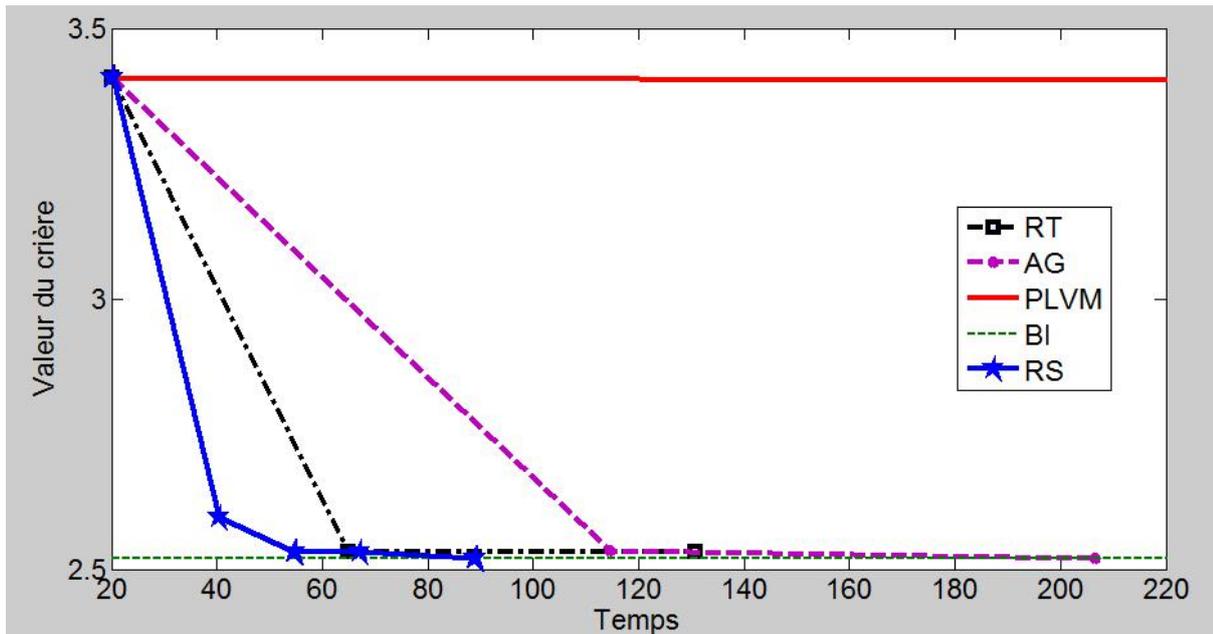


FIG. 7.8 – La vitesse de convergence de différentes métaheuristiques en comparaison avec la PLVM

moins long que la PLVM seule. En comparaison avec la PLVM seule au niveau de la performance du critère d'optimisation du problème, on arrive à l'améliorer considérablement (soit 34%).

5.2 Recuit simulé

La manière de générer des voisinages pour le recuit simulé est légèrement différente dans la façon de regrouper les services. Nous sélectionnons à chaque itération seulement trois services pour être optimisés par la PLVM. Nous commençons par le groupe des services $\{Srv(1), Srv(4), Srv(6)\}$. La composition de ce groupe est choisie aléatoirement mais le nombre de services reste toujours constant. En conséquence, le RS génère des sous-problèmes assez petit par rapport au problème initial. Cela permet d'accélérer la résolution des sous-problèmes par la PLVM. Par contre, si le nombre de services dans ce groupe est trop petit, il peut conduire à des modifications non significatives qui ne permettent pas d'améliorer le critère d'optimisation. Le choix du nombre de services à modifier doit être un compromis entre deux aspects.

L'implémentation du RS sur l'exemple 5 nous donne une solution optimale après 89s de calcul. On arrête la procédure d'optimisation parce que le RS a trouvé une solution ayant un critère d'optimisation égal à la borne inférieure. On constate que le RS est plus performant que à la RT sur cet exemple, et nettement meilleur que la PLVM seule.

5.3 Algorithme Génétique

L'AG est la seule des trois métaheuristiques testées qui n'est pas une recherche locale. Elle doit évaluer un nombre important de solutions qui est égale au nombre d'individus de la population à chaque génération. C'est la raison pour laquelle, on ne peut pas choisir une population initiale trop importante. On considère alors arbitrairement 10 individus à chaque génération. La condition

d'arrêt de l'AG est soit une solution optimale trouvée, soit après 5 itérations sans amélioration.

L'implémentation de l'AG sur l'exemple 5 aboutit à une solution optimale après 206 secondes en 4 itérations. L'AG est plus lent que le RS en trouvant la solution optimale sur cet exemple. Cela provient du fait que l'AG doit évaluer beaucoup plus de solutions pour terminer chaque itération.

Après l'implémentation sur un exemple concret de trois métaheuristiques, on peut constater que la combinaison entre les métaheuristiques et la PLVM nous donne des méthodes de résolution puissantes en comparaison avec la PLVM seule au niveau du temps de calcul. Elles sont capables de converger rapidement vers la région des solutions intéressantes et d'améliorer significativement le critère d'optimisation de la solution initiale.

5.4 Synthèse des résultats obtenus par les métaheuristiques hybrides

Sur l'exemple précédent, nous avons étudié la performance des méta-heuristiques hybrides. On peut réduire le temps de calcul de la procédure d'optimisation de 720 fois par rapport à la PLVM seule. Afin d'évaluer la performance des méthodes basées sur les méta-heuristiques hybrides, nous les avons appliquées sur 60 exemples générés aléatoirement. Ces exemples sont divisés en trois catégories : petite, moyenne et grande taille (20 exemples par catégorie) selon le nombre de variables binaires dans le problème. Pour comparer les différentes méta-heuristiques hybrides avec la PLVM seule, on choisit d'arrêter l'algorithme PLVM après 3600 secondes tandis que la condition d'arrêt pour la recherche tabou et le recuit simulé est de 10 itérations sans amélioration du critère. Dans le cas de l'algorithme génétique, on choisit de l'arrêter après 5 itérations sans amélioration.

Les résultats des calculs sont présentés dans les tableaux 7.3 et 7.4. Le tableau 7.3 synthétise les temps de calcul moyens des 4 algorithmes et leur taux d'optimalité qui représente le pourcentage des cas où les algorithmes trouvent une solution ayant la valeur du critère de la borne inférieure. À partir de ces critères de performance, le recuit simulé apparaît comme la méthode qui a la vitesse de convergence la plus rapide. De plus, dans 73% des cas, le recuit simulé trouve la solution de la borne inférieure en 126s en moyenne. Un peu moins performante, la recherche tabou requiert un temps de calcul un peu plus long mais en terme de taux d'optimalité, elle est comparable au recuit simulé. L'algorithme génétique est nettement moins performant tant en terme de temps de calcul que de taux d'optimalité. Les performances des méta-heuristiques sur les 60 exemples traités sont, à tout point de vue, meilleures que celles obtenues avec la PLVM seule.

Lorsque les algorithmes ne convergent pas vers la borne inférieure, on peut apprécier la déviation entre la solution obtenue et la borne inférieure. On peut considérer d'une part la déviation moyenne à tous les exemples et d'autre part, la déviation maximale observée. Ces informations sont consignées dans le tableau 7.4. On observe ici que la recherche tabou est plus performante que le recuit simulé tant au niveau de la déviation maximale que de la déviation moyenne. L'algorithme génétique est une fois encore moins performant que les deux autres mais il est toujours très loin devant la PLVM seule. En particulier, dans un exemple de grande taille, la PLVM a abouti à une solution 496% moins bonne que la borne inférieure après une heure de calcul, très loin derrière les performances obtenues par les métaheuristiques hybrides. On constate également que la dégradation de performance de ces méthodes est fonction de la taille du problème. Cela

Type exemple	Temps d'exécution moyen				Taux d'optimalité			
Méthode	RT	RS	AG	PLVM	RT	RS	AG	PLVM
100>binaire>20	63,6	34,6	109,9	1304,6	75%	65%	75%	65%
200>binaire>100	223,9	123,4	146,4	3241	35%	45%	20%	25%
250>binaire>200	257,4	211,4	255,8	3600	20%	30%	10%	0%
Moyenne	186	126,7	174,9	2774,2	70%	73,3%	43,3%	33,3%

TAB. 7.3 – Le temps de calcul moyen et les taux d'optimalité des solutions obtenus par plusieurs méthodes sur 60 exemples

Type exemple	Déviation Moyenne				Déviation Maximale			
Méthode	RT	RS	AG	PLVM	RT	RS	AG	PLVM
100>binaire>20	0,76%	1,47%	1,15%	6,12%	7,07%	27,07%	14,3%	68,24%
200>binaire>100	2,11%	0,83%	2,87%	12,54%	17,22	6,1%	9,23%	69,98%
250>binaire>200	8,2%	8,2%	12,75%	123%	5,6%	25,93%	83,22%	496,25%
Moyenne	1,73%	3,64%	5,8%	49,31%	17,22%	27,07%	83,22%	496,25%

TAB. 7.4 – La déviation moyenne et maximale de la solution obtenue par rapport à la borne inférieure sur 60 exemples

est dû au fait que la condition d'arrêt des algorithmes reste la même pour les trois catégories de problèmes. Sur les exemples de grande taille, il faudrait des analyses plus poussées.

6 Conclusion

Cette partie détaille le fonctionnement de la couche anticipation. Nous avons proposé une méthode de résolution générale pour les problèmes d'anticipation qui calculent un plan d'affectation de l'énergie optimal tenant compte des prévisions de fonctionnement disponibles. Nous avons proposé un algorithme hiérarchisé qui combine méthode de résolution exacte et heuristique pour accélérer la convergence vers un optimum global supposé. L'heuristique permet de tenir compte de la structure du problème et d'éviter aux méthodes exactes d'explorer des régions sans intérêt. Plusieurs méta-heuristiques, recherche tabou, recuit simulé et algorithme génétique, ont été adaptés à la génération de sous-problèmes qui sont alors résolus par un algorithme de programmation linéaire en nombre entier mixte. Nous avons montré que cette combinaison permettait de converger beaucoup plus rapidement vers un optimum global supposé dans un rapport de 720. Cette couche détermine des consignes moyennes qui sont ajustées en temps réel par la couche réactive.

Approche de résolution pour la couche réactive

Le plan d'affectation de la ressource énergie calculé par la couche d'anticipation pour des périodes de temps larges, doit être appliqué à tout instant et ce malgré les perturbations que constituent les événements mal ou non prévus. C'est le rôle de la couche réactive d'adapter le plan fourni par la couche d'anticipation de façon à satisfaire aux contraintes du système (voir l'illustration figure 8.1). Puisque la solution se base sur la consommation ou la production moyenne, c'est une condition nécessaire mais non suffisante pour respecter les contraintes de ressources en temps réel. La couche réactive est complémentaire de la couche d'anticipation, elle vise à atteindre l'objectif proposé par cette dernière en garantissant le respect des contraintes fortes en temps réel. Le moyen d'action de la couche réactive est basé sur les degrés de liberté des services interruptifs.

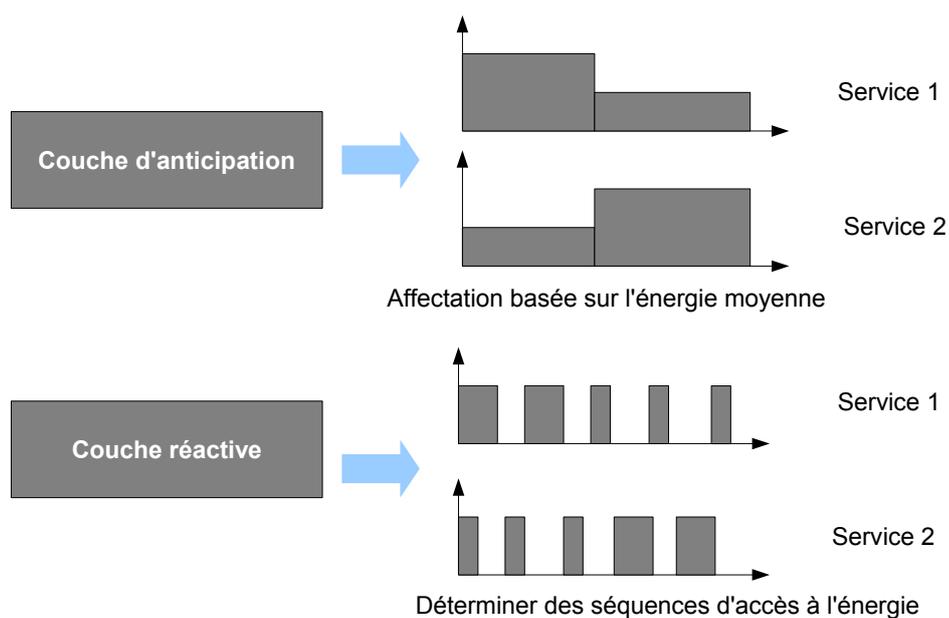


FIG. 8.1 – Principe de la couche réactive

1 Introduction

Dans un contrat avec un fournisseur d'énergie, la puissance maximum qui peut être consommée est fixée (supposons que l'énergie soit fournie par EDF, l'abonnement sera proposé par tranches de consommation 6kW, 9kW, 12kW...(Angioletti et Despretz, 2003a)). Dans ce cas, la consommation dans le bâtiment doit respecter une contrainte forte :

$$P(t) \leq P_{max} \quad \forall t \quad (8.1)$$

Il est aussi possible que la puissance consommée maximale ne soit pas définie à l'avance. Elle peut être intégrée dans le coût global de la facture d'électricité journalière comme aux États-Unis ou au Japon.

1.1 Approche d'ordonnement sous contrainte de ressource

(Ha, 2004) a montré que le problème de maîtrise de la consommation dans l'habitat particulier ou dans le bâtiment en général peut être vu comme un problème d'ordonnement sous contraintes de ressource (RCPSPs).

Une période d'anticipation est découpée en K périodes réactives de durée Δ_r . Le rapport cyclique (noté R) est le pourcentage de temps d'utilisation de la ressource pendant une période réactive (voir la figure 8.2). Le rapport cyclique peut varier au cours de la journée, en fonction des consignes de l'utilisateur.

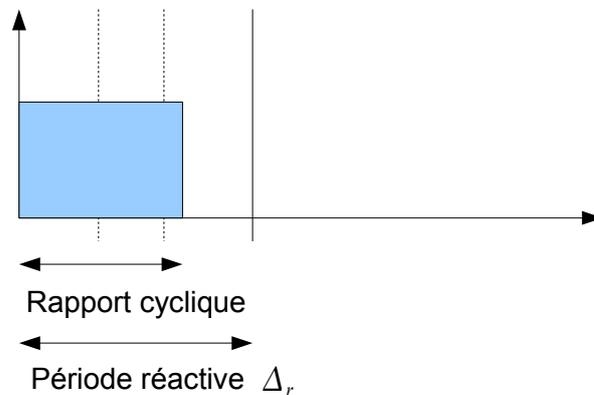


FIG. 8.2 – Notion de rapport cyclique

La consommation de cet équipement peut être vu comme une tâche à ordonnancer avec une durée égale à $R \times \Delta_r$, la ressource empruntée est égale à la puissance consommée maximale de l'équipement. La contrainte de fenêtre de temps d'une tâche est considérée comme la plage dans laquelle on peut décaler la tâche. Cette contrainte est déterminée par son cycle de fonctionnement. Dans (Ha, 2004), nous traitons le problème de minimisation du pic de consommation P_{max} . La méthode de résolution utilisée est un algorithme génétique. Le résultat de ce travail a montré que le pic de consommation dans l'habitat peut être divisé par deux grâce à une coordination entre les consommations des différents équipements. Dans (Ha et al., 2005b) et (Ha et al., 2005a), nous nous intéressons au problème d'optimisation de consommation dans l'habitat en respectant la contrainte de puissance maximale P_{max} . Nous visons à minimiser l'inconfort de l'utilisateur en

jouant sur les décalages de la consommation des équipements. Nous avons montré que ce problème correspond au problème de minimisation du retard pondéré dans l'ordonnancement sous contrainte de ressource. Dans la littérature, la complexité de ce problème est démontrée comme \mathcal{NP} -*Difficile* au sens fort. Par conséquent, pour obtenir une solution exacte, une procédure de séparation et d'évaluation a dû être implémentée.

La formulation de ce problème sous forme d'un problème d'ordonnancement sous contrainte de ressource permet d'exploiter des études ayant été développées dans le domaine de l'ordonnancement. Par ailleurs, l'optimisation de l'ordonnancement prévisionnel permet de réduire les risques de violation des contraintes de ressources maximales ou de recours à un réordonnancement. Cependant, cette approche exige des prédictions de comportement de consommation assez précises qui rendent la solution obtenue très sensible aux perturbations.

1.2 Approche de pilotage direct des charges

Le pilotage direct (**D**irect **L**oad **C**ontrol(DLC) en anglais) est une méthode utilisée par le fournisseur d'énergie pour réduire les pics de consommation en s'appuyant sur le caractère interruptible de certaines charges. Cette fonction de gestion de l'énergie pourrait exister à différents niveaux du réseau, dans le réseau de distribution mais aussi au niveau des consommateurs au sein des équipements électro-ménagers.

Des études ont porté sur l'application de DLC à des systèmes de climatisation et de chauffage notamment dans (Bargiotas et Birdwell, 1988). Souvent, dans la littérature, on trouve que l'objectif principal DLC est de minimiser le coût de production de l'énergie, mais l'aspect de confort de l'utilisateur n'est pas pris en compte de manière explicite. Selon les études publiées, l'approche semble donner des résultats intéressants et être en mesure de répondre à nos attentes, (Huang et Huang, 2004) présente une méthode de résolution approchée pour le problème de pilotage direct d'un système de climatisation. Dans ces travaux, l'auteur a discrétisé le temps suivant plusieurs périodes de même durée, durant lesquelles, chaque charge interruptible est soit activée soit désactivée. On parle de séquence d'interruption des équipements. Pour réduire la complexité de la modélisation, l'auteur s'est inspiré des notions de logique floue qui sont utilisées dans le problème de DLC développé originalement par (Bhattacharyya et Crow, 1995) et (Yang et Huang, 1999). La logique floue permet de représenter le confort de l'utilisateur ainsi que la capacité des sources.

L'implémentation sous forme d'une boucle fermée de cette stratégie de pilotage direct est divisée en deux étapes :

- Déterminer les séquences d'interruption de l'ensemble par programmation dynamique floue en établissant une fonction récursive basée sur une heuristique. Pour l'instant, il n'y a pas encore de résultat conduisant à une solution exacte.
- Appliquer au système la séquence d'interruption. En fonction de la différence entre les paramètres de prédiction et la consommation réelle, la séquence est adaptée aux conditions courantes. Puisque, ce mécanisme doit répondre en temps réel, certaines règles heuristiques sont utilisées.

Huang et Huang (2004) ont montré que des heuristiques simples permettent d'améliorer considérablement la solution en tenant compte des incertitudes de prédiction.

2 Problème d'affectation d'énergie aux services interruptibles

Le pilotage réactif consiste à contrôler de consommation de certains services en utilisant la caractéristique de préemption. Il s'agit d'affecter l'énergie en respectant les contraintes de ressource en temps réel.

2.1 Description du problème

Le groupe de services concernés est souvent constitué des services de chauffage ou bien de climatisation. La couche réactive travaille sur un temps d'échantillonnage de quelques minutes noté $\Delta_r \ll \Delta_a$ où Δ_a correspond à la période d'échantillonnage de la couche d'anticipation.

Supposons que la couche réactive soit composée d'un ensemble de I services ayant une consommation interruptible. La modèle de comportement dynamique du service est présenté dans le chapitre 4 :

$$\begin{cases} T(i, k+1) = A \times T(i, k) + B \times E(i, k) + C \times W(k) \\ y(i, k) = D \times T(i, k) + F \end{cases} \quad (8.2)$$

où $T(i, k)$ est le vecteur de température du service i durant la période k et $E(i, k)$ est l'énergie consommée dans la période k . $W(k)$ est l'impact des éléments externes comme la température extérieure, les radiations solaires. $y(i, k)$ est le critère de respect de la consigne de la couche réactive.

Durant chaque période d'échantillonnage k , chaque équipement interruptible doit être activé ou désactivé. Cette décision est naturellement exprimée par une variable binaire $\mathcal{X}(i, k)$.

$$\mathcal{X}(i, k) = \begin{cases} 1 & \text{Si l'équipement } i \text{ est activé durant la période } k \\ 0 & \text{Si l'équipement } i \text{ est désactivé durant la période } k \end{cases} \quad (8.3)$$

Avec l'introduction de la variable binaire $\mathcal{X}(i, k)$, le modèle dynamique du service $Srv(i)$ est écrit sous la forme :

$$\begin{cases} T(i, k+1) = A \times T(i, k) + B \times P_{max}(i) \times \mathcal{X}(i, k) \Delta_r + CW(k) \\ y(i, k) = D \times T(i, k) + F \end{cases} \quad (8.4)$$

Supposons que le plan d'affectation de la couche d'anticipation assigne la valeur T_{ref} à la couche réactive. L'objectif de la couche réactive est de suivre cet objectif en respectant la contrainte de ressource. D'une manière générale, la contrainte traduisant le respect de la consigne durant la période k s'écrit :

$$y(i, k) = |T_a(i, k) - T_{ref}| \quad (8.5)$$

Ce critère doit être évalué sur les périodes entre $\{0, \dots, K\Delta_r\}$ où $K\Delta_r = \Delta_a$. Chaque service a une pondération $w(i)$. Le critère visant à minimiser le plus grand écart de consigne :

$$J(n) = \left(\sum_{k=1}^n w(i) \times y(i, k) \right) \quad (8.6)$$

L'objectif du contrôle est de respecter la contrainte de capacité à chaque période réactive k avec $P_{dis}(k)$ la puissance maximale disponible pour la période k après soustraction de la

consommation des services non-préemptibles. La consommation de tous les équipements ne doit pas dépasser la puissance $P_{dis}(k)$:

$$\sum_{i=1}^I P(i) \times \mathcal{X}(i, k) \leq P_{dis}(k) \quad (8.7)$$

Nous proposons ensuite des approches différentes pour traiter ce problème. La première approche est une approche prédictive qui vise à établir à l'avance la séquence d'activation et de désactivation des services sur l'horizon temporel $\{0, \dots, K\Delta_r\}$. La deuxième approche est basée sur un algorithme de liste qui vise à construire la solution à partir de la mesure, mais sans expliciter la solution obtenue à l'avance.

2.2 Approche prédictive par programmation dynamique

Cette approche s'inspire des méthodes développées pour la couche d'anticipation. La couche d'anticipation est chargée de construire une solution sur l'horizon d'une journée avec un temps de discrétisation Δ_a égal à 1h. La couche réactive complète ce plan en établissant un plan d'exécution ayant un horizon égal à Δ_a . Ainsi, les services doivent suivre en même temps les consignes établies par la couche d'anticipation et les séquences d'action/désactivation pré-établies par la couche réactive.

Ce problème d'affectation d'énergie aux services interruptibles au niveau de la couche réactive peut être résolu par la programmation linéaire mixte en utilisant la transformation présentée dans le chapitre 5 mais le problème peut devenir très complexe quand le nombre de variables binaires $\mathcal{X}(i, k)$ augmente. Nous cherchons une méthode de résolution plus appropriée au problème car le temps de calcul doit être court. En sachant que l'état courant des services dépend seulement de leur état précédent (résultant de l'équation (8.4)). La solution optimale de la période $k + 1$ dépend forcément de la solution de la période k .

On peut alors utiliser la **P**rogrammation **D**ynamique (PD) pour résoudre plus efficacement ce problème. Inspirés par le principe d'optimalité de la programmation dynamique proposé par (Bellman, 1957), nous proposons l'algorithme 8. Pour faciliter l'explication de cet algorithme, on emprunte la vision du problème du plus court chemin dans un graphe très connu (voir la figure 8.3). L'objectif de ce problème est de chercher le plus court chemin allant d'un sommet initial à un sommet cible. Le problème d'affectation d'énergie dans la couche réactive revient également à trouver le "chemin" minimisant la critère (8.6) allant de la période 1 à la période K . Nous introduisons la notion de graphe des séquences.

Définition 17 *Un graphe des séquences est divisé en K niveaux. Chaque niveau correspond à une période de discrétisation de la couche réactive. $\mathbb{X}(j, k)$ est le sommet $j \in \{1, \dots, \mathcal{N}(k)\}$ de niveau $k \in \{1, \dots, K\}$ qui correspond à un assignement de valeur binaires pour $(\mathcal{X}(i, k))$ où $(\mathcal{X}(i, k))$ est la liste des variables d'activation pour l'instance k pour I services. $\mathcal{N}(k)$ est le nombre des sommets dans le niveau k . $\mathcal{N}(k)$ est égal au nombre d'états atteignables pour I services, c'est-à-dire au plus 2^I sommets. Un sommet $\mathbb{X}(j, k)$ peut donc être représenté par un mot de I bits.*

La chemin ne connecte que deux sommets de deux niveaux successifs. Un chemin entre deux sommets existe si et seulement si le passage d'une séquence à la suivante est admissible. Dans le

graphe de séquences, il n'y a pas de circuit. C'est une condition nécessaire pour pouvoir appliquer l'algorithme du plus court chemin de Bellman.

L'algorithme 8 est initialisé par la génération de $\mathbb{X}(j, 1)$ pour la première période. À partir de $k = 2$, la décision d'activer ou de désactiver les services $\{\mathcal{X}(i, k)\}$ est calculée en fonction de l'état précédent $\mathbb{X}(j, k - 1)$.

Dans la figure 8.3, on peut observer un exemple de la PD sur un cas où il y a deux équipements. Chaque sommet dans le graphe correspond à un état de la programmation dynamique. Sur chaque sommet, il y a des étiquettes sur l'état $\{\mathcal{X}\} = \{1, 0\}$, cela signifie que $\mathcal{X}(1, 1) = 1$, $\mathcal{X}(2, 1) = 0$. Les arcs qui connectent les sommets décrivent les passages possibles.

[Initialiser]

Initialiser l'ensemble des sommets $\mathcal{X}(1) = \{\mathbb{X}(j, 1); j \in \{1, \dots, 2^I\}\}$ avec tous les états possibles $\{0, 1\}$ pour chaque $\mathcal{X}(j, 1); j \in \{1, \dots, I\}$;

Pour chaque sommet $\mathbb{X}(j, 1)$ de $\mathcal{X}(1)$, créer un arbre vide : $\mathcal{A}(\mathbb{X}(j, 1)) \leftarrow \emptyset$;

[Parcourir le graphe]

Pour ($k = 2; k \leq K; k++$) **faire**

[Chercher le meilleur chemin conduisant à chacun des sommets de l'instant k]

$\mathcal{X}(k) \leftarrow \emptyset$;

Pour ($j = 1; j \leq 2^I; j++$) **faire**

 Générer le sommet $\mathbb{X}(j, k)$ associé à j ;

 Créer un chemin vide : $\mathcal{A} \leftarrow \emptyset$;

Pour $\mathbb{X} \in \mathcal{X}(k - 1)$ **faire**

$\mathcal{A} \leftarrow (\mathbb{X}, \mathbb{X}(j, k)) \cup \mathcal{A}(\mathbb{X})$;

Fin Pour

 Trouver le meilleur chemin \mathcal{S}^* de \mathcal{A} , au sens de (8.6), en partant de $\mathbb{X}(j, k)$ et en allant vers un noeud racine ($k = 0$);

Si (\mathcal{S}^* existe) **Alors**

[Sélectionner l'arc du meilleur chemin conduisant à $\mathbb{X}(j, k)$]

$\mathcal{X}(k) \leftarrow \mathcal{X}(k) \cup \mathbb{X}(j, k)$

 Sélectionner $\mathbb{X}/(\mathbb{X}, \mathbb{X}(j, k)) \in \mathcal{S}^*$;

$\mathcal{A}(\mathbb{X}(j, k)) \leftarrow (\mathbb{X}, \mathbb{X}(j, k)) \cup \mathcal{A}(\mathbb{X})$;

Fin Si

Fin Pour

Fin Pour

[Trouver la meilleure séquence d'activation/désactivation]

Le meilleur chemin, au sens de (8.6), partant de $\mathbb{X} \in \mathcal{X}(K)$ vers un noeud racine ($k = 0$) correspond à la meilleure séquence d'activation/désactivation.

ALG. 8: Algorithme de programmation dynamique pour le problème d'affectation d'énergie

La complexité de cette méthode est de $K \times 2^I$ en sachant que l'on doit stocker les résultats sur différentes étapes et que le nombre de sommets mémorisés peut atteindre $K \times 2^I$. Le point fort de cette méthode est que l'on peut obtenir une solution optimale pour un problème de petite

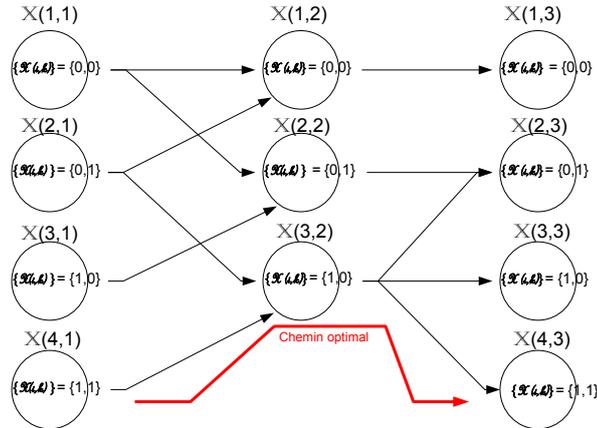


FIG. 8.3 – Illustration de la programmation dynamique

taille. Par contre pour les problèmes de grande taille, nous devons chercher une méthode plus appropriée.

2.3 Affectation dynamique par l'algorithme de liste

La complexité de l'algorithme 8 est $K \times 2^I$, le temps de calcul reste important dans le cas où le cardinal de I est grand. C'est la raison pour laquelle nous proposons une heuristique qui se base sur les flux d'information dans le bâtiment pour appliquer un algorithme de liste. Chaque service est chargé de remonter de l'information sur la satisfaction courante. A partir de ces informations, on essaie d'effectuer une affectation de ressource en temps réel en utilisant une heuristique qui favorise la distribution de ressource au service le moins satisfait. Le principe de cet algorithme est simple, tout en permettant de résoudre des problèmes de grande taille.

A chaque instant k , récupérer toutes les satisfactions $U(i, k - 1)$ et les puissances requises $P(i)$ pour les services actifs $Srv(i)$;
 Initialiser $\mathcal{X}(i, k) \leftarrow 0, \forall i$;
 $\mathcal{L} \leftarrow$ la liste des couples $(Srv(i), P(i))$ pour les services de type charge avec leur puissance consommée correspondante, ordonnée par ordre décroissant de $U(i, k - 1)$;
 $P \leftarrow P_{dispo} - P(j)$ avec $j/\mathcal{L}(1) = (Srv(j), P(j))$;
 [Redistribuer de l'énergie]
Tant que $(P > 0)$ **faire**
 $\mathcal{X}(j, k) = 1$;
 $i \leftarrow i + 1$;
 $j/\mathcal{L}(i) = (Srv(j), P(j))$;
 $P \leftarrow P_{dispo} - P(j)$
Fin Tq

ALG. 9: Algorithme d'affectation dynamique

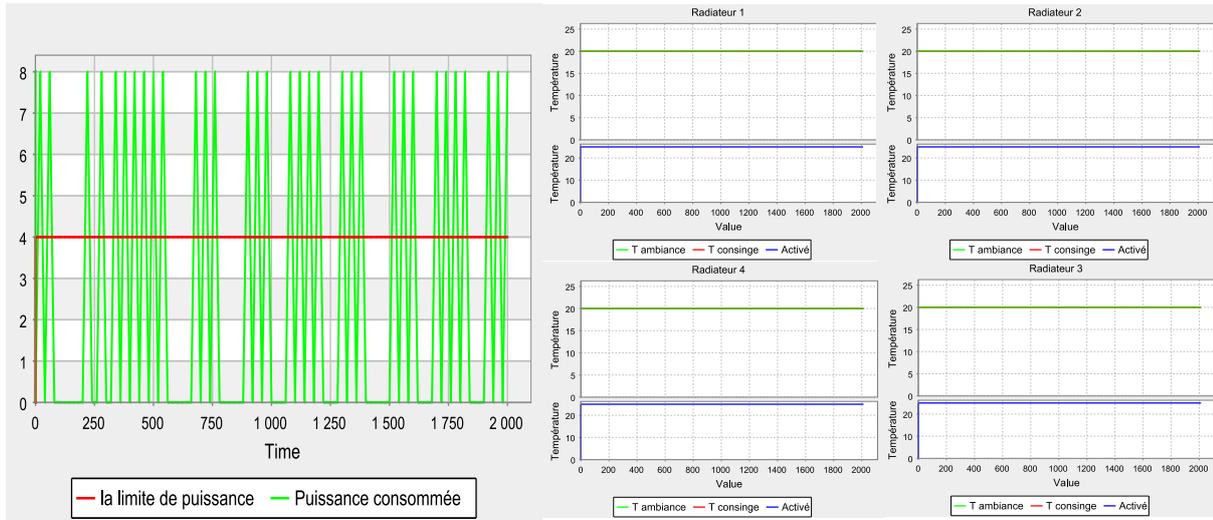


FIG. 8.4 – Résultat de l'exemple 1 sans la couche réactive

Exemple 1 : Considérons la couche réactive chargée d'affecter de l'énergie électrique à 4 charges interruptibles. Les radiateurs sont utilisés pour illustrer le fonctionnement de la couche réactive. Chaque radiateur supporte un service de chauffage dans une zone thermique différente. On suppose que les zones thermiques sont identiques au niveau du modèle thermique avec un temps d'échantillonnage de 1 seconde :

$$\begin{bmatrix} T_a(k+1) \\ T_m(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,97 & 0,028 \\ 0,0085 & 0,99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a(k) \\ T_m(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,00047 & 0,039 & 0,014 \\ 2 \times 10^{-6} & 0,00029 & 6,06 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out} \\ \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} \quad (8.8)$$

Chaque radiateur a une puissance maximale de 2kW, la couche réactive dispose de 4kW à distribuer entre 4 radiateurs. La période de la couche réactive est de 5 minutes soit 300 secondes. En conséquence, à chaque période k , il est possible que deux radiateurs soient activés. Un simulateur de la couche réactive a été codé en Java pour implémenter l'optimisation en temps réel de la couche réactive. Ce simulateur permet de simuler en parallèle la boucle de régulation de chaque radiateur (la commande locale). Dans la première simulation (figure 8.4), nous présentons la solution calculée par la couche d'anticipation sans la couche réactive. Bien que la contrainte de ressource énergétique soit respectée en moyenne dans la couche d'anticipation pourtant on observe des pics de consommation de 8kW lorsque les 4 radiateurs se mettent en marche en même temps. En conséquence, la contrainte de puissance maximale est violée. Dans la deuxième simulation, nous utilisons les deux couches de commandes anticipative et réactive. Le résultat de la couche d'anticipation combinée à l'algorithme 9 est illustré dans la figure 8.5.

On constate que le mécanisme réactif permet de coordonner la consommation des 4 radiateurs en respectant la contrainte de ressource. Le confort dans les 4 zones thermiques est équilibré. Aucune zone thermique n'est pénalisée plus que les autres en moyenne. La séquence d'activation et de désactivation des équipements est très proche de la solution optimale calculée par l'algorithme 8. Dans ce scénario, on arrive à proposer une solution de 2% moins bonne que la solution optimale obtenue par l'algorithme 8.

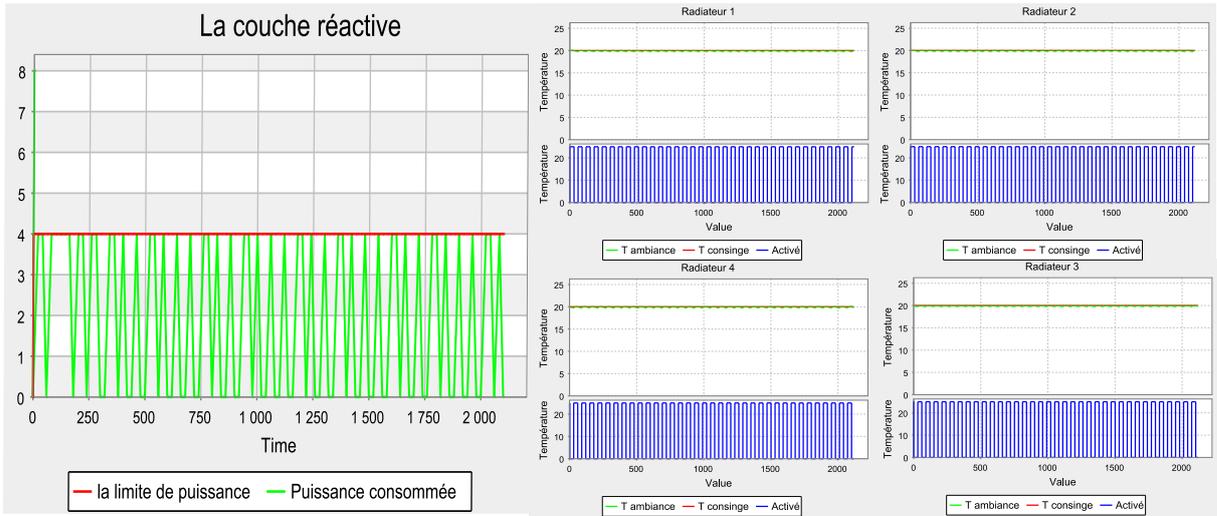


FIG. 8.5 – Résultat de l'exemple 1 avec la couche réactive

3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le problème d'affectation de ressource dans la couche réactive. Il s'agit de distribuer la ressource énergétique à différents services interruptibles en respectant la contrainte forte de ressource maximale en approchant l'objectif calculé par la couche d'anticipation. Nous avons proposé deux approches pour résoudre ce problème, l'approche prédictive vise une planification sur un horizon court et moyen terme. Elle consiste à calculer par avance des séquences d'activation/désactivation des services en se basant sur le principe de programmation dynamique. L'avantage de cet algorithme est qu'il est capable de nous donner une solution optimale dans le cas où le nombre d'équipements interruptibles n'est pas trop important (inférieur à 10) et surtout qu'elle ne nécessite aucun capteur. Contrairement à l'approche prédictive, l'approche réactive est un algorithme de liste qui vise à construire dynamiquement la solution du problème sans rechercher de la solution globale. Elle requiert un temps de calcul très faible et elle tient compte de l'état courant des services et donc des perturbations pour l'affectation de la ressource énergie.

Le couche réactive est un complément essentiel à la couche anticipative. Elle permet au système de réagir aux perturbations et d'affiner le plan d'affectation de la ressource énergétique avec un niveau d'abstraction plus précis. On peut imaginer des cas extrêmes où les perturbations sont si importantes que la couche réactive ne parvient plus à suivre la consigne de la couche d'anticipation. Le démarrage d'un four peut prendre toute l'énergie de la maison. Dans ce cas, la couche réactive réagit mais trop tard parce qu'il n'y a plus d'énergie pour le service de chauffage par exemple. La prise en compte de l'incertitude doit être autant que possible intégrée au niveau anticipatif pour privilégier les solutions robustes vis-à-vis des perturbations. Le chapitre suivant expose une démarche permettant la prise en compte des incertitudes et perturbations dans le problème de gestion d'énergie dans le bâtiment.

Chapitre 9

Prise en compte des incertitudes

Les chapitres 7 et 8 proposent une méthode de résolution globale du problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment. Les approches d'optimisation de la couche d'anticipation sont des approches déterministes. La couche réactive permet d'affecter l'énergie en temps réel et ajoute de la réactivité au système de pilotage. Ce chapitre est une extension de la méthode anticipative pour tenir compte du cas où il existe des incertitudes dont les bornes sont connues dans les prévisions disponibles. La connaissance du problème peut être imparfaite et parfois cette connaissance imparfaite peut être modélisée. Si on ne tient pas compte de cette incertitude, elle peut conduire à une dégradation de performance par rapport à la solution calculée. La prise en compte de perturbations dans la modélisation du système permet de l'améliorer en intégrant les perturbations. Nous commençons notre démarche par une analyse et une modélisation de l'incertitude en utilisant la modélisation par intervalles. Ensuite, nous proposons une méthode de prise en compte de l'incertitude dans le problème de gestion d'énergie dans le bâtiment par une procédure en 3 étapes en utilisant la programmation multi-paramétrique.

1 Analyse des incertitudes

Comme indiqué dans l'introduction de cette partie, nous allons prendre en compte les incertitudes dans le problème de gestion d'énergie dans l'habitat. Même si le mécanisme prédictif/réactif prend en compte, de manière non explicite, l'incertitude dans le problème d'optimisation, ce chapitre propose une approche pour tenir compte de l'incertitude de façon explicite. Parmi les paramètres de prédiction, plusieurs sont incertains comme la prédiction sur l'information météorologique. L'incertitude est elle-même présente dans le critère d'optimisation. Par exemple le critère de sensation thermique est relativement dépendant de plusieurs éléments de l'environnement thermique comme la vitesse de l'air, le métabolisme du corps humain, etc... On ne dispose pas forcément de tous les capteurs pour les mesurer.

1.1 Sources d'incertitudes dans le problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment

L'incertitude dans le problème de gestion de l'énergie dans l'habitat peut provenir de différentes origines. Nous distinguons l'incertitude qui vient de l'extérieur comme celle qui entache une prédiction météorologique ou celle qui modifie la disponibilité des sources énergétiques et de l'incertitude qui vient d'éléments internes au bâtiment.

1.1.1 Les incertitudes venant de l'extérieur

La prédiction météorologique contient naturellement des incertitudes. Il est difficile de prédire précisément les conditions météorologiques. L'information sur la prédiction peut être mise à jour régulièrement. Mais la température extérieure ou le taux d'ensoleillement ne peuvent être prédits qu'avec des intervalles de confiance.

La prédiction météorologique a un impact important sur la production d'énergie locale dans le bâtiment. Dans la littérature, des méthodes efficaces pour prédire la radiation solaire durant la journée sont proposées. Malgré tout, le résultat de prédiction peut être très différent des valeurs mesurées. La raison principale est qu'il est très difficile de prévoir à l'avance la couverture nuageuse du ciel. D'une part, l'incertitude sur la prédiction de la radiation solaire a une influence directe sur la consommation du service comme le chauffage ou la climatisation, d'autre part, elle peut influencer la ressource énergétique totale disponible si le bâtiment est équipé de panneaux photovoltaïques.

D'autres perturbations extérieures peuvent venir du fournisseur d'énergie. On voit ainsi que la sécurité d'approvisionnement en énergie par exemple suite à une coupure d'électricité peut conduire à un inconfort majeur pour les usagers si le bâtiment ne dispose pas d'énergie en stock. Parmi les autres risques, il faut compter que le prix de l'énergie vendue par le fournisseur est actuellement fixé en fonction de tranches horaires creuse et pleine. Mais dans un futur proche, on pourra avoir une politique permettant d'acheter l'électricité suivant un coût dynamique représentant le vrai coût de la production d'énergie (Wacks, 1993), ou encore, une politique permettant de calculer le coût de l'électricité vendue en une journée. Ce principe est déjà mis en place à travers la bourse européenne de l'énergie électrique PowerNext (Pownext, 2006). La gestion des incertitudes sur ces informations doit également être intégrée dans les fonctions du système.

1.1.2 Les incertitudes venant de l'intérieur

Les perturbations existent non seulement au dehors du bâtiment mais également dans le bâtiment lui-même. La mise en place du système de gestion de l'énergie dans le bâtiment a besoin de capteurs pour avoir des informations sur l'état du système. Certaines variables comme l'inertie thermique du bâtiment sont difficiles à mesurer. Certaines restent à estimer sans avoir les capteurs pour les mesurer comme le métabolisme du corps de l'occupant ou la vitesse de l'air dans la zone thermique. Plus radicalement, il existe des activités énergétiques qui surviennent sans avoir été prévues et modifient la structure du problème d'affectation de l'énergie. Dans le bâtiment, l'utilisateur est libre d'agir sans forcément prévenir le système de gestion d'énergie. La consommation de certains services comme la cuisson, l'éclairage, leur durée et leur date d'exécution restent difficile à prévoir. Le fonctionnement du service en cours peut être modifié (changer le mode de fonctionnement, annuler un service en cours). La période d'occupation du bâtiment varie aussi en fonction de la demande de l'utilisateur sans forcément respecter la pré-programmation de celui-ci.

A travers une analyse sommaire, les sources d'incertitudes sont nombreuses, mais l'intégration de toutes les sources d'incertitudes dans la résolution risque de conduire à des problèmes très complexes. On ne peut pas tout traiter en même temps : il vaut mieux traiter prioritairement les perturbations fréquentes. Tout d'abord, nous essayons de classer les sources d'incertitude suivant deux types de perturbations (voir la [tableau 9.1](#)) :

- Le premier type d'incertitudes concerne celles qui changent les informations sur les va-

Sources d'incertitudes	Perturbation sur les variables	Changement de la structure du problème
Prédiction météorologique	X	
Coût énergétique	X	
Coupure électrique		X
Donnée du capteur	X	
Service imprévisible		X
Modification d'un service	X	
Occupation imprévue des locaux	X	

TAB. 9.1 – Classification des types d'incertitudes dans le problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment

riables du problème d'affectation d'énergie. La conséquence de ce type de perturbations est généralement une dégradation du résultat réel par rapport à la solution optimale obtenue.

- Le deuxième type concerne les incertitudes qui causent des perturbations plus importantes : elles changent la structure du problème en ajoutant et en enlevant des contraintes fortes. La conséquence dans le pire des cas est que la solution courante n'est plus pertinente, ou devient nonadmissible. Elle doit être remplacée par une autre solution adaptée à la nouvelle structure du problème.

1.2 Modélisation de l'incertitude

Une piste de recherche pour la gestion des incertitudes est l'optimisation stochastique qui consiste à représenter les incertitudes par des variables aléatoires. On peut trouver ces études résumées dans (Greenberg, 1998). (Billaut et al., 2005b) a montré trois points faibles de ces méthodes stochastiques dans le cas général :

- la connaissance appropriée de la plupart des problèmes n'est pas suffisante pour déduire la loi de probabilité, surtout la première fois qu'on les traite.
- la source de perturbations conduit généralement à des incertitudes sur plusieurs types de données à la fois. L'hypothèse selon laquelle les perturbations sont indépendantes les unes des autres est difficile à satisfaire.
- même si on arrive à déduire un modèle stochastique, il est souvent trop complexe pour être utilisé ou intégré dans une procédure d'optimisation.

Une approche alternative de modélisation des incertitudes est la méthode d'intervalles pour les variables continues : il est possible de déterminer un intervalle qui borne la valeur réelle. On peut trouver cette approche dans le problème d'ordonnancement flou présenté dans (Dubois et al., 2001, 2003). Rossi (2003); Aubry et al. (2006) ont utilisé la méthode de l'ensemble de scénarios pour modéliser l'incertitude dans un problème d'équilibre de la charge de machines parallèles. La combinaison entre trois types de modélisations (modèle stochastique, modèle de scénarios, modèle par intervalles) est également possible selon Billaut et al. (2005a).

Dans le contexte du problème de gestion d'énergie dans le bâtiment, si nous n'avons pas choisi d'utiliser les méthodes stochastiques, c'est parce que nous ne cherchons pas à garantir une performance moyenne de la solution. Par exemple, une performance moyenne de confort usager

peut conduire à une solution qui est très désagréable dans un moment et très confortable à un autre moment. Ensuite, on peut tout à fait imaginer un système d'apprentissage qui prenne en charge la construction du modèle stochastique des habitudes des usagers. Mais combien de temps faudrait-il mettre pour que ce mécanisme puisse construire un modèle stochastique fiable. Cela nous semble une méthode très difficile à appliquer concrètement dans le contexte du bâtiment. Par contre, la méthode par intervalles nous apparaît comme une méthode appropriée pour ce problème. Par exemple, l'incertitude sur la prédiction météorologique comme la température extérieure T_{ext} peut être modélisée par un intervalle $T_{ext} \in [\underline{T}_{ext}, \overline{T}_{ext}]$. La modélisation d'un service de cuisson imprévisible dont la durée est $p \in [0, 5h, 3h]$ et la date d'exécution est dans l'intervalle $s(i) \in [18h, 22h]$. De façon similaire, on peut modéliser l'incertitude de la période d'occupation du bâtiment ou encore d'autres types de perturbations.

En résumé, dans cette section, nous avons établi une analyse pour mettre en évidence l'existence d'incertitudes dans le problème. Nous choisissons la méthode par intervalles pour modéliser l'incertitude du fait de sa bonne adéquation à la nature du problème. La suite de ce chapitre va présenter la méthode pour appréhender l'incertitude par la programmation multi-paramétrique.

2 Approche pour la prise en compte des incertitudes

Notre démarche de prise en compte des incertitudes consiste à adopter une procédure en trois étapes à l'instar des problèmes d'ordonnancement présentés dans (Billaut et al., 2005a) :

- **étape 0** : Cette étape consiste à définir le problème dans lequel les paramètres de prédiction sont fixés à leur valeur la plus vraisemblable par exemple. Le chapitre 5 contribue à cette étape.
- **étape 1** : Cette étape correspond au calcul d'une famille de solutions réalisables et tenant compte des incertitudes modélisées par des intervalles
- **étape 2** : Une solution est choisie parmi celles qui ont été calculées à l'étape 1.

Notre objectif est de chercher une méthode de résolution pour l'**étape 1**. Nous allons nous orienter vers une approche de résolution paramétrique pour calculer une famille de solutions qui va être exploitée par l'étape 2.

2.1 Introduction à la programmation multi-paramétrique

Le programmation paramétrique correspond à une méthode de résolution de problème d'optimisation qui caractérise la solution en fonction d'un paramètre. Dans notre cas, la méthode qui permet de caractériser la solution en fonction d'un vecteur de paramètres est considérée comme une programmation **Multi-Paramétrique (mp)**. La première approche de programmation paramétrique est présentée dans (Gass et Saaty, 1955) suivie de l'approche de programmation multi-paramétrique présentée par Gal et J.Nedoma (1972). Borrelli et al. (2000); Borrelli (2002) ont introduit une extension de la PMP pour les problèmes mixtes linéaires et les variables en nombres entiers : une méthode de programmation géométrique. Nous utilisons la programmation multi-paramétrique pour exprimer les variables à optimiser en fonction des variables des incertitudes.

Pour faciliter la compréhension, nous commençons notre introduction par la programmation mixte linéaire multi-paramétrique (MPL-mp). Formellement, une MPL-mp est définie comme suit : soit x_c , l'ensemble des variables continues, et x_d l'ensemble des variables discrètes à opti-

miser. Le critère à minimiser s'écrit :

$$J(x_c, x_d) = Ax_c + Bx_d \quad (9.1)$$

Les contraintes à respecter sont écrites sous la forme :

$$\begin{bmatrix} F & G & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ \theta \\ x_d \end{bmatrix} \leq W \quad (9.2)$$

où θ est l'ensemble des paramètres incertains à prendre en compte.

Définition 18 Un **polytope** est défini par l'intersection d'un nombre fini de demi-espaces bornés. Une région admissible \mathcal{P} est un polytope de $\begin{bmatrix} x_c \\ \theta \end{bmatrix}$ où chaque point peut générer une solution admissible pour le problème (9.2). $\begin{bmatrix} x_c \\ \theta \end{bmatrix}$ appartient à une famille de polytopes paramétrée par les valeurs de $x_d \in \text{dom}(x_d)$:

$$\mathcal{P}(x_d) = \left\{ (x_c, \theta) \mid \begin{bmatrix} F & G & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ \theta \\ x_d \end{bmatrix} \leq W \right\} \quad (9.3)$$

Dans cette famille de polytopes, on cherche les régions optimales qui sont définies comme suit :

Définition 19 La région optimale $\mathcal{P}^*(x_d) \subseteq \mathcal{P}$ est le sous-ensemble de $\mathcal{P}(x_d)$ dans lequel le problème (9.2) admet au moins une solution optimale. $\mathcal{P}^*(x_d)$ est nécessairement un polytope car :

- un polytope est délimité par des hyperplans qui peuvent conduire à des arêtes qui constituent des polytopes
- un polytope est un hypervolume convexe.

La famille de région optimale de $\mathcal{P}(x_d)$ s'écrit :

$$\mathcal{P}^*(x_d) = \left\{ (x_c, \theta) \mid \begin{bmatrix} F & G & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ \theta \\ x_d \end{bmatrix} \leq W, J(x_c^*) = \min_{x_c} (Ax_c + Bx_d) \right\} \quad (9.4)$$

Cette famille d'espace $\mathcal{P}^*(x_d)$ avec $x_d \in \text{dom}(x_d)$ peut être décrite par une fonction optimiseur que nous nommerons $Z(x_c, x_d)$.

Pour construire cette fonction Z , nous définissons différents espaces dont certains correspondent aux espaces de définition de cette fonction Z .

Définition 20 La famille de régions admissibles pour θ est définie par :

$$\Theta_a(x_d) = \left\{ \theta \mid \exists x_c \text{ vérifiant } \begin{bmatrix} F & G & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ \theta \\ x_d \end{bmatrix} \leq W \right\} \quad (9.5)$$

Définition 21 La famille de régions optimales pour θ est un sous-ensemble de la famille $\Theta_a(x_d)$:

$$\Theta_a^*(x_d) = \left\{ \theta \mid \exists x_c^* \text{ vérifiant } \begin{bmatrix} F & G & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ \theta \\ x_d \end{bmatrix} \leq W, J(x_c^*) = \min_{x_c} (Ax_c + Bx_d) \right\} \quad (9.6)$$

Définition 22 La famille de régions admissibles pour x_c est définie par :

$$\mathcal{X}_a(x_d) = \left\{ x_c \mid \exists \theta \text{ vérifiant } \begin{bmatrix} F & G & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ \theta \\ x_d \end{bmatrix} \leq W \right\} \quad (9.7)$$

Définition 23 La famille de régions optimales pour x_c est un sous-ensemble de la famille $\mathcal{X}_a(x_d)$:

$$\mathcal{X}_a^*(x_d) = \left\{ x_c^* \mid \exists \theta \text{ vérifiant } \begin{bmatrix} F & G & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ \theta \\ x_d \end{bmatrix} \leq W, J(x_c^*) = \min_{x_c} (Ax_c + Bx_d) \right\} \quad (9.8)$$

Définition 24 La fonction optimiseur représente la famille de régions optimales $\mathcal{P}^*(x_d)$ définie par (9.4). Elle est définie de $\mathcal{X}_a^*(x_d)$ vers $\Theta_a^*(x_d)$, définis respectivement par (9.8) et (9.6) :

$$Z(x_c, x_d) : \mathcal{X}_a^*(x_d) \mapsto \Theta_a^*(x_d) \quad (9.9)$$

Définition 25 La région critique $RC_m(x_d)$ est un sous-ensemble de l'espace de $\mathcal{P}^*(x_d)$ dans lequel les conditions locales d'optimalité du critère d'optimisation restent immuables, c'est-à-dire que la fonction optimiseur $Z_m(x_c, x_d) : \mathcal{X}_a^*(x_d) \mapsto \Theta_a^*(x_d)$ est unique. $RC_m(x_d)$ est construite en effectuant l'union des différentes régions optimales $\mathcal{P}^*(x_d)$ ayant la même fonction optimiseur.

L'objectif de la programmation linéaire mixte multi-paramétrique est de caractériser les variables à optimiser x_c, x_d et la fonction objectif en fonction de θ (voir figure 9.1). Le principe de résolution de la programmation mixte **mp** est résumé par deux étapes principales :

- Première étape : chercher dans la région paramétrique de θ le plus petit affine sous-espace de \mathbb{P} qui contient la région optimale $\mathcal{P}^*(x_d)$. Déterminer ensuite le système de linéaire inégalités fonction de θ qui définit \mathbb{P} .
- Deuxième étape : construire l'ensemble des régions critiques : la région \mathbb{P} est découpée en un sous-espaces $RC_m(x_d) \in \mathcal{P}^*(x_d)$. Dans la région critique $RC_m(x_d)$ la fonction optimiseur $Z_m^*(x_c, x_d)$ reste une fonction unique. Après avoir déterminé la famille les régions critiques $RC_m(x_d)$, nous cherchons ensuite les fonctions linéaires par morceau de $Z_m^*(x_c, x_d)$ qui caractérisent x_c, x_d en fonction de θ . Après avoir affiné les régions critiques en regroupant des RC_m , on peut obtenir un nombre de façades minimales caractérisant la région critique.

2.2 Algorithme dans l'étape 1

Après l'introduction de la programmation multi-paramétrique, la suite du chapitre est consacrée à l'adaptation de cette méthode au problème de gestion d'énergie. Le principe d'application de la programmation multi-paramétrique est simple (voir la figure 9.2). En s'appuyant sur les

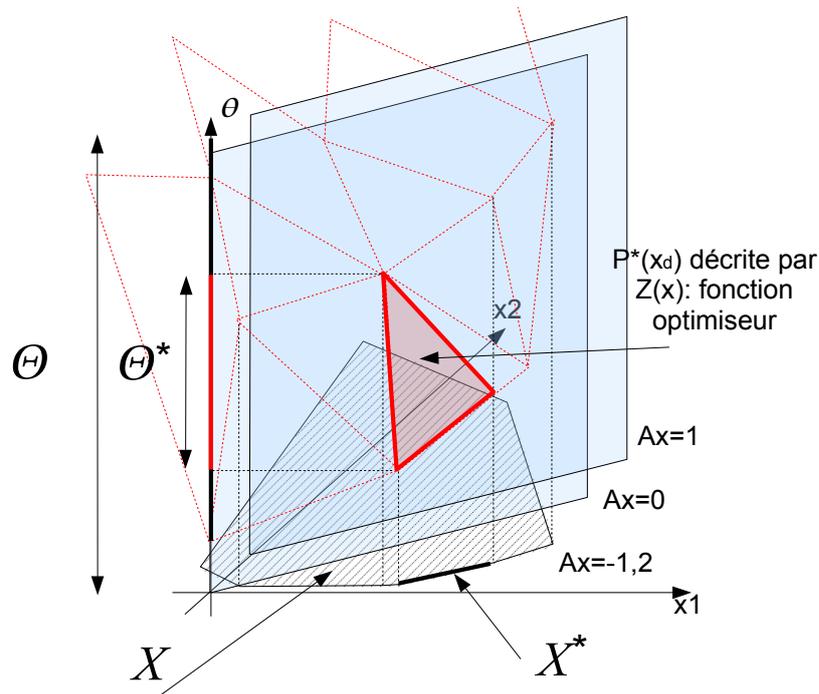


FIG. 9.1 – Illustration de la programmation multi-paramétrique

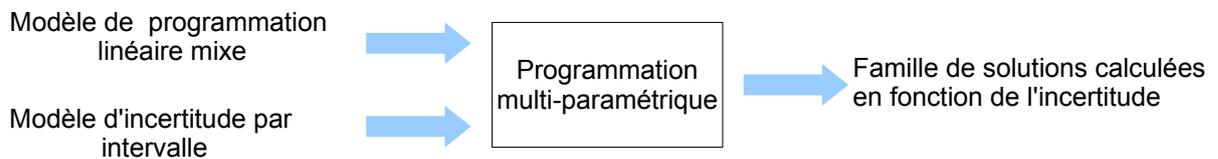


FIG. 9.2 – Principe d'application de la programmation multi-paramétrique

résultats du chapitre 5, on montre que le problème de gestion d'énergie dans le bâtiment peut s'écrire :

$$\begin{aligned}
 J &= (A_1 \times z + B_1 \times \delta + D_1) \\
 \text{avec} & \\
 A_2 z + B_2 \delta + C_2 x &\leq C
 \end{aligned}
 \tag{9.10}$$

$z \in Z$ est l'ensemble des variables continues et $\delta \in \Delta$ est l'ensemble des variables binaires résultant de la transformation logique présentée dans le chapitre 5. A partir de la modélisation des incertitudes par la méthode par intervalle, on essaie d'intégrer des incertitudes qui sont modélisées par des variables intervalles $\theta \in \Theta$. On suppose que les incertitudes sont bornées, donc

$$\underline{\theta} \leq \theta \leq \bar{\theta}
 \tag{9.11}$$

La famille de solutions du problème prenant en compte l'incertitude est générée par la programmation paramétrique. Pour illustrer cette méthode, nous proposons deux exemples.

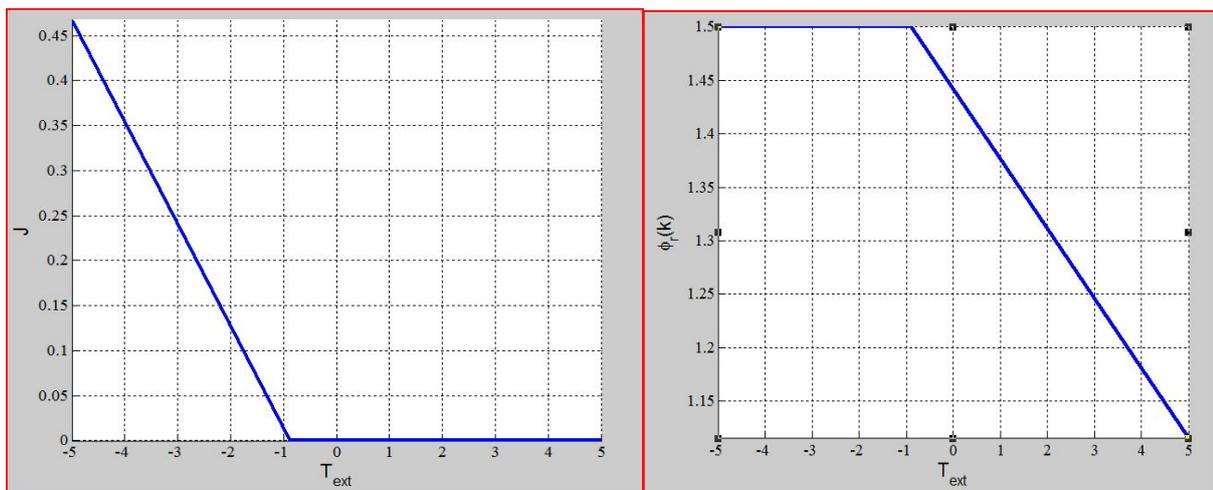


FIG. 9.3 – Illustration du résultat de l'exemple 1

Exemple 1 : Considérons un service de chauffage supporté par l'équipement radiateur électrique ayant une puissance maximale de 1,5kW. T_a est la température de l'environnement thermique et T_m la température de l'enveloppe du bâtiment avec pour températures initiales $T_a(0) = 22^\circ\text{C}$ et $T_m(0) = 22^\circ\text{C}$. Le modèle thermique de la pièce après discrétisation avec un temps d'échantillonnage égal à 1h est le suivant :

$$\begin{bmatrix} T_a(k+1) \\ T_m(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,364 & 0,6055 \\ 0,359 & 0,625 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a(k) \\ T_m(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,0275 & 1,1966 & 0,4193 \\ 0,016 & 0,7 & 0,2434 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} \quad (9.12)$$

Supposons que la fonction de satisfaction thermique est écrite sous la forme :

$$U(k) = \delta_a(k) \times a_1 \times \frac{(T_a(k) - T_{opt})}{T_{opt} - T_{Min}} + (1 - \delta_a(k)) \times a_2 \times \frac{(T_{opt} - T_a(k))}{T_{Max} - T_{opt}} \quad (9.13)$$

en sachant que $T_{min} = 20^\circ\text{C}$, $T_{max} = 24^\circ\text{C}$ et $T_{opt} = 22^\circ\text{C}$.

Nous prenons pour hypothèse que l'on n'a pas une estimation précise de la température extérieure T_{ext} mais qu'il est possible d'affirmer que la température externe varie dans un intervalle : $[-5^\circ\text{C}, +5^\circ\text{C}]$. Nous avons besoin de calculer l'énergie moyenne affectée au radiateur $\phi_r(k)$ sur une période de 4h pour minimiser la fonction objectif suivante :

$$J = \left(\sum_{k=1}^4 U(k) \right) \quad (9.14)$$

La programmation paramétrique tient compte de l'incertitude sur la température extérieure. Nous avons réalisé une implémentation de la résolution multi-paramétrique grâce à un outil nommé Multi Parametric Toolbox **MPT** (Kvasnica et al., 2006) en programmant par l'interface du solveur YALMIP développé par Lofberg (2004). La résolution de l'exemple 1 prend 3.31 secondes en utilisant un calculateur Pentium IV 3,4GHz. Les résultats sont illustrés dans la

figure 9.3. On a obtenu l'énergie moyenne affectée au radiateur en fonction de la température externe comme suit :

$$\phi_r(1) = \phi_r(2) = \phi_r(3) = \phi_r(4) = \begin{cases} 1,5 & \text{Si } -5 \leq T_{ext} \leq -0,875 \\ -0,097 \times T_{ext} + 1,415 & \text{Si } -0,875 < T_{ext} \leq 5 \end{cases} \quad (9.15)$$

La programmation paramétrique a découpé la zone d'incertitude en deux régions critiques. La première zone correspond à la zone de température $-5 \leq T_{ext} \leq -0,875$. La solution optimale consisté à mettre le radiateur au niveau maximal afin d'approcher la température de consigne. Dans la deuxième région critique de $-0,875 \leq T_{ext} \leq -5$, l'énergie affectée au radiateur est proportionnelle à la température extérieure. Plus la température extérieure augmente moins d'énergie est affectée au radiateur. En fait, $T_{ext} = -0,875$ °C est le point d'équilibre du système où la puissance maximale générée par le radiateur peut compenser le flux thermique perdu à travers l'enveloppe du bâtiment.

Exemple 2 Partant de l'exemple 1, on s'intéresse maintenant à des incertitudes multiples. Dans cet exemple, on simule la perturbation induite par l'utilisateur. On part de l'hypothèse que dans les 3^e et 4^e périodes du plan d'affectation de ressource, il est probable qu'une consommation imprévisible se produise. En conséquence, l'énergie disponible durant les périodes 3 et 4 est comprise entre 0 et 2kWh. On ajoute une variable paramétrique $E_{max} \in [0, 2]$ et la contrainte suivante :

$$\phi_r(3) + \phi_r(4) \leq E_{max} \quad (9.16)$$

On doit maintenant calculer la solution optimale du problème en fonction des deux variables $[T_{ext}, E_{max}]$. Nous continuons à implémenter cet exemple avec l'outil MPT. Cette fois, le solveur prend 5,2 seconde et donne un résultat illustré dans la figure 9.4. L'énergie moyenne affectée pour la période 1, $\phi_r(1)$, est indépendante de la variable E_{max} : cela signifie que quoiqu'il se passe sur l'énergie disponible durant les périodes 3 et 4, la décision à la période 1 ne peut pas améliorer la situation :

$$\phi_r(1) = \begin{cases} 1,5 & \text{Si } \begin{bmatrix} -5 \leq T_{ext} \leq -0,875 \\ 0 \leq E_{max} \leq 2 \end{bmatrix} \\ -0,097 \times T_{ext} + 1,415 & \text{Si } \begin{bmatrix} -0,875 < T_{ext} \leq 5 \\ 0 \leq E_{max} \leq 2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9.17)$$

L'énergie affectée au radiateur pour la deuxième période $\phi_r(2)$ est une fonction linéaire par morceaux qui est composée de cinq régions critiques différentes. Parmi ces 5 régions (9.18), on observe dans trois régions que la solution optimale d'affecter au maximum l'énergie au radiateur. En anticipant la disponibilité des ressources dans les périodes 3 et 4, le confort de l'utilisateur est amélioré en sur-chauffant la zone thermique. Ce résultat correspond à la conclusion constatée dans (Ha et al., 2006). Durant les périodes 3 et 4, la consommation du radiateur est moins importante que pour les périodes 1 et 2. L'explication est que grâce à l'énergie stockée dans l'environnement thermique, on arrive à obtenir une solution robuste malgré la perturbation sur la ressource et la température extérieure. Pourtant, dans la région critique 5 (9.18), on observe un cas extrême où il fait très froid dehors et il existe une grande perturbation sur la disponibilité de la ressource. La seule solution est de mettre $\phi_r(k)$ à la valeur maximale mais malgré tout il y

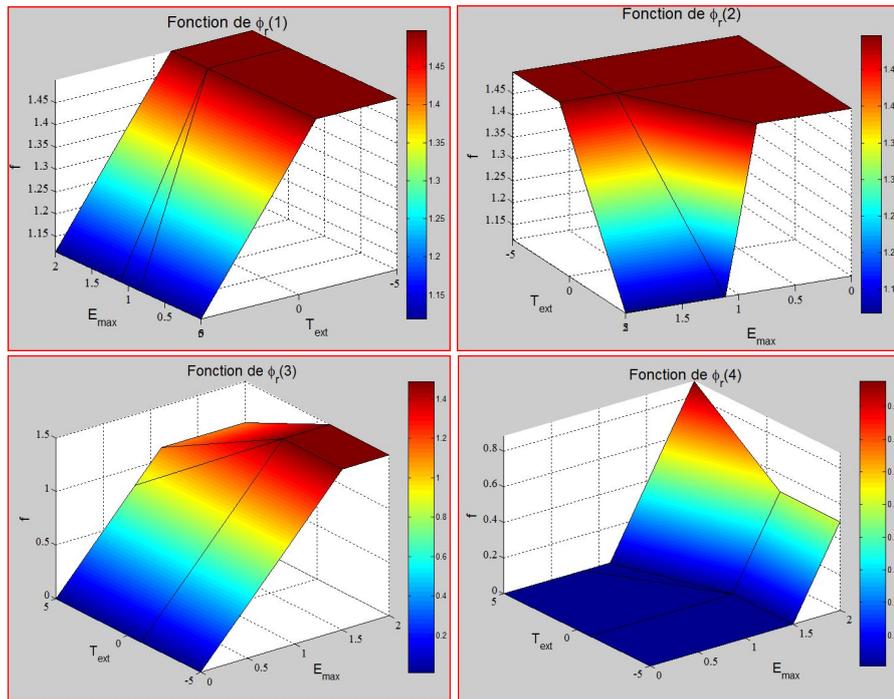


FIG. 9.4 – Les fonctions linéaires par morceaux de $\phi_r(k)$ en fonction de $[T_{ext}, E_{max}]$

a une dégradation du confort de l'utilisateur.

$$\phi_r(2) = \begin{cases} 1,5 & \text{Si } \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ E_{max} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} -0,8750 \\ -1,5 \\ 2 \\ 5 \end{bmatrix} & \text{Région 1} \\ -0,097 \times T_{ext} + 1,415 & \text{Si } \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -0,99 & -0,065 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ E_{max} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0,875 \\ -1,44 \\ 2 \\ 5 \end{bmatrix} & \text{Région 2} \\ -0,097 \times T_{ext} + 0,273 \times E_{max} + 2,32 & \text{Si } \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ E_{max} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} -0,8750 \\ 1,5 \\ 0 \\ 5 \end{bmatrix} & \text{Région 3} \\ 1,5 & \text{Si } \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0,99 & 0,11 \\ -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ E_{max} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0,8750 \\ 1,3927 \\ 0 \\ 5 \end{bmatrix} & \text{Région 4} \\ 1,5 & \text{Si } \begin{bmatrix} 0,99 & 0,065 \\ -0,99 & -0,11 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ E_{max} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 1,44 \\ -1,3927 \\ 5 \end{bmatrix} & \text{Région 5} \end{cases} \quad (9.18)$$

2.3 Algorithme de l'étape 2

Après avoir généré la famille des solutions lors de l'étape 1, en général, dans l'étape 2, on doit choisir effectivement une solution, c'est le rôle de l'étape 2. Sachant que la solution optimale de l'étape 1 est une fonction linéaire par morceaux limitée par des régions critiques, la procédure de choix d'une solution consiste maintenant à sélectionner un des fonctions linéaires par morceaux. L'espace de recherche est donc réduit et l'algorithme de l'étape 2 demande un temps de calcul réduit. Nous proposons d'utiliser l'approche minimax pour trouver une solution robuste parmi la famille des solutions. Nous introduisons un algorithme polynomial Alg.10 qui parcourt les différentes régions critiques pour trouver la solution qui optimise le critère :

$$J^* = (\text{Max}(J(\theta)) | \theta \in \mathcal{P}^*) \quad (9.19)$$

Mettre à jour l'intervalle des incertitudes $[\underline{\theta}, \bar{\theta}]$;
 J^* : valeur optimale du critère à optimiser ;
 $J^* \leftarrow +\infty$;
Pour ($m = 1; m \leq \mathcal{M}; m++$) **faire**
 Chercher θ_m pour que $J_m = \text{Min}(\text{Max}(J(\theta)) | \theta \in RC_m$;
 Si ($(J^* < J_m)$) **Alors**
 | $x = Z_m^*(\theta_m)$
 Fin Si
Fin Pour
Appliquer x au système

ALG. 10: Algorithme de l'étape 2 : trouver une solution la plus robuste dans la famille de solutions calculées

3 Conclusion

Nous avons proposé une approche qui permet de prendre en compte des incertitudes sous forme d'intervalles dans les prédictions et la modélisation de la résolution du problème d'optimisation de la couche d'anticipation. Il s'agit d'une adaptation de la programmation multi-paramétrique. Elle permet de calculer des solutions robustes aux incertitudes qui ont pu être modélisées. Les résultats obtenus sont intéressants mais certains points demeurent délicats. Il reste difficile d'appréhender un grand nombre d'incertitudes du fait de la complexité induite. De surcroît, les problèmes posés doivent être affines en les variables et les incertitudes. Les différents résultats obtenus ont été validés sur différents types d'applications.

Quatrième partie

Applications

Je sais pourquoi tant de gens aiment couper du bois. C'est une activité où l'on voit tout de suite le résultat.

Albert Einstein

Chapitre 10

Gestion des flux électriques dans un bâtiment photovoltaïque

Ce chapitre se concentre sur une application de gestion de l'énergie dans l'habitat conçue dans le cadre du projet industriel ANR Multisol. Ce projet est né d'une collaboration entre différents partenaires : l'INES/CEA, Schneider Electric, le laboratoire G2ELab, le laboratoire G-SCOP et l'entreprise Armines. Ce projet vise à la mise en place d'un système de gestion d'énergie dans le bâtiment pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire produite par des panneaux photovoltaïques. En tant que partenaire de ce projet, nous transférons une partie des travaux de recherche présentés dans ce mémoire pour proposer des algorithmes qui vont être intégrés au module de pilotage réactif et prédictif de Multisol. L'application présentée dans ce chapitre correspond à une simulation sur un cas d'étude choisi pour valider, dans un premier temps, nos résultats de recherche.

1 Présentation du projet Multisol

Le projet ANR Multisol s'intéresse aux bâtiments photovoltaïques raccordés au réseau (Bacha et Chatroux, 2006) avec une vision moyen terme où les tarifs de rachat de l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques est favorable. Le projet adopte aussi une vision à moyen terme où les tarifs de rachat peuvent être revus à la baisse ou encore disparaître. A cet effet, le bâtiment aura peu d'intérêt à réinjecter l'énergie produite, mais devra plutôt la consommer localement de manière intelligente en favorisant certaines charges au détriment d'autres en cas de manque ou valoriser l'énergie produite en la partageant avec d'autres bâtiments ou avec le réseau quand il y a surplus.

Le consortium constitué autour de ce projet réunit des compétences complémentaires : électrotechnique, solaire photovoltaïque, supervision et contrôle-commande. Pour conforter l'ensemble, ce projet s'appuie sur les moyens techniques des démonstrateurs de l'Institut National de l'énergie Solaire (INES/CEA).

1.1 Architecture matérielle

Aujourd'hui, lorsque l'on modifie une installation pour y ajouter un générateur photovoltaïque, l'onduleur peut être raccordé sur une des sorties disponibles du coffret de distribution. Il

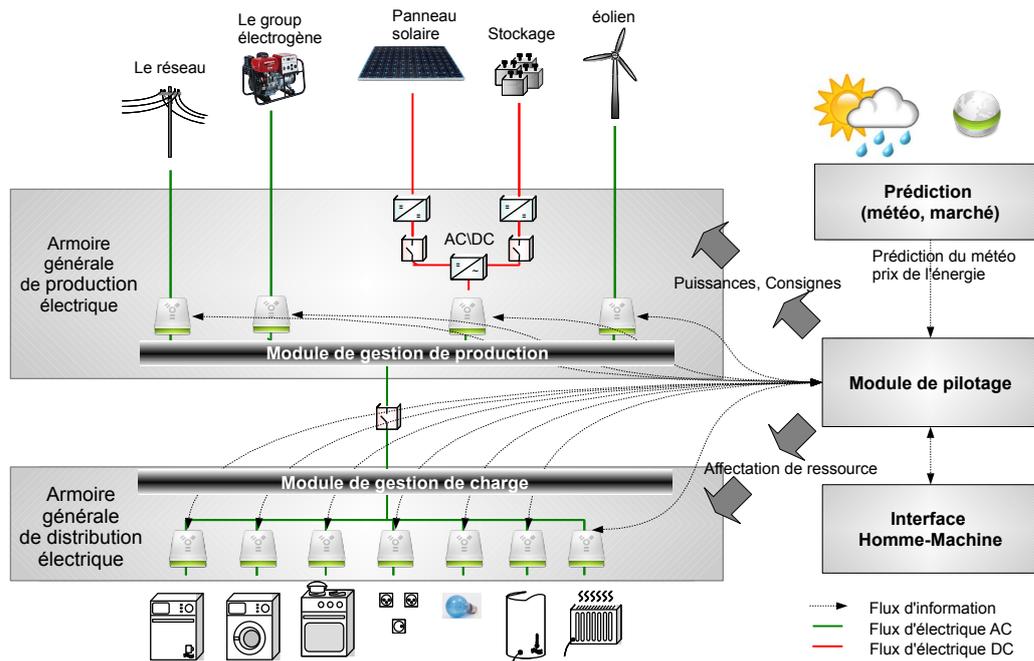


FIG. 10.1 – Architecture matérielle de Multisol

existe dès lors une possibilité de rencontrer des courants qui remontent vers le réseau de distribution ce qui va à l'inverse des habitudes de câblage actuelles. Cet aspect perturbe non seulement les électriciens qui doivent reprendre leurs méthodes de calcul qui n'étaient pas prévues pour traiter ce type de configuration mais aussi et surtout les contrôleurs chargés d'attester la conformité électrique des installations.

D'un autre côté, en passant à une production multi-sources, le schéma à un seul bâtiment s'avère compliqué, peu évolutif voire dangereux et donc coûteux en travaux d'études et de réalisation. En conséquence, le système de raccordement électrique entre bâtiment et réseau doit avoir une architecture matérielle appropriée.

L'idée proposée par le G2ELAB est de séparer les composants liés à la production électrique dans un coffret ou un boîtier séparé dit de "Production" qui alimentera une armoire de distribution plus traditionnelle. Le réseau, les groupes électrogènes et autres sources complémentaires apparaissent alors comme des générateurs d'appoint du solaire. En sortie de cet ensemble, un module de gestion doit permettre le pilotage et le couplage de ces sources en fonction des charges. Les sources DC disposent de convertisseurs DC/AC réglés pour optimiser le point de fonctionnement du générateur tout en respectant les contraintes de tension imposées par les onduleurs. Nous tenons compte de l'aspect redondant de l'onduleur notamment pour renforcer la sécurité de l'application. Le boîtier de production d'énergie dispose également d'un système de connexion qui permet de mesurer l'énergie propre revendue au réseau et l'énergie importée du réseau. Le système de gestion des charges dans le bâtiment peut être situé dans une armoire traditionnelle (voir la figure 10.1) qui permet de placer le système de contrôle-commande au plus près des lignes.

Concernant l'architecture matérielle du système de pilotage, plusieurs solutions sont proposées. Un module communiquant peut être intégré dans une prise électrique intelligente, qui intègre une interface de communication entre l'équipement et le système de pilotage. Cette interface de

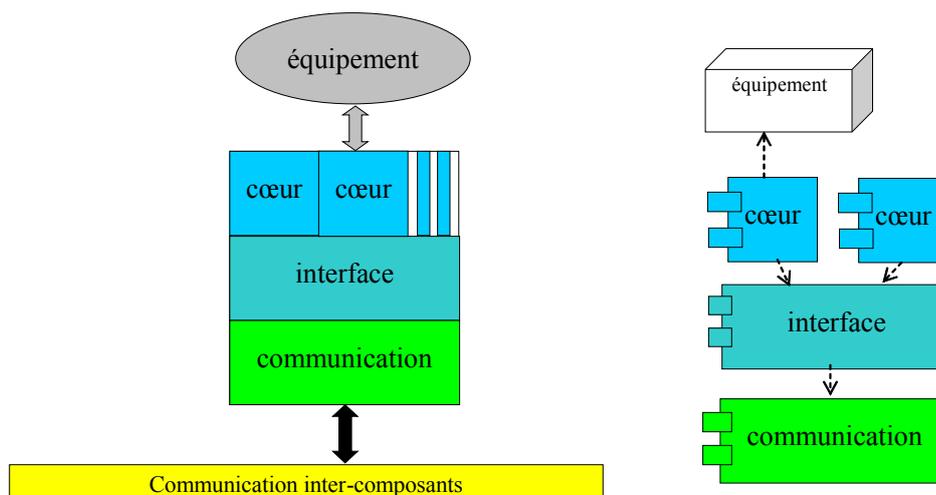


FIG. 10.2 – Architecture du composant logiciel du Multisol

communication permet de récupérer d'une part les informations disponibles sur l'équipement correspondant et d'autre part d'exécuter la commande envoyée par le module de pilotage. Cette architecture est modulaire avec des interfaces standardisées permettant l'interchangeabilité et l'évolutivité des composants du système.

L'avantage de cette architecture est qu'elle est adaptée au contexte actuel dans lequel les logements anciens représentent 66% de la totalité des logements en France avec un taux de renouvellement de l'habitat de l'ordre de 1% par an. Dans les bâtiments neufs aujourd'hui, la réglementation exige un câble par équipement. Dans ce contexte, le module de pilotage peut être situé au niveau du tableau électrique. De plus, dans un contexte plus futuriste, on peut imaginer que les fabricants de gros équipements (chauffage, cuisson, éclairage, électro ménager...) intègrent directement un module communiquant de contrôle-commande dans leurs systèmes de commande locale existants. Bien entendu, des solutions mixtes avec des modules de contrôle/ commande dans des prises intelligentes, au tableau électrique et dans les systèmes de commande locale existant peuvent être conçues. La distribution géographique du système de contrôle/commande n'a pas d'impact sur les algorithmes utilisés. Néanmoins, l'architecture logicielle de l'application doit s'y prêter.

1.2 Architecture logicielle

Nous proposons une architecture logicielle du système composée de différents composants logiciels. Les composants logiciels ont été définis pour conduire à des macros composants standard structurés en couche (figure 10.2). Les interfaces de communication des composants sont identiques, les interfaces et les messages échangés entre les composants sont standardisés.

Architecture de pilotage Nous reprenons l'architecture de pilotage introduite dans le chapitre 6 de ce mémoire, composée de trois couches de commande. La couche d'anticipation est chargée de prévoir la demande en énergie et les capacités de production. Elle détermine un plan d'affectation de la ressource énergie en coordonnant la consommation et la production. La couche réactive ajuste le plan calculé en absorbant des incertitudes de prédiction et les perturbations.

Le solveur est un organe qui est chargé d'effectuer les calculs d'optimisation du système. Il optimise la gestion des flux d'énergie dans l'habitat. Le fonctionnement du solveur est périodique, il peut aussi être déclenché par un service si le plan doit être remis en cause ou par une nouvelle prédiction météorologique ou encore une nouvelle programmation d'équipement. Pour réaliser les optimisations, les informations suivantes sont nécessaires :

- Chaque variable et ses caractéristiques
 - Est-elle partagée ? (globale ou locale à l'équipement)
 - Est-elle constante ? (Cherche-t-on à déterminer la valeur optimale de cette variable ou est-ce une donnée du problème ?)
 - Quel est son domaine de valeurs ? (binaire/entier/continu)
- La contribution à la fonction objectif (on minimise la somme de ces contributions)
- Un ensemble de contraintes sur ces variables

Pour pouvoir récupérer l'ensemble de ces informations avant chaque nouvelle optimisation, il est nécessaire de définir un protocole. Chaque composant utilisant le solveur devra s'enregistrer auprès du solveur selon un pattern de type " observer ", le solveur interrogera ensuite l'ensemble des macro-composants correspondants à des services enregistrés avant chaque optimisation.

Le module de pilotage est chargé de coordonner les charges avec les sources d'énergie. Chaque macro-composant de service doit être capable d'anticiper l'évolution de la consommation ou de la ressource disponible. A travers l'interface de communication, le module de pilotage va récupérer les modèles de différents services. Le plan d'affectation de la ressource est calculé par l'algorithme prédictif. Pour valoriser les résultats de recherche, nous sommes en train d'implémenter les mécanismes de pilotage qui sont présentés dans le chapitre 6 pour le projet Multisol.

Interface Homme-Machine Le système de gestion d'énergie est muni d'une Interface Homme-Machine permettant les ajustements de paramètres de confort, la renégociation avec l'utilisateur en cas d'échec du calcul du plan d'affectation et la restitution d'un tableau de bord incitatif à la réduction de la consommation. Cette interface joue le rôle de récupération des consignes de l'utilisateur sur la pré-programmation, par exemple la période d'occupation du bâtiment et les températures de consigne. Le suivi de la consommation doit également apparaître sur cette interface graphique.

Macro-Composant de prévision Ces modules sont utilisés par les services pour acquérir des informations depuis l'extérieur (et donc, principalement pour construire les contraintes pour le solveur) via Internet ou le réseau GSM pour la communication avec l'utilisateur par exemple. Les informations collectées sont diverses :

- Météo
- Coût de l'énergie
- Comportement de l'utilisateur

2 Cas d'étude

Dans le cadre de Multisol, afin de valider les résultats préliminaires de notre projet, on choisit un cas d'étude représentatif d'un habitat usuel. Il s'agit d'un appartement d'une surface habitable de 109.25 m², composé de 4 chambres, un salon, une cuisine, une salle de bain et un garage (voir



FIG. 10.3 – Le plan de l'appartement cible

Nom	Puissance max	Pilotable	Modélisé comme
chauffage	7kW	Oui	Service permanent
chauffe-eau	1,5kW(150 litres)	Oui	Service temporisé préemptible
machine à laver	2,1kW	Oui	Service temporisé non-préemptible
lave linge	1,6kW	Oui	Service temporisé non-préemptible
table de cuisson	2×1,5kW+2×1kW	Oui	Service temporisé non-préemptible
réfrigérateur	0,12kW	Oui	Service permanent
congélateur	0,21kW	Oui	Service permanent
télévision	0,6kW	Non	
éclairage	1,2kW	Non	

TAB. 10.1 – Liste des équipements disponible dans la maison

le plan de l'appartement cible dans la figure 10.3). Les services disponibles dans la maison sont donnée par le tableau 10.1.

2.1 Services disponibles dans l'appartement cible

Pour illustrer les résultats de l'optimisation des flux électriques dans le bâtiment, on a choisi un appartement dans lequel la plupart des services sont alimentés par de l'énergie électrique. Les services disponibles dans l'appartement sont présentés dans le tableau 10.1. Le mécanisme de pilotage doit effectuer un plan d'affectation des ressources d'énergie 24h à l'avance, le temps de discrétisation est $\Delta_a = 1h$.

2.1.1 Service de chauffage

Le service de chauffage est assuré par 4 radiateurs électriques de 1kW, un dans chaque chambre, un radiateur de 2kW pour le salon. Dans la salle de bain, on considère qu'un radiateur

soufflant est utilisé lorsque l'usager entre dans la salle de bain. Le modèle thermique d'une pièce est donné par le modèle à deux constantes de temps présenté dans le chapitre 4 :

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_a}{dt} \\ \frac{dT_m}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ r_i C_e & r_i C_e \\ 1 & -1 & 1 \\ r_i C_i & -r_a C_i & r_i C_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & W \\ r_a C_i & C_i & C_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ \phi_r \\ \phi_s \end{bmatrix} \quad (10.1)$$

Avec

- T_m la température de l'enveloppe de la pièce
- T_a la température ambiante de la pièce
- T_{ext} la température extérieure
- ϕ_r le flux thermique généré par le radiateur
- ϕ_s le flux énergétique apporté par le rayonnement solaire
- C_e la capacité thermique de l'enveloppe de la pièce
- C_i la capacité thermique du volume d'air dans la pièce
- r_i, r_a les résistances thermiques
- W la superficie de la fenêtre

$Srv(1)$, $Srv(2)$, $Srv(3)$, $Srv(4)$ correspondent aux services de chauffages de 4 chambres, $Srv(5)$ correspond au service chauffage de salon. La sensation thermique est modélisée par le système d'inéquations mixtes introduites dans le chapitre 5, la température optimale choisie est de $T_{opt} = 20^\circ\text{C}$, $T_{min} = 18^\circ\text{C}$, $T_{max} = 22^\circ\text{C}$. En sachant que l'appartement est occupé durant deux périodes de la journée : la première période est $[0h, 8h]$ et la seconde période est entre $[17h, 24h]$. Le critère de confort thermique est pris en compte lorsque le bâtiment est occupé. Cela permet de réduire significativement le nombre de variables binaires qu'il faut ajouter. Nous ajoutons donc 15 variables binaires $\delta(i, k)$ par service de chauffage qui permettent de décrire la sensation thermique dans une période k sous la forme :

$$\begin{aligned} |PMV(T_a(i, k))| &= \delta_a(i, k) \times 0,5(T_a(i, k) - T_{opt}) + (1 - \delta_a(i, k)) \times 0,5(T_{opt} - T_a(i, k)) \\ &\quad \forall i \in \{1, \dots, 5\}, k \in \{0, \dots, 18, 17, \dots, 24\} \\ &= F_1 \delta_a(i, k) + F_2 T_a(i, k) + F_3 T_a(i, k) \times \delta_a(i, k) + F_4 \\ &\quad \forall i \in \{1, \dots, 5\}, k \in \{0, \dots, 18, 17, \dots, 24\} \\ &= F_1 \delta_a(i, k) + F_2 T_a(i, k) + F_3 z_a(i, k) + F_4 \\ &\quad \forall i \in \{1, \dots, 5\}, k \in \{0, \dots, 18, 17, \dots, 24\} \end{aligned} \quad (10.2)$$

La variable semi-continue $z_a(i, k)$ est utilisée pour $z_a(i, k) \triangleq T_a(i, k) \times \delta_a(i, k)$. Le critère de satisfaction du service de chauffage est écrit sous la forme

$$U(i) = \sum_{k=1}^K \frac{|PMV(T_a(i, k))|}{24} \quad \forall i \in [1, \dots, 5] \quad (10.3)$$

2.1.2 L'eau chaude sanitaire

L'eau chaude sanitaire est fournie par le chauffe-eau qui a une puissance maximale de 1,5kW. Le besoin en eau chaude est estimé selon le tableau 2.2 au chapitre 2. Supposons que l'appartement est équipé d'un évier, d'un lavabo et une petite baignoire. Le besoin en eau chaude dans

une journée est :

$$E_e = 2,0 + 1,3 \times N = 2,0 + 1,3 \times 5 = 8,5kWh \quad (10.4)$$

Nous faisons l'hypothèse que la consommation du service de chauffe-eau peut être découpée en respectant la contrainte d'accumulation suffisante pour couvrir à tout moment le besoin en eau chaude de la journée. Le service en eau chaude est donc modélisé par un service préemptible qui a un horizon temporel couvrant toute la journée :

$$\sum_{k=1}^K E(6, k) = E_e \quad (10.5)$$

La contrainte sur la puissance consommée maximale de chauffe-eau est :

$$E(6, k) \leq 1500 \forall k \in [1, \dots, 24] \quad (10.6)$$

2.1.3 Service de lave-linge

Le service de lave-linge $Srv(7)$ assuré par la machine à laver est modélisé comme un service temporisé. En effet, selon [Liu et al. \(2005\)](#). La modélisation du comportement énergétique de la machine à laver est composée de trois phases : le phase chauffage de l'eau, la phase de lavage et la phase d'essorage. On considère que la machine à laver a été programmée avec un cycle à 90°C. La puissance consommée dans la phase de chauffage est de 92% de l'énergie totale consommée, 4% pour la phase de lavage et 4% pour la phase de l'essorage. La puissance consommée maximale dans la phase de chauffage est fixée à 98% de la puissance maximale (donnée par la notice d'un composant constructeur) et durant 1h.

Le modèle comportemental du service du lave-linge est finalement modélisé par un automate à état en trois états différents. Un état de l'automate correspond à un sous-service temporisé $Svr(7, j)$, $j \in [1, 2, 3]$. Nous considérons que le service de lave-linge est un service non-préemptif. En conséquence, le fonctionnement des trois phases doit s'enchaîner. Cela est modélisé par les contraintes suivantes :

$$\begin{aligned} s(7, 2) &= f(7, 1) \\ s(7, 3) &= f(7, 2) \end{aligned} \quad (10.7)$$

La demande du service du lave-linge est définie par différents paramètres. Le service doit se terminer dans la fenêtre de temps [9h, 16h], la date de fin souhaitée de l'utilisateur est 10h. On ajoute une variable binaire $\delta_u(7)$ qui est chargée de distinguer le retard ou l'avance du service de lavage. En sachant que le critère de satisfaction du service ne dépend que de la date de fin du service de lave-linge :

$$U(i) = \delta_u(7) \times (f_{opt}(7) - f(7, 3)) + (1 - \delta_u(7)) \frac{f(7, 3) - f_{opt}(i)}{6} \quad (10.8)$$

Pour compléter cette transformation, nous devons ajouter une variable semi-continue $z_u(7) \triangleq f(7, 3) \times \delta_u(7)$. La transformation équivalente de $z_u(7)$ se trouve dans le chapitre 5.

La formulation mathématique de chaque sous-service temporisé $Srv(7, j)$ est expliqué dans le chapitre 5. Considérons le sous-service $Srv(7, 1)$ en guise d'illustration :

$$s(7, 1) \in [f_{min}(7) - d(7, 3) - d(7, 1), f_{max}(7) - d(7, 3) - d(7, 1)] = [7, 5h, 14, 5h] \quad (10.9)$$

$$f(7, 1) \in [8, 5h, 15, 5h] \quad (10.10)$$

avec $d(i, j)$ la durée du sous-service $Srv(i, j)$.

La transformation liée à la période temporelle $\Delta_a = 1h$ nécessite d'ajouter les variables binaires $[\delta_{t1}(i, j, k)] \leftrightarrow [f(7, 1) \leq k\Delta_a]$. $[\delta_{t2}(i, j, k)] \leftrightarrow [f(7, 1) \leq k\Delta_a]$. Le nombre de variables $\delta_{t1}(i, j, k)$ et $\delta_{t2}(i, j, k)$ est égal à 14. L'énergie moyenne consommée dans la phase 1 s'écrit sous la forme :

$$E(7, j, k) = \begin{cases} E'(7, j, k) = P_{max}(7) (\text{Min}[f(7, j), (k + 1)\Delta] - \text{Max}[s(7, j), k\Delta]) & \text{Si } E'(i, j, k) > 0 \\ 0 & \text{Si } E'(7, j, k) \leq 0 \end{cases} \quad (10.11)$$

Finalement, la formulation est complétée par la transformation de (10.11) en forme mixte linéaire en ajoutant la variable binaire $[\delta_{t3}(i, j, k)] \leftrightarrow [E'(7, j, k) \leq 0]$. Le nombre de variables binaires $\delta_{t3}(i, j, k)$ est égal au nombre de périodes d'anticipation durant lesquelles $E'(7, j, k)$ peuvent être positives. Ainsi, la période active de $Srv(7, 1)$ est $[s_{min}(7, 1), f_{max}(7, 1)]$, le nombre de variables $\delta_{t3}(i, j, k)$ est de 8 variables :

$$E(7, j, k) = (1 - \delta_{t3}(i, j, k))E'(7, j, k) \quad (10.12)$$

La consommation du service $Srv(i)$ est la somme de la consommation de tous ses sous-services en utilisant au total 69 variables binaires :

$$E(7, k) = \sum_{j=1}^3 E(7, j, k) \forall k \in [1, \dots, K] \quad (10.13)$$

2.1.4 Service du lave vaisselle

Le service du lave-vaisselle $Srv(8)$ est modélisé de la même manière que le service de lave-linge $Srv(7)$. Le fonctionnement composé de trois phases différentes :

- selon le rapport Ciel (Sidler, 2002b), la phase de chauffage de l'eau absorbe 70% l'énergie totale consommée.
- 30% de l'énergie est utilisée pour le lavage à l'eau froide
- la campagne de mesure de Ciel (Sidler, 2002a) a montré que la consommation d'un lave-vaisselle est de l'ordre de 1,93 kWh durant 90 minutes.

La modélisation de la consommation de lave vaisselle est illustrée par la figure 10.4. La formulation du service de lave-vaisselle se base sur un automate à l'état à trois états, chaque état correspondant à un service temporisé.

2.1.5 Les sources d'énergie électrique

Le fournisseur d'énergie On fait l'hypothèse que la maison bénéficie d'un abonnement souscrit de 6kW avec l'option heures creuses et heures pleines. Ce service de source permanente est noté $Srv(9)$. La contrainte de capacité de source est écrite sous la forme :

$$E(9, k) \leq 6 \forall k \in [1, \dots, K] \quad (10.14)$$

Le coût d'achat de l'énergie électrique est $C(9, k)$, égal à 0,0654 € durant la période creuse ([2h, 7h] et [12h, 15h]) et 0,1074 € durant la période pleine

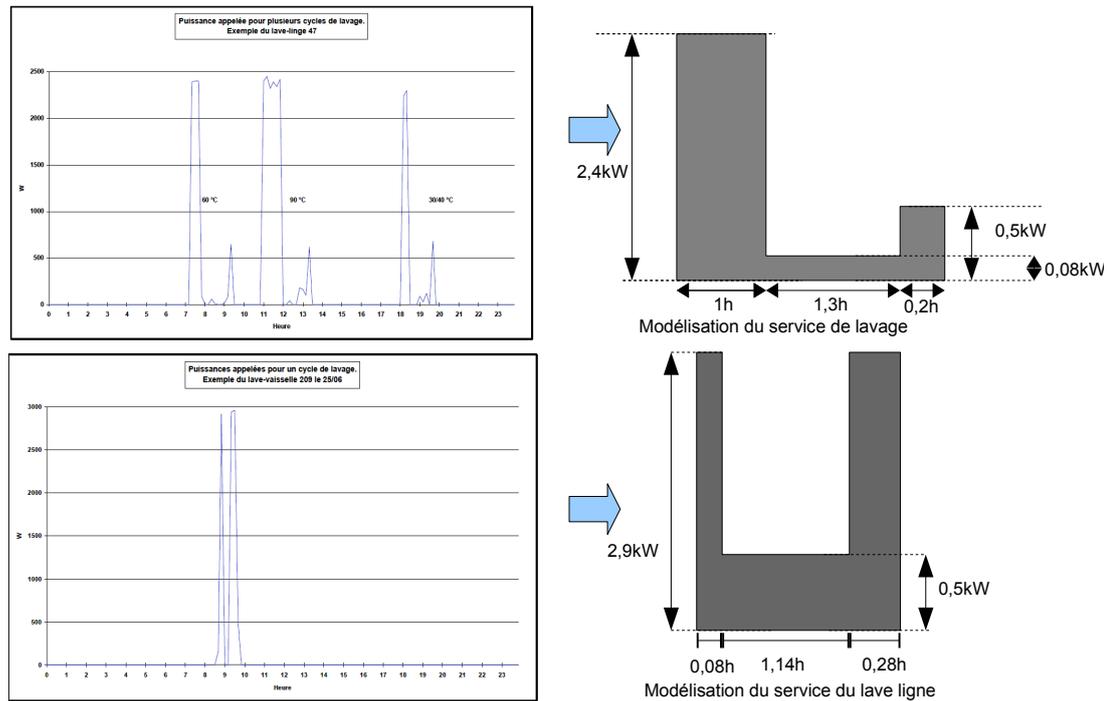


FIG. 10.4 – Modélisation de la consommation d'énergie électrique du service de lavage et le lave vaisselle

Les panneaux solaires Sur le toit de la maison et sur le garage on dispose d'une surface de $147,47 \text{ m}^2$. On peut mettre un système des panneaux photovoltaïques de 100 m^2 . La puissance générée correspond à 10% de l'énergie solaire rayonnée. Ce service est considéré comme un service de source locale intermittente noté $Srv(10)$.

Le service de vente d'énergie au réseau Comme dans le chapitre précédent, l'énergie produite par les panneaux solaires peut être réinjectée sur le réseau lorsque la consommation est moindre que la production locale. L'utilisateur peut choisir un raccordement en mode parallèle qui permet de revendre la totalité de l'énergie produite au réseau et importer de l'électricité du réseau pour la consommation locale.

Nous étudions deux stratégies d'utilisation de la ressource d'énergie produite par les panneaux photovoltaïques. Dans le premier, on cherche un moyen efficace d'utiliser l'énergie produite localement. L'équilibrage entre la consommation et la production est écrit sous la forme :

$$E(10, k) + E(9, k) = E(8, k) + E(7, k) + E(6, k) + E(5, k) + E(4, k) + E(3, k) + E(2, k) + E(1, k) \\ \forall k \in [1, \dots, K] \quad (10.15)$$

Dans la deuxième simulation, l'habitat revend l'énergie électrique produite par les panneaux photovoltaïques au réseau avec le prix favorable de $0,3\text{€}/kWh$. Dans ce cas, l'équation d'équilibrage de la production et de la consommation avec $E^{ex}(k)$ est l'énergie vendue au réseau durant

la période k :

$$\begin{aligned}
 E(9, k) &= E(8, k) + E(7, k) + E(6, k) + E(5, k) + E(4, k) + E(3, k) + E(2, k) + E(1, k) \\
 \forall k &\in [1, \dots, K] \\
 E_{ex}(k) &= E(10, k) \\
 \forall k &\in [1, \dots, K]
 \end{aligned} \tag{10.16}$$

2.1.6 Critères d'optimisation et modes de fonctionnement

Dans ce cas d'étude, nous tenons compte des critères d'optimisation suivants :

Critère de confort de l'utilisateur : Ce critère mesure l'impact de la solution par rapport la satisfaction de l'utilisateur :

$$J_1 = U(1) + U(2) + U(3) + U(4) + U(5) + U(6) + U(7) \tag{10.17}$$

Critère économique : Ce critère reflète le coût du plan d'affectation des ressources énergétiques qui est principalement déterminé par le coût de production de l'énergie :

$$J_2 = \sum_{k=1}^K (C(9, k)E(9, k) - 0.3E_{ex}(k)) \tag{10.18}$$

Critère écologique : L'électricité issue du réseau donne en France une émission $\tau_{CO_2}(9, k)$ de $66g/kWh$ de CO_2 dans l'atmosphère en période creuse et $383g/kWh$ dans période pleine :

$$J_3 = \sum_{k=1}^K E(9, k)\tau_{CO_2}(9, k) \tag{10.19}$$

Parmi les fonctionnalités de Multisol, l'utilisateur peut configurer dynamiquement son système de gestion d'énergie selon plusieurs modes différents en fonction de ses besoins :

- Mode confort : c'est le mode où le critère de confort est favorisé. Ce mode est souvent choisi durant la période d'occupation du bâtiment. Il s'agit de mettre en priorité le confort de l'utilisateur par rapport au critère économique et écologique
- Mode économique : dans ce mode, le critère sur le coût est favorisé. Le système de gestion d'énergie va chercher à décaler la consommation en période creuse et à réduire la consommation de certains services pour atteindre cet objectif.
- Mode écologique : ce mode vise à favoriser la réduction d'émissions du gaz carbonique du bâtiment. L'émission de gaz à effet de serre est calculée en fonction de ce critère. Le critère écologique est préféré dans ce mode tout en maintenant le critère de confort de l'utilisateur à un bon niveau.

2.2 Résultats

2.2.1 Stratégie 1 : Consommation locale de l'énergie solaire produite

Dans ce scénario, on examine le cas où le prix de vente de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques n'est pas favorable. On préfère la consommer localement. Pour la première simulation, le mode confort est choisi. Le problème est décrit grâce à la formulation générale présentée

dans la chapitre 5. Ce problème est un problème d'optimisation de grande taille qui contient 2212 variables et 2108 contraintes. Le nombre de variables binaires est de 190. La procédure d'optimisation implémentée est le recuit simulé hybride abordé dans le chapitre 7. Le temps de calcul est fixé à un maximum de 3 minutes.

Au bout de trois minutes, on obtient une solution approchée ayant un critère d'optimisation de 3% supérieur à la borne inférieure. Le résultat est illustré dans la figure 10.5. Le critère de coût de la consommation obtenue est de 4,37€ et le critère d'agrégation du confort de tous les services est de 9,5833e-004. La valeur du critère écologique est de 6,037 g d'émission du CO₂. L'utilisateur obtient alors un niveau de confort maximal dans ce mode de fonctionnement. Mais le critère de coût n'est pas négligé. Dans la figure 10.5, on constate que le système favorise la consommation des charges durant la période creuse en profitant du prix de l'électricité le moins cher. L'énergie électrique est alors accumulée sous forme d'énergie thermique dans l'enveloppe du bâtiment et dans l'air. En conséquence, la consommation des services de chauffage est réduite considérablement en soirée. On observe également que la date de fin des services temporisés non-préemptibles correspond parfaitement à la date de fin souhaitée. Le chauffe-eau est alimenté en partie par l'électricité du réseau et en partie complété par l'énergie électrique provenant des panneaux solaires.

Passons maintenant à l'implémentation du mode économique qui favorise la réduction de la facture électrique en gardant le confort à un bon niveau. Une solution optimale est obtenue par le recuit simulé hybride (voir la figure 10.6). La valeur du critère de coût est quasiment divisé par deux : 2,167€. Néanmoins, le critère de confort s'est dégradé : il est égal à 0.126. La dégradation du confort se traduit par une diminution de la température dans les environnements thermiques. Cependant, cette dégradation reste acceptable (19,5°C) par rapport à la température consigne qui est de 20°C. On observe également un léger décalage du service de lavage par rapport à sa date de fin souhaitée pour profiter de l'énergie gratuite produite par les panneaux photovoltaïques.

Deux simulations sont présentées, nous voulons montrer que grâce au système de gestion d'énergie, l'utilisateur peut contrôler la consommation de son habitat en fonction de ses besoins. Différents scénarios peuvent être imaginés, l'utilisateur peut imposer la contrainte financière au système et le système est chargé de trouver une solution minimisant le critère de confort. Le critère écologique permet à l'utilisateur d'avoir conscience de ses émissions de gaz carbonique.

2.2.2 Stratégie 2 : revente de l'énergie produite

On choisit de vendre la totalité de l'énergie au réseau. Les consommations des services dans l'habitat sont assurées par l'énergie vendue par le fournisseur d'énergie. On obtient une solution optimale par la recherche tabou hybride. Le critère économique est de 1,97 € dans le mode de confort. Cela signifie qu'avec la tarification actuelle, la seconde stratégie permet à confort égal, de réduire le critère de coût de 45% par rapport à la stratégie de consommation locale de l'énergie produite. Néanmoins, au niveau du critère écologique, l'émission de CO₂ est de 7,33 g soit une augmentation de +20% par rapport à la stratégie de consommation locale de l'énergie produite. En conséquence, l'utilisateur effectue un plan d'affectation des ressources beaucoup moins écologique.

Prédiction et la production



FIG. 10.5 – Résultats d'affectation des ressources d'énergie dans le mode de confort avec la stratégie de consommation locale de l'énergie produite

3 Conclusion

Le projet ANR Multisol nous a permis de montrer l'intérêt industriel des méthodes de gestion de l'énergie dans l'habitat que nous avons développées. En effet, nous avons pu adapter nos solutions à des bâtiments photovoltaïques raccordés au réseau en intégrant la problématique de revente d'énergie solaire sur le réseau et en montrant qu'il était possible d'optimiser la production d'énergie locale. Nous avons eu l'occasion d'appréhender les différentes problématiques liées à l'implémentation d'un système de gestion de l'énergie dans le bâtiment concernant tant l'architecture matérielle que l'architecture logicielle. Le projet s'achèvera, dans une année, par une implémentation réelle dans un véritable appartement.

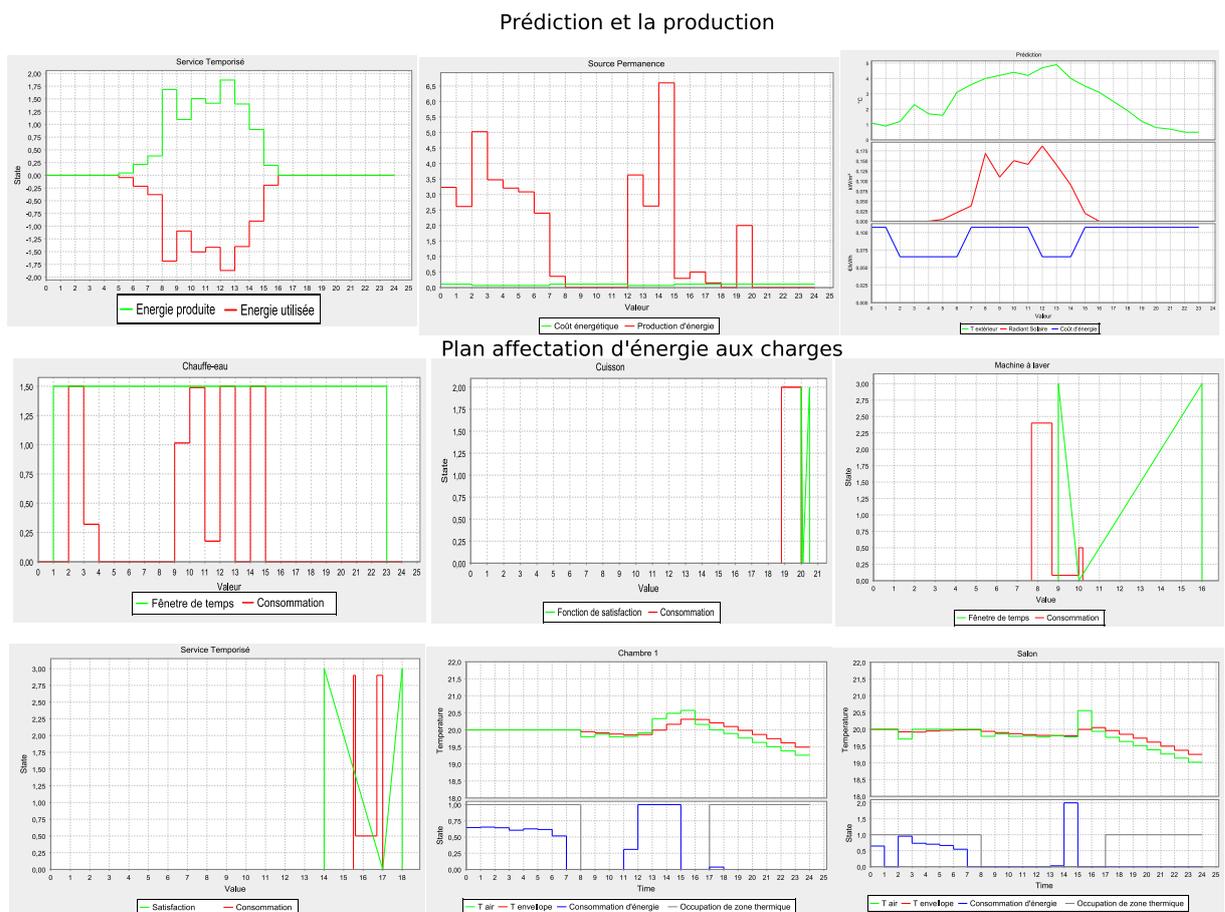
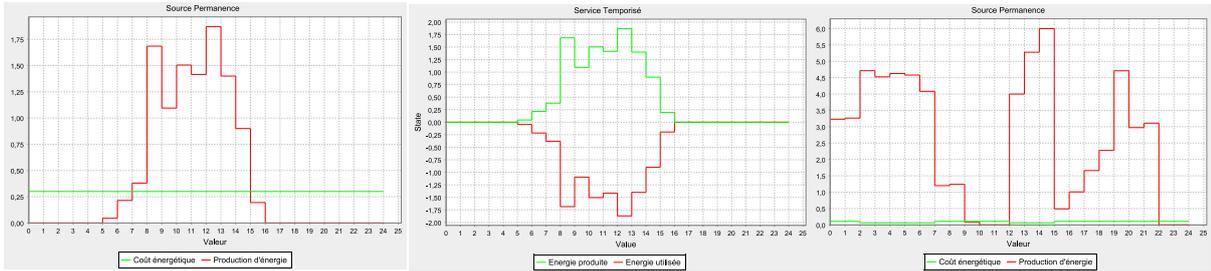


FIG. 10.6 – Résultats d'affectation des ressources d'énergie dans le mode économique avec la stratégie de consommation locale de l'énergie produite

Prédiction et la production



Plan affectation d'énergie aux charges

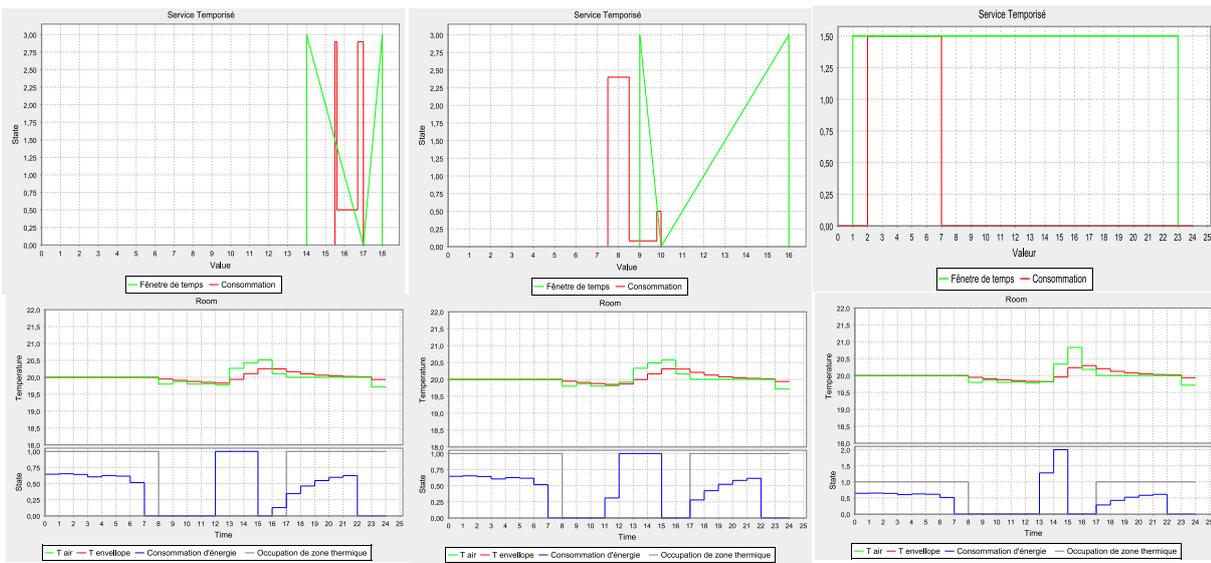


FIG. 10.7 – Résultats du plan d'affectation des ressources d'énergie électrique dans le mode en vendant l'énergie produite au réseau

Chapitre 11

Prévention des blackouts grâce au système de gestion d'énergie

1 Introduction

Ce chapitre est consacré à une application du système de gestion d'énergie pour le bâtiment dans le contexte de l'exploitation des réseaux électriques. L'objectif de cette application est de montrer l'intérêt du système de gestion de l'énergie dans le bâtiment pour le fournisseur d'énergie dans le problème de conduite et d'exploitation du réseau électrique. En effet, les bâtiments peuvent maintenant rendre des services dit "systèmes" au fournisseur grâce au système de gestion d'énergie. Nous pouvons donc envisager une nouvelle méthode d'exploitation du réseau en intégrant des flux d'information entre les fournisseurs d'énergie et les consommateurs. Un mécanisme de gestion des flux électriques composé de la coordination du système de production, du réseau de transport jusqu'au niveau le plus bas du réseau, le système de gestion d'énergie dans le bâtiment, peut être imaginé.

La menace du blackout Face à l'augmentation de la consommation, le système de production et de distribution d'électricité révèle certaines vulnérabilités. La terme *blackout* désigne une coupure d'électricité à large échelle concernant plusieurs régions voire la totalité d'un pays. Lorsqu'un blackout à grande échelle se produit, il peut causer des dommages économiques et sociaux énormes. Par exemple, l'immense blackout qui s'est produit le 28 août 2003 a conduit à un dommage économique approximatif de 7 à 10 milliards de dollars et a laissé 50 millions d'Américains sans électricité plusieurs jours ([PSOTF, 2004](#)). Son origine provenait de la station électrique de Parma dans l'Ohio, où l'entreprise FirstEnergy avait oublié d'ébrancher des arbres, causant une longue panne en cascade en période de forte consommation. L'analyse de 37 blackouts dans le monde ([Lu et al., 2006a,b](#)) a mis en évidence certains points communs entre les incidents de blackout : un blackout commence toujours sous certaines pré-conditions, par la propagation en cascade d'événements de déclenchement de protection conduisant à la coupure d'électricité dans une grande région.

[Lu et al. \(2006a\)](#) a proposé également une façon efficace de prévenir les blackouts en stoppant les effets de surcharge en cascade afin d'éviter la propagation. Dans les situations critiques où il existe une surcharge, un court-circuit, ou le réseau est incapable de transporter l'énergie demandée par les consommateurs. Dans ce cas, on recourt au délestage d'une partie des charges les moins

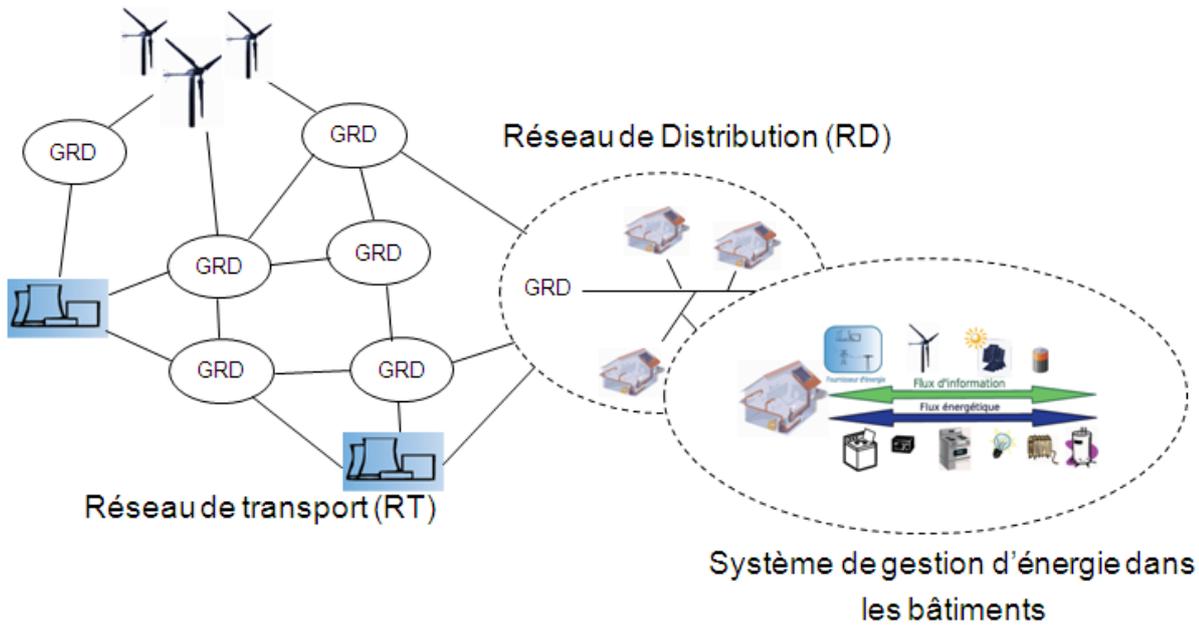


FIG. 11.1 – Principe du mécanisme de prévention des blackouts en utilisant Home Automation System

importantes pour parvenir à un équilibre entre production et consommation. Mais c'est une solution radicale car la coupure brutale ne prend pas en compte le confort du consommateur et ne permet aucune souplesse quant à son utilisation. Une solution de compromis est l'affectation dynamique de l'énergie électrique qui vise à réduire la consommation des usagers.

Parallèlement au projet Multisol, nous nous sommes intéressés à l'impact de nos travaux de recherche sur la prévention des blackouts. La coopération avec le laboratoire G2ELab nous a permis d'une part de recevoir des avis d'experts, d'autre part de situer notre problème par rapport à l'ensemble de la thématique de conduite et d'exploitation des réseaux électriques. Durant la première étape de cette coopération, nous avons cherché à apporter un élément de réponse au problème de prévention des blackouts par un mécanisme de délestage intelligent. La solution apportée n'est pas une méthode de délestage radicale comme la méthode qui est appliquée aujourd'hui mais un mécanisme prenant en compte le confort de l'utilisateur. Dans le cas où un incident se produit dans le réseau de transport, le système demande une réduction de la consommation aux usagers. Ce message urgent se propage à travers le réseau d'information. Le système de gestion d'énergie va alors chercher à réduire la consommation des services les moins prioritaires dans le bâtiment en gardant un bon niveau de confort pour l'utilisateur.

2 Mise en place d'un système de pilotage

2.1 Principe du mécanisme de prévention des blackouts

Selon une analyse de 37 incidents de blackouts dans le monde réalisée par (Lu et al., 2006a), les blackouts se produisent en général dans les réseaux de transport et on peut retenir certaines caractéristiques communes à ces incidents qui sont considérés comme les plus redoutables dans

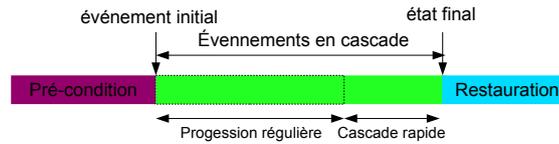


FIG. 11.2 – Les phases de blackout dans le cas général (Lu et al., 2006a)

le problème de conduite et d'exploitation du réseau :

- Le blackout se compose en général de 5 phases différentes (voir la figure 11.1). Tous les blackouts commencent avec certaines pré-conditions, ensuite ils entrent dans la phase de propagation et de cascade et finissent par la phase de restauration (voir la figure 11.2). Certains incidents de blackout n'ont pas de phase de propagation régulière mais entrent tout de suite dans la phase de cascade rapide.
- 60% des cas de blackout ont commencé par une chute de tension et 70% des cas sont initialisés par une surcharge en cascade.
- 30% des cas se produisent dans la période de pic en hiver, et 35% dans la période de pic en été. Seulement 35% des blackouts se produisent dans des conditions normales du réseau.

L'inquiétude que fait peser la menace d'incidents de type blackout dans le contexte de libéralisation du marché de l'énergie est très grande. Il est nécessaire de mettre en place un système de prévention des blackouts. Ce mécanisme doit privilégier tout d'abord l'étude des pré-conditions conduisant souvent à la phase des événements en cascade. A travers l'analyse de Lu et al. (2006a), on peut constater qu'il y a une grande probabilité qu'un blackout se produise lorsque la production ne peut pas suivre la consommation dans des conditions difficiles du réseau (une période de pic de consommation et des conditions météorologiques extrêmes). Dans le cadre de la coopération avec le laboratoire G2ELab, nous avons défini un mécanisme de prévention des blackouts composé de deux phases principales (voir illustration dans la figure 11.1) :

1. **Étape de détection** D'abord, lorsque les pré-conditions du blackout sont détectées, le gestionnaire du réseau doit réagir pour ramener le réseau dans son état de fonctionnement normal. Le gestionnaire du réseau de transport établit un délestage optimal qui consiste à déterminer la limite maximale de puissance consommée dans chaque nœud au réseau de transport. Ce mécanisme permet au réseau de retrouver des conditions normales. Ces travaux sont réalisés par le laboratoire G2ELab.
2. **Étape de délestage** Ensuite, grâce au système de communication entre le Gestionnaire du Réseau de Distribution (GRD) et le système de gestion d'énergie dans le bâtiment, le GRD impose dynamiquement une contrainte de puissance maximale consommée par chaque consommateur dans le réseau de distribution. Ce mécanisme permet de coordonner les activités énergétiques des différents consommateurs pour arriver à respecter la contrainte imposée par le délestage optimal déterminé. Au niveau du bâtiment, grâce au système de gestion d'énergie, on arrive à obtenir une solution permettant une dégradation maîtrisée du confort de l'utilisateur en suivant les contraintes imposées par le GRD. Ces travaux s'appuient sur nos résultats et vont être précisés dans la suite de ce chapitre.

2.2 Mécanisme de pilotage multi-échelle

Dans le problème de prévention des blackouts, la plus grande difficulté est de traiter le problème d'optimisation de grande taille en respectant les contraintes de temps de réponse très court avec un ordre de grandeur de moins de 10 secondes. L'origine de cette contrainte de temps de réponse provient des caractéristiques du blackout. Dans certains blackouts, il peut arriver que le temps entre la phase de pré-condition et la phase de cascade rapide soit inférieure à 30 secondes (Blackout en Italie du 12 Janvier 2003). En conséquence, si le système ne récupère pas l'énergie nécessaire dans un temps très court, cela risque probablement de produire un blackout dans le réseau de transport.

Notre idée principale est d'utiliser l'architecture de conduite introduite dans le chapitre 6 en ajoutant un niveau de coordination de la consommation pour différents bâtiments. Ce mécanisme de pilotage permet de découper le problème suivant plusieurs échelles soit spatiales soit temporelles. Chaque couche de commande embarque une connaissance de son contexte qui n'est pas partagée avec les autres couches : les couches ne communiquent que par des flux d'informations très synthétiques. Cette organisation permet de mieux gérer les problèmes de grande taille, de plus, les aspects confidentiels ou privés des informations dans les bâtiments sont respectés. En assemblant les résultats de différentes couches, on retrouve la solution globale approchée tout en ayant un temps de calcul relativement faible pour assurer la réactivité du système.

2.2.1 La couche de gestion d'énergie dans le bâtiment

Nous supposons que l'ensemble des bâtiments connectés au réseau dispose d'un système de gestion d'énergie intégré. Une interface de communication entre le bâtiment et le GRD permet d'échanger des informations. L'idée de communiquer la satisfaction du gestionnaire de réseau aux différents consommateurs est abordée dans (Abrams et al., 2006). Une amélioration de ce mécanisme est abordée ici pour réduire la phase d'échange de messages. La satisfaction $S_{\mathcal{B}}(i, k)$ du bâtiment \mathcal{B}_i reflète la satisfaction de l'utilisateur par rapport à la stratégie de délestage du GRD. Elle est calculée par le système de gestion. Supposons que le bâtiment \mathcal{B}_i propose un ensemble de services $Svr(j), j \in \{1, \dots, \mathcal{N}_i\}$. La satisfaction $S_{\mathcal{B}}(i, k)$ est calculée à partir de la satisfaction du service le moins satisfait en sachant que le critère de satisfaction est un critère à minimiser :

$$S_{\mathcal{B}}(i, k) = \text{Max} \{S(Svr(j))\} \quad \forall j \in \{1, \dots, \mathcal{N}_i\} \quad (11.1)$$

L'affectation dynamique dans le bâtiment est réalisée par la couche réactive présentée dans le chapitre 8.

2.2.2 La couche de commande du GRD

Supposons que le GRD dispose d'un mécanisme de pilotage qui se situe à un niveau plus haut que le mécanisme de gestion de l'énergie dans le bâtiment. On prend également pour hypothèse que le délestage optimal a été effectué en imposant une puissance consommée maximale au GRD, et ce seuil est noté $\overline{P_g(k)}$. Pour simplifier le problème, on suppose que la puissance consommée dans le bâtiment est purement active. Le GRD joue le rôle de fournisseur d'électricité pour un ensemble de bâtiments $\mathcal{B}_i, i \in \{1, \dots, \mathbf{N}\}$. La puissance consommée à l'instant k dans le bâtiment

\mathcal{B}_i est notée $P_{\mathcal{B}}(i, k)$. La contrainte de ressource maximale du GRD est écrite sous la forme :

$$\sum_{i=1}^N P_{\mathcal{B}}(i, k) \leq \overline{P_g(k)} \forall k \quad (11.2)$$

On suppose que chaque bâtiment \mathcal{B}_i a une limite inférieure de puissance consommée $\underline{P_{\mathcal{B}}(i)} > 0$ qui est une réserve nécessaire pour alimenter les besoins critiques dans le bâtiment. Le seuil supérieur de puissance consommée noté $\overline{P_{\mathcal{B}}(i)}$ correspond à la puissance souscrite avec le fournisseur d'énergie. La contrainte de puissance affectée au bâtiment \mathcal{B}_i doit respecter la contrainte suivante :

$$\overline{P_{\mathcal{B}}(i)} \geq P_{\mathcal{B}}(i, k) \geq \underline{P_{\mathcal{B}}(i)} \forall i, \forall k \quad (11.3)$$

Régulation des puissances affectées $P_{\mathcal{B}}(i, k)$ A chaque période k , le système de gestion d'énergie dans le bâtiment remonte une information concernant la satisfaction ou le confort de l'utilisateur notée $S_{\mathcal{B}}(i, k)$. Le GRD va interpréter cette information pour redistribuer l'énergie en fonction de la satisfaction courante.

En général, les charges dans le bâtiment fonctionnent selon un mode tout ou rien. En conséquence, la puissance consommée $P_{\mathcal{B}}(i, k)$ de chaque bâtiment est une variable entière qui est générée par la combinaison des consommations des équipements. Supposons qu'un équipement dans le bâtiment a deux états différents soit activé, soit désactivé. La combinaison de toutes les possibilités de contrôler \mathcal{N} équipements est $2^{\mathcal{N}}$. En évitant l'explosion combinatoire, nous proposons une relaxation sur le variable $P_{\mathcal{B}}(i, k)$ en considérant cette variable comme continue.

La conséquence de cette relaxation est que la puissance consommée réellement $p_{\mathcal{B}}(i, k)$ par le bâtiment \mathcal{B}_i pourrait effectivement être inférieure à la limite de puissance déterminée par le GRD, alors que la limite de puissance affectée $P_{\mathcal{B}}(i, k)$ n'est pas utilisée totalement. L'efficacité du système pourrait être améliorée en reprenant la puissance non-utilisée $P_{\mathcal{B}}(i, k) - p_{\mathcal{B}}(i, k)$ pour l'affecter à un autre bâtiment. Pour minimiser cet effet, on définit la notion suivante :

Définition 26 L'efficacité de l'affectation de puissance du bâtiment \mathcal{B}_i est définie par l'équation suivante :

$$\eta_{\mathcal{B}}(i, k) = \begin{cases} \frac{P_{\mathcal{B}}(i, k)}{p_{\mathcal{B}}(i, k)} & \text{Si } p_{\mathcal{B}}(i, k) > 0 \\ 0 & \text{Si } p_{\mathcal{B}}(i, k) = 0 \end{cases} \quad (11.4)$$

Les échanges de puissance non-utilisée sont réalisés par le programme linéaire suivante

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max} \left\{ \sum_{i=1}^N (\eta_{\mathcal{B}}(i, k-1) + S_{\mathcal{B}}(i, k-1)) \times P_{\mathcal{B}}(i, k) \right. \\ \text{Pour que} \\ \left. \sum_{i=1}^N P_{\mathcal{B}}(i, k) \leq \overline{P_g(k)} \forall k \right. \\ \left. \overline{P_{\mathcal{B}}(i)} \geq P_{\mathcal{B}}(i, k) \geq \underline{P_{\mathcal{B}}(i)} \forall i, \forall k \right. \end{array} \right. \quad (11.5)$$

L'objectif du programme linéaire (11.5) est de maximiser l'efficacité de l'affectation de la puissance du GRD. Le coefficient $\eta_{\mathcal{B}}(i, k-1) + S_{\mathcal{B}}(i, k-1)$ est utilisé pour appliquer une heuristique visant à affecter plus d'énergie au bâtiment qui est le moins satisfait en utilisant la puissance affectée le moins efficacement. La fonction objectif du programme linéaire (11.5) est sous la forme d'une somme de variables multipliées par des coefficients. La solution optimale du

problème a tendance à privilégier les variables ayant les plus grandes. En conséquence, la programmation linéaire (11.5) va assigner une puissance plus grande aux bâtiments ayant la somme $\eta_{\mathcal{B}}(i, k-1) + S_{\mathcal{B}}(i, k-1)$ plus grande. En fait, ce bâtiment est prioritaire parce que la puissance affectée est insuffisante pour qu'il réalise certains services. En conséquence le critère de confort est dégradé. Le principe de cette programmation linéaire est simple mais approprié au problème traité. Elle permet de traiter un problème de grande taille avec un temps de calcul qui est relativement faible.

3 Mise en œuvre

3.1 Structure du simulateur

Dans un premier temps, on a cherché à valider nos résultats de recherche avec un simulateur. Dans le cadre de la coopération avec le G2ELAB, on propose un simulateur composé de trois éléments principaux :

- Un simulateur de réseau qui consiste à simuler le comportement du réseau de transport par le logiciel Eurostag
- Un algorithme de délestage optimal du réseau du transport qui est écrit sous Matlab
- Un mécanisme de délestage entre le GRD et le système de gestion d'énergie dans le bâtiment est implémenté dans le langage Java en utilisant la programmation multithreading pour modéliser l'évolution des charges dans les bâtiments. Chaque équipement et bâtiment évolue indépendamment des autres. Cela permet d'avoir un comportement dynamique de la consommation et une gestion d'énergie plus réaliste.

Pour l'instant, les trois simulateurs communiquent par l'intermédiaire de Matlab, le temps de de l'envoi des messages dans le réseau d'information est considéré comme négligeable.

3.2 Exemple d'application

Exemple 1 : Pour faciliter la visualisation des résultats du simulateur, nous prenons un exemple académique composé de 2 habitats différents qui sont gérés par un GRD. On simule le comportement de la consommation du bâtiment en période de pic de consommation en hiver. Pour avoir une modélisation plus proche de la réalité, on suppose que, durant cette période, les consommations des services de chauffage et des services de cuisson sont dominantes au niveau du secteur résidentiel.

Dans chaque maison, deux types de charges sont modélisées : les systèmes de chauffage électrique qui représentent un service permanent et des services temporisés illustrés par des services de cuisson de type four ou plaque chauffante. On suppose que ces équipements sont interruptibles. On suppose aussi que les modèles de la zone thermique sont identiques avec un temps d'échantillonnage $T_s = 1$ seconde et chaque service de chauffage a une puissance de 1 kW :

$$\begin{bmatrix} T_a(k+1) \\ T_m(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,97 & 0,028 \\ 0,0085 & 0,99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a(k) \\ T_m(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,00047 & 0,039 & 0,014 \\ 2 \times 10^{-6} & 0,00029 & 6,06 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ \phi_s \\ P_r \end{bmatrix} \quad (11.6)$$

Le service de cuisson est modélisé par un modèle thermique du premier ordre. La commande locale joue le rôle de régulateur de température de la plaque chauffante autour de 250°C. La

puissance consommée par la plaque chauffante est de 2kW.

$$T_f(k+1) = 0,99T_f(k) + 2,05P_f \quad (11.7)$$

Le premier habitat compte 4 services de chauffage $\{Svr(1), Svr(2), Svr(3), Svr(4)\}$ et un service de cuisson $Svr(5)$. Le deuxième habitat ne dispose que de trois services de chauffage $\{Svr(6), Svr(7), Svr(8)\}$. Le scénario de simulation consiste à baisser la puissance limite proposée par le GRD pendant 42 minutes pour expérimenter le mécanisme de pilotage multi-échelle composé du GRD et des deux habitats.

Le résultat est illustré dans la figure 11.3. On commence avec une puissance maximale égale à 10kW, ensuite nous réduisons la puissance maximale $\overline{P_g(k)}$ par pas de 1kW à chaque fois. Nous conduisons la simulation jusqu'à l'état critique de 3kW pour voir son impact sur les consommateurs. Le moment de la réduction de puissance est généré aléatoirement pour tester la réactivité du système. On constate d'abord que cette réactivité est largement suffisante pour répondre aux contraintes nécessaire à la prévention d'un blackout. Ensuite en regardant le critère de satisfaction de l'utilisateur, on constate qu'il y a une légère dégradation du confort reflétée par une baisse de la température ambiante dans la zone thermique et de la température de la plaque chauffant. Le comportement des 7 services de chauffage étant assez similaires, nous n'avons pris que trois services pour l'illustration. Mais le plus intéressant à observer est que le critère de satisfaction pour les différents services dans les deux habitats sont équilibrés : aucun service n'est plus pénalisé que les autres. Dans habitat 1, on peut observer une dégradation de la satisfaction du service $Srv(1)$ par rapport au service de cuisson $Srv(5)$ car le service de cuisson a une configuration plus prioritaire que les services de chauffage.

En comparant l'affectation des puissances entre les deux habitats, nous pouvons observer que l'affectation de la puissance est fonction de la puissance disponible et de la satisfaction des différents services. Nous observons que l'affectation de l'énergie est plus favorable à l'habitat 2 tout simplement parce qu'à l'origine l'habitat 1 a une charge plus importante que celle de l'habitat 2.

Exemple 2 : Partons du même principe que dans l'exemple 1. Nous voulons cette fois simuler un problème à grande échelle pour avoir une vision plus réaliste du problème. Une simulation de 400 habitats est effectuée, avec deux types de maisons différentes : 200 maisons correspondent à l'habitat 1 qui contient 4 services interruptibles et 200 maisons sont du type de l'habitat 2 composées de 3 services interruptibles. Le simulateur doit exécuter une grande quantité de processus en parallèle pour simuler les 400 habitats : 1400 services de chauffages, 200 services de cuisson et un GRD. Le pic de puissance consommée totale peut atteindre théoriquement 1,8GW.

Le résultat de la simulation est illustré par la figure 11.4. Pour l'ensemble de 400 habitats gérés par GRD, on choisit aléatoirement deux habitats pour illustrer l'impact de la gestion sur le confort de l'utilisateur. On suppose que la consommation dans le bâtiment se produit durant la période de pic de consommation. La prévention du blackout a imposé une contrainte forte sur chaque GRD. La puissance maximale $\overline{P_g(k)}$ est fixée d'abord à 1,2GW. Ensuite, nous prenons un scénario pour réduire ce seuil de la même manière que celle expérimentée dans l'exemple 1. La période [866, 1028] est une période critique lorsque $\overline{P_g(k)}$ descend à 0,525 GW (30% de la puissance maximale consommée), durant cette période, la puissance maximale consommée de chaque habitat est presque au niveau le plus bas : 1kW. Pourtant, la température dans les pièces reste au niveau acceptable de 18,5 °C. La température de la plaque chauffant reste entre 200°C

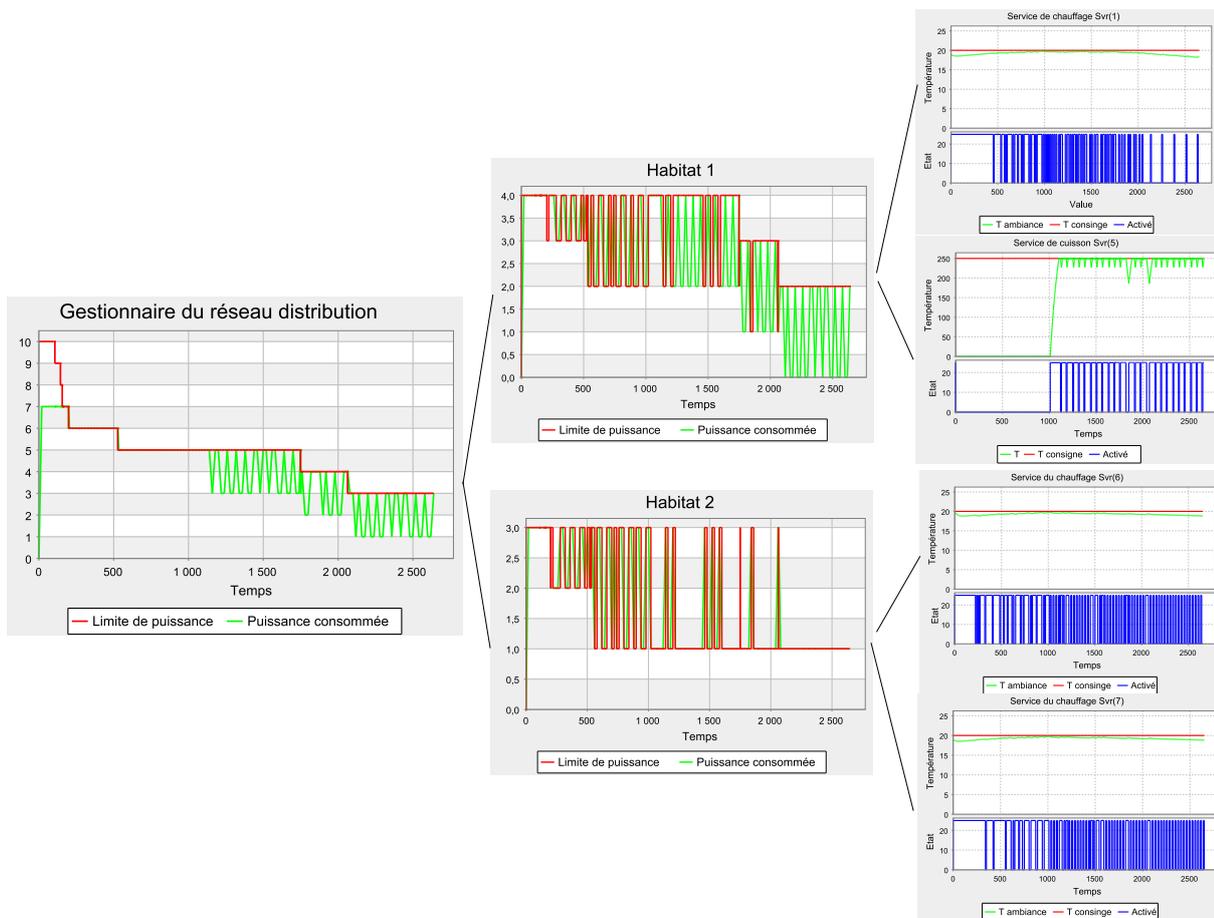


FIG. 11.3 – Résultat de simulation sur l'exemple 1

et 250°C. Pour constater la réactivité du mécanisme de gestion d'énergie, on observe que même si le calculateur doit traiter une grande quantité de calculs en parallèle, la contrainte du temps de réponse est toujours respectée. La puissance consommée reste très proche de la puissance limite, ce qui signifie que la ressource affectée est distribuée efficacement.

4 Conclusion

Même si, au premier abord, l'impact de la gestion de l'énergie dans une habitation peut paraître limité, nous avons montré à travers la gestion des blackouts qu'un parc de logements équipés de systèmes de gestion de l'énergie pouvait permettre aux gestionnaires de réseaux de mieux réagir face aux situations de blackout. En effet, ces systèmes de gestion ouvrent de nouvelles perspectives aux fournisseurs d'énergie qui ont désormais un moyen de limiter la consommation de leurs clients. Cette souplesse inattendue pour un fournisseur d'énergie peut lui permettre d'optimiser sa production, en réduisant ses coûts ou en réduisant les émissions de gaz à effet de serre en évitant le plus possible d'avoir recours à des énergies polluantes et coûteuses.

Conclusion générale

Les travaux que nous avons présentés dans ce mémoire introduisent une nouvelle problématique de recherche : concevoir un logement avec ses occupants comme un système énergétique qui peut être commandé. Le problème était de proposer des outils qui permettent de gérer automatiquement l'énergie électrique dans le bâtiment en tenant compte du confort des occupants, des coûts économiques et environnementaux. Nous avons montré qu'il y avait des analogies intéressantes entre les systèmes de production de biens et les systèmes de gestion de l'énergie dans le bâtiment ce qui nous a permis de nous appuyer sur les concepts de planification et d'ordonnancement pour résoudre le problème posé. Nous avons examiné les différentes charges et services dans le bâtiment pour proposer une formulation standardisée des différents services que l'on peut rencontrer dans l'habitat, qu'ils soient consommateurs ou producteurs d'énergie, ou qu'ils permettent de stocker de l'énergie. Nous avons modélisé le confort pour les occupants et montrer que les services permanents ou temporisés, représentés par des équations différentielles et des automates à états finis, peuvent être reformulés sous la forme d'un modèle dynamique à variables binaires.

Nous avons alors proposé une solution de conduite qui coordonne consommation et production d'énergie en s'appuyant sur un mécanisme de pilotage multi-couches capable de prendre en compte des flux d'événements à échelles de temps multiples. Nous avons proposé une méthode de résolution hiérarchisée capable d'appréhender tout problème exprimé sous la forme générique que nous proposons. L'architecture se décompose en trois couches. Une couche locale temps-réel constituée de régulateurs permettant d'absorber un certain nombre de perturbations. Une couche réactive rapide, fonctionnant à l'échelle de la minute, qui permet d'ajuster en temps réel le plan d'affectation d'énergie déterminé par la couche d'anticipation qui travaille à une échelle de temps lente, de l'ordre de l'heure, pour être compatible avec la précision des prévisions disponibles. La couche d'anticipation s'appuie sur un algorithme qui combine méthode de résolution exacte et heuristique pour accélérer la convergence vers un optimum global. L'heuristique permet de tenir compte de la structure du problème et d'éviter aux méthodes exactes d'explorer des régions sans intérêt. Plusieurs méta-heuristiques, recherche tabou, recuit simulé et algorithme génétique, ont été adaptées à la génération de sous-problèmes qui sont alors résolus par un algorithme de programmation linéaire mixte. Nous avons montré que cette combinaison permettait de converger beaucoup plus rapidement vers un optimum global ou une bonne solution si le temps de calcul disponible est réduit.

Cette architecture de conduite permet d'appréhender certaines perturbations, même importantes. En plus des propriétés de robustesse vis-à-vis des perturbations que confère la structure en couches, nous avons montré qu'il est même possible de prendre en compte certaines incertitudes dès la couche d'anticipation pour accroître encore la robustesse des solutions obtenues. Nous avons proposé une approche qui permet de prendre en compte des incertitudes sous forme

d'intervalles lors de la résolution du problème d'optimisation. Il s'agit d'une adaptation de la programmation multi-paramétrique.

Les différents résultats obtenus ont été validés sur différents types d'application. Le projet ANR Multisol nous a permis de montrer l'intérêt industriel et sociétal des méthodes de gestion de l'énergie dans le bâtiment que nous avons développées. En effet, nous avons pu adapter nos solutions à des bâtiments photovoltaïques raccordés au réseau en intégrant la problématique de revente d'énergie solaire et en montrant qu'il était possible d'optimiser la production d'énergie locale.

Une collaboration avec le laboratoire G2ELAB nous a permis d'étudier l'impact global que peuvent avoir les systèmes de gestion d'énergie dans le bâtiment. Nous avons montré qu'un parc de logements équipés de systèmes de gestion de l'énergie pouvait permettre aux gestionnaires de réseaux de mieux réagir face aux situations de blackout. En effet, le système de gestion proposé ouvre de nouvelles perspectives aux fournisseurs d'énergie qui ont désormais un moyen d'influencer la consommation de leurs clients sans les déconnecter complètement. Cette souplesse convoitée par les fournisseurs d'énergie peut leur permettre d'optimiser leur production, en réduisant leurs coûts et leurs émissions de gaz à effet de serre.

Nos travaux ouvrent une nouvelle direction de recherche qui rapproche de nombreuses disciplines scientifiques : le contrôle commande, la recherche opérationnelle, le génie électrique, le génie civil, l'informatique et même l'architecture. Nous avons montré qu'une habitation pouvait être conçue comme un système et qu'il était possible de contrôler sa consommation électrique. De nombreuses voies doivent être approfondies et validées dans le domaine de la modélisation. En effet, il faut concevoir des modèles pour chacun des services de l'habitat qui soit compatible avec l'objectif d'apprentissage et de recalage automatique des modèles. Même si les modèles de comportement thermique d'enveloppes de bâtiments foisonnent, le nombre de paramètres à estimer est trop important au regard du peu d'information disponible. Les mécanismes d'apprentissage et les modèles correspondant sont essentiels à la diffusion des systèmes de gestion d'énergie dans l'habitat. Étant donné le contexte, il n'est guère concevable d'effectuer des campagnes de mesure pour configurer un système domotique.

Du fait du nombre et de la diversité des acteurs de l'habitat, il est essentiel de s'orienter vers des solutions qui favorisent la modularité. Ainsi, il faudrait pouvoir embarquer les modèles d'un équipement ainsi que les algorithmes d'apprentissage correspondant dans un composant logiciel fermé doté d'interfaces standardisées. Cela oriente les recherches vers l'informatique distribuée. De plus, les solutions que nous avons explorées sont synchrones. Or, notamment pour la couche réactive, il est inutile d'échanger des messages en l'absence d'évènement particulier. Il faut donc favoriser l'autonomie des composants et l'asynchronisme. Le besoin d'auto-adaptation structurel, plus techniquement le besoin d'équipements plug-and-play, laisse à penser que le paradigme multi-agent est une voie intéressante à explorer. Ainsi, il serait possible de ne partager qu'un minimum de connaissances entre modules et de fonctionner de manière asynchrone par échange de messages à l'image d'une société humaine.

Concernant la partie algorithmique, nous avons proposé une structure de modèle standardisée qui permet de représenter tous les services que nous avons recensés dans l'habitat. Pour implémenter le système de gestion d'énergie que nous proposons, il faut concevoir un protocole de communication qui permettra d'échanger les contraintes et modèles de comportement. Au niveau de la couche d'anticipation, nous avons montré que la combinaison d'heuristiques avec de la programmation linéaire mixte permettait d'accélérer grandement la convergence vers un

optimum global. Cependant, nous avons observé que les heuristiques étaient très sensibles au réglage de leurs paramètres (tabou tenure, température de recuit, condition d'arrêt, population initiale,...). Un réglage peut être particulièrement efficace pour la résolution de certains problèmes mais beaucoup moins performant pour d'autres. Une méthode d'ajustement dynamique des paramètres des heuristiques qui s'appuierait sur l'évolution des solutions trouvées permettrait de réduire cette sensibilité. Il est aussi possible de mettre en parallèle plusieurs algorithmes de résolution qui, à certains moments, puissent s'échanger leurs solutions courantes.

Des améliorations peuvent aussi être réalisées afin de bénéficier de la robustesse aux incertitudes de la méthode basée sur l'algorithme de liste avec l'exploitation des modèles de comportement par les méthodes de programmation dynamique. Il faudrait représenter les situations courante et passée et extrapoler sur un horizon de quelques périodes réactives la situation courante pour permettre à la programmation dynamique d'acquiescer cette réactivité. Enfin, d'autres progrès peuvent encore être accomplis dans la prise en compte a priori des incertitudes connues. En effet, la méthode multi-paramétrique peut être complétée par des approches qui conduisent à des solutions robustes par rapport un des ensembles de scénarios.

Si les systèmes de gestion de l'énergie électrique dans le bâtiment que nous proposons se déploient un jour dans nos logements, cela bouleversera certainement notre rapport à l'énergie. En effet, cela facilitera la rupture avec l'attitude d'exigence vis-à-vis du service. Nous en viendrons à caractériser notre conception du confort, avec vraisemblablement une tarification liée aux exigences, avant de solliciter des services sans savoir comment ou quand ils seront réalisés. Il faudra faire confiance au système de conduite qui veillera à satisfaire des objectifs parfois contradictoires de confort, de coût et d'environnement. Il peut paraître surprenant aujourd'hui de programmer par exemple un lavage de linge sans pouvoir en connaître précisément la date de fin mais de nombreux auteurs s'accordent à dire que l'objectif facteur 4 pour 2050 ne peut pas uniquement être atteint en comptant sur les progrès technologiques. Même sous les hypothèse les plus optimistes, il faudra modifier radicalement notre rapport à la consommation. Les systèmes de gestion d'énergie dans l'habitat rendent plus confortable cet extraordinaire changement de paradigme dans l'histoire de l'humanité.

Un système de gestion de l'énergie dans le bâtiment peut, en plus de l'énergie électrique, permettre de gérer d'autres types d'énergie. Cela ouvre de nouvelles perspectives sur de nouveaux types de bâtiments. A travers de nombreux échanges avec le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, qui s'intéresse à des maisons énergétiquement autonomes utilisant un système de double enveloppe comportant du matériau à changement de phase pour stocker de l'énergie sous forme thermique (Faure et al., 2007a,b), il est apparu qu'une combinaison d'un système de gestion multi-énergie avec ces nouveaux types de bâtiments pourrait bouleverser la façon de concevoir les bâtiments.

Bibliographie

- Abras, S., Ploix, S., Pesty, S., et Jacomino, M. (2006). A multi-agent home automation system for power management. In *The 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Setubal, Portugal. (cité page 152.)
- ADEME (2002). Des éoliennes dans votre environnement ? Technical report, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. (cité page 23.)
- ADEME (2005). L'électricité solaire photovoltaïque dans le bâtiment retour d'expérience en France du Projet Européen Hip Hip. Technical report, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. (cité page 37.)
- ADEME (2006a). Ventilation - perméabilité. Technical report, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. (cité page 34.)
- ADEME (2006b). Ventilation performance, double flux ou modulée en fonction de l'occupation. Technical report, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. (cité page 34.)
- AFNOR (2006). Ergonomie des amniances thermiques , détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PDD et par des critère de confort thermique local. *Norme européenne, norme française*. (cité page 66.)
- Al-Hasan, A., Ghoneim, A., et Abdullah, A. (2004). Optimizing electrical load pattern in kuwait using grid connected photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*, 45 :483–494. (cité page 72.)
- Andersen et Klaus, K. (2000). Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equations. *Energy and Building*. (cité page 58.)
- Angioletti, R. et Despretz, H. (2003a). Maîtrise de l'énergie dans les bâtiments - tarifs de l'énergie. *Techniques de l'ingénieur*, BE9022. (cité pages 35, 110 et 175.)
- Angioletti, R. et Despretz, H. (2003b). Maîtrise de l'énergie dans les bâtiments -techniques. *Techniques de l'ingénieurs*. (cité page 74.)
- Angioletti, R. et Despretz, H. (2004). Maîtrise de l'énergie dans les bâtiments-définitions. usages. consommations. *Techniques des ingénieurs*. (cité pages 31, 32, 34, 36, 43, 173 et 175.)
- Aubry, A., Rossi, A., Espinouse, M.-L., et Jacomino, M. (2006). Minimizing setup costs for parallel multi-purpose machines under load-balancing constraint. *European Journal of Operational Research*, in press, doi :10.1016/j.ejor.2006.05.050. (cité page 121.)

- Bacha, S. et Chatroux, D. (2006). *Nouvelles technologies de l'énergie*, chapter 2 : Systèmes photovoltaïque couplés au réseau, page 51. Hermes Science. (cité page 135.)
- Bakos, G., Soursos, M., et N.F.Tsagas (2003). Technoeconomic assessment of a building-integrated pv system for electrical energy saving in residential sector. *Energy and Buildings*, 35 :757–762. (cité page 72.)
- Bargiotas, D. et Birdwell, J. (1988). Residential air conditioner dynamic model for direct load control. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 3(4) :2119–2126. (cité page 111.)
- Bellivier, A. (2004). *Modélisation numérique de la thermo-aéraulique du bâtiment : des modèles CFD à une approche hybride volumes finis / zonale*. PhD thesis, L'Université de la Rochelle. (cité page 57.)
- Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton University Press. (cité pages 88 et 113.)
- Bemporad, A. et Morari, M. (1998). Control of systems integrating logic, dynamics and constraints. *Automatica*, 35 :407–427. (cité pages 63 et 65.)
- Bernard, A. et Lemaire, M. (2005). La ventilation modulée : une solution rationnelle. *Revue de CVC*. (cité page 34.)
- Bhattacharyya, K. et Crow, M. (1995). A fuzzy based load model for power system direct load control. In *Control Applications, 1995., Proceedings of the 4th IEEE Conference on*, pages 27–32. (cité page 111.)
- Bilge, U., Kurtulan, M., et Kiraç, F. (2006). A tabu search algorithm for the single machine total weighted tardiness problem. *European Journal of Operation Reseach*. (cité page 99.)
- Billaut, J.-C., Moukrim, A., et Sanlaville, E. (2005a). *Flexibilité et Robustesse en Ordonnancement*. Hermès Science, Paris, France. (cité pages 121 et 122.)
- Billaut, J.-C., Moukrim, A., et Sanlaville, E. (2005b). *Flexibilité et Robustesse en Ordonnancement*, chapter 1. Hermès Science, Paris, France. (cité page 121.)
- Binder, T., Blank, L., Dahmen, W., et Marquardt, W. (2001). Multiscale concepts for moving horizon optimization. *Eprint for the optimization community*. (cité page 77.)
- BMU (2006a). Climate protection pays implementing and upgrading the Kyoto Protocol. Technical report, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU). (cité page 22.)
- BMU (2006b). Renewable Energies innovation for the future. Technical report, German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU). (cité pages 20, 23 et 173.)
- Boivin (1995). Demand side management -the role of the power utility. *Pattern Recognition*, 28(10) :1493–1497. (cité page 29.)
- Borrelli, F. (2002). *Discrete Time Constrained Optimal Control*. PhD thesis, Swiss Federal Institute of technology (ETH) Zurich. (cité page 122.)

-
- Borrelli, F., Bemporat, A., et Morari, M. (2000). A geometric algorithm for multi-parametric linear programming. Technical report, Automatic Control Laboratory ETH Zurich, Switzerland. (cité page 122.)
- Branicky, M., Borkar, V., et Mitter, S. (1994). A unified framework for hybrid control. In *Decision and Control, 1994., Proceedings of the 33rd IEEE Conference on*, volume 4, pages 4228–4234 vol.4. (cité page 63.)
- Brown, L. (2001). Eco-economie. une autre croissance est possible, écologie et durable. *Edition originale "Eco-Economy. Building an Economy for the Earth"*. (cité page 26.)
- Calasiu, A. D. et Veitch, J. A. (2006). Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control system in daylight offices : a literature review. *Energy and Building*, 38 :728–742. (cité page 36.)
- Candas, V. (2000). Confort thermique. *Technique de l'ingénieurs*, BE9085. (cité page 32.)
- Castagnoni, A. (2003). Application électrodomestiques généralité. *Technique de l'ingénieur*. (cité page 31.)
- Castro, P. M. et Grossmann, I. E. (2006). An efficient mip model for the short-term scheduling of single stage batch plants. *Computers and Chemical Engineering*, 30 :1003–1018. (cité page 69.)
- Chatterjee, S., Carrera, C., et Lynch, L. A. (1996). Genetic algorithms and traveling salesman problems. *European Journal of Operational Research*, 93 :490–510. (cité page 103.)
- Dahal, K. P., Aldridge, C. J., et Galloway, S. J. (2006). Evolutionary hybrid approaches for generation scheduling in power systems. *European Journal of Operation Research*, InPress. (cité page 95.)
- DGEMP (2004). Energy baseline scenario for france to 2030 dgemp-oe (2004). Technical report, General Directorate for Energy and Raw Materials (DGEMP) Observatoire de l'énergie (Energy Survey Unit, OE). (cité pages 24, 25 et 173.)
- DGEMP (2005). La production d'énergie d'origine renouvelable en France en 2005. Technical report, La Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières. (cité page 25.)
- DGEMP (2007). La situation énergétique de la france. Technical report, Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières Observatoire de l'Economie de l'Énergie et des Matière Premières. (cité page 24.)
- Diestel, R. (2005). *Graph Theory Third Edition*. Springer Verlag, Heidelberg. (cité page 91.)
- Dubois, D., Fargier, H., et Fortemps, P. (2003). Fuzzy scheduling : Modeling flexible constraints vs. coping with incomplete knowledge. *Euroupean Journal of Operational Research*, 147 :231–252. (cité page 121.)
- Dubois, D., Fortemps, P., Pirlot, M., et Prade, H. (2001). Leximin optimality and fuzzy set-theoretic operations. *European Journal of Operational Research*, 130 :20–28. (cité page 121.)
- Esquirol, P. et Lopez, P. (1999a). *L'Ordonnancement*, chapter 5 Ordonnancement sous contraintes de ressources cummulatives, page 87. Economica. (cité page 70.)

- Esquirol, P. et Lopez, P. (1999b). *L'Ordonnancement*. Ed. ECONOMICA. (cité pages 47 et 67.)
- Faure, X., Johannes, K., Jousselein, F., Pierson, P., et Quenard, D. (2007a). Integrated pcms solar system within the building envelop, heat set 2007 proceedings. In *Heat Set 2007 proceedings, FRANCE vol 2*. (cité page 161.)
- Faure, X., Johannes, K., Jousselein, F., Pierson, P., et Quenard, D. (2007b). A simulation tool for hybrid envelop coupling free energy, convection, specific and latent heat,. In *10th IBPSA Wolrd conference, Beijin, Chine, 3-6 Septembre 2007*. (cité page 161.)
- Fraisse, G. (1999). *La régulation thermique des bâtiments tertiaires : Application de la logique floue à la régulation centrale du chauffage en régime intermittent*. PhD thesis, CETHIL (Centre thermique de Lyon), INSA Lyon. (cité page 33.)
- Fraisse, G., Viardo, C., Lafabrie, O., et Achard, G. (2002). Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy. *Energy and buildings*, 1430 :1–14. (cité page 58.)
- G. Thomas, B. (2000). Load management techniques. In *Southeastcon 2000. Proceedings of the IEEE*, pages 139 – 145. (cité page 29.)
- Gal, T. et J.Nedoma (1972). Multiparametric linear programming. *Management Science*, 18 :406–442. (cité page 122.)
- Gass, S. et Saaty, T. (1955). The computatinal algorithm for the parametric objective function. *Naval Reseach Logistices Quarterly*, 2 :39–45. (cité page 122.)
- Gendreau, M., Guertin, F., et Taillard, J.-Y. P. E. (1999). Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching. *SIAM Monogrpahs on Discrete Mathematics and Applications*, pages 129–154. (cité page 99.)
- Gendreau, M., Hertz, A., et Laporte, G. (1994). A tabu search heuristic for vehicle routing problem. *Management Science*, 40 :1276–1290. (cité page 99.)
- Glover, F. (1989). Tabu-search - part 1. *ORSA Journal of Computing*, pages 190–206. (cité page 99.)
- Glover, F. (1990). Tabu-search - part 2. *ORSA Journal of Computing*, pages 4–32. (cité page 99.)
- Glover, F. et Laguna, M. (1997). *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA. (cité pages 95 et 98.)
- Greenberg, H. (1998). *Advances in Computational and Stochastic Optimization, Logic Programming and Heuristic Search : Interfaces in Computer Science and Operations Research*, chapter 4. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA. (cité page 121.)
- Ha, D. L. (2004). Optimisation de la consommation d'énergie en domotique par ordonnancement sous contrainte de ressources. Master's thesis, INPG. (cité pages 56 et 110.)
- Ha, D. L., Ploix, S., Zamaï, E., et Jacomino, M. (2005a). Maîtriser la consommation d'énergie en domotique par ordonnancement sous contrainte de ressources. In *Journées Doctorales du GdR MACS - JDMACS , Lyon , 5-7 septembre*. (cité page 110.)

-
- Ha, D. L., Ploix, S., Zamai, E., et Jacomino, M. (2005b). Control of energy consumption in home automation by resource constraint scheduling. In *The 15th International Conference on Control System and Computer Science*, Bucharest, Romania. (cité page 110.)
- Ha, D. L., Ploix, S., Zamai, E., et Jacomino, M. (2006). A home automation system to improve the household energy control. In *INCOM2006 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. (cité pages 88 et 127.)
- Hartman, T. (1980). Dynamic control of heat called key to saving energy. *Air-Conditioning Heating and Refrigeration News*, 151 :14–16. (cité page 87.)
- Hatley, D., Meador, R., Katipamula, S., et Brambley, M. (2005). Energy management and control system : Desired capabilities and functionality. Technical report, LtCol. Carl Wouden, USAF, Ret. (cité page 41.)
- Henze, G., Kalz, P., Felsmann, D., et Knabe, G. (2004a). Impact of forecasting accuracy on predictive optimal control of active and passive building thermal storage inventory. *Journal HVAC*. (cité pages 87 et 88.)
- Henze, G. P. et Dodier, R. H. (2003). Adaptive optimal control of a grid-independent photovoltaic system. *Transactions of the ASME*, 125 :34–42. (cité page 76.)
- Henze, G. P., Felsmann, C., et Knabe, G. (2004b). Evaluation of optimal control for active and passive building thermal storage. *International Journal of Thermal Sciences*, 43 :173–183. (cité pages 39, 76, 87 et 88.)
- Holland, J. (1975). Adaption in natural and artificial systems. *The University of Michigan Press, Ann Arbor*,. (cité page 102.)
- House, J. M. et Smith, T. F. (1995). Optimal control of building and hvac systems. In *Proceedings of the American Control Conference, Seattle, Washington*. (cité page 76.)
- Huang, K.-Y. et Huang, Y.-C. (2004). Interruptible load management to provide instantaneous reserves for ancillary services. *IEEE Transactions on power systems*, 19 :1626–1634. (cité page 111.)
- IEA (2006). Key world energy statistics. Technical report, International Energy Agency. (cité pages 20, 22 et 23.)
- ILOG (2006). CPLEX tutorial handout. Technical report, ILOG. (cité page 93.)
- ISO 9001 (1994). Moderate thermal environments - determination of the pmv and ppd indices and specification of the conditions for thermal comfort. Technical report, International Standards Organization. Geneva. (cité page 32.)
- J.O. (1983). Arrêté du 24/03/82 - dispositions relatives à l'aération des logements (modifié par l'arrêté du 28/10/83). (cité page 33.)
- J.O (1984). Code du travail - décrets n°84-1093 et n°84-1094 du 7 décembre 1984 - « règles relatives à l'aération et à l'assainissement des locaux de travail ». (cité page 33.)

- Kampf, J. H. et Robinson, D. (2006). A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows. *Energy and Building*, InPress. (cité page 58.)
- Kintner, M. (1995). Optimal control of an hvac system using cold storage building thermal capacitance. *Energy and Building*. (cité pages 87 et 88.)
- Koji, N. et Toshihide, I. (1998). A tabu search approach to the constraint satisfaction problem as a general problem solver. *European Journal of Operational Research*, 106 :599–623. (cité page 99.)
- Kvasnica, M., Grieder, P., Baotic, M., et Christophersen, F. (2006). Multi-parametric toolbox (MPT). Technical report, Automatic Control Laboratory ETH Zurich, Switzerland. (cité page 126.)
- Laherrere, J. (2003). How to estimate future oil supply and oil demande. In *International conference on Oil Demand, Production and Cost-Prospects for the future. Copenhagen*. (cité page 21.)
- Lawler, E. et Wood, D. (1966). Branch-and-bound methods : a survey. *Operations Research*, 14 :699–719. (cité page 93.)
- Liu, N., Ritzert, G., et Belloc, A. (2005). Rapport final : Modélisation des flux énergétiques dans une maison autonome. Technical report, Ecole Centrale de Lyon. (cité page 141.)
- Lofberg, J. (2004). YALMIP : A toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In *Proceedings of the CACSD Conference*, Taipei, Taiwan. Available from <http://control.ee.ethz.ch/~joloef/yalmip.php>. (cité page 126.)
- Lu, W., Bésanger, Y., Zamai, E., et Radu, D. (2006a). Analysis of large scale blackouts and recommendations for prevention. *WSEAS Transactions on power systems*, 1. (cité pages 149, 150, 151 et 174.)
- Lu, W., Bésanger, Y., Zamai, E., et Radu, D. (2006b). Blackout : Description, analysis and classification. In *6th WSEAS Int. Conference on POWER SYSTEMS, PE'06 September 22-24 2006, Lisbon, Portugal*. (cité page 149.)
- Madsen, H. (1995). Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building. *Energy and Building*. (cité pages 58, 59 et 173.)
- Makhorin, A. (2006). GNU linear programming kit reference manual version 4.11. Technical report, GNU Project. (cité page 93.)
- Malmborg, C. J. (1996). A genetic algorithm for service level based vehicle scheduling. *European Journal of Operational Research*, 93 :121–134. (cité page 103.)
- Menanteau, P. (2006). Amélioration des performances énergétiques des équipements de froid domestique : étiquettes, normes de performances et accords volontaires. In *Le froid pour l'alimentation et la santé : quels enjeux? : Actes de la 16e journée du Cuepe (04/2006)*. (cité page 36.)
- Ménézo, C., Saulnier, J.-B., Lincot, D., et Guarracino, G. (2007). Energy, domotics, materials welcome to the home of the future. *CNRS international magazine*, 5 :18–27. (cité page 29.)

-
- Mondol, J. D., Yohanis, Y. G., et Norton, B. (2007). Comparison of measured and predicted long term performance of grid a connected photovoltaic system. *Energy Conversion and Management*, 48 :1065–1080. (cité page 76.)
- Mérieux, P. et Pleynet, B. (1992). Chauffage et rafraîchissement : système de conduite et de gestion. *Technique de l'ingénieur*, B2 158. (cité pages 42, 60 et 76.)
- Multon, B., Geraud, O., et Robin, G. (2003). Ressources énergétiques et consommation humaine d'énergie. *Techniques de l'Ingénieur*, D3900. (cité page 20.)
- Multon, B., Robin, G., Ruellan, M., et Ahmed, H. B. (2004). Situation énergétique mondiale à l'aube du 3e millénaire perspectives offertes par les ressources renouvelables. *Revue 3EI*, 36. (cité pages 21 et 22.)
- Muselli, M., Notton, G., Poggi, P., et Louche, A. (2000). Pv-hybrid power system sizing incorporating battery storage : an analysis via simulation calculations. *Renewable Energy*, 20 :1–7. (cité page 60.)
- Nagai, T. (2001). Dynamic optimization technique for control of hvac system utilizing building thermal storage. In *Proceedings of Building Simulation*. (cité page 88.)
- Neron, E. (1999). *Du flow-shop hybride au problème cumulatif*. PhD thesis, Université de Technologie de compiegne. (cité page 67.)
- Nizet, J., Lecomte, J., et F.X., L. (1985). Optimal control allied to air conditioning in buildings. *ASHRAE*. (cité page 87.)
- Observer (2006). La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde. *Huitième inventaire*. (cité page 22.)
- Olesen, B. W. et Brager, G. S. (2004). A better way to predict comfort : The new ashrae standard 55-2004. *ASHRAE*. (cité page 33.)
- Palensky, P. et Posta, R. (1997). Demand side management in private home using lonworks. In *Proceedings.1997 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*. (cité page 41.)
- Pinto, J. M. et Grossmann, I. (1995). A continuous time mixed integer linear programming model for short term scheduling of multistage batch plants. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 35 :338–342. (cité page 69.)
- Pinto, J. M. et Grossmann, I. E. (1998). Assignment and sequencing models for the scheduling of process systems. *Annals of Operations Research*, 81 :433–466. (cité page 69.)
- Powernext (2006). Powernext futures has made a name for itself as a price reference for the medium term market. (cité page 120.)
- PSOTF, U.-C. (2004). Final report on the august 14, 2003 blackout in the united states and canada : Causes and recommendations. Technical report, U.S.-Canada Power System Outage Task Force. (cité page 149.)

- Richalet, J., Rault, A., Testud, A., et Papon, J. (1978). Model predictive heuristic control : Applications to industrial processes. *Automatica*. (cité page 87.)
- Rossi, A. (2003). *Ordonnancement en milieu incertain, mise en oeuvre d'une démarche robuste*. PhD thesis, Ecole Doctorale EEATS " Electronique, Electrotechnique, Automatique & Traitement du Signal", INPGrenoble. (cité pages 47 et 121.)
- RTE (2003). Energie électrique en france en 2003, valeurs provisoire. *Gestionnaire du réseaux de transport d'électricité*. (cité page 24.)
- RTE (2004). *Memento de sûreté de système électrique*. RTE. (cité page 27.)
- Ruud, M., Mitchell, J., et Klein, S. (1996). Use of building thermal mass to offset cooling loads. *ASHRAE Transaction*. (cité page 88.)
- Salas, V., Alonso-Abella, M., Olias, E., Chenlo, F., et Barrado, A. (2007). DC current injection into the network from PV inverters of <5 kw for low-voltage small grid-connected pv systems. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 91 :801–806. (cité page 72.)
- Salas, V., E.Olias, Alonso, M., et Chenlo, F. (2006). Overview of the legislation of dc injection in the network for low voltage small grid-connected pv systems in spain and other countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. (cité page 72.)
- Schmitt, L. J. et Amini, M. M. (1996). Performance characteristics of alternative genetic algorithmic approaches to the traveling salesman problem using path representation : An empirical study. *European Journal of Operational Research*, 108 :551–570. (cité page 103.)
- Sidler, O. (1999). Maîtrise de la demande d'électricité, etude expérimentale des appareils de cuisson, de froid ménager et de séchage dans 100 logements. Technical report, Projet ECUEL Programme SAVE CONTRAT N° 4.1031/Z/96-146. (cité page 36.)
- Sidler, O. (2002a). Connaissance et maîtrise des consommations des usages de l'électricité dans le secteur résidentiel. Technical report. (cité pages 31 et 142.)
- Sidler, O. (2002b). Maîtrise de la demande électrique campagne de mesures par usage dans le secteur domestique. Technical report, Commission des Communautés Européennes Programme SAVE Contrat N 4.1031/93.58 Rapport final. (cité pages 36 et 142.)
- Stum, K., Mosier, R., et Haasl, T. (1997). Energy management systems. Technical report, Portland Energy Conservation Inc.(PECI). (cité page 41.)
- Wacks, K. (1993). The impact of home automation on power electronics. In *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pages 3 – 9. (cité pages 41 et 120.)
- Wacks, K. P. (1991). Utility load management using home automation. *IEEE transaction on Consumer Electronics*, 37 :168–174. (cité page 41.)
- Williams, H. P. (1993). *Model building in mathematical programming*. New York : Wiley. (cité page 64.)
- WWF (2004). Living planet report 2004. Technical report, World Wildlife Fund. (cité page 20.)

- Yang, H. et Huang, K. (1999). Direct load control using fuzzy dynamic programming. *Proc. Inst. Elect. Eng. Gen. Transm. Distrib.*, 146 :294–300. (cité page [111](#).)
- Zhou, G. et Krarti, M. (2005). Parametric analysis of active and passive building thermal storage utilization. *Journal of Solar Energy Engineering*, 127 :37–46. (cité pages [76](#) et [88](#).)

Table des figures

1.1	Consommation énergétique mondiale depuis 1870 (source IEA statistique et BMU (2006b))	20
1.2	Réserve mondiale l'énergie fossile	21
1.3	Consommation d'électricité par secteur dans le monde entier	23
1.4	Évolution et répartition par secteur de la consommation finale d'énergie primaire (source (DGEMP, 2004)) en France	25
1.5	Structure du réseau de production et de distribution d'électricité	27
1.6	Les records de pic de consommation en France de 1996 à 2006 (source RTE)	28
2.1	La répartition de la consommation de l'électricité par les différentes fonctions énergétiques dans le bâtiment (source Angioletti et Desprez (2004))	32
2.2	PMV : sensation thermique sur un échelle de 7 niveaux	32
3.1	Service énergétique	43
3.2	Les trois critères de la Maîtrise De l'Energie(MDE)	45
4.1	Diagramme de classe UML du système	54
4.2	Modèle thermique de la température dans une pièce munie d'une fenêtre et d'un radiateur (Madsen, 1995)	59
4.3	Modélisation de la régulation thermique tout ou rien par automate à états	60
4.4	Modèle de l'automate à l'état d'une batterie	60
4.5	Machine à états finis du comportement d'une machine à laver	61
5.1	Formulation continue du service temporisé	69
6.1	Mécanise de pilotage multi-échelle pour le système de gestion de l'énergie dans le bâtiment (IDC : Interface de communication)	79
7.1	Transformation d'un problème en graphe de relations temporelles directes	91
7.2	La solution optimale pour l'exemple 1 en utilisant GLPK	95
7.3	Principe de "Diviser et Conquérir" des métaheuristiques hybrides	96
7.4	Illustration de la génération des voisinages par l'algorithme 4	98
7.5	Évolution du recuit simulé après 4 itérations	101
7.6	Illustration du croisement du algorithme génétique	104
7.7	Graphe des relations temporelles pour l'exemple 5	105
7.8	La vitesse de convergence de différentes métaheuristiques en comparaison avec la PLVM	106

8.1	Principe de la couche réactive	109
8.2	Notion de rapport cyclique	110
8.3	Illustration de la programmation dynamique	115
8.4	Résultat de l'exemple 1 sans la couche réactive	116
8.5	Résultat de l'exemple 1 avec la couche réactive	117
9.1	Illustration de la programmation multi-paramétrique	125
9.2	Principe d'application de la programmation multi-paramétrique	125
9.3	Illustration du résultat de l'exemple 1	126
9.4	Les fonctions linéaires par morceaux de $\phi_r(k)$ en fonction de $[T_{ext}, E_{max}]$	128
10.1	Architecture matérielle de Multisol	136
10.2	Architecture du composant logiciel du Multisol	137
10.3	Le plan de l'appartement cible	139
10.4	Modélisation de la consommation d'énergie électrique du service de lavage et le lave vaisselle	143
10.5	Résultats d'affectation des ressources d'énergie dans le mode de confort avec la stratégie de consommation locale de l'énergie produite	146
10.6	Résultats d'affectation des ressources d'énergie dans le mode économique avec la stratégie de consommation locale de l'énergie produite	147
10.7	Résultats du plan d'affectation des ressources d'énergie électrique dans le mode en vendant l'énergie produite au réseau	148
11.1	Principe du mécanisme de prévention des blackouts en utilisant Home Automation System	150
11.2	Les phases de blackout dans le cas général (Lu et al., 2006a)	151
11.3	Résultat de simulation sur l'exemple 1	156
11.4	Résultat de simulation sur l'exemple 2	157

Liste des tableaux

2.1	Besoin de ventilation de différents types de bâtiment (Angioletti et Despretz, 2004)	34
2.2	Besoin en eau chaude sanitaire dans le bâtiment (N est le nombre des personnes) (Angioletti et Despretz, 2003a)	35
3.1	Caractérisation du degré de liberté pour différents services énergétiques	44
3.2	Comparaison entre un système de production de biens et un système de gestion de l'énergie	46
4.1	Structure d'information du besoin utile d'un service	57
5.1	Table de vérité de fonctions booléennes	64
7.1	Relaxation de certains services pour calculer une borne inférieure	92
7.2	Résultats de la programmation en nombres entiers	95
7.3	Le temps de calcul moyen et les taux d'optimalité des solutions obtenus par plusieurs méthodes sur 60 exemples	108
7.4	La déviation moyenne et maximale de la solution obtenue par rapport à la borne inférieure sur 60 exemples	108
9.1	Classification des types d'incertitudes dans le problème de gestion de l'énergie dans le bâtiment	121
10.1	Liste des équipements disponible dans la maison	139

Liste des Algorithmes

1	Fonction de génération du graphe des relations temporelles directes	90
2	Algorithme de marquage pour chercher les sous problèmes indépendants	91
3	Conception de la métaheuristique hybride composée de trois étapes	97
4	Fonction de génération du voisinage de la solution S_{ini}	99
5	Implémentation de la recherche tabou hybride	100
6	L'implémentation du recuit simulé	102
7	Algorithme génétique considéré	103
8	Algorithme de programmation dynamique pour le problème d'affectation d'énergie	114
9	Algorithme d'affectation dynamique	115
10	Algorithme de l'étape 2 : trouver une solution la plus robuste dans la famille de solutions calculées	129

Résumé : Le travail présenté contribue à la gestion de la consommation et de la production d'énergie dans le bâtiment. L'objectif est de montrer qu'en dotant les équipements domotiques d'algorithmes d'optimisation et de facultés de communication, il est possible de mieux maîtriser la consommation dans le bâtiment en exploitant les degrés de liberté offerts par l'utilisateur et ceux liés au fonctionnement des équipements. Une formulation mathématique et une architecture de conduite structurées en trois niveaux : prédictif, réactif et local, sont proposées dans le but d'optimiser le confort de l'utilisateur, les coûts économiques et environnementaux. Plusieurs approches de résolution à base de métaheuristiques hybrides et de programmation dynamique sont proposées. La programmation multiparamétrique est utilisée pour la prise en compte des grosses incertitudes. Ces résultats ont été appliqués à la gestion d'énergie d'un bâtiment photovoltaïque et à la prévention de blackouts par un délestage intelligent.

Mots clés : gestion de l'énergie, bâtiment, optimisation, domotique, commande prédictive, métaheuristiques hybrides, programmation dynamique, programmation multiparamétrique

Abstract: This PhD thesis contributes to the power management in buildings. It is shown that, by providing appliances with optimization algorithms and communication abilities, it is possible to improve energy consumption and production in buildings by exploiting the degrees of freedom coming from user requests and appliance behaviors. A mathematical formulation and a multi-layer control architecture composed of three layers: predictive, reactive and local layers, are proposed in order to optimize user's comfort, economical and environmental criterion. Different solving approaches based on hybrid metaheuristics and dynamic programming are proposed. A multi-parametric programming is used to take into account big uncertainties. It has been applied to the power management of a photovoltaic building and to the prevention of blackouts using sets of buildings equipped with intelligent and communicating home automation systems.

Keywords: Energy management, building, optimization, home automation system, predictive control, hybrid system, hybrid metaheuristics, dynamic programming, multiparametric programming.