



**HAL**  
open science

# Développement de méthodes intelligentes pour la gestion énergétique des bâtiments, utilisant des capteurs sans fils

Nhat Hai Nguyen

## ► To cite this version:

Nhat Hai Nguyen. Développement de méthodes intelligentes pour la gestion énergétique des bâtiments, utilisant des capteurs sans fils. Autre. Université de Grenoble, 2011. Français. NNT : 2011GRENT080 . tel-00682923

**HAL Id: tel-00682923**

**<https://theses.hal.science/tel-00682923>**

Submitted on 27 Mar 2012

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

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

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

## DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Optique et Radiofréquences**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

**Nhat Hai NGUYEN**

Thèse dirigée par **Quoc Tuan TRAN** et **Tan Phu VUONG**  
codirigée par **Jean-Michel LEGER**

préparée au sein du **CEA-LETI (Laboratoire d'Electronique des technologies de l'information)**

dans l'École Doctorale «**Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunication et Signal**»

## Développement de méthodes intelligentes pour la gestion énergétique des bâtiments, utilisant des capteurs sans fil

Thèse soutenue publiquement le **11 juillet 2011**,  
devant le jury composé de :

**M. Mohamed El Hachemi BENBOUZID**

Professeur de l'Université de Bretagne Occidentale, Président-Rapporteur

**Mme. Monique POLIT**

Professeur de l'Université de Perpignan, Rapporteur

**M. Georges BARAKAT**

Professeur de l'Université du Havre, GREAH, Rapporteur

**M. Xavier LE PIVERT**

CEA/INES, Membre

**M. Quoc Tuan TRAN**

IDEA, G2Elab, Directeur de thèse

**M. Jean-Michel LEGER**

CEA/LETI, Co-encadrant

**M. Tan Phu VUONG**

Professeur de Grenoble-INP, Directeur de thèse





## *Remerciements*

Cette thèse a été effectuée au CEA (Commissariat à l’Energie Atomique) de Grenoble, au sein du laboratoire LE2TH (Electronique, Energie, Transport, Habitat) du LETI (Laboratoire d’Électronique, de Technologie et l’Instrumentation), et au l’Institut National Polytechnique de Grenoble. Je tiens à remercier M. Roland BLANPAIN, chef du département et M. Sébastien DAUVE, chef du laboratoire, pour m’avoir donné la possibilité de travailler durant ces trois années de thèse sur ce sujet passionnant.

Je tiens à remercier tout d’abord mes trois directeurs de thèse :

Je remercie chaleureusement M. TRAN Quoc Tuan pour avoir dirigé mes travaux de thèse. Il a pris le temps de me guider et de me donner des conseils très importants tout au long de mes travaux. Merci pour les nombreux échanges scientifiques, les explications techniques, les aides efficaces, et particulièrement les moments d’amitiés.

Je tiens à remercier M. LEGER Jean-Michel, mon encadrant et chef du laboratoire CARE (Capteur Actionneur et Récupération d’Energie), pour m’avoir donné l’occasion de travailler au CEA-LETI, pour les nombreux conseils efficaces, pour les temps précieux et d’amitiés et pour les soutiens permanents pendant mes années de thèse.

Je remercie tout aussi chaleureusement M.VUONG Tan-Phu qui m’a aidé et apporté de précieux conseils.

J’exprime mes sincères remerciements à mes amis du laboratoire CEA et IMEP, Mlle. Claire JEAN\_MISTRAL, M. Jean-Jaques CHAILLOUT, Mlle. Claire AGRAFFEIL, qui m’ont aidé et leur bonne humeur. Je remercie aussi toutes les personnes de ces deux laboratoires, qui m’ont aidé et m’avoir permis de réaliser mes travaux.

Un grand merci à mes amis vietnamiens à Grenoble, à toute l’équipe vietnamiens au CEA et l’IMEP, que je peux nommer ici : NGUYEN Le Minh, TRAN Thi Thu Nhi, co Phuong, NGUYEN Tien Luong, Sy Lam, Trang, Quoc Dung, Minh Thuy,..., pour les repas de midi animés et leurs aides pour la vie en France.

Enfin et pas de moindres, je remercie mes parents pour leur soutien, confiance et intérêt tout au long de ce travail. J’exprime du fond du cœur et ma reconnaissance envers mon frère jumeau NGUYEN Nhat-Tung, de croise en moi, de m’avoir encouragé, et de partager avec moi tant de choses tout au long de ma vie.



# TABLE DES MATIERES

<b>GLOSSAIRE</b>	<b>10</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>12</b>
<b>I. CONTEXTE</b>	<b>12</b>
<b>II. OBJECTIFS</b>	<b>14</b>
<b>III. DESCRIPTIF DU MEMOIRE</b>	<b>15</b>
<b>CHAPITRE 1 CONSOMMATION D'ENERGIE ELECTRIQUE</b>	<b>16</b>
<b>1.1 CONTEXTE ENERGETIQUE</b>	<b>16</b>
<b>1.2 DEMANDE D'ELECTRICITE</b>	<b>18</b>
1.2.1 <i>Analyse sectorielle de la demande d'électricité</i>	20
1.2.2 <i>Caractéristiques des besoins en électricité dans le secteur des bâtiments</i>	22
1.2.2.1 Chauffage	24
1.2.2.2 Cuisson	25
1.2.2.3 Eau chaude sanitaire	25
1.2.2.4 Electricité spécifique	25
<b>1.3 CONTRAINTES DU RESEAU ELECTRIQUE</b>	<b>26</b>
1.3.1 <i>Conduite et exploitation du réseau électrique</i>	26
1.3.2 <i>Problèmes liés aux pics de consommation</i>	27
<b>1.4 CONCLUSIONS</b>	<b>28</b>
<b>CHAPITRE 2 METHODES DE GESTION DES CHARGES DANS LES BATIMENTS</b>	<b>29</b>
<b>2.1 INTRODUCTION</b>	<b>29</b>
2.1.1 <i>Objectifs et intérêts d'un système de gestion des charges</i>	29
2.1.1.1 Pour les consommateurs	30
2.1.1.2 Pour les gestionnaires des réseaux	31
2.1.1.3 Pour les producteurs d'électricité	31
2.1.2 <i>Présentation générale des méthodes de gestion des charges</i>	32
2.1.2.1 Méthodes de gestion indirectes (Indirect Load Control)	32
2.1.2.2 Méthodes de contrôles directes (Direct Load Control - DLC)	33
2.1.2.2.1 Méthodes de gestion préventives	33
2.1.2.2.2 Méthodes de gestion en temps réel	34
2.1.2.2.3 Conclusions	35
<b>2.2 METHODES DE GESTION DES CHARGES INDIRECTES</b>	<b>35</b>
2.2.1 <i>Méthodes basées sur la tarification dynamique de l'électricité</i>	36
2.2.2 <i>Méthodes fondées sur le marché de l'électricité</i>	38
2.2.3 <i>Délestages prédéterminés</i>	40
2.2.4 <i>Conclusions</i>	42

<b>2.3</b>	<b>METHODES DE GESTION DIRECTE DES CHARGE .....</b>	<b>43</b>
2.3.1	<i>Présentation générale de gestion directe des charges dans les bâtiments .....</i>	43
2.3.2	<i>Méthodes de gestion directe traditionnelles.....</i>	46
2.3.2.1	Régulation.....	46
2.3.2.2	Programmation temporelle ou intermittente .....	47
2.3.2.3	Délestage.....	47
2.3.2.4	Décalage de consommation.....	47
2.3.2.5	Conclusion .....	47
2.3.3	<i>Méthodes préventives de gestion des charges .....</i>	48
2.3.3.1	Méthodes paramétriques – méthodes statistiques.....	48
2.3.3.1.1	Méthode de régression .....	49
2.3.3.1.2	Méthode prévisionnelle "Time-series" .....	49
2.3.3.1.3	Prévision en utilisant le modèle de "théorie de système gris"- "Gray system theory".....	49
2.3.3.2	Méthodes fondées sur l'intelligence artificielle.....	50
2.3.3.2.1	Méthodes basées sur les réseaux de neurones .....	50
2.3.3.2.2	Méthodes basées sur la logique floue .....	51
2.3.3.2.3	Algorithmes génétiques.....	52
2.3.3.3	Conclusions.....	52
2.3.4	<i>Algorithmes optimaux.....</i>	53
2.3.4.1	Méthodes déterministes :.....	53
2.3.4.2	Méthodes énumératives :.....	54
2.3.4.3	Méthodes stochastiques :.....	54
2.3.5	<i>Conclusions.....</i>	55
<b>2.4</b>	<b>LIMITATIONS ACTUELLES DU SYSTEME DE GESTION DES CHARGES DANS LES BATIMENTS .</b>	
	<b>.....</b>	<b>55</b>
2.4.1	<i>Restriction de fonctionnalités.....</i>	55
2.4.2	<i>Difficultés techniques .....</i>	55
2.4.3	<i>Difficultés économiques.....</i>	56
2.4.4	<i>Autres challenges .....</i>	56
<b>2.5</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>59</b>
 <b>CHAPITRE 3 SYSTEME DE COMMUNICATION ET CAPTEURS POUR LA GESTION</b>		
<b>DES CHARGES .....</b>		
		<b>61</b>
<b>3.1</b>	<b>MESURES POUR LA GESTION DES CHARGES .....</b>	<b>61</b>
3.1.1	<i>Parametres à mesurer .....</i>	61
3.1.1.1	Facturation .....	62
3.1.1.2	Modélisation et prévision des charges.....	62
3.1.1.3	Surveillance des charges .....	63
3.1.1.4	Contrôle des usages d'électriques .....	63
3.1.1.5	Services électriques .....	63
3.1.2	<i>Comptage électrique.....</i>	64
3.1.2.1	Compteur électrique classique.....	64

3.1.2.2	Compteurs intelligents .....	65
<b>3.2</b>	<b>COMMUNICATION POUR LES SYSTEMES DE GESTION DES CHARGES .....</b>	<b>68</b>
3.2.1	<i>Communication sans –fil</i> .....	69
3.2.1.1	Présentation générale .....	69
3.2.1.2	Défis et Opportunités .....	71
3.2.1.3	Conclusions .....	72
3.2.2	<i>Courant porteur de ligne- CPL</i> .....	73
3.2.2.1	Introduction .....	73
3.2.2.2	Avantages du CPL .....	73
3.2.2.3	Inconvénients du CPL .....	74
3.2.3	<i>Bus de terrain interopérables (bus line communication)</i> .....	76
3.2.3.1	Introduction .....	76
3.2.3.2	Architecture du bus de terrain inter-opérable .....	76
3.2.4	<i>Conclusions</i> .....	77
<b>3.3</b>	<b>SYSTÈME M2M (MACHINE-TO-MACHINE) .....</b>	<b>77</b>
3.3.1	<i>Définition</i> .....	78
3.3.2	<i>Concepts généraux des systèmes M2M</i> .....	78
3.3.2.1	Eléments du système M2M .....	78
3.3.2.2	Organisation fonctionnelle d'un système M2M .....	80
3.3.2.2.1	Connectivité "end-to-end" .....	80
3.3.2.2.2	Gestion de données de communications bidirectionnelles .....	80
3.3.2.2.3	Système distribué intelligent .....	81
3.3.2.2.4	Services et outils d'administration .....	82
3.3.3	<i>Défis et Opportunités</i> .....	83
<b>3.4</b>	<b>ZIGBEE - RESEAU DE CAPTEURS SANS FIL .....</b>	<b>83</b>
3.4.1	<i>Architecture du ZigBee</i> .....	84
3.4.1.1	Couche physique .....	84
3.4.1.2	Couche MAC (Media Access Control layer) .....	85
3.4.1.3	Couche de réseau (Network layer-NWK) .....	86
3.4.1.4	Couche d'application .....	87
3.4.2	<i>Approches d'économie de l'énergie du réseau de capteurs sans fil</i> .....	87
3.4.2.1	Approche basée sur le modèle du réseau (Connected Dominating Set- CDS) .....	88
3.4.2.2	Approche basée sur la couche MAC (Media Access Control) .....	88
3.4.2.3	Approches Slot-Based .....	89
3.4.2.4	S-MAC (Sensor MAC) .....	89
3.4.2.5	TMAC (Timeout MAC) .....	90
3.4.2.6	LPL (Low Power Listening) approches .....	90
<b>3.5</b>	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>91</b>
<b>CHAPITRE 4 CONCEPTION DU SYSTEME DE GESTION DE CHARGE EN TEMPS REEL</b>		
.....		<b>92</b>
<b>4.1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>92</b>

<b>4.2</b>	<b>ARCHITECTURE MATERIELLE DU SYSTEME .....</b>	<b>93</b>
<b>4.3</b>	<b>ARCHITECTURE LOGICIELLE DU SYSTEME .....</b>	<b>95</b>
4.3.1	<i>Description générale du système.....</i>	95
4.3.2	<i>Conception du système de communication.....</i>	97
4.3.2.1	Architecture de communication.....	97
4.3.2.2	Formule des messages.....	98
<b>4.4</b>	<b>DEVELOPPEMENT DES STRATEGIES DE GESTION DES CHARGES EN TEMPS REEL.....</b>	<b>99</b>
4.4.1	<i>Introduction .....</i>	99
4.4.2	<i>Fonction de gestion en temps réel des radiateurs .....</i>	100
4.4.2.1	Analyse du fonctionnement d'un régulateur thermique classique.....	100
4.4.2.2	Formulation du problème.....	102
4.4.2.2.1	Influence de la puissance souscrite sur la facture énergétique.....	103
4.4.2.2.2	Modèle thermique d'un bâtiment.....	105
4.4.2.2.3	Puissance appelée .....	106
4.4.2.3	Méthode proposée.....	107
4.4.2.3.1	Introduction.....	107
4.4.2.3.2	Formulation mathématique.....	108
4.4.2.4	Fonctionnement de la régulation adaptative proposée.....	109
4.4.3	<i>Fonction de gestion en temps réel des cuisinières.....</i>	111
4.4.3.1	Principe de la méthode.....	112
4.4.3.1.1	Objectif de la méthode .....	112
4.4.3.1.2	Principe de la méthode .....	112
4.4.3.2	Résultats.....	114
4.4.4	<i>Conclusions.....</i>	117
 <b>CHAPITRE 5 APPLICATION A LA GESTION EN TEMPS REEL DE CHARGES</b>		
<b>CHAUFFAGE .....</b>		
<b>5.1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>119</b>
<b>5.2</b>	<b>METHODE DE GESTION EN TEMPS REEL DES RADIATEURS .....</b>	<b>121</b>
5.2.1	<i>Conception du pilotage des radiateurs en temps réel.....</i>	121
5.2.2	<i>Algorithme de contrôle .....</i>	123
<b>5.3</b>	<b>PROTOTYPE DEVELOPEE POUR LA GESTION EN TEMPS REEL DES RADIATEURS .....</b>	<b>126</b>
5.3.1	<i>Architecture physique du système.....</i>	127
5.3.1.1	Installation du système développé .....	127
5.3.1.2	Radiateur adaptatif.....	129
5.3.1.3	Capteur de température sans fil.....	129
5.3.1.4	Capteur de puissance sans-fil.....	130
5.3.1.5	Unité de contrôle – régulateur central .....	131
5.3.2	<i>Résultats obtenus.....</i>	132
5.3.2.1	Cas initial sans gestion de charge .....	133
5.3.2.2	Gestion en temps réel des radiateurs par la méthode adaptative.....	136
5.3.3	<i>Conclusions.....</i>	140

5.3.4	<i>Régulation en temps réel avec confort réduit</i> .....	141
5.3.4.1	Définition du régulateur avec confort réduit.....	141
5.3.4.2	Régulation.....	142
5.3.4.3	Résultats.....	143
5.3.4.4	Optimisation de la régulation d'intermittence adaptative .....	144
<b>5.4</b>	<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>148</b>
<b>CHAPITRE 6 APPLICATION A LA GESTION EN TEMPS REEL DES CUISINIÈRES ....</b>		<b>149</b>
<b>6.1</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>149</b>
<b>6.2</b>	<b>DESCRIPTION DU SYSTEME DE PILOTAGE DES CUISINIÈRES</b> .....	<b>150</b>
6.2.1	<i>Objectifs</i> .....	150
6.2.2	<i>Conception du pilotage en temps réel des cuisinières</i> .....	151
6.2.2.1	Conception du système intégré aux cuisinières.....	151
6.2.2.2	Fonctionnement du système .....	152
<b>6.3</b>	<b>RESULTATS OBTENUS</b> .....	<b>154</b>
6.3.1	<i>Cas sans gestion</i> .....	155
6.3.2	<i>Cas avec gestion adaptative</i> .....	156
<b>6.4</b>	<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>158</b>
<b>CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b> .....		<b>159</b>
<b>REFERENCES</b> .....		<b>163</b>
<b>PUBLICATIONS</b> .....		<b>173</b>
<b>ANNEXE</b> .....		<b>175</b>
<b>ANNEXE 1 : RESULTATS EXPERIMENTAUX DE LA METHODE ADAPTATIVE DE GESTION EN TEMPS REEL DES RADIATEURS</b> .....		<b>175</b>
<b>TABLE DES FIGURES</b> .....		<b>180</b>
<b>TABLE DES TABLEAUX</b> .....		<b>183</b>



# Glossaire

---

CPL : Courant Porteur en Ligne  
EDF : Electricité de France  
GA : Algorithme Génétique  
GES : Gaz à Effet de Serre  
MDE : Maîtrise de la Demande d'Electricité  
M2M : Machine à Machine  
RTE : Réseau de Transport d'Electricité

ANN : Artificial Neural Network  
CDMA : Code division multiple access  
DLC : Direct Load Control  
DSB : Demand Side Bidding"  
EDRP : Emergency Demand Response Program  
EDEG : Enhanced Data Rates for Global Evolution  
GMS : Global System for *Mobile* communication  
HVAC (Heating, Ventilating, and Air Conditioning)  
MA : Multi-agent  
SMART GRD : Réseau intelligence  
TDMA : Time division multiple access  
WWAN : Wireless Wide Area Network - Réseaux sans fil étendus  
WLAN - Wireless Local Area Network - Réseaux locaux sans fil  
WMAN - Wireless Metropolitan Area Network - Réseaux métropolitains sans fil  
WPAN - Wireless Personal Area Network - Réseaux sans fil personnels



# Introduction

---

## I. CONTEXTE

La consommation énergétique mondiale augmente encore d'environ 2% par an, alors que l'on assiste à une réduction des ressources énergétiques fossiles et qu'apparaît un risque majeur concernant l'avenir de notre planète du fait du changement climatique. L'ère d'une énergie abondante et extrêmement bon marché est derrière nous. L'énergie va donc devenir un bien plus rare et plus cher. C'est pourquoi la maîtrise des consommations énergétiques ainsi que le recours aux énergies renouvelables, prennent tant d'importance. Il faut à ce sujet noter que dans le programme de Maîtrise de la Demande Energétique, le gain d'un MWh obtenu en améliorant le rendement d'utilisation nécessite seulement 13,5 € d'investissement tandis que la production d'un MWh coûte plus de 32,5 € [1].

En France, le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) est le plus grand consommateur d'énergie primaire avec 69.4 Mtep (43.4%) de la consommation totale d'énergie primaire (160 Mtep en 2008). En 2009, la consommation d'électricité du secteur résidentiel et tertiaire a atteint 293.8 TWh, soit 64.4% de l'électricité consommée en France (456.3 TWh) [2].

Qui plus est, l'émission de gaz carbonique est liée directement à la consommation énergétique. Des études récentes sur la consommation d'énergie [3] constatent que la fraction d'énergie utilisée dans les bâtiments augmenté au cours des dernières années. Par exemple, entre 1970 et 2001, la consommation d'énergie électrique dans le secteur de bâtiment a connu une vitesse de croissance deux fois plus rapide que celle des autres secteurs, si bien qu'elle contribue à une partie significative de la production de CO<sub>2</sub>. L'émission de gaz enregistrée en France en 2006 est à hauteur de 404 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, dont 22,6% proviennent du secteur de bâtiment (résidentiel et tertiaire) [4]. Ainsi, ce secteur présente l'un des plus grands potentiels d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ceci souligne l'enjeu d'une gestion énergétique optimisée dans ce secteur.

Pour atteindre cet objectif de réduction d'énergie consommée dans les bâtiments, plusieurs voies peuvent être explorées, telles que la mise au point d'enveloppes thermiques hyper-isolées pour le bâtiment ou le développement des systèmes de production d'énergie à

haut rendement. De nombreux efforts ont été faits afin de trouver la meilleure approche pour gérer la consommation d'énergie dans les bâtiments et en limiter les conséquences négatives pour l'environnement. Cet objectif est explicitement affiché dans une directive de performance énergétique [5], qui indique l'importance de l'économie des ressources énergétiques et de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Dans cette optique, il devient important de mener une/des stratégie(s) de **Maîtrise de la Demande d'Electricité (MDE)**, qui vise à la gestion optimale de l'électricité dans les bâtiments. La régulation et la gestion intelligente de la consommation électrique sont ainsi une des préoccupations majeures non seulement pour les gestionnaires et les fournisseurs mais aussi pour les consommateurs d'énergie.

Pour la mise en œuvre et le développement des technologies de gestion intelligente des systèmes énergétiques, des mesures (via des capteurs) sont indispensables. A ce titre, les réseaux de capteurs sans-fil ouvrent des perspectives prometteuses pour les systèmes de gestion énergétique dans les bâtiments. En effet ils permettent, d'une part de rendre plus facile la collecte des données relatives aux conditions ambiantes afin d'améliorer le confort des occupants, et d'autre part de surveiller le niveau du fonctionnement des différents équipements électriques. L'utilisation et le déploiement à grande échelle de tels réseaux de capteurs sans fil représentent une opportunité très intéressante pour la mise en œuvre de systèmes de gestion de charge dans les bâtiments. Parmi les arguments, on peut citer :

- Large gamme de micro-capteurs (thermique, optique, vibrations,...) avec des avantages liés à leur précision, fiabilité, robustesse et possibilités offertes par leur miniaturisation
- Communication sans-fil qui facilite le déploiement de tels réseaux de capteurs ainsi que les opérations de rénovation grâce à leur installation aisée.
- Récupération de l'énergie ambiante qui permet de longues durées de fonctionnement des capteurs dans des environnements très variés (intérieur/extérieur...).

Ces capteurs sans fil permettront d'améliorer les performances des applications de gestion existantes et de faciliter la conception de nouveaux systèmes. En effet, ils ont le potentiel de révolutionner la manière même de comprendre et de construire les systèmes physiques de plus en plus complexes.

## **II. OBJECTIFS**

L'objectif principal de la thèse est de développer et réaliser un système de pilotage des charges en temps réel, en particulier les charges thermiques, pour un bâtiment résidentiel ou tertiaire dans les buts suivants :

- Pour les utilisateurs :
  - de réduire les pics de consommation donc de réduire la puissance de l'abonnement
  - de réduire la facture énergétique globale
  - de réduire la consommation aux heures de pointe
- Pour le distributeur et fournisseur d'énergie :
  - de minimiser le coût énergétique
  - de maximiser les services et les bénéfices
- Pour les gestionnaires du réseau :
  - de contribuer efficacement aux services systèmes

Pour le gestionnaire du réseau, la réduction des pics de consommation pourra se révéler en cas d'urgence une solution très efficace et prometteuse pour :

- éviter les blackouts sur le réseau (l'énergie non distribuée lors d'un blackout coûte de plus en plus cher au gestionnaire du réseau)
- améliorer la stabilité du réseau (stabilité de tension et stabilité transitoire)
- contribuer au réglage de tension et de fréquence.

Dans le cadre de ma thèse, nous nous intéressons au développement/déploiement d'un réseau de capteurs sans-fil associé à des méthodes de contrôle en temps réel des consommations électriques, pour un bâtiment résidentiel ou tertiaire. Nous proposons une réalisation d'un prototype de système de régulation sans-fil, qui basée sur une nouvelle méthode de pilotage des charges en temps réel. Des données environnementales et de consommation sont mesurées via le réseau de capteurs sans fils. Des actionneurs pilotés à distance par le système sans fil ont aussi été développés pour gérer efficacement la consommation d'énergie dans les bâtiments.

Un des avantages d'un tel système de gestion intelligente des charges des bâtiments en temps réel tient au fait qu'il permet d'éviter l'utilisation des modèles (ex: modèles thermiques du bâtiment) qui sont très difficiles à identifier avec précision.

### **III. DESCRIPTIF DU MEMOIRE**

Ce mémoire compose en sept chapitres:

Le premier chapitre est une introduction générale portant sur le contexte des consommations d'énergie primaire et l'électricité. Une analyse des besoins énergétiques au niveau mondial et au niveau de la France est abordée. La répartition sectorielle de la consommation énergétique puis les besoins énergétiques du secteur des bâtiments sont présentés.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des méthodes de gestion des charges dans le bâtiment. On y présente notamment des méthodes de gestion préventive, de gestion en temps réel, les méthodes spécifiques très utilisées pour le chauffage électrique ainsi qu'une analyse des défis et des opportunités spécifiques de ce domaine.

Le troisième chapitre traite des capteurs utilisés dans les systèmes de gestion des charges du bâtiment. Nous présentons d'abord les besoins de mesure puis les différentes technologies et architectures de communication d'un tel système, y compris les communications pour les compteurs électriques intelligents.

Les chapitres 4, 5 et 6 correspondant aux travaux principaux de cette thèse présentent des applications innovantes. Ce chapitre 4 présente la conception d'un système de gestion de charge en temps réel dont les applications concrètes sont développées dans les chapitres 5 et 6.

Le chapitre 5 concerne particulièrement la gestion adaptative des charges de chauffage d'un local résidentiel.

Dans le chapitre 6, les approches précédentes sont étendues au contrôle des cuisinières électriques. Les applications proposées ont fait l'objet de réalisations sous prototype et ont été validées par des résultats expérimentaux.

Le mémoire de thèse se termine par le chapitre 7, résumant les conclusions et perspectives ouvertes par les solutions proposées.

# Chapitre 1

## Consommation d'énergie électrique

---

Ce chapitre présente le contexte de la consommation énergétique, en particulier de l'électricité, à la fois au niveau mondial puis plus spécifiquement pour la France. La consommation électrique sera ensuite présentée. Puis la demande électrique du secteur résidentiel-tertiaire qui représente une grosse partie de la consommation d'électricité finale sera analysée. Ensuite, les caractéristiques des besoins énergétiques dans les bâtiments seront analysées afin de mieux évaluer l'intérêt potentiel de la gestion énergétique des charges dans ce secteur. Ce chapitre se termine par l'analyse des contraintes propres au réseau électrique, ce qui correspond aux problèmes liés à l'augmentation de la demande d'électricité. Cela nécessite le développement de systèmes de gestion intelligente des charges dans les bâtiments afin de réduire les pics de consommation et de respecter les contraintes affectant le réseau. Alors la charge électrique devient intelligente et active (modifiable).

### 1.1 CONTEXTE ENERGETIQUE

De nos jours, les préoccupations concernant l'avenir des ressources énergétiques font l'objet de débats populaires dans le monde entier. L'effet de réchauffement climatique provoqué par les gaz à effet de serre (GES) est de plus en plus souligné, si bien que de nombreux pays se penchent sur ce problème.

Depuis la fin du XVIIIème siècle, avec le développement industriel, l'énergie est un moteur essentiel du développement économique. Si l'on regarde la consommation énergétique depuis 1971 (Figure 1-1), on constate qu'elle a crû continûment d'environ 2-3% par an. Cette situation met en danger nos ressources fossiles et pose un risque majeur quant à de disposer à l'avenir de renouables énergétiques suffisantes.

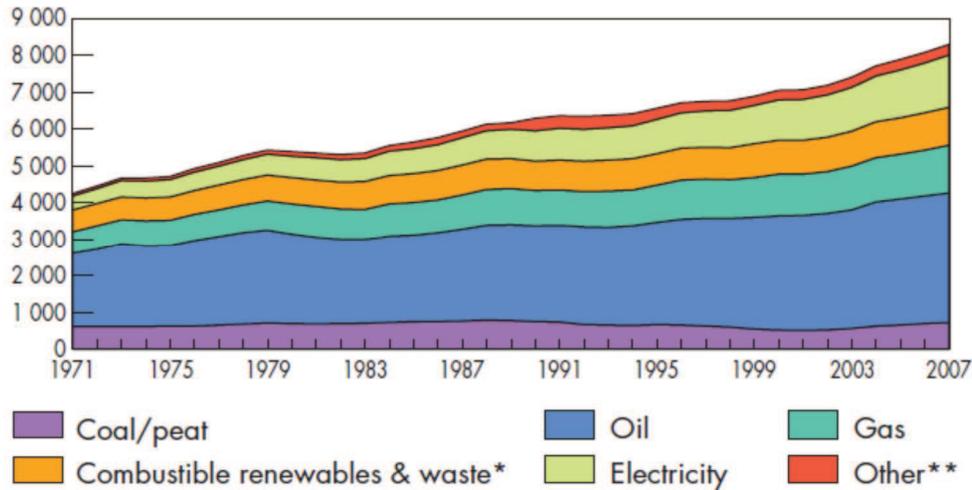


Figure 1-1 : Consommation finale énergétique en fuel (Mtep) au niveau mondial depuis 1970, (Source de l'IEA [6])

Dans le cadre du protocole de Kyoto établi en 1997 et de sa nouvelle version appliquée durant la période d'engagement 2008-2012 [7], les pays participants, dont les membres de l'Union Européenne, se sont engagées à réduire de manière significative leurs émissions de GES. Afin de répondre à cette exigence, ces pays doivent modifier leurs plans de consommation et de production d'énergie et cet engagement aura une incidence directe sur les politiques de consommation énergétique de chacun, en particulier de l'électricité. Plutôt que de réduire la production industrielle, il semble nettement plus intéressant de mettre en œuvre des méthodes intelligentes visant à utiliser plus efficacement d'énergie.

Mode de production	Emission de CO <sub>2</sub> en g/kWh
Hydraulique	4
Nucléaire	6
Eolien	3 à 22
Photovoltaïque	60 à 150
Cycle combiné à gaz naturel	427
Turbine à combustion à gaz naturel	883
Fuel	891
Charbon	978

Tableau 1-1 : Émissions CO<sub>2</sub> des différentes filières de production d'énergie (source : SFEN, d'après des éléments fournis par EDF) [8]

Par contre, afin d'assurer un développement économique, acceptable il nous faut faire face à l'augmentation continue de la demande d'énergie électrique. Les fournisseurs sont amenés à construire des nouvelles centrales de production. Si l'on regarde les émissions de

CO<sub>2</sub> des différentes filières de production (Tableau 1-1), celles générés par les centrales hydrauliques et nucléaires sont les plus basses, mais elles impliquent des investissements et dans délais de réalisation très importants. Les autres types de production (par fuel, charbon ou turbine à combustion) ont des gros taux d'émission de gaz à effet de serre. Par conséquent, ceci amène à développer les énergies renouvelables qui produisent moins de GES, comme le photovoltaïque ou l'éolien. Cette tendance introduit un nouveau contexte pour la gestion énergétique dans les bâtiments en intégrant les productions photovoltaïques. Aujourd'hui, la maîtrise des consommations énergétiques tenant compte de l'intégration des énergies renouvelables devient une approche importante pour résoudre les problèmes de l'énergie.

## **1.2 DEMANDE D'ELECTRICITE**

L'électricité, en raison de ses avantages, que sont sa propreté et sa souplesse d'exploitation, est devenue la source énergétique la plus importante et à ce titre est absolument indispensable. Ses applications sont très variées dans différents secteurs de consommation. Cette demande d'énergie électrique est représentée habituellement par deux grandeurs physiques : la puissance appelée (W) et l'énergie électrique consommée (TWh) par l'ensemble des appareils connectés au réseau.

*La puissance appelée sur le réseau* varie en fonction des caractéristiques des appareils installés sur le réseau. Ceux-ci sont généralement caractérisés par leur propre puissance unitaire, leur durée de fonctionnement et le moment de la journée (l'heure) auquel apparaît la demande.

- *La puissance appelée de l'appareil* : elle est très variable d'un secteur à l'autre (industriel, transport, résidentiel, etc). Dans l'industrie, la demande de puissance des équipements est généralement très importante, allant jusqu'à des dizaines de MW [8]. Au contraire, le secteur résidentiel représente un grand nombre d'appareils très diversifiés mais de petites puissances unitaires.
- *La durée de fonctionnement* : une des particularités importantes des appareils industriels est leur longue durée de fonctionnement par rapport à ceux utilisés dans le secteur résidentiel. La durée d'utilisation moyenne de la majorité des récepteurs électriques dans les bâtiments est à l'inverse relativement courte.
- *Moment de consommation* : Dans le secteur industriel, le fonctionnement de la plupart des machines est lié au plan de travail, fonction des jours ouverts ou fériés. Par

conséquent, ce fonctionnement est relativement prévisible et peu variable. Au contraire, dans le secteur résidentiel, le moment de consommation est plus difficile à prédire. On observe toutefois un pic de consommation électrique entre 19h et 20h [Figure 1-2], période au cours de laquelle la France, qui exporte en général son électricité excédentaire, est parfois obligée d'en acheter à ses voisins notamment en hiver. Effet saisonnier ce pic de consommation est lié à la mise en œuvre simultanée d'équipement comme les chauffages, les cuisines, les lumières, dont la combinaison n'est pas figée. Ce caractère plus aléatoire est lié à la grande diversité des caractéristiques des utilisateurs personnels.

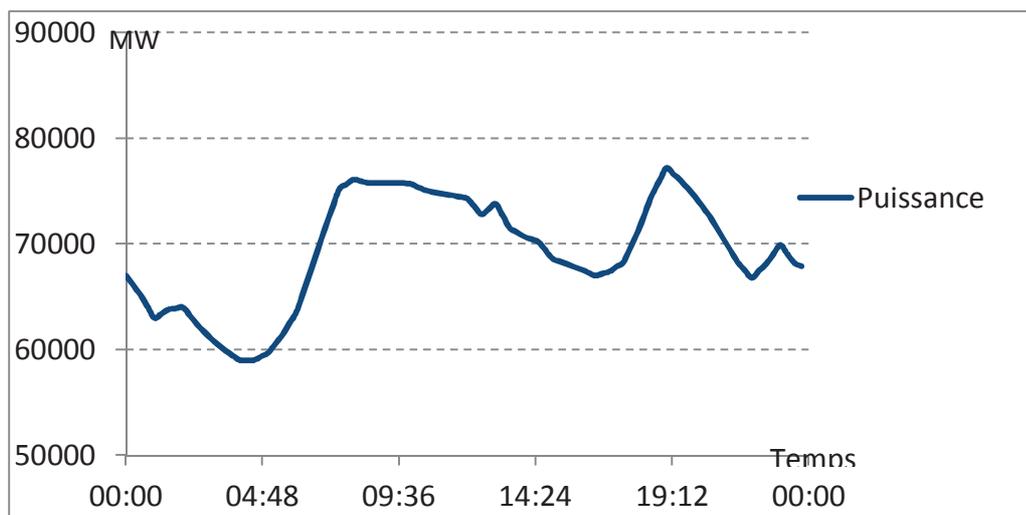


Figure 1-2 : Courbe de charge de la journée du 08/02/2011 [9]

En réalité, la puissance électrique appelée totale sur le réseau n'est pas la somme de la puissance de tous les appareils électriques installés, puisqu'ils ne fonctionnent pas tous en même temps. Elle est très variable selon l'heure de la journée, le jour de la semaine ou la saison de l'année. La variation horaire de consommation électrique en France pendant une journée est observée par RTE (Réseau de Transport d'Electricité). On constate que cette variation est identifiée par un creux la nuit et deux pointes, l'une du matin (vers 9h00), l'autre du soir.

**L'énergie demandée au réseau** est l'énergie consommée en TWh par l'ensemble des appareils électriques en fonctionnement. Dans le secteur résidentiel, l'énergie demandée est fortement variable selon les conditions climatiques et le comportement des consommateurs. Par contre, l'énergie consommée dans le secteur industriel reflète l'activité industrielle du pays.

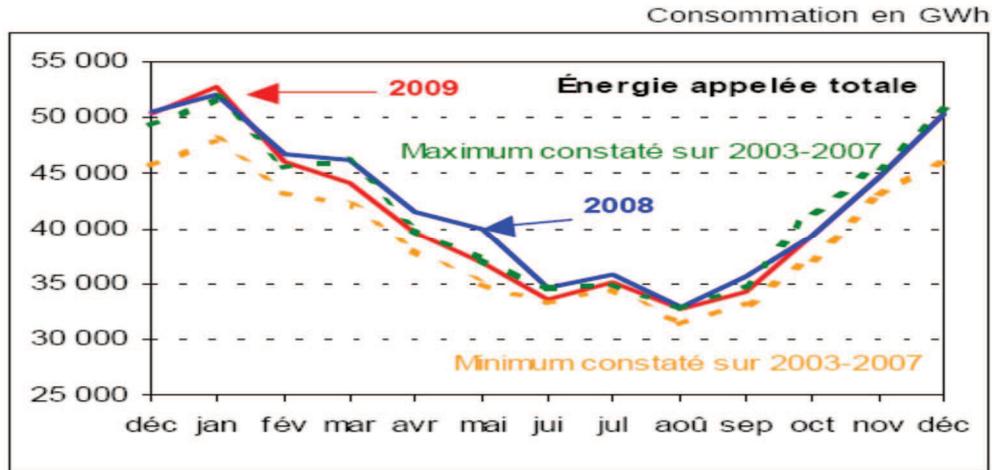


Figure 1-3 : Energie appelée totale selon les mois de l'année [10]

La Figure 1-3 présente l'énergie appelée totale de la France corrigée pour le climat<sup>1</sup>. La variation de la demande électrique au cours de l'année se traduit par une différence entre les puissances appelées en hiver et en été. Cet écart entre la consommation pendant l'hiver et pendant l'été s'explique par l'augmentation en besoin de chauffage électrique en hiver.

### 1.2.1 ANALYSE SECTORIELLE DE LA DEMANDE D'ELECTRICITE

La consommation d'électricité française varie en fonction des secteurs d'activité. On peut distinguer cinq secteurs principaux dans lesquels l'énergie électrique est utilisée. Le Tableau 1-2 présente la consommation électrique de ces secteurs au cours des dernières années. On peut constater que les secteurs industriels et résidentiel-tertiaire sont les plus grands consommateurs d'électricité. De plus, le secteur résidentiel-tertiaire est caractérisé par une croissance significative de la consommation énergétique : il est ainsi passé de 274,9 TWh en 2006, à 289,2 TWh en 2008, soit une augmentation de 5,2% en 2 ans.

<sup>1</sup> La consommation d'énergie corrigée des variations climatiques est calculée en tenant compte d'un indice de rigueur climatique (0,94 en 2003, 0,82 en 2002). On obtient ainsi la consommation correspondants aux conditions climatiques dites "normales" [11]

	Sidérurgie		Industrie		Résidentiel-Tertiaire		Agriculture		Transports		TOTAL	
	TWh	%	TWh	%	TWh	%	TWh	%	TWh	%	TWh	%
<b>1973</b>	11,7	7,8	72,3	48,0	56,9	37,8	3,5	2,3	6,4	4,2	150,7	100
<b>1979</b>	12,6	6,2	82,6	40,3	98,5	48,1	4,3	2,1	6,9	3,4	204,8	100
<b>1985</b>	9,9	4,0	86,6	34,9	140,8	56,7	3,7	1,5	7,4	3,0	248,3	100
<b>1990</b>	10,5	3,4	105,0	34,4	176,6	57,8	5,0	1,6	8,3	2,7	305,5	100
<b>1995</b>	10,4	3,0	114,1	32,9	208,2	60,0	5,7	1,6	8,6	2,5	347,1	100
<b>2000</b>	11,1	2,6	127,4	29,8	237,2	63,1	6,0	1,7	10,4	2,8	392,2	100
<b>2005</b>	11,0	2,7	126,3	28,6	267,4	64,4	7,2	1,6	11,9	2,8	423,8	100
<b>2006</b>	11,9	2,8	124,0	32,5	274,9	60,5	7,4	1,5	12,1	2,7	430,3	100
<b>2007</b>	11,6	2,8	123,8	28,8	278,7	63,9	6,8	1,7	12,2	2,8	433,1	100
<b>2008</b>	11,9	2,7	121,1	27,4	289,2	65,4	7,2	1,6	12,7	2,9	442,1	100

Tableau 1-2 : Consommation finale d'électricité par secteur [12].

On observe qu'au cours des dernières années, la structure de la consommation par secteur s'est modifiée avec une augmentation significative du résidentiel-tertiaire, alors que celle de l'industrie baisse. La consommation totale d'électricité du secteur résidentiel-tertiaire est passée de 60,5% en 2005 à 65,4% en 2008 (voir Figure 1-4). Dans le même temps celle de l'industrie décroissait de 32,5% à 27,4%. Les consommations des secteurs du transport, de l'agriculture et de la sidérurgie, représentant respectivement 2,9%, 1,6% et 2,7% de la consommation électrique totale, sont relativement faibles et elles n'ont récemment guère évolué.

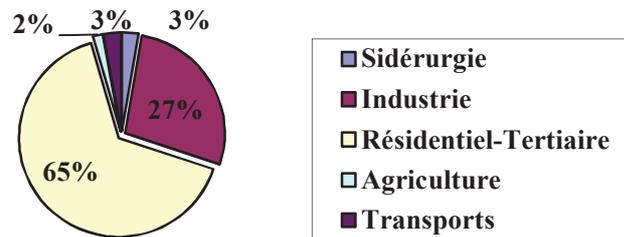


Figure 1-4 : Consommation d'électricité par secteur en 2008 [12]

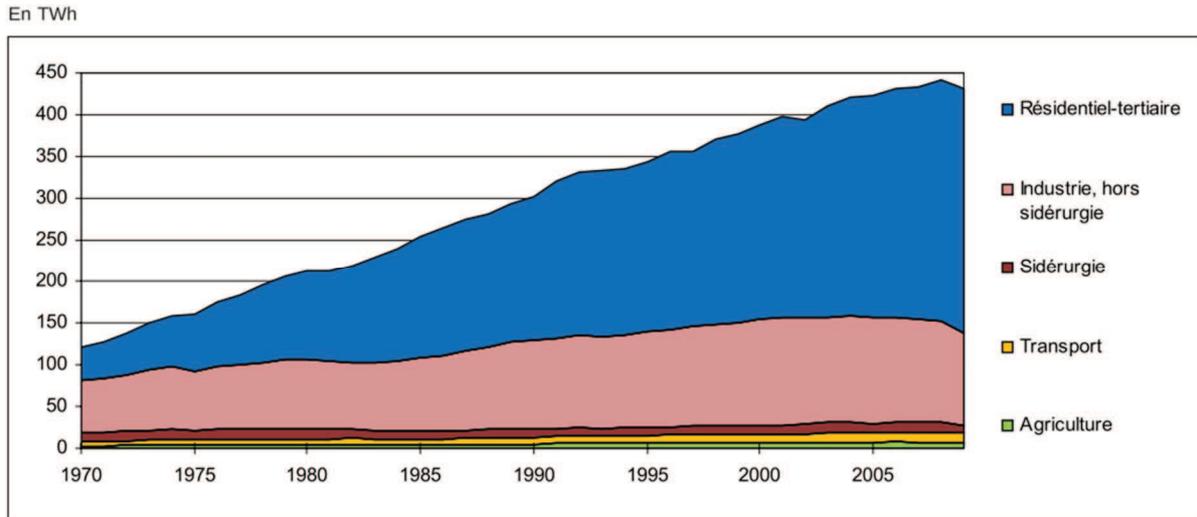


Figure I-5 : Evolution de la consommation d'électricité par secteur [13]

Cette croissance de la consommation d'électricité en France, particulièrement dans le secteur résidentiel-tertiaire (Fig. I-5) correspond en grande partie à l'augmentation de la demande électrique des équipements HVAC (Heating, Ventilating, and Air Conditioning) et de l'éclairage. Il en résulte que, les émissions de gaz des bâtiments représentent environ 10% des émissions totales de CO<sub>2</sub> au niveau mondial, y compris les émissions à partir de l'utilisation de l'électricité dans ce secteur [13]. Au cours de l'année 2008-2009, 404 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> ont été émises en France, dont 22,6% proviennent du secteur du bâtiment [4]. Par conséquent, le développement de la gestion énergétique dans les bâtiments devient nécessaire voire indispensable.

### 1.2.2 CARACTERISTIQUES DES BESOINS EN ELECTRICITE DANS LE SECTEUR DES BATIMENTS (RESIDENTIEL-TERTIAIRE)

Dans la partie précédente, on a mentionné l'augmentation de la consommation d'énergie électrique de ce secteur. Un bâtiment typique comporte de nombreux équipements électriques qui possèdent chacun un fonctionnement correspondant aux besoins de l'utilisateur. Les besoins en énergie électrique pour différents équipements [14] sont présentés dans le tableau suivant :

	1990	1995	2000	2004	2005	2006	2007
Consommation non corrigée du climat	174,6	201,5	223,0	245,6	250,7	254,5	256,2
Consommation corrigée du climat	177,4	203,4	226,3	245,0	250,0	255,5	260,7
<b>RESIDENTIEL</b>							
Chauffage électrique à climat corrigé	36,7	39,5	39,2	39,8	40,5	41,8	43,2
Eau chaude sanitaire	13,6	17,1	18,6	18,9	18,8	18,8	19,2
Cuisson	6,3	8,6	9,7	9,9	10,0	10,1	10,4
Electricité spécifique	41,5	48,1	58,3	67,6	69,8	71,9	73,9
<b>Consommation du secteur résidentiel</b>	<b>98,1</b>	<b>113,4</b>	<b>125,8</b>	<b>136,2</b>	<b>139,1</b>	<b>142,6</b>	<b>146,7</b>
<b>TERTIAIRE</b>							
Chauffage électrique à climat corrigé	12,1	13,2	14,9	16,0	16,3	16,7	17,1
Eau chaude sanitaire et cuisson	8,6	10,1	11,0	11,7	11,8	12,0	12,3
Electricité spécifique (électroménager et éclairage)	58,6	66,7	74,6	81,1	82,8	84,2	84,7
<b>Consommation du secteur tertiaire</b>	<b>79,3</b>	<b>90,0</b>	<b>100,5</b>	<b>108,8</b>	<b>110,9</b>	<b>112,9</b>	<b>114,1</b>
<b>RESIDENTIEL ET TERTIAIRE</b>							
Chauffage	48,8	52,7	54,1	55,8	56,8	58,5	60,3
Eau chaude sanitaire et cuisson	28,5	35,8	39,3	40,5	40,5	40,9	41,9
Electricité spécifique	100,1	114,8	132,9	148,7	152,6	156,1	158,6
<b>Consommation du secteur résidentiel et tertiaire</b>	<b>177,4</b>	<b>203,4</b>	<b>226,3</b>	<b>245,0</b>	<b>250,0</b>	<b>255,5</b>	<b>260,8</b>

Tableau 1-3 : Consommation d'électricité du secteur résidentiel et tertiaire par usage (Unité TWh) [14]

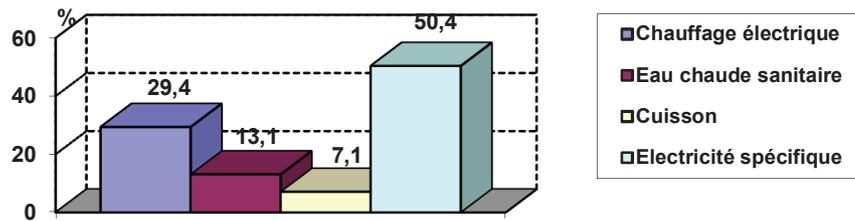


Figure 1-6 : Répartition de consommation électrique dans les bâtiments en 2007 en France

La Figure 1-6 montre la répartition des usages d'un bâtiment entre les différents appareils électriques: le chauffage électrique, l'eau chaude sanitaire, la cuisson, et l'électricité spécifique. En regardant cette figure, on constate que l'électricité utilisée pour le chauffage et pour l'électricité spécifique représente une part importante de l'électricité totale consommée, la seconde ayant connu la plus forte croissance

### 1.2.2.1 Chauffage

La consommation d'énergie pour le chauffage dépend du type de bâtiment, de son isolation thermique, de l'utilisation du consommateur ainsi que de l'efficacité des progrès de la technique de chauffage. Par ailleurs, à partir des années 80, on a observé une évolution de l'énergie utilisée pour le chauffage : l'utilisation du fioul et du charbon a diminué, alors qu'inversement celle de l'électricité a été multipliée [15].

En France en 2007, environ 25% des 25 millions de logements étaient chauffés à l'électricité, une proportion qui atteint presque 70% dans les logements neufs. Parmi les particuliers qui font appel à un constructeur de maisons individuelles, 64% prévoient de se chauffer exclusivement à l'électricité [16].

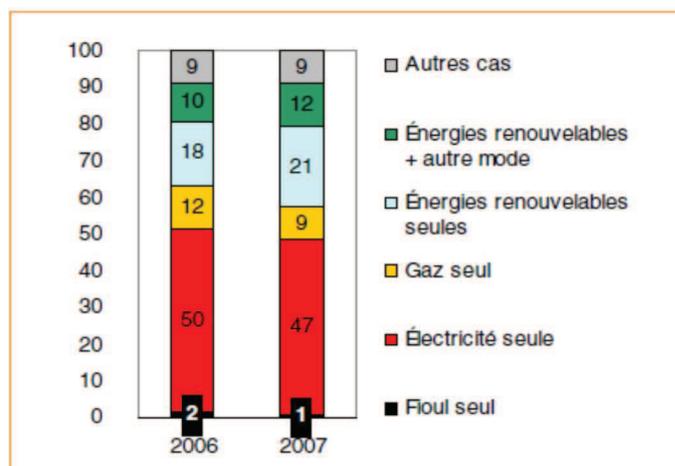


Figure 1-7 : Ensemble des permis délivrés à des particuliers pour la construction d'une maison [16]

Toujours en 2007, le chauffage a représenté 29.4% de la consommation d'énergie globale dans les bâtiments, soit une part très importante. De ce fait, l'amélioration des modes d'utilisation du chauffage représente un des plus grands gisements d'économies d'énergie dans les bâtiments.

#### **1.2.2.2 Cuisson**

En 2007, la cuisson électrique représentait en moyenne 7,1% de la consommation totale d'électricité des bâtiments. La puissance appelée de la plupart des appareils de cuisson électrique reste en général inférieure à 3kW.

Au regard de la consommation mensuelle, l'électricité utilisée pour la cuisson électrique connaît des variations saisonnières. Elle atteint un maximum en hiver et un minimum en été. La consommation annuelle moyenne de l'ensemble des usages de la cuisson électrique est de 568kWh/an, dont 50% pour les plaques et 42% pour les fours [17]. La gestion possible pour ce type de consommation est de régler de façon optimale la température de la plaque et la vitesse d'augmentation de sa température.

#### **1.2.2.3 Eau chaude sanitaire**

L'eau chaude sanitaire représente environ 13,1% de la consommation d'électricité à l'intérieur des bâtiments du secteur résidentiel-tertiaire. La consommation pour l'eau chaude varie principalement en fonction du type de bâtiment, du nombre de personnes dans chaque logement, de la température de stockage de l'eau, de la qualité d'isolation du ballon et de la spécificité différence des besoins en eau chaude (douche, baignoire).

Dans un bâtiment, le ballon d'eau chaude est souvent alimenté pendant les heures creuses pour éviter le pic de consommation et réduire la facture d'électricité. Ici, le choix de la période de fonctionnement de ce type d'appareil, coordonné avec d'autres équipements grâce à un système de gestion, est à la fois très bénéfique et simple à mettre en œuvre et immédiatement.

#### **1.2.2.4 Electricité spécifique**

La consommation d'électricité spécifique concerne les usages domestiques hors usages thermiques (TV, informatique machine à laver, etc) et l'éclairage. La consommation a tendance à augmenter dans tous les logements à cause de l'accroissement du nombre des équipements ménagers et de loisir. La consommation électrodomestique moyenne d'un logement en France est de 2600 kWh/an [17, 18]. Il s'agit du premier poste de consommation

domestique, qui apparait très lié à des usages exclusifs et qui, à ce titre se prête moins bien à des stratégies de gestion intelligente.

## **1.3 CONTRAINTES DU RESEAU ELECTRIQUE**

### **1.3.1 CONDUITE ET EXPLOITATION DU RESEAU ELECTRIQUE**

En général, un système électrique contient des centres de production et des réseaux de transmission et de distribution à différents niveaux de tension permettent de transporter l'électricité des centrales électriques vers les consommateurs. Dans la référence [8], on a identifié les principales contraintes du réseau électrique suivantes :

- Adapter la production à la demande d'électricité : le principe est d'ajuster la puissance produite face aux variations continues de la demande de puissance sur le réseau pour que le système électrique puisse continuer à fonctionner correctement à tout moment. L'ajustement de la puissance doit prendre en compte tous les aléas qui apparaissent sur le système : augmentations inattendues de la demande, indisponibilité de lignes de transport électrique (neige, tempête, etc), défauts.
- Assurer la sécurité d'alimentation et la qualité du service : il s'agit des moyens capables d'éviter une défaillance d'alimentation et toute interruption pour chaque utilisateur, de maintenir la stabilité de fréquence et de respecter la chute de tension maximale acceptable. En guise d'illustration, en cas de panne d'un groupe de production, il existe une réserve de puissance constituée (ou réseaux voisins) qui peut être démarrée immédiatement ou dans des délais assez courts.
- Fournir l'électricité au meilleur coût pour l'utilisateur.

Pour des raisons techniques et économiques, l'électricité ne peut pas être stockée en quantités significatives. Par conséquent, on a souvent recours à l'interconnexion avec les autres réseaux voisins, combinée à des stratégies de régulations appliquées sur le réseau. Ces contrôles à leur tour demandent au réseau de faire face à certaines nouvelles contraintes par suite de l'installation des nouveaux dispositifs de réglage, de protection et des modes de gestion très élaborés.

### 1.3.2 PROBLEMES LIES AUX PICS DE CONSOMMATION

En analysant les courbes de charges journalière et annuelle, on voit aisément qu'il existe des périodes où la puissance appelée sur le réseau est très élevée, notamment en hiver. Dans ces conditions, le réseau électrique peut atteindre ses limites de fonctionnement peuvent conduire à accroître le risque de rupture d'approvisionnement.

Le problème majeur de l'exploitation du réseau électrique est d'ajuster en permanence la puissance produite à la demande. On doit donc gérer ce problème de pics de consommation. Sur les bases de données climatiques et des statistiques d'usages, la probabilité d'apparition d'un pic de consommation peut être évaluée.

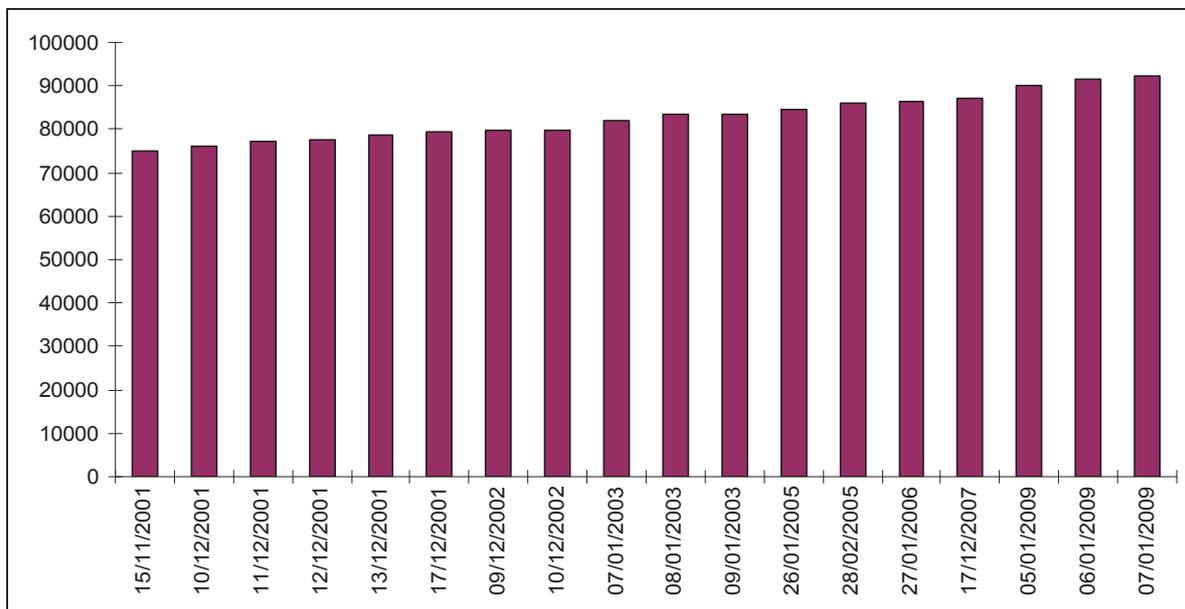


Figure 1-8 : Historique des pics de consommation d'électricité en France [19]

Les pics de consommation sont généralement couverts par des sources d'énergie complémentaires souvent très polluantes (centrales thermiques,..) possédant en outre leurs propres contraintes de temps de réponse. De plus, la capacité de production de ces sources d'énergie est limitée. Elles sont insuffisantes pour couvrir toutes les demandes de l'électricité (en cas de chute de la fréquence et/ou de tension, par exemple en régimes de fonctionnement exceptionnels)

La figure ci-dessus représente le record des pics de consommation en France au cours des années 2001 à 2009. Elle est marquée par un accroissement régulier. En 2009, le record du pic de consommation a atteint 92.4 GW. Cette évolution impose en premier lieu une augmentation de la capacité de production d'électricité qui à son tour implique des investissements importants pour construire des centrales électriques, lesquelles consomment

des énergies primaires ayant un impact négatif sur l'environnement. Dès lors l'alternative consistant à réduire le pic de consommation représente un enjeu incontournable.

## **1.4 CONCLUSIONS**

Ce chapitre a présenté une vision sur les contextes énergétiques, en particulier sur ceux à l'électricité. Parmi tous les secteurs d'activités, celui des bâtiments contribue de manière importante à la consommation électrique totale. Par conséquent, ce secteur est considéré comme un acteur important et il convient d'augmenter son efficacité énergétique afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre. On constate que, parmi les charges électriques analysées, le chauffage et la climatisation prennent une part de plus en plus importante. Ceci explique pourquoi les systèmes de gestion énergétique concernant le chauffage et la climatisation se sont aussi répandus.

Dans ce chapitre, nous avons également analysé les problèmes actuels causés par l'augmentation de la demande électrique. Jusqu'à présent, les fournisseurs d'électricité pouvaient faire face à toutes les demandes, même en période de pic de consommation, par la construction de nouveaux centres de production sans prendre en compte l'impact environnemental. Les accords de Kyoto encouragent les recherches sur l'amélioration de l'efficacité énergétique, une voie très importante étant la gestion intelligente des charges électriques. Pour ces raisons, ce travail se focalise sur les systèmes de gestion de la charge dans le secteur résidentiel-tertiaire, et en particulier sur les bâtiments.

## **Chapitre 2**

# **Méthodes de gestion des charges dans les bâtiments**

---

Ce chapitre présente l'ensemble des techniques et méthodes de gestion des charges dans les bâtiments. Tout d'abord, une classification des méthodes de gestion des charges est présentée, ce qui donne une vision globale des méthodes actuelles. Des stratégies de gestions directes ou indirectes sont ensuite analysées. Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons particulièrement aux méthodes de contrôle direct des charges intelligentes relatives au secteur résidentiel-tertiaire. La gestion préventive et la gestion en temps réel appliquées aux bâtiments sont présentées et analysée plus en détail. La dernière partie analyse les problèmes rencontrés actuellement par l'utilisation de ces systèmes de gestion des charges dans les bâtiments.

### **2.1 INTRODUCTION**

#### **2.1.1 OBJECTIFS ET INTERETS D'UN SYSTEME DE GESTION DES CHARGES**

Selon les arguments présentés dans le chapitre précédent, l'augmentation de la demande électrique est un problème important. Par conséquent, l'amélioration des performances énergétiques du bâtiment est considérée comme étant un potentiel important d'économies d'énergie en France [20]. A ce jour de nombreux moyens et systèmes ont été développés afin d'augmenter l'efficacité énergétique et par conséquent d'économiser l'énergie utilisée, parmi lesquels des systèmes de contrôle et de surveillance des charges aux États-Unis [21], un système de gestion des climatisations dans le bâtiment présenté dans la référence [22] ou le système de gestion adaptative de la charge thermique [23]. En général, les systèmes actuels de gestion de la charge sont réalisés en vue d'atteindre quatre objectifs [1 , 24]:

- Réduction de la consommation d'énergie,
- Réduction des pics de consommation,

- Réduction des factures de consommation : déplacer la consommation vers les périodes tarifaires les plus intéressantes,
- Remplissage des creux de consommation.

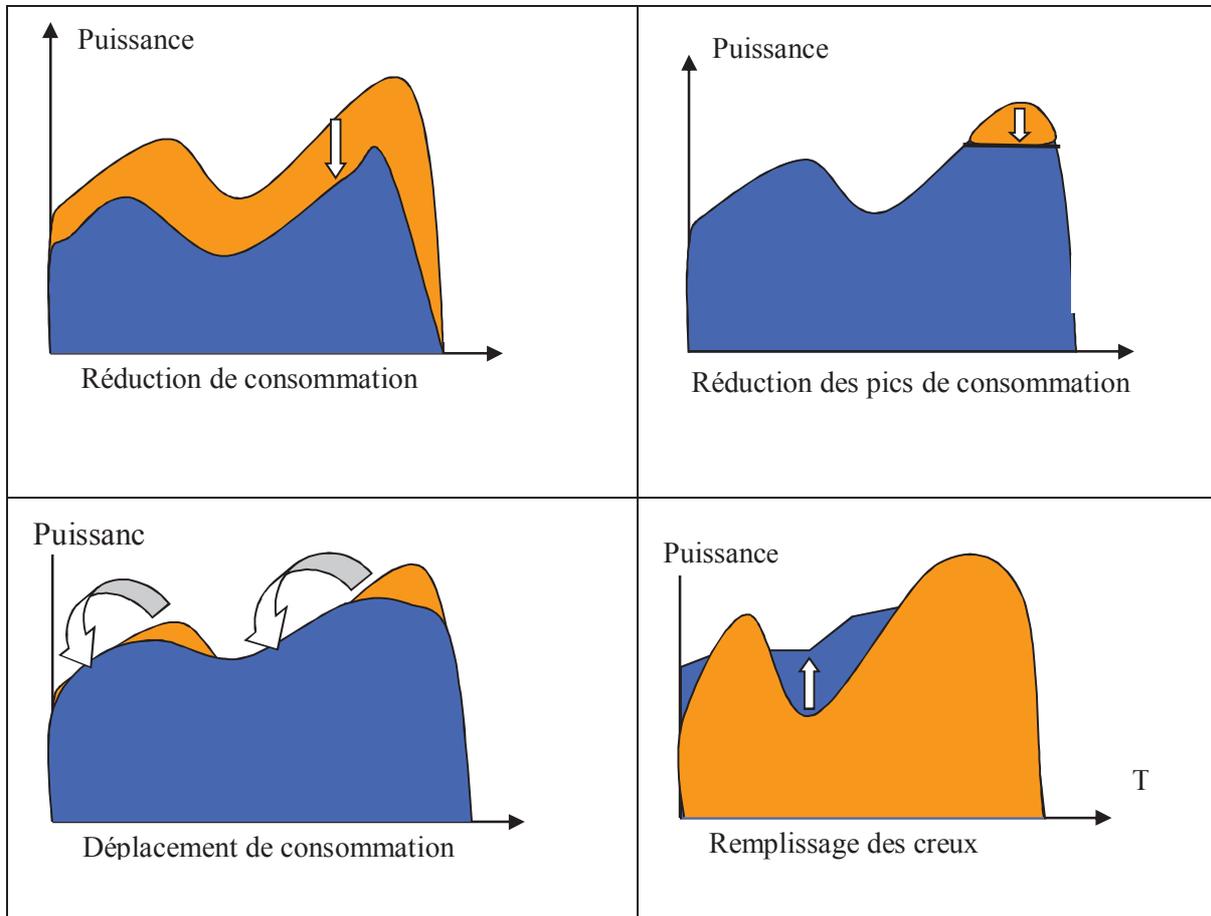


Figure 2-1 : Objectifs d'un système de gestion de charge dans les bâtiments [1, 24]

Toutefois, sur un marché où production, distribution et consommation d'énergie électrique des secteurs bien séparées, les systèmes de gestion de la charge doivent aussi répondre aux besoins des différents acteurs. De ce fait, nous analyserons du point de vue de chaque groupe (consommateurs, gestionnaires du réseau, producteurs électriques) les objectifs et intérêts des systèmes de gestion des charges dans le bâtiment tels que résumés par M. Ky LE [1]:

### 2.1.1.1 Pour les consommateurs

Les consommateurs s'intéressent particulièrement à la diminution du coût de l'énergie consommée et à la satisfaction de critères de confort. Dans ce cas, les objectifs d'un système de gestion de la charge sont de :

- Réduire la facture avec une satisfaction égale,

- A coût égal, satisfaire les consommateurs en lui offert des services de haute qualité,
- Faciliter l'utilisation de l'énergie grâce à un système de gestion automatique des charges.

#### **2.1.1.2 Pour les gestionnaires des réseaux**

Les besoins des gestionnaires du réseau sont très diversifiés. Dans la mesure où ils doivent, assurer le fonctionnement du réseau en toute sécurité (notamment de la gestion des congestions) et sa stabilité, ils s'intéressent beaucoup à des systèmes de gestion des charges pour en simplifier le pilotage, d'éviter les black-out et de réguler la tension et la fréquence.

En outre, l'augmentation des pics de consommation pose aux services d'électricité des problèmes importants. Elle induit des surinvestissements très coûteux afin d'assurer une production électrique permettant de répondre aux besoins. La mise en œuvre d'une gestion des charges permettrait de diminuer les pics de consommation est donc une des priorités des gestionnaires dans la mesure où elle leur permet de retarder des investissements importants.

Un autre objectif est l'augmentation du bénéfice d'exploitation. Outre la réduction des achats d'électricité pendant les périodes où les prix sont élevés, l'autorisation des revendeurs énergétiques à participer au domaine électrique pour maximiser les bénéfices d'exploitation sur le réseau présente aussi un fort intérêt pour les gestionnaires.

#### **2.1.1.3 Pour les producteurs d'électricité**

L'objectif d'un système de gestion de charge pour les producteurs est de garantir le niveau de production, tout en respectant les contraintes environnementales et les critères notions de service minimum. Récemment, dans un nouveau contexte de ressources décentralisées (cas énergies renouvelables et intermittentes) un système de gestion de ces charges doit être capable de faciliter l'intégration des nouvelles ressources au réseau.

Sur un plan général, on a intérêt à ce que les systèmes de gestion puissent contribuer à équilibrer en permanence la production et la consommation, exigence qui concerne à la fois les producteurs et les gestionnaires des réseaux.

## 2.1.2 PRESENTATION GENERALE DES METHODES DE GESTION DES CHARGES

Dans la littérature, un grand nombre de programmes et méthodes de gestion des charges est proposé du fait des nombreux acteurs concernés (consommateurs, gestionnaires du réseau, revendeurs,...) et de la diversité des charges installées dans les bâtiments. Il existe à la fois des programmes appliqués depuis longtemps (gestion classique) et des programmes plus récents basés sur des méthodes de contrôle avancées qui seront présentées dans cette partie. L'ensemble des méthodes de gestion seront réparties en deux classes, selon que les méthodes de contrôle mises en œuvre sont directes ou indirectes.

### 2.1.2.1 Méthodes de gestion indirectes (Indirect Load Control)

Elles incitent les utilisateurs (consommateurs ou clients) à modifier leur comportement énergétique. Le consommateur gère lui-même ses activités énergétiques (choix des fournisseurs, de l'abonnement, équipements d'électricité,...), mais les gestionnaires ou les opérateurs du réseau ne peuvent pas contrôler directement les charges des utilisateurs. Les programmes de contrôle indirect de la charge peuvent être rassemblés en quatre groupes principaux :

Premier groupe : Ces sont les actions ayant pour but d'encourager les utilisateurs à remplacer leurs anciens appareils électriques et à utiliser des solutions plus économes en énergie (exemples : utilisation des lampes à basse consommation, ou incitation au renforcement de l'isolation thermique, etc). Ces méthodes reposent essentiellement sur des aides au financement en vue de faciliter la pénétration des nouvelles technologies.

Deuxième groupe : L'utilisateur est sollicité pour s'accorder avec les fournisseurs afin de réduire sa consommation pendant certaines périodes dans la journée en échange d'aides financières ou de primes [25, 26, 27]. Les méthodes sont appliquées en particulier largement en vue de résoudre les problèmes liés aux pics de consommation pour les heures de pointe.

Troisième groupe : Il s'agit d'appliquer des tarifs différents au cours de la journée. La France, l'Espagne, les États-Unis ou quelques autres pays ont appliqué de nombreux programmes selon cet axe [5-8]. Avec ces méthodes, des renseignements relatifs au prix de l'énergie électrique sont fournis aux utilisateurs, lequel peut alors adapter ses comportements de consommation afin de tirer le meilleur parti des tarifs variables. Il s'agit d'une action indirecte, dont le résultat dépend de la sensibilité du client aux prix élevés.

Quatrième groupe : Il s'agit des méthodes basées sur le fait que sur le marché électrique le prix de l'électricité présente un caractère dynamique. Ces méthodes qui permettent à l'utilisateur de faire face à des prix différents sur le marché électrique et de prendre la responsabilité de ces décisions d'achat. Le "Demand Side Bidding" (DSB), par exemple, est une approche très populaire qui permet aux utilisateurs de participer de manière active au marché de l'électricité. Il autorise les consommateurs à changer de fournisseur et à négocier le prix de l'électricité. Le DSB est très prometteur pour augmenter la concurrence dans le marché de l'énergie et améliorer l'efficacité d'utilisation énergétique en appliquant des approches de programmation optimale orientées vers le marché comme celles présentées dans les références [28, 29, 30].

Il faut bien noter que ces quatre méthodes indirectes sont appliquées par des opérateurs sous la forme de règles ou de contrats. Ils incitent les consommateurs à un changement du comportement de l'utilisation d'énergie électrique.

### **2.1.2.2 Méthodes de contrôles directes (Direct Load Control - DLC)**

Ce sont des moyens/méthodes de contrôle qui permettent aux opérateurs du réseau et également aux utilisateurs de réaliser directement des actions de gestion de la charge afin d'attendre des objectifs de contrôle bien définis.

En général, les méthodes DLC appliquées dans le secteur résidentiel-tertiaire visent à contrôler les consommations des climatisations, des chauffages, des chauffe-eau et des dispositifs d'éclairage. La classification des méthodes de gestion est basée sur divers caractéristiques, comme le type de charge, les temps de calcul requis ainsi que la nature des données à traiter. Dans cette partie, nous allons regrouper les méthodes en deux groups : les méthodes de gestion préventives et celles en temps réel.

#### **2.1.2.2.1 *Méthodes de gestion préventives***

Elles reposent sur des programmes ayant pour but d'établir à l'avance des plans d'affectation de l'énergie dans certains créneaux horaires. Le principe de ces méthodes est de fournir des informations, de manière cohérente et crédible, liées à l'énergie qui sera consommée dans le futur. Les fluctuations du coût énergétique, les changements liés aux usages ou encore les prévisions météorologiques, sont les informations les plus utilisées. Elles répondent aux exigences de planification de charge du système. Basés sur ces informations, des actions et des plans d'utilisation de l'énergie sont élaborés en utilisant des techniques de recherche opérationnelle.

Concernant la prévision météorologique, les programmes de gestion peuvent récupérer les informations à distance via des lignes de communication dédiées. La prévision la plus importante concerne la prévision des courbes de charge. Pour ce faire une grande variété de techniques sont disponibles dans la littérature [13-21] : des réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Network-ANN, en anglais ) [14-15, 17, 21], systèmes experts, systèmes d'apprentissage comme les systèmes flous [31], reposant en majorité sur des bases de données. L'efficacité des méthodes de gestion préventive dépend fortement de la précision des résultats et de la capacité de prévision à s'adapter aux incertitudes.

L'emploi de techniques optimales est indispensable pour la planification des affectations énergétiques, afin d'atteindre le niveau de performance désiré. Elles sont appliquées afin trouver la solution optimale entre des plans possibles d'affectation de l'énergie. Ces plans sont normalement définis en utilisant des modèles mathématiques (voir références [32, 33, 34]) ou des simulations (voir références [35, 36]). Ces plans varient en fonction de divers paramètres comme l'évolution des tarifs électriques (heure pointe/creuse, marché électrique), les demandes directes auprès du fournisseur, les ressources complémentaires, etc.

Le temps de calcul d'un programme optimal dépend directement du nombre de variables à résoudre. Pour tenir compte des contraintes liées au temps de réponse, les formulations d'un problème d'optimisation doivent être aussi simples que possible (la complexité de calcul est plus faible).

#### ***2.1.2.2 Méthodes de gestion en temps réel***

L'objectif de ces méthodes est de contrôler les charges de façon directe avec un temps d'intervention rapide, voire en temps réel. Ces méthodes sont appliquées dans plusieurs domaines comme les systèmes de contrôle de l'éclairage, de la porte, etc, dont les actions de contrôle sont déterminées en fonction d'événements à future.

Récemment, de nouvelles approches ont été proposées. Premièrement, ce sont des méthodes directes basées sur l'utilisation de capteurs (Sensor-based approach), dont plusieurs applications sont décrites dans la littérature [37, 38, 39, 40]. Cette approche améliore la qualité des services de gestion, en vue de satisfaire les besoins des occupants, ou d'optimiser l'utilisation de l'énergie, en profitant des derniers développements dans le domaine des capteurs.

Deuxièmement, les méthodes de gestion directe s'appuient sur des techniques de Multi-agent (MA). Ces techniques [41, 42] sont très répandues pour construire un système de gestion autonome. Elles considèrent les équipements et les utilisateurs du système comme un ensemble d'agents. Chaque "agent" agit de façon autonome et intervient avec les autres en respectant des contraintes globales déterminées par le système.

### **2.1.2.2.3 Conclusions**

Chaque méthode de gestion de la charge, préventive ou en temps réel, a des avantages et inconvénients différents. Mais elles peuvent être utilisées simultanément dans un même système de gestion, car la combinaison de plusieurs méthodes différentes permet d'obtenir de meilleures performances.

Actuellement, la majorité des méthodes de gestion intelligente des charges utilisent des recherches optimales de prédiction de la consommation. En ce qui concerne les applications de gestion en temps réel, on s'oriente vers l'amélioration des moyens de contrôle, c'est-à-dire essentiellement le système de communication, le réseau de capteurs ou la gestion en fonction des événements détectés par les capteurs. Il ne semble pas y avoir d'idées originales au niveau de la centrale de contrôle.

Dans les parties suivantes, nous analysons en détail toutes les spécifications de ces méthodes, en se consacrant plutôt aux méthodes de contrôle directes.

## **2.2 METHODES DE GESTION DES CHARGES INDIRECTES**

Comme nous l'avons présenté dans la partie 0, les méthodes de contrôle indirectes se classent en général selon quatre groupes principaux.

L'approche du premier groupe dépend fortement des directives économiques et des politiques énergétiques de chaque pays. Elle englobe les aides financières des gouvernements pour réduire le prix des produits économes (lampe fluo compact, pile solaire, etc), ou les programmes qui incitent au remplacement des anciens appareils électriques. Elle est régie par des règles ou des programmes lancés par des organisations responsables, par exemple EDF en France, Red Electrica en Espagne, et des opérateurs de réseau indépendants (Etats-Unis). Toutefois, cette approche est relativement fixée car elle ne permet pas d'intervenir au niveau du système de gestion de la charge dans les bâtiments.

C'est pourquoi, on analysera dans cette partie les approches des trois derniers groupes : tarification variable (ou tarif dynamique), programmes d'interruption et programmes liés au

marché électrique. Nous analyserons aussi l'influence de ces méthodes indirectes sur les utilisateurs, les applications de gestions correspondantes étant pour leur part détaillées dans la partie concernant les méthodes de gestion directes.

### 2.2.1 METHODES BASEES SUR LA TARIFICATION DYNAMIQUE DE L'ELECTRICITE

Récemment, la variation de tarif électrique en fonction des différents moments pendant la journée a été appliquée largement dans les pays développés. Avec cette approche, la facture d'électricité d'un client est fortement variable selon les options retenues, les clients étant amenés à modifier d'eux-mêmes leur consommation, en tirant parti des tarifs les plus intéressants afin de minimiser leur facture électrique.

Un contrat électrique avec des options à choisir est normalement établi entre le client et le fournisseur afin de déterminer le tarif appliqué. En général, il en existe deux options principales :

*-La variation de prix du kWh en fonction du moment de la journée* : Cette option a été très populaire dans les pays européens. En France, ERDF (Electricité Réseau Distribution France - Electricité de France) l'exploite avec des millions de clients. Elle est présentée sous l'option Heures Pleines/Heures Creuses dans le contrat [43]. Les programmes "Economie 7" en Angleterre et AEM<sup>2</sup> aux Etats-Unis (Tableau 2-1) sont des exemples similaires. Les opérateurs imposent un prix plus élevé en période de pointe et le réduisent aux autres périodes:

Type (option)	Tarif (\$)	Heures annuelles affectées (%)
Basse (Low)	0,035/kWh	27 %
Moyen (Medium)	0,046/kWh	53 %
Haut (High)	0,094/kWh	19 %
Période de Pic (Critical)	0,290/kWh	1 %

Tableau 2-1 : Tarifs électriques de l'AEM en Etats-Unis [28]

---

<sup>2</sup> Gulf Power Advanced Energy Management

Ainsi par exemple des radiateurs électriques à accumulation thermique peuvent être exploités pendant la période correspondant au meilleur tarif de nuit (ici de 01:00 h à 07:00), ceci ayant pour effet de diminuer la demande électrique aux heures de pointe.

-*La variation de prix selon la puissance souscrite (kVA)* : En France, les tarifs d'électricité dépendent de la puissance souscrite et de la tension de raccordement, Tableau 2-2.

Tension \ Puissance (kVA)	$\leq 36$	$36 < P \leq 250$	$250 < P$
	$< 50$ kV	Tarif bleus	Tarif jaunes
$> 50$ kV	x	x	Tarif vert B&C

Tableau 2-2 : Tarifs électriques en France [selon l'EDF]

Cette option peut être installée chez des consommateurs par la configuration de leur compteur électrique ou par un système de communication entre le fournisseur et les consommateurs (Figure 2.2).

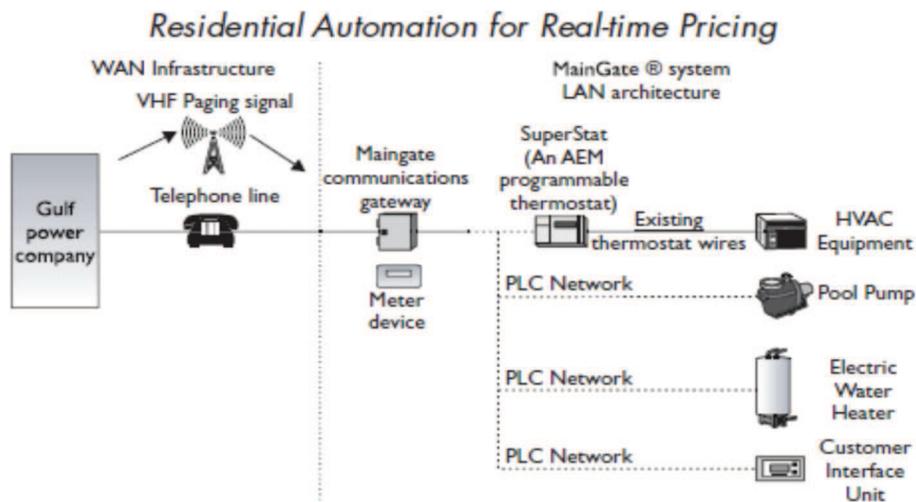


Figure 2-2 : Architecture de communication appliquée aux Etats-Unis [28]

Ces deux options tarifaires sont des méthodes indirectes très efficaces afin de lisser la courbe de charge et de diminuer les pics de consommation. En plus des tarifs électriques appliqués par des producteurs ou des opérateurs nationaux, il en existe encore d'autres régis selon les règles du marché de l'électricité. Ceci amène à d'autres actions de gestion indirectes qui seront analysées dans la partie suivante.

## **2.2.2 METHODES FONDEES SUR LE MARCHE DE L'ELECTRICITE**

L'ouverture du marché européen de l'électricité a débuté en 1998. Le marché qui s'est ouvert tout d'abord pour les clients industriels s'est ensuite étendu aux particuliers. Selon la directive du Parlement Européen [44], les consommateurs peuvent acheter l'électricité auprès de l'opérateur de leur choix. Cette situation se retrouve aussi hors de l'union européenne (États-Unis, Canada,...). Au niveau global du marché, les interventions commerciales tirant parti de cette situation sont considérées comme des méthodes indirectes de gestion énergétique. Il existe des méthodes intelligentes qui permettent aux systèmes de gestion de la charge de participer au marché et par suite de contribuer à la gestion énergétique du réseau. On peut citer pour l'exemple les méthodes demande-réponse qui étaient présentées par l'IAE (voir la référence [28]), ou encore celles appliquées à NewYork [27] ou dans les pays de l'UE [45]. Le marché électrique nous amène aussi à une direction de programmation optimale basée sur le prix de l'électricité [29, 30, 46]. Généralement, il y a deux types de marchés électriques dans lesquels chacun peut exercer une certaine influence sur la consommation électrique :

- **Marchés de gros** (Wholesale markets)

Dans ce type de marché, les prix résultent d'interactions complexes entre les acheteurs et les vendeurs. L'ouverture du marché électrique permet aux producteurs d'offrir un certain volume d'énergie électrique sur le marché. Puis des détaillants, des clients qui participent au marché achètent la quantité d'électricité dont ils ont besoin. Les participants à ces marchés sont des consommateurs industriels ou des distributeurs électriques indépendants. Ils peuvent aussi remettre sur le marché tout ou partie de l'électricité qu'ils ont achetée lors des transactions précédentes. Cela est connu sous le nom de DSB (Demand Side Bidding) dans la littérature [47, 48, 49]. En général, cette revente d'électricité est effectuée dans les cas où les consommateurs industriels sont dans des situations inattendues, qui les amènent à réduire temporairement leurs besoins électriques, par exemple lors de pannes de machines ou si des pénuries imprévues imposent l'arrêt de tout ou partie leur production.

Les petits clients, commerciaux et domestiques, peuvent aussi participer au marché électrique. Ils sont généralement regroupés et réalisent des actions d'achat d'ensemble. Ces groupes sont formés par des intermédiaires tels que les détaillants, des entreprises ou des distributeurs indépendants.

Lorsque les consommateurs peuvent faire face en temps réel aux fluctuations des prix du marché, ils peuvent répondre par :

- Le déplacement de leur demande,
- La réduction du coût de leur électricité demandée,
- L'utilisation de moyens de gestion d'efficacité énergétique, ou leur auto-génération.

On constate que si les programmes DSB peuvent contribuer à la redistribution d'électricité et à la réduction des pics de consommation, ils n'apportent pas de réduction de l'énergie consommée [50].

Le marché électrique a amélioré la concurrence en matière de fourniture d'électricité. Le passage des prix régulés aux prix concurrentiels (par des opérateurs électriques) augmente la possibilité de manipulation des prix par des utilisateurs. D'autre part, la liberté offerte par le marché électrique sollicite le développement de systèmes de gestion électrique DSM (Demand Side Management). Par exemple des programmations orientées spécifiquement du marché ont été développées pour certains problèmes d'optimisation de l'allocation des ressources électriques [29, 46]. Le HOMEBOTS système [29, 42] est un exemple de gestion de la charge dans le bâtiment fondée sur le marché électrique. Dans ce système, on utilise le modèle multi-agent où chaque maison ou appareil est représenté par un agent électrique qui négocie sur le marché le coût de l'énergie qu'il va consommer. Chaque agent communique avec les autres dans le marché afin d'arriver à la consommation globale optimale souhaitée. Le niveau d'efficacité du système est obtenu via ses actions sur le marché électrique fondé sur la libéralisation de l'achat et de la vente de l'énergie.

- **Marché des services système (Ancillary services markets)**

Dans le marché électrique, il y a des opérations nécessaires réalisées par les gestionnaires des réseaux électriques consistant à garantir un fonctionnement fiable du réseau. Ces opérations affiliées aux systèmes de service sont appliquées en particulier en France ou aux États-Unis [51]. Les systèmes de service permettent d'assurer « à tout instant l'équilibre des flux d'électricité sur le réseau, ainsi que la sécurité, la sûreté et l'efficacité de ce réseau ». La capacité de réduire l'énergie offerte aux consommateurs est ici considérée comme une forme d'énergie disponible. Citons à ce titre le marché ERCOT au Texas [52], le programme PJM [51] ou encore ISO-New England [53].

Dans ce nouveau contexte des énergies disponibles sur le réseau, des stratégies optimales pour des enchères sur l'électricité et pour la distribution électrique sur le marché

peuvent être déployées. Le système de gestion de la charge est sollicité à son tour pour participer à ces services sur le marché. Il existe ainsi la possibilité que le système de gestion réduise le volume d'énergie consommée et ensuite place sur le marché une offre correspondant à l'économie aussi réalisés. Ces services de marché conduisent à des options potentielles pour des méthodes de gestion de la charge.

### **2.2.3 DELESTAGES PREDETERMINES**

Ces délestages prédéterminés s'adressent à des consommateurs qui ont la capacité de réduire leur consommation à la demande des gestionnaires du système électrique. Ces programmes ont été très populaires dans quelque pays comme l'Espagne ou les Etats-Unis.

En général, les consommateurs signent un accord avec les gestionnaires du réseau sur un plan de délestage prédéterminé qui détermine le seuil de la puissance minimum à réduire, la durée maximale de l'interruption et le nombre maximum d'interruptions annuelles. Les demandes de délestage sont normalement annoncées quelques minutes à l'avance pour que les consommateurs puissent se préparer et être prêts à exécuter la réduction correspondante aux moments indiqués. La plupart des consommateurs procèdent à la réduction en éteignant des éclairages et des équipements de bureau, en retardant ou réduisant leur consommation. Typiquement, les grands consommateurs industriels démarrent un générateur de secours afin d'éliminer l'impact de la réduction de demande sur leurs processus de production. En contre, les consommateurs peuvent bénéficier d'une récompense ou de tarifs intéressants sur la quantité l'énergie qu'ils ont permis de réduire.

*En Espagne*, l'opérateur du réseau Red Electrica (REE), gère depuis 2002 un programme de délestage de charge appliqué aux grands consommateurs industriels. Ce programme offre une réponse rapide et efficace pour faire face aux situations d'urgence du système électrique. Le programme a estimé la capacité de délestage totale du système à environ 2600MW [45] . Il est entré en vigueur le 1er Juillet 2008 et la puissance totale interruptible dans les périodes d'urgence a atteint environ 2163 MW en 2010 [54]. Il y a cinq options proposées (Tableau 2-3) aux clients [55]:

Type	Préavis minimum	Duré totale maximale
1	2 heures	12 heures
2	2 heures	8 heures
3	1 heures	3 heures
4	5 min	2 heures
5	0 min	1 heures

Tableau 2-3 : Les programmes interruptible en Espagne [55]

Les calculs de prix de la rémunération sont complexes en correspondance avec l'option choisie (voir la référence [55]). La demande de réduction peut être transmise par un système de communication via des lignes téléphoniques, par courriel ou télécopieur. Des programmes similaires ont été appliqués en **Italie** et en **Finlande** pour les industriels. Le prix de la rémunération en Italie pour l'année 2007 a atteint 150 €/MW/an [45].

*Aux États-Unis*, ce type de programme est appliqué largement par des exploitants de réseaux indépendants (ISO<sup>3</sup>), particulièrement en Californie, à New York et en Nouvelle Angleterre.

En se basant sur la prévision de la croissance importante de l'énergie électrique requise par la Californie, le CAISO (Californie-ISO : gestionnaire du réseau en Californie) a lancé un programme de délestage au cours de l'été 2000 pour faire face aux problèmes associés à l'insuffisance des productions électriques pendant les périodes de pointe [56]. Ce programme a été conçu à destination des consommateurs qui pourraient réduire leur demande d'au moins 1 MW en réponse à l'instruction diffusée par le CAISO. Les participants doivent s'équiper des équipements de télémétrie nécessaires, et avoir la capacité de communication avec le CAISO ainsi qu'avec un centre de base de données (ALMDS<sup>4</sup>). Ils doivent réduire leur demande électrique en moins de 30 minutes lors de l'émission d'un ordre de réduction du CAISO. L'intérêt de chaque participant est présenté sous la forme d'un tarif interruptible intéressant et d'une prime mensuelle sur le volume d'énergie réduite. Le prix moyen payé pour chaque mégawatt de réduction est environ 36dollar/MW/mois [56].

A New York, l'EDRP<sup>5</sup> a lancé des programmes d'action qui sont comparables aux précédents pour répondre aux situations urgentes sur le réseau [27]. Les participants doivent

---

<sup>3</sup> Independent System Operators

<sup>4</sup> Aggregated Load Meter Data Server

<sup>5</sup> Emergency Demand Response Program

s'engager à réduire au moins de 1MW leur consommation lorsqu'il y a une demande de la part de l'EDRP. En 2002, 1700 consommateurs sont entrés dans ce programme avec la capacité de réduire la consommation de 1500MW en cas d'urgence. L'EDRP paie 500\$/MWh pour récompenser la réduction [27].

D'autres programmes de délestage ont été appliqués en Nouvelle Angleterre en 2003. Leur principe est similaire à ceux mis en œuvre à New York et en Californie.

En conclusion, les conditions pour participer aux programmes de délestage sont généralement assez rigides, ce qui n'en permet pas un large déploiement. Ce type de programme est plutôt destiné aux grands consommateurs. Cependant, la mise en œuvre des mécanismes de prix pour les charges interruptibles peut entraîner des avantages, et ceux-ci vont faire augmenter le nombre de participants à ces programmes et aux marchés de l'énergie. Les résultats obtenus présentés dans la préférence [24] démontrent l'impact potentiel de tels programmes.

#### **2.2.4 CONCLUSIONS**

Dans la pratique, les consommateurs sont généralement très sensibles aux prix et aux services électriques. C'est la raison pour laquelle les programmes de gestion indirecte se sont bien développés. Ils ouvrent des possibilités importantes pour la gestion de la charge. Les programmes indirects qui visaient initialement les grandes industries (tarifs interruptibles et services système) ont été de plus en plus complétés et étendus à des groupes de clients commerciaux et résidentiels. En principe, l'addition des programmes de contrôle indirect peut conduire à une réduction significative des pics de consommation électrique ou à retarder la nécessité d'investissement en de nouveaux moyens de production, et à offrir de meilleures condition d'équilibrage.

Actuellement, les marchés de l'électricité s'élargissent difficilement, en particulier pour les petits consommateurs au niveau du bâtiment pour plusieurs raisons fondamentales. En premier lieu, même si le marché électrique est progressivement ouvert et de plus en plus étendu, les sociétés électriques, qui étaient plutôt nationalisées, tendent à préserver leur comportement naturel de monopole. D'autre part, les infrastructures des systèmes électriques actuels (compteurs et moyens de communication pour la réglementation des prix électriques) ne peuvent pas répondre efficacement aux besoins du marché électrique. Au niveau des bâtiments, la production électrique de chacun étant négligeable, il faut établir une liaison entre

plusieurs bâtiments pour que puisse s'exercer une influence concurrentielle sur le marché électrique

Par contre, avec le développement des technologies de l'information, le marché électrique offre des possibilités importantes en matière de programmes de contrôle de charge au niveau des bâtiments. Plusieurs méthodes de contrôle direct proposées sont très prometteuses et applicables en complément des moyens indirects. Ce sont des méthodes à d'optimisation du DSB sur le marché [30, 48] ou de gestion optimale, basées sur la fluctuation du prix électrique en temps réel [29, 30, 57].

## **2.3 METHODES DE GESTION DIRECTE DES CHARGE**

En général, le fonctionnement d'un système de gestion directe de la charge comprend plusieurs étapes. Chaque étape peut appliquer des techniques très variées. Nous présentons ici tout d'abord les étapes principales du système, et ensuite nous analysons pour chaque étape les techniques les plus avancées.

### **2.3.1 PRESENTATION GENERALE DE GESTION DIRECTE DES CHARGES DANS LES BATIMENTS**

On trouve dans le commerce des systèmes directs de gestion de la charge, dans lesquels les opérateurs (fournisseur, gestionnaire du réseau, etc) ou les utilisateurs interviennent directement sur les équipements électriques pour réaliser les objectifs de contrôle. Nous présentons tout d'abord le mécanisme de contrôle d'un système de gestion de la charge qui se compose des briques principales suivantes (Figure 2-3):

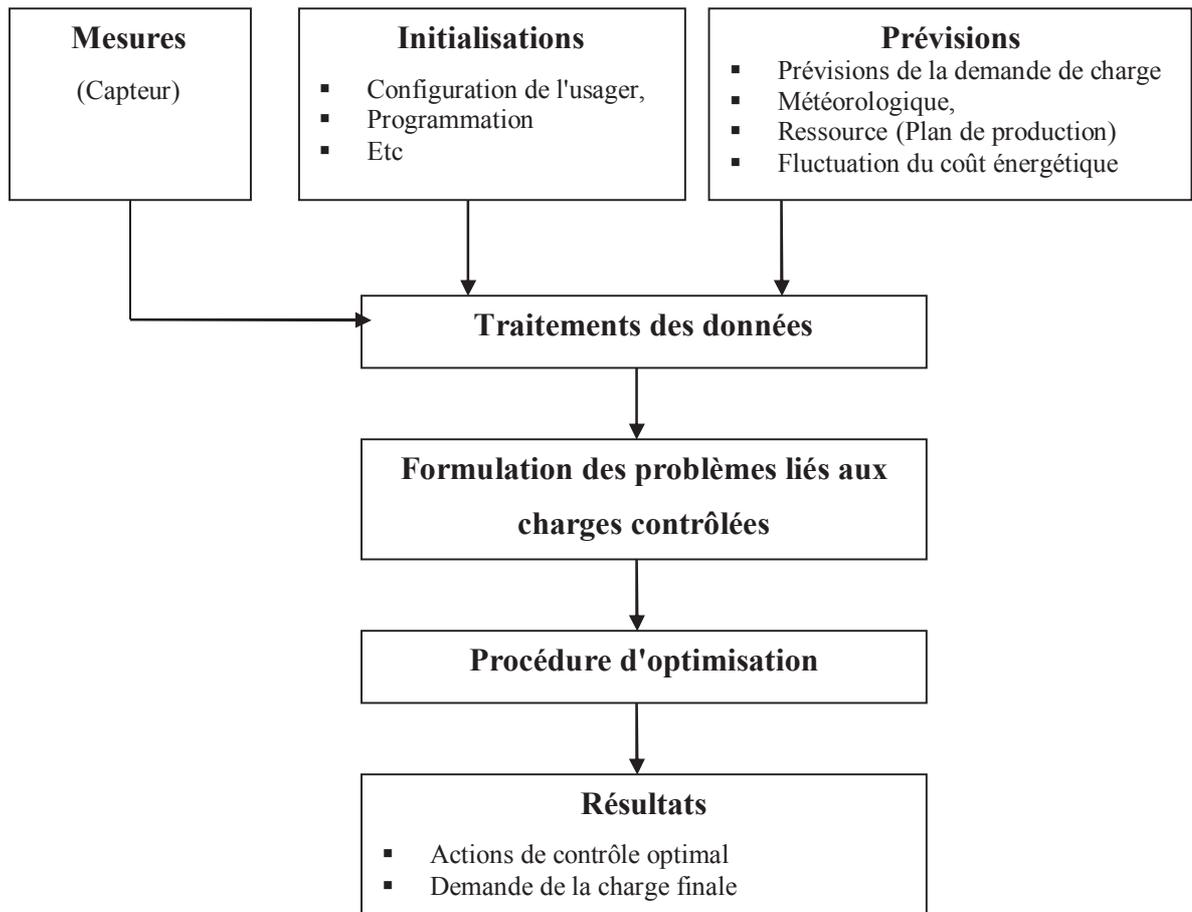


Figure 2-3 : Mécanisme de contrôle optimal pour un système de gestion de la charge dans le bâtiment

- La première étape concerne des opérations *d'initialisations, de mesure, et de prévisions*. Elle a pour rôle la récupération des informations et des entrées nécessaires pour les algorithmes de contrôle. Ce sont :

1. des mesures : informations émises capturées par les capteurs, les détecteurs, etc.
2. des résultats de prévisions météorologiques, de l'énergie à consommer, et les formes des courbes de consommation de tout appareil dans le bâtiment. Ces informations sont nécessaires non seulement dans plusieurs programmes d'optimisation qui sont détaillés dans les références [22, 23, 33, 58, 59, 60, 61, 62, 63], mais encore pour construire des modèles de simulation des charges [64, 65]. Certains autres programmes basés sur le marché électrique [28, 29, 30, 54, 57, 66] utilisent aussi des prévisions, en particulier pour fluctuations du prix de l'électricité ou bien pour les plans de production électrique
3. des configurations de l'utilisateur : niveau de confort, des horloges ou périodes de contrôle, etc. Ce sont aussi des signaux de contrôle à l'externe, comme les ordres émanant des opérateurs du réseau

4. des informations sur les caractéristiques des bâtiments : dimensions, nombre de portes, de fenêtres, etc...
5. des stratégies de contrôles possibles correspondant à chaque type d'utilisateur et à chaque groupe d'appareils
6. des profils d'utilisateurs (commerce, individuel, etc), et des équipements à contrôler (contrôlable, non-contrôlable, déplaçable, interruptible, etc), nombre d'équipements à contrôler, nombre d'utilisateurs gérés par le système, etc.

- *La deuxième étape concerne le **traitement des données*** : En premier lieu, toutes les informations récupérées lors de l'étape précédente sont traitées ou reformatées pour les adapter aux besoins de l'algorithme de contrôle. De plus, on suppose qu'une stratégie de gestion correspondant à certains groupes d'appareils électriques est applicable pendant un intervalle de contrôle. Cette étape a en fait un rôle de traitement de l'information liée aux charges à contrôler afin de déterminer des stratégies de contrôle adéquate. aspect est très important en particulier dans les approches de gestion multi-objectifs [1, 61, 67]. Par exemple, grâce à ces informations aussi traitées, on peut choisir quelles stratégies de contrôle sont à appliquer, correspondant à des objectifs différents, comme l'optimisation du confort, la minimisation des coûts, ou la réduction de puissance appelée, etc.

- *La troisième étape concerne la **formulation des problèmes liés aux charges contrôlées*** : elle consiste à formuler et à établir les modèles mathématiques ou numériques (modélisation, simulation) nécessaires pour calculer les informations nécessaires au contrôle. On rencontre souvent des modèles spécifiques pour le chauffage des bâtiments, le refroidissement, l'éclairage, la ventilation, etc.

De nombreux modèles ont été développés comme illustré dans les références [64, 65, 68, 69]. Dont l'établissement est souvent complexe, car influencé par de nombreuses variables telles que les caractéristiques du bâtiment (dimensions, matériaux de construction, etc) les conditions climatiques locales (température, humidité, rayonnement,...), les paramètres de confort, l'équipement existant, etc.

- *L'étape d'**optimisation*** : grâce aux modèles établis précédemment, cette étape met en œuvre des algorithmes de recherche opérationnelle afin de trouver des actions de contrôle optimal adaptées aux besoins.

- *Résultats* : Après avoir trouvé la solution de contrôle la plus appropriée, cette étape l'applique et déclare les résultats obtenus.

## **2.3.2 METHODES DE GESTION DIRECTE TRADITIONNELLES**

L'histoire de la gestion énergétique dans le bâtiment et de l'augmentation d'efficacité de l'utilisation électrique n'est pas récente. Dans un premier temps, des méthodes avec des fonctionnalités de contrôle classiques ont été appliquées et restent utilisées actuellement. Ce sont des méthodes :

- de régulation
- de programmation temporelle ou intermittente
- de délestage
- de décalage de consommation

### **2.3.2.1 Régulation**

A l'origine, la régulation était plutôt appliquée dans les systèmes de contrôle thermique sous forme des thermostats. Elle maintient la température à une valeur de consigne afin d'assurer le confort de l'utilisateur. Il existe deux types de régulation : régulation en fonction de la température intérieure et celle en fonction de la température extérieure.

- Régulation en fonction de la température intérieure (ou système pour tout ou rien) : L'utilisateur peut modifier manuellement les paramètres du thermostat pour faire correspondre la puissance du radiateur à ses besoins. Il y a deux techniques appliquées pour ce type de régulation : régulateur tout ou rien non modulé (TOR)<sup>6</sup>, et régulateur tout ou rien modulé (PID) [70].
- Régulation en fonction de la température extérieure : Son mécanisme a pour but d'élaborer une loi de chauffe [71]. Pour une température extérieure donnée, le régulateur détermine la température du fluide de chauffage à régler. En bref, ce système prend en compte l'influence de l'inertie thermique du bâtiment sans tenir compte des apports énergétique interne gratuits du bâtiment (nombre de personnes, chaleur des autres équipements, etc.). En général, la détermination des paramètres de la loi de chauffe est délicate.

---

<sup>6</sup> Enclenche 100% de la puissance de chauffe, puis la coupe (0%) lorsque la consigne est atteinte

### **2.3.2.2 Programmation temporelle ou intermittente**

Dans la plupart des systèmes de gestion de la charge, on applique très souvent une fonction qui permet de commander l'ouverture ou la fermeture des appareils pendant des périodes de temps définies. Il s'agit de mécanismes d'horloge comme des programmes journaliers ou hebdomadaires. Dans des bâtiments du secteur résidentiel tertiaire, le taux d'occupation n'est que d'une dizaine d'heures par jour. Pendant les jours fériés, les week-ends et les vacances, les taux d'occupation sont encore plus faibles. Il est donc possible de réaliser d'importantes économies d'énergie par cette méthode.

### **2.3.2.3 Délestage**

Le délestage est une méthode qui permet d'arrêter temporairement l'ensemble des appareils électriques afin de limiter l'appel de puissance. Plusieurs systèmes de climatisations domestiques et de chauffages sont visés par cette solution. Il existe en général deux types de délestage dont les principes sont présentés les suivants:

- Délestage sur ordre : Les équipements sont arrêtés selon un ordre établi préalablement et mémorisé par l'automate, ou par des ordres extérieurs (ex: EDF; ordre HP heures de pointe, etc),
- Délestage à seuil de puissance ou de courant : si la puissance appelée dépasse le seuil fixé, il y a délestage des équipements qui durant des courtes périodes.

### **2.3.2.4 Décalage de consommation**

*-Décalage liés au tarif* : déplacer plusieurs usages (eau chaude sanitaire, chauffage) de périodes plus chères vers celles qui le sont moins. En France, on configure l'usage électrique afin d'interdire aux heures pleines le fonctionnement de certains appareils pouvant fonctionner aux heures creuses. On trouve par exemple des systèmes comportant des délesteurs commandés par des signaux de l'horloge tarifaire. Cette méthode est souvent appliquée pour l'eau chaude ou des radiateurs. L'objectif est d'accumuler l'énergie thermique lorsque le tarif électrique est intéressant.

*-Décalage pour réduire des pics de consommation* : interdire le fonctionnement de certains appareils pendant les heures de pointe.

### **2.3.2.5 Conclusion**

Les méthodes présentées précédemment sont bien adaptées aux applications de la gestion de charge dans le bâtiment. Elles sont plutôt efficaces, de réponse rapide, et

conviennent pour des contrôles en temps réel. Par contre, ces méthodes ne sont pas flexibles et ne permettent pas de réduire les consommations de manière optimale. Par exemple les méthodes de délestage ne prennent pas en compte le confort de l'utilisateur et les régulateurs ne prennent pas en charge les occupations de l'utilisateur. Elles ne permettent pas non plus l'optimisation sur les descentes en température la nuit ou le week-end. Cela nous incite à développer des méthodes de gestion avancées qui seront présentées dans les parties suivantes.

### **2.3.3 METHODES PREVENTIVES DE GESTION DES CHARGES**

En regardant les étapes du mécanisme de gestion, on observe que la prévision des consommations a une influence directe sur la détermination des stratégies de gestion. La prévision de consommation peut être utilisée dans la gestion énergétique optimale, comme la minimisation du coût de l'énergie [48, 57, 66], l'optimisation du DSB [48] avec la libéralisation du marché électrique et le contrôle prédictif pour les HVAC résidentiels [72, 73]. Ces applications dépendent fortement des résultats de prévision de la demande d'électricité. Dans la bibliographie, on peut trouver nombre de méthodes de prévision de consommation. En général, on peut classer ces méthodes en deux catégories : *les méthodes paramétriques (ou méthodes statistiques)* et *les méthodes fondées sur l'intelligence artificielle* [74].

#### **2.3.3.1 Méthodes paramétriques – méthodes statistiques**

Le but des méthodes paramétriques est de construire des modèles mathématiques qui représentent les relations entre la demande énergétique des charges et d'autres facteurs (variables) affectant cette demande (température, humidité, vitesse du vent, etc). L'idée principale de ces méthodes est consisté à déterminer les variables d'influence à estimer des coefficients de modèles en utilisant des techniques statistiques aux données historiques de consommation. Ensuite, l'énergie électrique consommée est estimée par extrapolation à partir d'une relation prédéterminée entre la charge et ses facteurs d'influence. Dans la bibliographie, il y a trois approches essentielles de prévision paramétrique. Ce sont les méthodes de régression, les méthodes de prévision "time-series" (The time series prediction method), et les méthodes de prévision basées sur le "gray system theory" (gray dynamic method) [75].

### **2.3.3.1.1 Méthode de régression**

Il s'agit de méthodes basées sur des techniques d'analyses régressives [76] et qui ont été appliquées à diverses reprises [77, 78, 79, 80, 81]. De nombreuses approches sont proposées, dont les plus populaires sont l'Analyse de régression linéaire (Linear Regression Analysis- LRA) et l'"Autoregressive Integrated Moving-Average" (ARIMA) [79]. Les références [79] et [80] présentent successivement utilisation de LRA pour la prévision de la consommation électrique dans des logements privées à Hong Kong, et celle de l'ARIMA pour modéliser la demande d'électricité totale en Grèce.

### **2.3.3.1.2 Méthode prévisionnelle "Time-series"**

Cette méthode est basée sur des techniques d'analyse des données de séries chronologiques afin d'en extraire des statistiques significatives et d'autres caractéristiques des données. La prévision de 'Time-series' est l'utilisation d'un modèle de prévision des événements futurs fondés sur des événements passés connus, pour estimer les données avant qu'elles ne soient mesurées [82]. Nombre d'applications ont utilisé cette méthode en la combinant avec d'autres techniques pour prévoir la consommation électrique, comme par exemple la référence [83] pour la prévision de la consommation électrique à court terme en Irlande et [84] pour la prédiction de la consommation à long terme en Pologne.

### **2.3.3.1.3 Prévision en utilisant le modèle de "théorie de système gris"- "Gray system theory"**

La "Gray theory" est d'abord proposée par Deng Julong en 1982 [47]. La méthode de prévision correspondants est détaillée sur la référence [85], où le problème de consommation peut être considéré comme un "gray system" entre la puissance demandée et des autres conditions (mesures ou économie, etc). Normalement, cette méthode basée sur un modèle dynamique est exprimée par une équation différentielle. Cette équation peut prendre en considération différents facteurs de fluctuation (facteurs d'entrée), son algorithme est très robuste et le temps de calcul est rapide [85].

En conclusion, il faut bien noter qu'il est très rare que ces trois approches (méthode de régression, méthode prévisionnelle « time-series » et « gray theory ») soient utilisées seules. Presque toutes les applications récentes trouvées dans la bibliographie ont mélangé ces méthodes et les ont combinées (voir par exemple les référence [86, 87]), par exemple même avec des techniques comme les réseaux de neurones [88, 89] pour des buts de prévision.

### **2.3.3.2 Méthodes fondées sur l'intelligence artificielle**

Les méthodes fondées sur l'intelligence artificielle (AI) sont aussi considérées comme des méthodes d'apprentissages ou méthodes basées sur la connaissance. Ces méthodes peuvent généralement comptés en trois catégories : méthodes basées sur les réseaux de neurones, méthodes basées sur la théorie de logique floue (Fuzzy logic-based method) celles basées sur l'algorithme génétique (Genetic algorithms - GA) [90].

#### **2.3.3.2.1 Méthodes basées sur les réseaux de neurones**

Un réseau de neurones artificiels (ANN - Artificial Neural Network) est une approche de calcul qui imite le fonctionnement des neurones biologiques. La conception et l'opération d'un réseau de neurones artificiels sont détaillées dans plusieurs articles, en particulier dans les référence de JJ.Hopfield [91]. Son modèle dit de perception est basé sur des méthodes d'apprentissage de type probabiliste.

Dans les systèmes de gestion des charges, certains problèmes sont extrêmement compliqués et non-linéaires. Il semble donc difficile de trouver un modèle mathématique qui les représente exactement. Par exemple, ceux concernant la transmission de la chaleur et de la consommation des habitats. On pense alors aux méthodes d'apprentissage pour résoudre ces problèmes. Ainsi, différentes études sur l'ANN ont été développées pendant les dernières années afin de résoudre les problèmes non-linéaires. L'ANN est alors habituellement appliquée pour la prévision de la consommation d'énergie et pour la modélisation du fonctionnement des systèmes équipés des appareils HVAC.

Il existe de nombreux modèles d'ANN et l'exemple ci-dessous présenté dans [92] utilise 6 paramètres de l'environnement en entrée (la température de l'air intérieur, la vitesse de l'air, la température de rayonnement, l'humidité relative, la quantité d'exercice, l'isolation des vêtements) pour estimer l'indice de confort thermique d'une pièce (l'indice PMV). Ce modèle de réseau de neurones a donc 6 neurones en d'entrée, 10 neurones dans la couche cachée et un neurone en sortie.

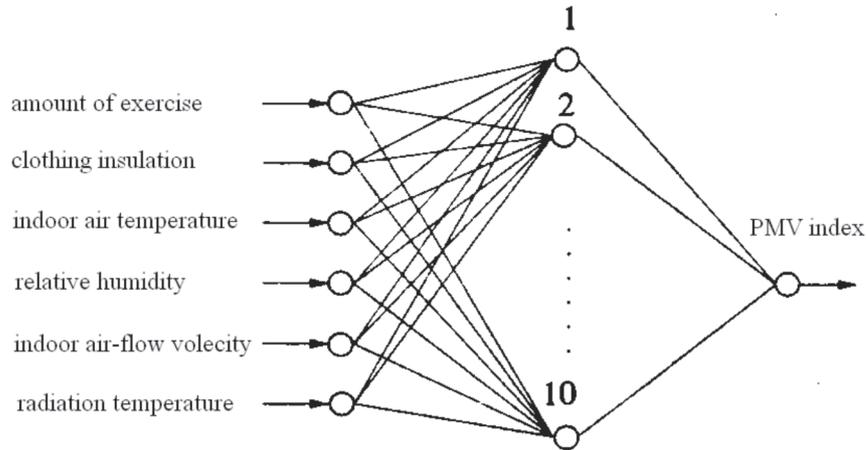


Figure 2-4 : Modèle de Prédiction de l'indice PMV utilisant un réseau de neurones artificiels [92]

On rencontre de nombreux systèmes basés sur des modèles ANN notamment pour réaliser l'estimation de la consommation du chauffage [93], la modélisation des échanges de chaleur dans le système de climatisation [94] et pour prévoir la consommation électrique à court-terme du réseau électrique [95].

En conclusion, même si les réseaux de neurones peuvent avoir tendance à mémoriser le bruit affectant les données de formation, ils peuvent approcher de nombreux types de problème de relatives entrées-sorties. C'est généralement une méthode très flexible pour la prévision de consommation, la modélisation et le contrôle dans les systèmes de gestion des charges. Il a été démontré que les réseaux de neurones peuvent modéliser n'importe quelle fonction continue sur un domaine limité de variables [96].

### 2.3.3.2.2 Méthodes basées sur la logique floue

La logique floue est une méthode qui imite la capacité humaine de raisonnement imprécis et de jugement incertain. Une approche basée sur la logique floue comporte typiquement trois modules : pour la "fuzzification", un moteur d'inférence (pour l'inférence floue), et un pour la "defuzzification" comme représenté sur la figure ci-dessous [90] :

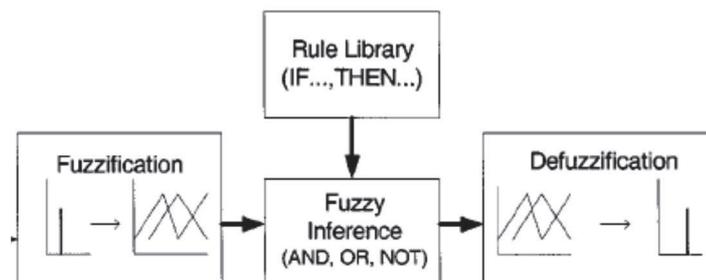


Figure 2-5 : Configuration typique d'un système de logique floue (rule-based fuzzy logic)[90]

- Fuzzyfication: organisation des relations entre vecteur de variables d'entrée et sous-ensembles de règles floues (fuzzy sets) définis par des variables linguistiques et des fonctions d'appartenance
- Fuzzy inférence : associe les règles floues avec d'autres règles intuitives et faciles à comprendre pour les utilisateurs (règles de type IF-THEN)
- Defuzzification: Interprète des règles floues en vecteurs de sortie.

Plusieurs systèmes de logique floue ont été proposés pour estimer la demande électrique dans la STLF (Short Term Load Forecasting) [97] et estimer la consommation électrique dans le secteur résidentiel [98].

### 2.3.3.2.3 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques - GA, utilisent des algorithmes heuristiques pour résoudre des problèmes d'optimisation. Cette méthode sera détaillée dans la partie 2.3.4.3 de ce chapitre.

### 2.3.3.3 Conclusions

Les techniques de prévision ont été développées depuis longtemps dans plusieurs domaines et diverses applications, et s'étendent de plus en plus aux problèmes liés à la gestion des charges. Le tableau 2-4 récapitule celles qui viennent d'être évoquées.

AI Méthode	Complexité du modèle	Vitesse de calcul	Application pour BES <sup>7</sup>
Réseau de neurones	Assez élevée	élevée	Prévision des consommations, modélisation, contrôles, détection des défauts et diagnostic
Logique floue	élevée	Assez élevée	Détection des défauts et diagnostic
Algorithmes génétiques	élevée	faible	Contrôles

Tableau 2-4 : Evaluation de trois méthodes fondées sur l'IA et leurs applications aux systèmes de gestion énergétique dans le bâtiment [90].

Pour la prévision des consommations, la charge future est estimée par des méthodes complexes et peut difficilement répondre au besoin de certitude attendu. Peu de systèmes basés sur la prévision des charges ont été effectivement mis en œuvre dans les bâtiments et il faut

<sup>7</sup> Building Energy System

encore étendre les recherches avant d'envisager une large diffusion. Par exemple, on peut constater de erreurs de prévision lorsque la méthode ANN est utilisé en présence de fluctuations rapides de la consommation et des températures [99]. Par contre, avec le développement de moyens de calculs et des centres de stockage de données, des techniques intelligentes comme les réseaux de neurones sont prometteuses pour la prévision.

### 2.3.4 ALGORITHMES OPTIMAUX

La formulation de modèles mathématiques du problème de gestion énergétique étant réalisée, des algorithmes optimaux sont utilisés pour trouver la solution correspondant à l'objectif désiré (exemple : minimisation de coût de l'électricité consommée dans un bâtiment). On peut utiliser des algorithmes issus de la Recherche Opérationnelle, la programmation linéaire (LP) ou la programmation non linéaire (NLP), la programmation dynamique (DP), la méthode génétique (GA) ou la méthode de Branche & Bound (BNB), etc.

Il y a trois méthodes principales de recherche d'optimisation [60] : *méthodes déterministes*, *méthodes énumératives* et *méthodes stochastiques*.

#### 2.3.4.1 Méthodes déterministes :

Le problème est représenté sous la forme d'une fonction mathématique à optimiser soumise à des contraintes discrètes. Ces méthodes impliquent l'existence d'une fonction continue avec des dérivables. Leurs applications sont souvent limitées à la recherche d'un optimum local. Kurucz, Brandt [32] et Ng.K.H [62] ont présenté une méthode d'optimisation basée sur la programmation linéaire. L'approche est similaire à celle de Lee et Wilkins [100] mais la liste des programmes de contrôle candidats est plus souple. Bojic et al [33] ont utilisé la programmation linéaire d'entiers binaires (0-1) pour résoudre le problème d'optimisation d'un système thermique de bâtiment utilisant des radiateurs électriques en prenant en compte les coefficients de transmissions thermiques, les résistances thermiques, etc...

En termes d'optimisation, la solution optimale du programme peut être décrite comme le problème mathématique suivant :

Objectif: min/ max $f(x)$	$x$ : vecteur avec $n$ variables
Sous des contraintes :	
Équations linéaires d'égalité	$A.x = b$
Équations linéaires d'inégalité	$B.x \leq b$
Non-linéaire avec les équations d'égalité	$C(x) = 0$
Non-linéaire avec les équations d'inégalité	$D(x) \leq 0$

Des restrictions

$$lb \leq x \leq ub$$

#### **2.3.4.2 Méthodes énumératives :**

Ces méthodes sont simplement basées sur l'évaluation de la valeur de la fonction objective à optimiser en chaque point de l'espace des solutions. Cette procédure est fastidieuse lorsque l'espace de recherche est trop vaste (grande dimension). La Procédure de Séparation et d'Evaluation (PSE) ou Branch and Bound (BNB) en anglais [101] est un exemple très populaire de cette approche.

#### **2.3.4.3 Méthodes stochastiques :**

Ces méthodes peuvent être considérées comme une extension évolution des deux méthodes précédentes. L'algorithme génétique (GA), la recherche Tabu, et "Simulated Annealing" sont des exemples très populaires de ces méthodes. Le GA a été initialement présenté par Holland [102] pour résoudre des problèmes d'optimisation. Les algorithmes génétiques utilisent la notion de "sélection naturelle"[103] et l'appliquent à une population de solutions potentielles au problème donné [103]. Ils sont utilisés dans plusieurs applications pour optimiser "load shedding" [59, 79] et pour résoudre les problèmes optimaux liés au transfert thermique des équipements HVAC d'un bâtiment. Un autre exemple est un système de gestion avancée basé sur des algorithmes présentés dans la référence [62] pour planifier des tâches de chauffage. Il utilise la méthode génétique pour planifier des charges de contrôle en considérant le rapport entre le coût électrique déterminé par l'équation et les prix du marché.

D'autre part, Cohen et Wang [104] ont présenté une méthode de planification optimale pour le contrôle fondée sur la programmation dynamique. L'algorithme calcule les cycles d'opération ON-OFF pour des groupes d'appareils. Chaque groupe peut être commandé plus d'une fois au cours de la période de contrôle, l'avantage étant que la planification des contrôles possible est plus flexible. Plusieurs méthodes multicritères ont été appliquées pour la gestion de charge dans les bâtiments. On trouve souvent des méthodes liées au principe de délestage ou de relestage.

Les limitations fondamentales de la plupart de ces méthodes sont qu'elles exigent des calculs importants. Une autre limitation est que les actions de contrôle ne sont pas modifiables au milieu d'une période de contrôle pour réduire des écarts résultant d'erreurs de calcul ou des événements inattendus. Or il faut avoir cette possibilité, car les conditions fonctionnelles du

système peuvent changer au fil du temps (la charge réelle peut être différente de la prévision ou des pannes peuvent intervenir).

Il peut y avoir un certain nombre de situation où certaines contraintes importantes ne sont pas considérées et dans le cas le modèle de la charge contrôlable est inexact.

### **2.3.5 CONCLUSIONS**

De nombreuses recherches ont été réalisées en vue de résoudre les problèmes de gestions de charges dans le bâtiment. On a étudié beaucoup de stratégies de contrôle optimal, de contrôle préventif, et aussi en temps réel, avec des méthodes et des modèles différents. Des scénarios particuliers, fonctionnelles caractéristiques des bâtiments, des types de l'utilisation, et les conditions climatiques sont proposés. Mais la plupart de ces scénarios doivent encore être développés et évalués en utilisant des outils de modélisation et de simulation. La partie suivante va donc analyser des problèmes concrets liés aux systèmes de gestion de charge actuels.

## **2.4 LIMITATIONS ACTUELLES DU SYSTEME DE GESTION DES CHARGES DANS LES BATIMENTS**

### **2.4.1 RESTRICTION DE FONCTIONNALITES**

Dans les quelques systèmes existants, nous avons constaté que les actions de contrôle sont fortement limitées. Ces limitations se trouvent liées à la restriction des fonctionnalités classiques ou à la capacité d'intégrer des nouveaux modules de contrôle au système. Plusieurs exemples peuvent être considérés, comme ceux présentés dans [60, 92] qui ne se consacrent qu'aux dispositifs thermiques (chauffage, radiateur, climatisation) sans prendre en compte la consommation des autres matériels utilisés dans les bâtiments. Un autre système [21] fournit des informations concernant l'énergie consommée dans un bâtiment mais n'offre que des fonctions classiques de gestion (délestage, décalage liée au tarif, etc).

### **2.4.2 DIFFICULTES TECHNIQUES**

La principale limitation vient du comportement non linéaire dans les HVAC qui rend difficile les modèles de prévision, de planification ou bien de contrôle dans les bâtiments. Ces modèles sont souvent trop complexes pour être exploités, soit du fait d'inexactitudes en raison

de l'apparition d'aléa, de la variabilité des paramètres thermiques (conductivité thermique, épaisseur du mur, de la fenêtre...), et de l'environnement (météo de la région, etc).

Par ailleurs, la diversification des types de bâtiments (ancien, neuf; maison individuelle ou résidence collective), rend difficile le déploiement d'un système générique ayant la généralité requise. Il est difficile d'affirmer qu'une méthode/système sera un candidat idéal car chacun possède des inconvénients et aussi des avantages spécifiques, qui ne correspondent pas à tous les types des bâtiments.

De plus, l'insuffisance des infrastructures de communication dans les réseaux actuels électrique empêche le déploiement des nouvelles méthodes de gestion. Cette insuffisance peut être surmontée mais ceci exige de gros investissements.

### **2.4.3 DIFFICULTES ECONOMIQUES**

Face au potentiel d'économies d'énergie existant dans le secteur résidentiel-tertiaire, nombre de méthodes et de systèmes avancés ont été étudiés et développés, avec parfois des performances élevées. Mais la plupart entre eux sont difficiles à déployer plus largement parce qu'ils se trouvent limités par des considérations économiques.

Une difficulté rencontrée pour le déploiement des nouvelles techniques tient aux appareils existants. Les progrès technologiques permettent de produire des nouveaux équipements plus performants mais aussi souvent plus coûteux que les anciens. Ainsi la référence [105] présente le coût des différents systèmes allant, de 40 € pour un thermostat d'ambiance à 300 - 450 € pour une régulation de température et jusqu'à plusieurs milliers d'euros pour une régulation complexe. Par conséquent, le renouvellement de certains appareils ne pourra se réaliser que de façon très progressive.

De plus, il existe d'autres limitations liées aux critères économiques. Elles viennent du bilan économique entre comparant le coût de l'investissement global pour appliquer une nouvelle méthode et le gain obtenu. On constate que le gain lié à l'économie énergétique apportée par équipements est souvent contre balancé par un coût d'investissement plus élevé.

### **2.4.4 AUTRES CHALLENGES**

Dans le domaine du bâtiment, la gestion de la charge a pour objectif de contrôler et modifier le comportement énergétique de différents consommateurs. Parmi les approches proposées, les techniques innovantes visant à réduire les pics de consommation sont fortement

encouragées, et les acteurs de la filière sont incités à participer financièrement à ces programmes d'amélioration. Toutefois, sur un marché où production, distribution et consommation sont bien séparées, de bonnes initiatives peuvent se noyer dans la masse et la foule des offres de tarifs électriques. Ainsi, les consommateurs pensent qu'il est plus facile de réduire leur facture en choisissant un fournisseur plutôt qu'en adoptant une stratégie de management de leur consommation. On ne sait pas qui peut mieux tirer parti de ces technologies de management. Même si le consommateur est prêt à adopter ces techniques pour réduire sa facture, on ne sait pas clairement qui payera pour leur développement ?

L'instabilité du marché rend difficile l'engagement d'investissements nécessaires au développement. En effet, les risques économiques influencent la politique de régulation énergétique, et cette dernière à son tour peut favoriser ou défavoriser un certain type de développement. Par contre, une politique de régulation de la consommation trop rigide pourrait empêcher le développement des futurs systèmes et conduire à plus long terme des pertes importantes pour les investissements à long terme. Ainsi, une réglementation plus intelligente pourrait consister à promouvoir une infrastructure commune avec des interfaces normalisées favorisant la concurrence dans le domaine de la métrologie mesure et de la gestion des charges.

Les régulations de l'électricité sont différentes d'un pays à l'autre selon les conditions des marchés énergétiques. Par exemple, l'édition de la facture peut être réalisée par un monopole ou une entreprise concurrentielle distincte. Des conditions stables et bien définies pour les grands marchés, comme celui dans l'Union européenne, seraient nécessaire pour toutes les technologies. En effet, les exigences et objectifs différents de chaque zone géographique ne permettent pas, en respectant les quantités de production, de conduire à une production à dont le coût serait compétitif. En résumé, les obstacles technologiques sont moins difficiles à surmonter que les difficultés économiques.

Certains problèmes technologiques et défis résident dans la complexité et la diversité des équipements utilisés pour un système de régulation. Il existe généralement plusieurs équipements de mesure fonctionnant en parallèle pour des tâches de mesure ou de contrôle à distance. De même, il existe plusieurs systèmes de communication qui fonctionnent en parallèle, malgré le coût relativement élevé des câbles de communication. De plus, chaque méthode de mesure est dédiée à un seul objectif et n'est pas toujours adaptable aux besoins des autres applications. En conséquence, un grand nombre de câbles et d'installations sont mis en place à proximité des équipements, ce qui est inefficace et coûteux. La tolérance aux

pannes de ces systèmes de communication est relativement faible. La possibilité de déploiement d'un inter-système de gestion et d'échange de données ou encore l'ajout de nouvelles fonctionnalités est difficile à réaliser et coûteux. Ceci bloque les stratégies de gestion.

Il existe également des difficultés de communication au niveau de la communication des systèmes qui empêchent le transfert et l'utilisation des données existantes, même si des améliorations ont été systèmes plus récents. Certains équipements de mesure ont pour but de détailler la consommation électrique, la tension, le courant, et d'indiquer les pannes. Mais la majorité des équipements ne fournissent que des données via une connexion d'impulsions qui est limitée et sujette à des défaillances. Pour la gestion de la charge, les mesures de l'énergie, le sens de circulation et des données de diagnostic sont nécessaires, ce qui implique l'établissement d'un bus de données. Les équipements de mesure et appareils de lecture sont souvent des structures non flexibles par rapport aux besoins de stockage des données et de communication.

On doit prévoir que, les données mesurées aux points de distribution augmentent ainsi que la diffusion et l'échange de ces informations entre un grand nombre de participants. Cette augmentation est due à l'émergence de nouveaux modèles de communication et de réseaux flexibles, qui sont composés d'organisations très spécifiques. Comme les modèles de régulation des charges ne sont pas exploitables sans une grande disponibilité de données mesurées, cela nécessite la normalisation de la communication avec des infrastructures souples et des formats de données communs.

Standardiser des systèmes de mesure est très difficile lorsque ceux ci tentent de remplir les conditions requises pour la gestion de charge. Il est peu avantageux d'avoir des systèmes distincts pour la mesure de la facturation, pour la surveillance continue de la qualité de fourniture pour la gestion de la charge. Des interfaces standards et des structures de données courantes seraient nécessaires pour permettre l'échange de données avec d'autres systèmes tels que :

- La gestion de la consommation des charges
- Le contrôle de la distribution électrique du réseau et sa gestion
- La surveillance de la qualité de l'offre
- Les échanges commerciaux de l'électricité

Toutefois, deux systèmes distincts pour la protection des paramètres critiques et pour les mesures relatives pourraient se relever nécessaires.

Il existe plusieurs types d'interfaces à normaliser. Une première interface est située entre les équipements de mesure et les équipements de lecture des données. Une autre interface est celle entre les équipements de lecture et les applications qui utiliseront ces données. En outre, le protocole de communication doit assurer que les différentes applications coopèrent entre elles.

Un autre obstacle qui s'oppose au développement du système de régulation est le coût de l'installation. Ce coût ne devait pas être supérieur à 25% du coût total du système. Or l'installation chez les clients dont les charges sont contrôlées à distance, des équipements de mesure est relativement coûteuse. En outre, les équipements actuels ne sont pas encore assez développés pour les systèmes de mesure à grande échelle, ce qui exige des développements complémentaires coûteux.

En résumé, les problèmes existants concernent :

- Le besoin d'un système commun de mesure : problème complexe et difficile à définir,
- La standardisation de la lecture des mesures, du stockage et du transfert de données n'est pas suffisamment avancée,
- Les intérêts à court terme des entreprises compromettent souvent le développement d'un système de régulation ayant des perspectives à long terme de développement,
- Il est plus facile d'évaluer le prix unitaire d'un équipement que d'estimer l'intérêt d'un système de régulation qui sera amorti sur une période de 5 à 10 ans.

## **2.5 CONCLUSIONS**

Ce chapitre a présenté des méthodes de gestion des charges traditionnelles ainsi que les nouvelles approches concernant des techniques de gestion préventives et en temps réel. L'introduction d'une forme d'intelligence adaptée au contrôle d'ambiance des bâtiments est une direction de recherche intéressante pour les années à venir. Plusieurs méthodes ont été mises en œuvre comme les systèmes de contrôle multi-agents, les méthodes de logique floue, les applications des réseaux de neurones, l'apprentissage d'automates, etc. La plupart des méthodes de contrôle intelligent sont très prometteuses grâce aux développements des technologies et de l'informatique qui permettent d'améliorer l'efficacité des systèmes de contrôle dans les bâtiments.

On constate qu'il serait nécessaire de mettre en place un système de gestion de la charge électrique qui fusionne un ensemble de techniques, comprenant la gestion en temps réel, la gestion préventive et la gestion optimale.

## **Chapitre 3**

# **Système de communication et capteurs pour la gestion des charges**

---

Les analyses du chapitre précédent nous ont montré que les mesures, l'infrastructure de communication et aussi les algorithmes de gestion jouent des rôles importants. Un système de communication efficace est donc indispensable, en vue de répondre aux exigences du système de gestion des charges. Ce chapitre analysera l'infrastructure de communication utilisée pour le système de gestion des charges. Après les rappels des besoins de mesures, les différents types de communications rencontrés dans le domaine domotique seront présentés. Ensuite, les tendances actuelles des systèmes de communication basés sur les techniques de "machine à machine" (M2M) particulièrement adaptées aux développements du système de gestion de charge seront analysées. Le dernier paragraphe présentera les capteurs et les technologies de réseaux de capteurs qui sont utilisés dans le système de gestion des charges.

### **3.1 MESURES POUR LA GESTION DES CHARGES**

L'information sur les états du système et de l'environnement est nécessaire pour l'exploitation intelligente des ressources d'énergie. Elle issue des mesures réalisées par différents capteurs. Après capture de ces données, des programmes de contrôle peuvent effectuer des ajustements selon des variations de charge ou en parallèle l'analyse des tendances de l'utilisation. Il existe différentes mesures correspondant à divers objectifs de gestion énergétique. Après l'analyse des paramètres à mesurer pour un système de gestion énergétique, nous réserverons une partie spécifique au compteur électrique compte tenu de son importance.

#### **3.1.1 PARAMETRES A MESURER**

Les besoins de mesures sont essentiels à la mise en œuvre d'un système de gestion de charge. Ces mesures peuvent être réalisées par différents moyens, et elles sont utilisées pour

des objectifs différents. La partie suivante montrera différents besoins de mesure du système de gestion des charges.

### **3.1.1.1 Facturation**

Le premier besoin de mesure est la facturation électrique. En général, il suffit de mesurer simultanément les puissances actives consommées et produits dans le bâtiment (en cas de production locale). On mesure aussi la puissance réactive qui n'est toutefois importante que dans certains cas, si l'appareil utilisé est une charge très fortement inductive (cuisine à induction par exemple).

Dans le nouveau contexte concernant l'ouverture du marché électrique et l'intégration des dispositifs de production dans les bâtiments, la consommation et la production doivent être mesurées séparément, car les tarifs appliqués sont généralement différents. En plus, le bilan des interruptions et certaines caractéristiques relatives à la qualité de la fourniture (coupures longues, taux d'harmoniques) sont nécessaires. Si l'utilisateur participe aux programmes de délestage ou de services système, (illustrés dans le chapitre 2), ces informations sont, d'une part utilisées pour le paiement compensatoire et d'autre part pour le calcul de facturation dans les futurs systèmes. Ces informations peuvent être aussi réutilisées pour les traitements de l'estimation ou des activités avancées (estimation de la stabilité du réseau, ou prévention des défauts, etc). De toute façon, il faut que les données correspondantes puissent être stockées.

### **3.1.1.2 Modélisation et prévision des charges**

Les besoins de modélisation et de prévision de charges sont nécessaires pour la gestion de système énergétique, les services du réseau électrique pouvant ainsi justifier des décisions importantes: décisions sur l'achat, sur la production énergétique et l'investissement en infrastructures, etc. L'objectif est de créer et mettre à jour des modèles prévisionnels en utilisant des mesures actuels et passés. La prévision des charges concerne plusieurs acteurs électriques, tels que les fournisseurs énergétiques et services financiers, mais aussi d'autres participants du secteur de la production d'énergie électrique, notamment ceux de la transmission, de la distribution et des marchés.

Concernant les mesures, les besoins sont très larges, en fonction des modèles de prévision utilisés et des objectifs de modélisation. Les mesures sont réalisées dans le but de comprendre le comportement des objets à modéliser ou à simuler. Les courbes de charges observées, qui comprennent dans ce cas les puissances active et réactive enregistrées

simultanément, sont très importantes. Pour la gestion prévisionnelle de la charge avec un système d'apprentissage, des modifications obtient intervenir rapidement pour réagir, vérifier et assurer la demande de gestion.

### **3.1.1.3 Surveillance des charges**

Pour la surveillance des charges, les utilisateurs veulent que cette opération soit réalisée de façon non-intrusive. Les mesures d'énergie consommée sont normalement celles des puissances active et réactive. L'intervalle temporel nécessaire entre deux mesures consécutives dépend de la dynamique de la courbe charge à surveiller.

### **3.1.1.4 Contrôle des usages d'électriques**

Le contrôle des usages électriques implique besoin des informations d'états des équipements, des puissances consommées et aussi des paramètres d'environnement:

- La puissance appelée sur le réseau
- Le courant électrique utilisé ( I,, P, etc)
- La température
- La luminosité
- L'occupation de l'habitat sur l'espace contrôlé
- etc

Les retards affectant les mesures ou le système de communication doivent être strictement limités si les mesures sont destinées aux boucles de contrôle ou à la surveillance en ligne. Si les contrôles des usages électriques sont réalisés à longue distance, ils doivent être assurés par un système de communication fiable.

### **3.1.1.5 Services électriques**

Il existe aussi des besoins de mesure relatifs à la détermination de la qualité de service (QS) électrique. Ils fournissent donnent des informations sur la qualité de puissance, la protection et l'autodiagnostic qui sont essentiellement relatives au niveau du producteur ou du fournisseur. Les mesures liées aux différentes QS répondent à des besoins distincts et spécifiques.

### **3.1.2 COMPTAGE ELECTRIQUE**

Le comptage électrique devient un dispositif important pour la gestion de la charge dans l'avenir. Les mesures correspondantes qui reflètent la consommation énergétique du client, sont directement reliées à la facturation et au règlement en temps réel.

Normalement, les données fournies par le compteur comprennent :

- L'énergie consommée par le client pendant une période définie
- La puissance appelée : enregistrements de la demande de l'électricité ou de la puissance appelée sur le réseau pendant la journée, ou un mois, etc
- La durée temps d'utilisation : archives de l'énergie consommée pendant des périodes différentes. Les périodes sont généralement prédéfinies : heures de pointes et heures creuses, et réglables.

Les compteurs électriques de technologie récente offrent de grande capacité d'accès à distance avec plusieurs modes de fonctionnement. A cause des besoins de communication, ces compteurs fonctionnent comme un point de communication. Outre la prise de mesure, ils réalisent également les fonctions de transfert et de communication des données. Un compteur contient, dans ce cas, une interface de communication sans fil, optique ou filaire, et peut posséder une liaison numérique ou des ports de communication avec des protocoles différents (téléphone, radio, téléphone portable, etc).

Une carte d'enregistrement intégrée au compteur permet de sauvegarder et de traiter les données mesurées à chaque intervalle de temps défini. De plus, plusieurs compteurs permettent de mesurer ou de rassembler des informations correspondant aux différentes mesures (énergie électrique, eau, gaz, etc).

#### **3.1.2.1 Compteur électrique classique**

Ce compteur est un compteur électromécanique. Son rôle principal est de mesurer la puissance et d'enregistrer la valeur de l'énergie consommée. Dans le domaine de l'électricité, il existe de nombreux types de compteurs destinés à différents secteurs:

- Les compteurs pour le secteur résidentiel : ils représentent environ 98% à 99% des compteurs installés dans le monde [106]. Dans ce secteur, le volume des données de mesure est normalement faible. La fréquence de mesure, qui dépend des besoins du fournisseur est normalement entre quelques mois et une année (relevé manuel). L'information à récupérer est souvent l'énergie active consommée. En France, EDF a

fait développer un système de communication destiné au relevé automatique des index du compteur à partir de la borne la plus proche du consommateur. Le compteur est équipé d'un système de transmission par bus bifilaire avec le protocole de communication EURIDIS.

- Les compteurs utilisés dans secteur industriel : dans ce secteur, le volume des données à relever est relativement plus important, la fréquence de relevé est normalement mensuelle. Les consommateurs ont chacun une consommation de puissance importante, environ 50kVA à 10MVA. La tarification appliquée pour ces utilisateurs est donc plus complexe (ex : tarif jaune, tarif vert<sup>8</sup>), et les besoins plus faibles de facturation impliquent sur temps de réponse. Dans le secteur industriel français, on rencontre les compteurs baptisés "Emeraude" du Tarif Vert et les compteurs ACTARIS A70TJ pour le Tarif Jaune.

Les compteurs électriques utilisés mesurent essentiellement les énergies active et réactive consommées. Ils réalisent aussi un grand nombre de fonctions de comptage telles que la gestion des dépassements de puissance (coupure en cas de dépassement de puissance), la mesure les caractéristiques des coupures et des fluctuations de tension sur le réseau, etc. Il nous faut donc développer de nouveaux compteurs, plus intelligents, plus modernes pour les économies d'énergie dans le bâtiment.

### **3.1.2.2 Compteurs intelligents**

Maintenant, pour améliorer la gestion d'énergie électrique consommée, on constate des nécessités importantes des mesures liées aux paramètres électriques et environnementaux. De plus, dans le nouveau contexte de l'ouverture du marché électrique, de gestion optimale énergétique et de l'intégration des dispositifs de production dans les bâtiments, le compteur doit également assurer des fonctions de plus en plus nombreuses et complexes, liées aux divers services d'électricité. Donc, il est nécessaire d'introduire des dispositifs auxiliaires correspondant à ces différents services, comme:

---

<sup>8</sup> En basse tension, le tarif bleu est appliqué pour les consommateurs ayant souscrit des puissances inférieures ou égales à 36 kVA, le tarif jaune est destiné aux utilisateurs dont les puissances souscrites sont supérieures à 36 kVA.

En haute tension : tarif vert

- une horloge, le contrôle du changement de période tarifaire;
- des indicateurs de maximum, le contrôle et la gestion des pointes de consommation pour le contrôle de changement de période tarifaire si besoin ;
- la mémorisation ou l'enregistrement des données, en particulier des données de facturation à la fin de la période contractuelle, permettant d'obtenir un suivi précis de la consommation d'énergie ;
- la gestion des dépassements de puissance, permettant à celui-ci d'effectuer les corrections nécessaires à l'optimisation de la consommation d'énergie ;
- l'émission, vers un autre dispositif de signaux caractéristiques de la consommation. Cette opération, qui porte le nom de télécomptage, permet de déporter l'information et sa gestion et de combiner les résultats de plusieurs points de comptage ;
- la communication à distance des données contenues dans le compteur permettant sa lecture par le distributeur ou le client depuis un point éloigné du comptage.

Ces divers services de l'électricité sont effectués depuis longtemps par des ensembles matériels à l'extérieur du compteur électrique. Aujourd'hui grâce aux développements en électronique et informatique, nous pouvons intégrer tous ces dispositifs auxiliaires dans le compteur électrique. Ce dernier est appelé, désormais, « compteur intelligent ». L'utilisation des compteurs intelligents est répandue dans le monde entier afin d'améliorer des services électriques.

Le compteur intelligent, AMR (Automated Meter Reading) a capacité [130] :

- De suivre en détail, précisément, et en temps réel, la consommation électrique d'un foyer, d'un bâtiment, ou une entreprise.
- De transférer des données sur les paramètres électriques (énergie consommée, pertes sur le réseau électrique) et des signaux de contrôle, par différentes manières de communication (courant porteur en ligne-CPL, Internet ou wifi) pour la gestion énergétique.

Si ce compteur peut être programmable à distance et équipé d'un appareil de commande (actionneur) à distance, il est appelé alors compteur AMM (Advanced Meter Management).

Ses avantages sont nombreux. En premier, ils permettent aux clients de connaître en temps réel l'énergie consommée et le prix électrique au fil de la journée (heures creuses/pleines) et de la saison. Cela encourage les clients à économiser l'énergie (de 5% à

15% en pratique [130]) dans une perspective de développement durable. Deuxièmement, le compteur intelligent permet d'effectuer certaines opérations à distance, qui par conséquent évite des tâches manuelles et les déplacements comme relevé de la consommation électrique, ou le changement de la puissance souscrite, etc. Cela permet également, une diminution des coûts de distribution de l'énergie et des délais d'intervention. On a été envisagé à rechercher des moyens (compteur) intelligents appliqué à la gestion de consommation électrique (ou bien aussi de gaz et d'eau) des habitants, d'un quartier, d'une région ou d'un pays.

Cependant, il faut faire attention au problème de protection de la vie privée des habitants. Les informations de consommation d'énergie transmises par les compteurs sont très détaillées et permettent de savoir beaucoup de choses sur la vie d'un client, comme leur heure de réveil, le moment où ils prennent une douche ou bien quand ils utilisent certains appareils (four, bouilloire...). Cela pourtant mise en question au sujet de sécurité pour les gestionnaires des réseaux énergétiques.

En Europe, l'Union européenne a fixé en 2009 un objectif de déploiement des compteurs intelligents dans 80 % des foyers européens d'ici 2020, et 100 % d'ici 2022 [131], qui indique le développement important de ce dispositif dans le domaine énergétique. Cette directive a incité la France par le projet Linky, à équiper tous les foyers de compteur AMM à l'horizon 2021 [132], en remplacement des compteurs électromécanique utilisés actuellement [133]. Le fonctionnement d'un compteur Linky est présenté sur la (Figure 3-1). Il est installé chez consommateurs. Il peut communiquer avec un centre de supervision, et est en interaction permanente avec le réseau. Le compteur Linky communique à un concentrateur, qui est en général un mini-ordinateur intégré aux postes de transformation. Le concentrateur est relié au centre de supervision d'ERDF (Électricité Réseau Distribution France).

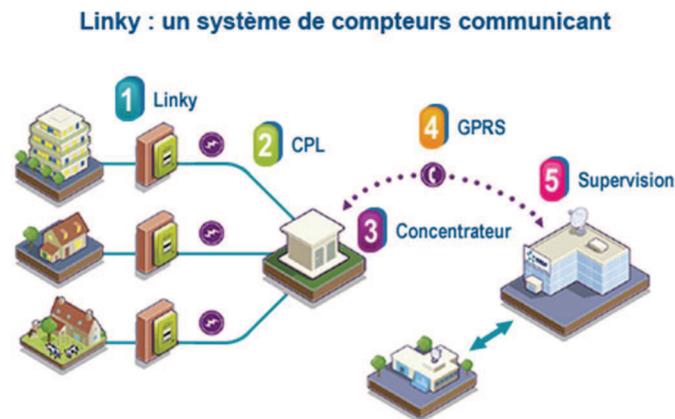


Figure 3-1 : Le système de compteurs communicant Linky [134]

Ce projet est déployé sur 10 ans selon trois phases différentes>. Le système de communication du projet Linky comporte : la communication de Linky à un concentrateur est établi en utilisant le courant porteur en ligne (CPL) bas débit sur le réseau BT, celle de concentrateur au système central est via le téléphone mobile (GPRS). [135]

En outre, l'Italie, producteur Enel SpA, a réalisé un projet qui permettra d'installer des compteurs intelligents dans 25 millions d'habitant entre 2000 et 2005. L'Irlande a commencé à installer des compteurs intelligents chez 25 000 foyers jusqu'en 2012 ..., tout cela traduit l'importance du développement de ce type de compteur intelligent.

D'autres pays développés comme l'Australie, le Canada et aussi les Etats-Unis ont aussi réalisé des activités de développement et de recherche associées au compteur intelligent.

Pour les applications dans les bâtiments, il est nécessaire d'utiliser de plus en plus de paramètres, cela veut dire que le compteur intelligent est très prometteur dans ces applications. Pourtant, au niveau de la gestion énergétique dans le bâtiment, le compteur intelligent est utilisé pour des mesures, de la communication ou pour effectuer des commandes à distance. Il ne peut pas décider lui-même des actions de contrôle. De plus, au niveau des appareils électriques dans un bâtiment, les commandes à distance ne tiennent pas compte du fonctionnement de chaque équipement. C'est pourquoi nous avons décidé de proposer dans les chapitres suivants des méthodes de gestion intelligente innovatrice qui prennent en compte tous les équipements d'un bâtiment. Ces méthodes peuvent être appliquées sur les futurs compteurs électriques.

### **3.2 COMMUNICATION POUR LES SYSTEMES DE GESTION DES CHARGES**

Chaque application de régulation exige une architecture de communication adéquate, établie entre les composants du système. Pour le système de gestion énergétique de bâtiment des références [21, 107], il y a des interventions complexes entre différents acteurs (utilisateur, gestionnaire, fournisseur,...), ce qui impose une communication bidirectionnelle. Techniquement, la communication dans un bâtiment peut être mise en œuvre de trois manières différentes :

- la communication sans fil par radio fréquence (RF).
- la communication par courant porteur en ligne (CPL),
- la communication par ligne de bus (bus de terrain),

### **3.2.1 COMMUNICATION SANS –FIL**

#### **3.2.1.1 Présentation générale**

Un réseau sans fil, comme l'indique son nom, n'utilise pas des lignes de connexion, la communication n'est réalisée que par des signaux sans support matériel, de radiofréquence par exemple. Les réseaux sans fil comprennent un grand nombre type : réseaux locaux sans-fil (WLAN), réseaux de capteurs (WNS) et réseaux sans fil personnels (WPAN).

Il existe différentes technologies de communication sans fil (Figure 3-2): [108]

- **WWAN - Wireless Wide Area Network - Réseaux sans fil étendus** : Ces réseaux destinés en premier lieu à des applications de téléphonie mobile, ont ensuite été largement étendus à d'autres applications, comme la transmission de données, les multimédias, les signaux de contrôle, etc. Les techniques de communication sont nombreuses, comme le GSM, CDMA, TDMA, EDEG, etc. La distance de communication est longue et dépend de la distribution spatiale des stations de base de communication.
- **WMAN - Wireless Metropolitan Area Network - Réseaux métropolitains sans fil** : Ce sont des réseaux destinés à des communications à plus longues distances, de quelques kilomètres. Les WMAN sont basés sur la norme IEEE 802.16. Ils offrent un débit de transmission de 1 - 10 Mbit/s et la distance de communication est de 4 - 10 kilomètres. Ils sont principalement développés pour les opérateurs de télécommunication.
- **WLAN - Wireless Local Area Network - Réseaux locaux sans fil** : En général, ils sont utilisés pour établir des liaisons de communication locale dans les entreprises, avec distances plus courts d'environ quelques centaines de mètres. Le Wifi (IEEE 802.11) et HyperLan2 (High Performance Radio LAN 2.0) sont les deux normes les plus utilisées pour la communication WLAN.
- **WPAN - Wireless Personal Area Network - Réseaux sans fil personnels** : Ils se composent de réseaux radiofréquences domestiques élaborés pour les applications des appareils personnels ou des petits équipements. Ils sont caractérisés par un débit de transmission de donnée relativement faible. Bluetooth et ZigBee sont deux des plus célèbres technologies basées sur la radio fréquence de courte portée, capables de transmettre la voix ou des données et informations simples.

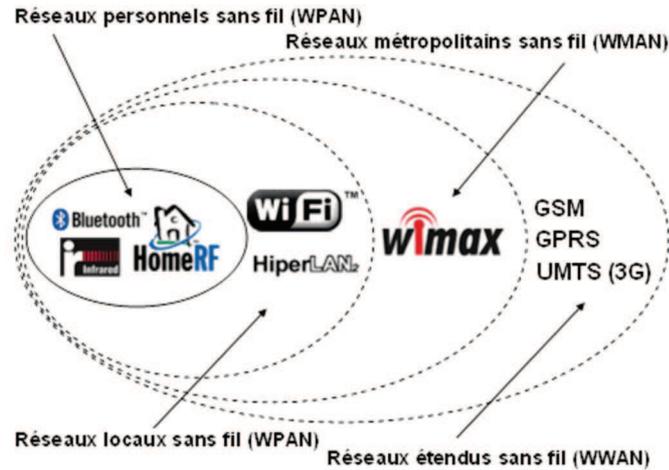


Figure 3-2 : Catégories de réseaux sans-fil [108]

Récemment, dans le domaine domestique, différentes normes sont apparues. Nous nous intéressons ici plutôt à celles destinées aux appareils personnels, ou petits dispositifs de communication aux courtes distances pour les applications dans le bâtiment (les technologies ZigBee, UWB, Bluetooth, etc). Le Tableau 3-1 présente certaines des caractéristiques générales de ces types de communications sans fil.

	IEEE 802.11a/b/g	HiperLAN 2	BlueTooth	ZigBee
<b>Fréquence</b>	Bande 2.4 GHz ISM Ou 5 GHz (b)	Bande 5 GHz ISM	Bande 2.4 GHz ISM	Bande 2.4 GHz ISM + Bande 868+902-928 MHz
<b>Débit Maximal</b>	11 - 54 Mbps	54 Mbps	1 à 3Mbps	20 kbps à 250 kbps
<b>Portée</b>	Maximum 30 m au débit maximal 500 m débit réduit	Maximum 150m	10 à 100m	10 à 100m
<b>Application</b>	Internet navigateur, réseau d'ordinateurs, transfert de fichiers	Internet, réseau d'ordinateurs, transfert de fichiers, etc	Destiné aux appareils personnels. Transmission des données fichier et audio composites,	Texte ou données simples, réseaux des capteurs
<b>Avantage</b>	Haut débit	Haut débit	Interopérabilité, sans-fil	Flexibilité, faible consommation

				d'énergie, facilité de l'installation
--	--	--	--	---------------------------------------

*Tableau 3-1 : Récapitulatif des types de communication sans-fil*

### **3.2.1.2 Défis et Opportunités**

#### **Avantages des communications sans-fil**

- Elimination des coûts liés à la connexion physique de l'appareil
- Facilité d'établissement d'une interface de communication universelle entre de nombreux appareils (protocoles de communication standards supportés par plusieurs fabricants)
- Facilité d'auto-configuration du réseau de communication en cas d'ajout d'un nouvel élément.

Le développement de la micro-électronique a conduit à une évolution importante sur des petits composants, avec une consommation faible, et peu coûteux, qui permet d'élargir l'exploitation des réseaux de capteurs sans fil et des dispositifs électroniques intelligents. Ces derniers sont également faciles à installer à la fois dans les bâtiments neufs et en rénovation de bâtiments existants.

#### **Challenges et besoins**

Un bâtiment est un milieu difficile pour le fonctionnement des communications sans fil. Les matériaux et les structures du bâtiment peuvent provoquer de fortes atténuations de la propagation des signaux radio. Cette perte affecte la qualité du signal transporté par onde électromagnétique d'un émetteur à un récepteur et c'est un problème qui semble difficile à résoudre. Il y a des contraintes relativement fortes qui sont liées au développement de nœuds de communication plus performants. Il faut satisfaire à la fois des conditions de coût de développement, de taille de dispositif (antenne), d'énergie consommée faible tout en assurant une communication sans-fil de bonne qualité.

Dans la plupart des applications, on a besoin d'un grand nombre de capteurs dans certains. Ces capteurs doivent automatiquement s'organiser pour constituer un réseau intelligent ad-hoc. De plus, l'utilisateur peut souhaiter intervenir ou envoyer des commandes dans le réseau de capteurs dont il est propriétaire. Le protocole de communication est la caractéristique la plus importante pour un réseau de capteur, particulièrement pour ceux qui exigent de faibles consommations énergétiques.

D'autre part, il existe plusieurs protocoles développés par des compagnies privées, destinés aux réseaux de capteurs sans fil. Ces protocoles peuvent être adaptés à des

applications variées, mais ils ne respectent aucune norme standard, rendant de facto difficile l'intégration/ajout de nouveaux modules complémentaires, par manque de compatibilité entre les technologies.

### 3.2.1.3 Conclusions

Si l'on compare les technologies optiques avec celles basées sur la RF, la communication optique est moins coûteuse plus facile à développer et consomme moins de puissance que la radio fréquence (RF). Cependant, la technologie optique exige la visibilité qu'il s'agit des contraintes liés à la connectivité (alignement précis des fils, pertes d'insertion...) qui sont extrêmement difficiles à satisfaire, particulièrement pour les applications dans les bâtiments où se trouvent beaucoup d'obstacles. Les capteurs dans les bâtiments utilisent de ce fait souvent des technologies RF.

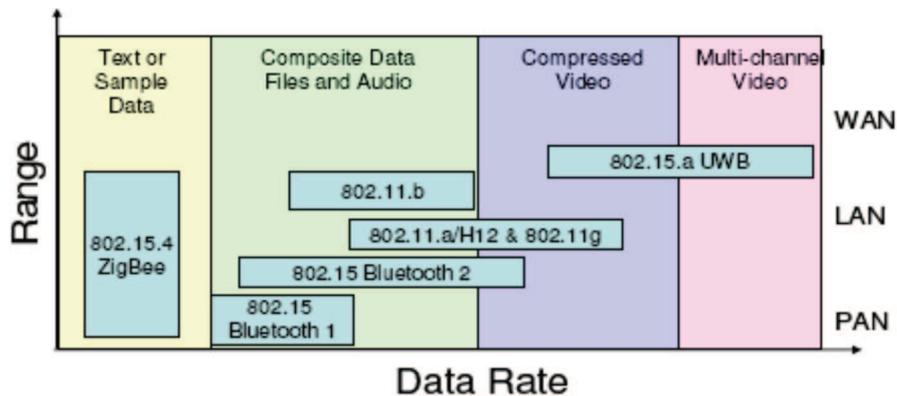


Figure 3-3 : Taux de transmission de données des réseaux sans-fil [39]

Pour les applications dans les bâtiments, il n'est pas nécessaire d'utiliser des protocoles à haut débit. Sur la Figure 3-3, on peut voir que le ZigBee et le Bluetooth sont deux solutions référentielles pour les réseaux de petits équipements.

D'un autre côté, il est évident que le fonctionnement des transmissions haut débit a besoin de plus d'énergie. Le ZigBee n'atteint que 250 Kbps (1/4 de la capacité de transmission du Bluetooth), mais présente un avantage au niveau de la consommation d'énergie. Il s'adapte donc bien aux réseaux de capteurs qui nécessitent de longues durées de fonctionnement sur batterie. Le Bluetooth, dont la capacité de transmission est de 1 Mbps, est conçu pour des applications spécifiques, telles que l'USB sans fil, les appareils et les casques.

Les technologies ZigBee seront probablement intégrées dans un large éventail de produits et d'applications à travers des marchés commerciaux et industriels.

### **3.2.2 COURANT PORTEUR DE LIGNE- CPL**

#### **3.2.2.1 Introduction**

En raison des besoins de disponibilité du réseau électrique et de l'énergie nécessaires à l'exploitation de l'appareil, les lignes électriques pourraient également être exploitées comme un moyen de communication [109]. L'utilisation de courant porteur de ligne (en anglais : PLC powerline communication) est une technique basée sur le principe de superposition d'un signal à plus haute fréquence (de 3 kHz à 30 MHz) au courant électrique normal (à 50 ou 60 Hz). Ce signal haute fréquence se propage sur le réseau électrique et permet de transmettre des informations numériques (Internet, Vidéos, Données, Audio, etc). Le CPL est souvent utilisé sur des lignes électriques à basse et moyenne tension.

Ce signal est modulé en fonction des informations envoyées par un émetteur. Les récepteurs gèrent le décodage de ces informations. Les signaux reçus peuvent ensuite être utilisées pour contrôler les équipements électriques.

Puisque ce signal peut se propager au sein d'un même réseau de distribution électrique (entre les appartements), on peut l'utiliser pour le contrôle d'un ensemble de bâtiments ou d'un quartier, chaque système de contrôle devant avoir une adresse informatique pour son identification.

Il y a deux types de réseau CPL, les réseaux "indoor" ou "outdoor" :

- Les réseaux " indoor" : il s'agit des lignes électriques situées en aval du compteur électrique du bâtiment. Le débit de ces réseaux est souvent de 14 à 45 Mbits/s.
- Les réseaux " outdoor" : il s'agit des lignes électriques situées entre le compteur électrique et le transformateur général du quartier. Leur débit peut aller jusqu'à 224 Mbits/s.

L'Insteon et X10 sont les deux normes les plus utilisées. Ces méthodes permettent de communiquer des données avec un débit faible (X-10) ou à double bande (Insteon) afin d'améliorer le contrôle.

#### **3.2.2.2 Avantages du CPL**

- Le CPL utilise les lignes électriques existantes, donc il n'est pas nécessaire d'installer de nouvelles lignes. , ce qui permet d'éviter de lourds investissements et désagréments liés à la construction d'un réseau de communication.

- Grâce aux technologies CPL, les fournisseurs d'électricité peuvent télémettre et contrôler à distance la lecture des compteurs, la gestion dynamique des charges, la protection, la commande de commutation, etc.
- Le CPL permet à des compagnies d'électricité de fournir des services BPL (Broadband over PowerLine services) comme l'accès à l'Internet, la télévision, multimédia... De nombreux clients peuvent utiliser ces services en raison de l'ubiquité et de la disponibilité du réseau électrique. Le CPL peut être considéré comme un réseau local informatique (LAN) permet de partager des fichiers ou accéder à Internet
- Le CPL peut ouvrir un marché concurrentiel dans secteurs des télécommunications
- Le CPL peut transmettre des données à une haute vitesse, son débit actuel étant compris entre 14 Mbit/s et 500 Mbit/s
- L'installation et le raccordement des appareils au CPL est simple
- La distance autorisée par les technologies de communication CPL est grande, (de l'ordre de 100 à 800 mètres pour le réseau indoor et de dizaines de km pour le réseau outdoor)
- A l'avenir, avec l'insertion des productions d'énergie décentralisée (PDE) et des sources d'énergie renouvelables (photovoltaïque, énergie éolienne...), il sera nécessaire de disperser d'un système à hautes performances. Dans ce cas le CPL ouvre des perspectives non seulement pour réduire le coût de raccordement des PDEs au système d'électricité, mais permet aussi pour accroître les performances du système dans ce futur contexte.

### **3.2.2.3 Inconvénients du CPL**

Le CPL est une technologie dédiée à la communication « point à point ». Les topologies physiques, les caractéristiques physiques de câblage et des perturbations générées par le courant électrique peuvent affecter la qualité de la communication.

1. Les terminaisons de ligne électrique provoquent des distorsions ou des atténuations du signal sur le réseau [110]. On a constaté que l'atténuation du signal va augmenter en fonction de la fréquence et de la longueur des liaisons [111].

2. Les interférences du réseau peuvent être considérées comme des bruits, un inconvénient important pour la communication par CPL. Les plus gênants sont les bruits impulsionnels qui apparaissent lorsque les appareils électriques sont connectés sur le réseau.

Par exemple, les interrupteurs d'éclairage peuvent produire des interférences insupportables pour le réseau de communication, en particulier pour le réseau WireNet [112]

3. Le CPL rencontre aussi des problèmes liés à l'atténuation du signal causée par des dispositifs actifs ou passifs [113]. Des dispositifs comme les relais, les transistors, les redresseurs (dispositifs actifs) peuvent créer des bruits dans ces systèmes, qui peuvent dégrader le signal. Les transformateurs ou les convertisseurs DC-DC vont presque complètement atténuer le signal. De même, les impédances dynamiques du réseau électrique produisent aussi des bruits et des atténuations importants pour la communication [114]

4. Dans un système de communication CPL, des changements de topologie du réseau peuvent conduire à des situations difficiles. Si on ajoute ou supprime certains équipements du réseau cela peut entraîner une reconfiguration majeure de l'installation électrique et affecter la transmission des données

5. L'existence de deux types de réseaux "indoor" et "outdoor" est due au fait que les informations qui transitent par le CPL ne peuvent pas traverser les compteurs électriques actuels. Les transformateurs sont également un obstacle à la propagation des signaux CPL [115].

6. Le réseau CPL ne travaille généralement pas de manière fiable si les charges domestiques sont branchées temporairement à des rallonges. Il faut normalement connecter directement ces dispositifs sur des prises murales. Malheureusement, dans les appartements individuels, les appareils souvent doivent se connecter au même circuit les uns avec les autres (blocs prises, rallonges,...)

7. Pour le CPL, de nombreuses organisations ont développé et proposé des systèmes de communication propriétaires avec des spécifications qui ne sont pas compatibles avec les solutions d'autres fournisseurs du CPL

8. Actuellement, le CPL est peu utilisé dans les grands bâtiments car il existe une limitation du nombre d'équipements pouvant se brancher sur le réseau. Par exemple, le réseau HomePlug 1.01 très populaire est limité à 15 points d'accès sur un réseau logique; l'Oxance propose pour sa part un modèle capable de gérer 250 points d'accès. Aujourd'hui, certains constructeurs proposent des réseaux CPL qui permettent de gérer beaucoup plus de points d'accès et cette limite est en voie d'être surmontée.

9. La longueur des liaisons de communication ne peut pas excéder 800 mètres en cas "outdoor" sans utilisation d'équipements de répétition. En réseau de type "indoor", la longueur ne peut excéder 300 mètres.

### **3.2.3 BUS DE TERRAIN INTEROPERABLES (BUS LINE COMMUNICATION)**

#### **3.2.3.1 Introduction**

Dans le bâtiment, la communication ou la transmission de données n'est pas facile à réaliser, si les appareils utilisés proviennent de fournisseurs différents. Par exemple, on ne peut pas faire communiquer directement un automate de Siemens avec un automate de Tac. Cela exige souvent de mettre en place plusieurs lignes filaires (peut-être sans fil), ou de partager une ligne de communication entre différents acteurs. On appelle **bus de terrain** un système d'interconnexion entre des appareils différents (des capteurs, des actionneurs ou des appareils de contrôle...). Ce système se compose d'un ensemble de communications filaires ou sans fil et aussi de sous-systèmes de communication.

L'objectif du système de "bus de terrain" est de définir les protocoles, des règles de transmission de données, communes pour la communication entre des supports physiques de différentes sortes.

#### **3.2.3.2 Architecture du bus de terrain inter-opérable**

L'idée de rassembler plusieurs tous les systèmes de communication sur un protocole commun, l'architecture du système qui doit être très flexible. Aujourd'hui, il existe trois grands langages/protocoles interopérables de bus terrain, qui sont les protocoles KNX, BACnet, et LonWorks. Ces trois protocoles sont assez similaires et sont développés et nommés sous les normes de l'EN<sup>9</sup> et de l'ISO.

- Les dispositifs du système de KNX peuvent communiquer via des fils en paires torsadées, des fils de courant électrique, via l'infrarouge ou la radio HF
- Le système LonWork est développé pour la communication sur des lignes torsadées, des lignes électriques, et la communication sans-fil comme radio HF, les fibres optiques et aussi le réseau informatique TCP/IP via Ethernet
- La norme du BACnet est utilisée afin de transférer des messages dans les réseaux informatiques comme Ethernet, ARCnet, MS/TP (RS485), PTP (RS232) et LonWork. En particulier, de nombreux appareils (par exemple les groupes froids et

---

<sup>9</sup> Norme Européenne

de refroidissement de toutes les marques) sont compatibles avec des interfaces LonWork.

L'architecture du KONNEX (KNX/EIB) est un bon exemple de système de bus terrain, adopté au niveau européen, dédié aux applications dans le bâtiment. Il regroupe les trois sous-systèmes de communication domestiques (BatiBUS, EIB et EHS) qui sont très populaires dans certains pays de l'EU. Il utilise des lignes filaires, des lignes de courant électrique, et supporte aussi la RF à 868 MHz. Le protocole proposé par le KNX garantit l'interopérabilité entre différents acteurs, et permet de développer un nouveau référentiel commun. Ce standard du KONNEX est maintenant devenu norme internationale ISO/IEC 14543-3.

### **3.2.4 CONCLUSIONS**

Les paragraphes ci-dessus présentent des techniques de communications très connues, qui sont non seulement utilisées dans le domaine des technologies de l'information mais aussi dans le domaine des applications intelligentes des bâtiments. Ils résument presque toutes les techniques possibles et leurs principales applications.

Chaque type de communication présente des avantages non négligeables et quelques inconvénients. Il est très important d'étudier ces techniques afin de comprendre et analyser celles utilisées actuellement dans le domaine des bâtiments. Dans le cadre de ma thèse, ces protocoles sont utilisés comme des références en matière de système de communications en vue afin de développer un nouveau système de communication simple et fiable.

## **3.3 SYSTÈME M2M (MACHINE-TO-MACHINE)**

Aujourd'hui, dans le monde entier il y a au moins 1,5 milliards d'appareils connectés à l'Internet. Cette évolution conduit à développer des technologies de communication et des technologies informatiques pour répondre à un besoin d'interconnexion généralisé. Les systèmes de gestion énergétiques doivent être interconnectés afin de pouvoir mettre en œuvre un contrôle réparti et des applications de gestion novatrices. Dans ce cas, le système de communication M2M est un candidat très prometteur. Cette partie vise à présenter/détailler les principes de communication M2M, une technologie très utilisée pour la gestion énergétique.

### **3.3.1 DEFINITION**

L'évolution rapide des technologies sans fil et de l'Internet a permis de développer de nouveaux systèmes informatiques, qui intègrent des appareils électroniques dans les applications de l'IT[116]. Ces systèmes sont appelés les systèmes M2M. Leur infrastructure comprend un ensemble de matériels distribués et des composants logiciels fournissant des solutions complètes pour la communication et le contrôle. Ils consistent en une combinaison des technologies issues et de l'informatiques pour la connexion à distance des périphériques, des systèmes et aussi des personnes. Leur but est d'assurer une communication directe entre des machines, y compris des équipements et des modules de télécommunications, des centres de données, des réservoirs de stockage, des équipements industriels ainsi que des systèmes publics, et même des distributeurs.

Les systèmes M2M s'appuient sur un concept de système intelligent distribué. Ceci signifie que les services de gestion et de contrôle sont définis et mis en œuvre comme un ensemble de composants logiciels agissant de manière coopérative. Le fonctionnement du système distribué est assuré par une infrastructure logicielle "middleware". Cette dernière fournit des services de communication fiables et sécurisés sur des réseaux hétérogènes ainsi que sur des plateformes d'exécution.

Les systèmes de gestion et de contrôle énergétique peuvent être considérés comme des systèmes M2M car ils impliquent l'intégration des équipements communicants avec des centres de contrôle afin de fournir des services de régulation.

### **3.3.2 CONCEPTS GENERAUX DES SYSTEMES M2M**

#### **3.3.2.1 Eléments du système M2M**

*Nœuds intelligents* : Ce sont souvent des capteurs, des actionneurs de communication, ainsi que des éléments de contrôle des machines (climatiseurs, ascenseurs, feux de circulation, etc...).

Généralement, les capteurs collectent et regroupent des informations, puis les traduisent en signaux numériques pour leur transmission à travers un réseau. Ils peuvent être considérés comme des équipements de communication. Leur rôle est d'établir un sous-système de communication entre eux, ainsi que de prétraiter les données.

*Équipements de communication* : Ce sont des moyens de communication permettent de pour transporter des données aux centres de gestion et entre les nœuds.

Pour les équipements de communication, les nœuds plus importants sont les points d'interconnexion (M2M Gateway) entre l'Internet et les sous-réseaux. Ces derniers sont des réseaux locaux sous forme de réseaux à courant porteur, de réseaux de bus de terrain, de réseaux sans fil (GSM, GPRS, UMTS, ZigBee, etc). M2M Gateway fournit des services de transport des informations sur le réseau d'intercommunication, prépare les données et optimise le transport d'information.

**Centre d'application** (ou centre d'opération) : Ce sont des centres de gestion et des logiciels de contrôle centralisés. A partir des informations issues des capteurs et en appliquant des ensembles de règles prédéfinies, ils envoient des commandes aux contrôleurs ou aux actionneurs, qui, par la suite, délivrent les signaux nécessaires pour que les appareils exécutent les actions attendues. Les logiciels utilisés sont plutôt des programmes d'analyse et de prise de décisions.

La Figure 3-4 ci-dessous présente l'architecture d'un système M2M complet, qui comporte des centres d'applications et aussi des appareils périphériques.

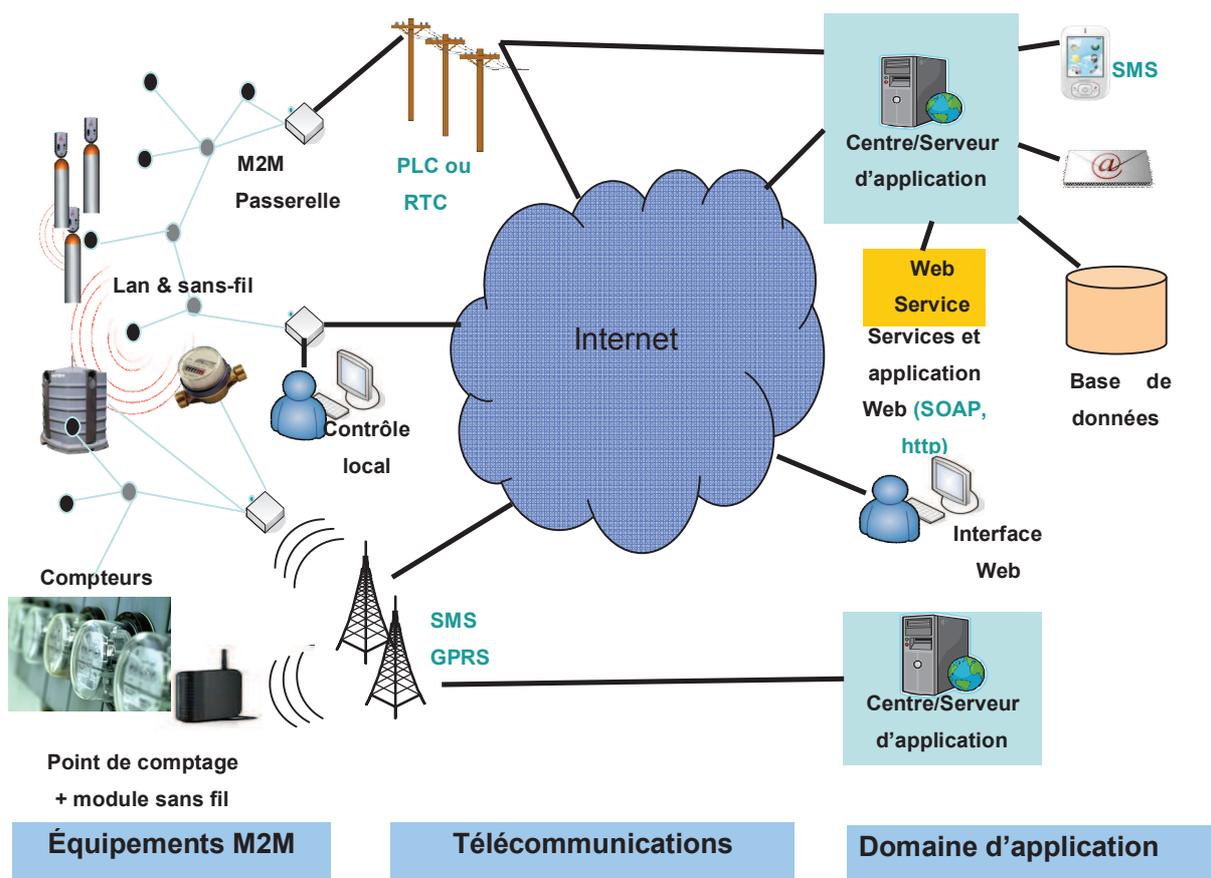


Figure 3-4 : M2M architecture

### **3.3.2.2 Organisation fonctionnelle d'un système M2M**

Cette partie présente les fonctionnalités principales d'un système M2M

#### **3.3.2.2.1 *Connectivité "end-to-end"***

Un système M2M assure la connectivité "end-to-end" qui permettent

- de fournir des canaux de communication bidirectionnelle entre des appareils ou avec des serveurs en respectant la qualité demandée de transmission requise,
- de masquer l'hétérogénéité des réseaux de télécommunications.

Cette dernière fonction est très importante car dans le cas de plusieurs systèmes de télécommunications complexes, l'accès aux réseaux des dispositifs terminaux (end-device) est très hétérogène à cause de la diversifié des technologies mises en œuvre. La communication d'un dispositif avec les appareils externes peut être réalisée de différentes façons, via des stations de communication (GSM, point de connexion Wi-Fi avec de nombreux protocoles de communication tels que Bluetooth, RFID, ZigBee). De plus, l'Internet introduit un moyen de communication normalisée entre les points d'accès (passerelles) des sous-réseaux différents et des serveurs informatiques. Dans l'avenir, il est prévu que l'Internet va s'étendre progressivement et les appareils intelligents intégreront une adresse IP.

Aujourd'hui, l'intégration à grande échelle de modules radio à des nœuds, typiquement des modules GSM / GPRS tels que le Nokia 12GSM ou le Sony Ericsson GT48 [116], sont très utiles pour les applications M2M à grande échelle sur le marché [117].

#### **3.3.2.2.2 *Gestion de données de communications bidirectionnelles***

Pour les systèmes de gestion énergétique, la communication doit assurer le transfert de deux types de données:

- La collecte de données provient des dispositifs terminaux qui sont ensuite envoyés à des serveurs informatiques. Il faut garantir les performances des communications (volume, débit, latence), ainsi que la fiabilité et la souplesse de fonctionnement (multiples formats de données, routage intelligent)
- Les commandes pour le contrôle et la gestion opérationnelle des dispositifs terminaux.

Dans les réseaux de systèmes M2M, les données peuvent circuler via les nœuds du réseau, et par conséquent sur de longues distances. En résumé, des données partagent le même système de communication basé sur IP-based transport (Internet Protocol) et peuvent utiliser des types de communication différents : client-serveur, point-to-point, etc.

### **3.3.2.2.3 Système distribué intelligent**

Dans la plupart des systèmes, les données issues des dispositifs sont ensuite envoyées à des centres de contrôle où sont effectués leurs traitements de données. Cette approche centralisée n'est utilisable que pour les systèmes de petite taille.

Par rapport à ces systèmes, le concept de système distribué intelligent est le progrès majeur fourni par l'infrastructure de M2M. Il permet de traiter des données directement au niveau local, selon le principe "La bonne fonction est exécutée au bon endroit". De nombreuses fonctions de traitement des données sont utilisées comme le filtrage, l'agrégation, la corrélation, la transformation ou algorithmes spécifiques,... Les traitements délocalisés permettent également l'analyse des données brutes au plus près de la source. Cela permet que les calculs des indicateurs nécessaires, pouvant être délivrés puissent être calculés et livrés en temps réel pour les applications de contrôle.

L'avantage de cette approche de traitement distribué est double. D'une part, les données transmises sur les canaux de communication étant plus synthétiques, la demande de bande passante est réduite. D'autre part, la tâche de traitement est répartie sur la chaîne d'installations de calcul disponibles, qui sont intégrées aux dispositifs ou aux serveurs informatiques.

La mise en œuvre d'un système distribué intelligent nécessite la mise en œuvre des solutions techniques suivantes :

- Une structure d'application, qui dispose de la propriété de granularité et préserve la cohérence globale du contrôle. L'architecture orienté service (SOA), basée sur les technologies logicielles des composants, est très prometteuse pour ce besoin. Dans un SOA, une demande est considérée comme un ensemble de services coopératifs qui s'exécutent de manière autonome. Un service est considéré comme un composant logiciel, défini par son interface informatique (les fonctions d'accès) et par des propriétés non-fonctionnelles (ses caractéristiques). L'interopérabilité entre les services est réalisée par des protocoles standardisés basés sur les échanges d'informations de contrôle et des données
- Un logiciel permettant de développer les fonctions de traitement des données. Il est capable d'exécuter ses tâches indépendamment du système d'opérations, et peut-être activé en tout nœud (du système Java est une bonne réponse à ce besoin). En fait, de la même manière que le IP-transport est devenu le protocole universel de transport, la

JVM (Java Virtual Machine) va devenir un environnement d'exécution universel pour y compris les environnements d'exécution limitées aux nœuds (limitation matérielle).

#### **3.3.2.2.4 Services et outils d'administration**

Les systèmes basés sur des dispositifs intelligents distribués impliquent un grand nombre de composants hétérogènes (matériel et logiciel). La gestion de ces éléments est un défi majeur pour le déploiement opérationnel d'un tel système à grande échelle. L'exploitation de tels systèmes M2M requiert des outils et des services avancés pour la configuration, l'administration et le contrôle opérationnel d'une collection de composants logiciels distribués à grande échelle. Le terme d'administration recouvre deux types d'opérations :

- Déploiement : installation et configuration à distance de composants logiciels localisés sur leur nœud d'exécution.
- Surveillance : supervision des infrastructures afin de détecter les défaillances du réseau et des nœuds, ainsi que les dysfonctionnements en raison de surcharges ou les paramètres de configuration impropres.

Le déploiement est effectué à différents moments au cours du cycle de vie d'une application, lorsqu'une nouvelle partie est mise en service ou lors d'une demande de reconfiguration pour tenir compte de nouvelles fonctions (par exemple, de nouveaux services), ou d'un changement de l'environnement d'exécution (nouveau réseau, nouveau périphérique, etc.). Par conséquent, l'adaptabilité et la flexibilité sont les principaux besoins qui ne sont pas bien traités dans les systèmes M2M d'aujourd'hui. Le processus de déploiement est lui-même une application distribuée complexe qui a pour objet de gérer les situations anormales rencontrées dans l'environnement distribué (par exemple une défaillance du réseau, l'indisponibilité d'un nœud, des erreurs de configuration, etc.). Les services de déploiement s'appuient sur la technologie d'ADL (Architecture Description Language) qui permet à une application distribuée d'être présentée comme un assemblage de composants logiciels<sup>10</sup>.

Les services de surveillance ont pour but d'examiner en permanence le comportement de tous les composants du système. Quand une situation anormale est détectée, une alarme est

---

<sup>10</sup> Une application est un graphe de composants et de connecteurs où ces derniers sont des interfaces liés à travers des objets de communications spécifiques

émise et une action appropriée doit intervenir exécutée pour le rétablir la situation (par exemple, redémarrage d'un nœud) ou pour trouver une autre solution (par exemple, nouvelles voies de communication), ce qui habituellement va conduire à une procédure de reconfiguration. Ces opérations impliquent la description du système global, et la mise en œuvre des outils de l'ADL en vue de garantir la cohérence globale du système.

Les outils ADL et les services associés à la reconfiguration ont marqué une avancée significative par rapport aux systèmes existants. En outre, nombre de recherches actuelles visent à fournir des outils d'administration autonomes qui sont nécessaires pour des grands systèmes M2M (par exemple l'auto-configuration, auto-récupération, auto-optimisation, etc.)

### **3.3.3 DEFIS ET OPPORTUNITES**

- Les systèmes M2M utilisent des technologies standard comme TCP/IP, IEEE 802.11 pour les réseaux sans-fil, les technologies de la téléphonie mobile et les réseaux câblés comme Ethernet. L'utilisation de norme standard d'interopérabilité permet aux appareils d'inter-opérer plus facilement dans les systèmes M2M et d'utiliser de larges gammes d'équipements conformément aux normes. Elle rend la mise en œuvre moins coûteuse, plus simple et plus rapide,
- Les nœuds d'un système M2M peuvent fonctionner de façon autonome. Chaque nœud peut envoyer des informations aux systèmes multiples et aux autres nœuds, et prendre des décisions relatives à leurs propres informations,
- M2M est une technologie flexible, contrairement au système SCADA dans lequel les capteurs et les contrôleurs sont câblés à un serveur (ou centre de contrôle), ce qui limite le nombre de capteurs que le système peut gérer, et la distance sur laquelle les données peuvent être transmises,
- De plus en plus d'applications M2M se basent sur les réseaux cellulaires de téléphonie mobile, en exploitant les avantages d'une meilleure couverture spatiale et la possibilité de réduire le coût de déploiement du réseau.

## **3.4 ZIGBEE - RESEAU DE CAPTEURS SANS FIL**

La technologie sans fil ZigBee, destinée aux réseaux de petits dispositifs et de capteurs, a connu un développement très rapide pendant ces dernières années. Avec cette technologie, les capteurs peuvent fonctionner pendant de très longues durées. Supportée par la

norme IEEE802.15.4, qui standardise deux couches de base PHY et MAC du réseau afin de faciliter l'inter-connectivité des différents capteurs, elle offre la possibilité d'établir un réseau sans fil complexe, portable et flexible.

Le ZigBee utilise la bande de fréquence 2,4 GHz, qui permet de transporter des données avec un débit maximal de 250 kbps, sur une distance maximale de 125 m. Le ZigBee bénéficie de tous les avantages d'un réseau sans fil. En le comparant avec d'autres technologies sans fil, ses principaux avantages sont un coût d'installation très attractif, une faible consommation électrique et une simplification de déploiement à très large échelle (limite théorique de 65.536 points d'entrée). En plus, ZigBee étant devenu une norme standardisée, on peut facilement trouver des produits l'utilisant dans le commerce.

Cette partie présentera cette technologie et expliquera son intérêt pour les capteurs sans fil autonomes du fait de sa faible consommation d'énergie.

### 3.4.1 ARCHITECTURE DU ZIGBEE

L'architecture du ZigBee se compose de quatre couches (Figure 3-5) : physique, MAC, réseau et application :

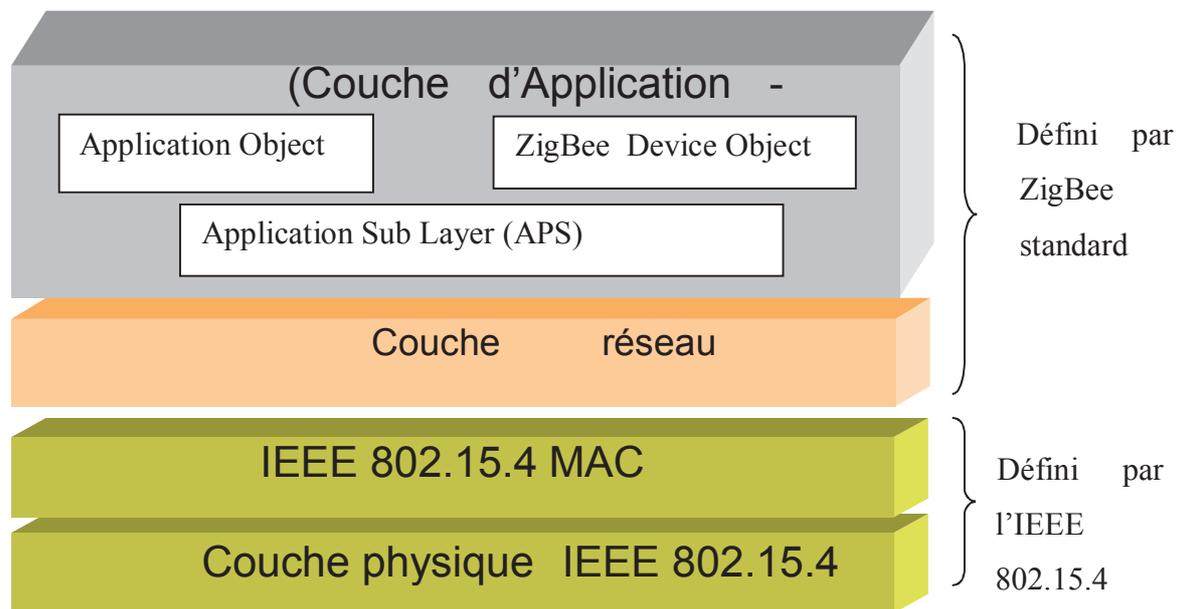


Figure 3-5 : Architecture du ZigBee [118]

#### 3.4.1.1 Couche physique

La couche PHY définit les caractéristiques physiques et électriques du réseau, y compris l'émetteur/récepteur radio. Elle supporte les fonctions pour la détection et

l'évaluation des chaînes libres (Clear Channel Assessment - CCA), l'estimation de la qualité du signal, la détection d'énergie.

La couche physique du ZigBee supporte trois bandes de fréquences (Tableau 3-2): 2450 MHz, 915 MHz et 868 MHz, les trois utilisant le mode d'accès DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum).

Bande de fréquence de la couche physique	2450 MHz	915 MHz	868 MHz
Débit de données.	250 kbps	40 kbps	20 kbps
Nombre de chaînes	16	10	1

*Tableau 3-2 : Caractérisations de la couche physique du ZigBee*

### **3.4.1.2 Couche MAC (Media Access Control layer)**

Le rôle de la couche MAC est de contrôler le fonctionnement opération de la radio et de définir le mécanisme selon laquelle plusieurs radios opéreront. Cela comprend la coordination d'accès à la liaison radio commune et la programmation et l'acheminement des trames de données. Elle s'occupe des fonctions de détection des chaînes et d'association ou dés-association. La fonction de détection contrôle plusieurs canaux logiques par l'envoi d'un message de demande, ensuite écoute les réponses afin de localiser les participants existants. Les couches supérieures spécifient le nouveau participant qui va se joindre au réseau, et va demander à la couche MAC d'entamer une procédure d'association le concernant.

Pour la couche MAC, deux topologies sont supportées par le 802.15.4. Ce sont la topologie en étoile et la topologie point à point. Dans la topologie en étoile, les communications s'établissent directement entre un nœud central (coordinateur) et les autres, le coordinateur étant le nœud principal qui initie et gère les communications dans le réseau. A l'inverse, la topologie "point à point" (Peer to Peer) permet à chaque nœud du réseau de communiquer avec tout autre nœud.

Dans les réseaux "point à point" normaux, l'accès au canal de transmission ne peut se faire qu'avec une technologie CSMA-CA simple dont les nœuds sont activés en permanence. Cette solution est coûteuse en énergie. Pour y remédier, une technologie hybride appelée "Mediation Device" compatible avec la norme IEEE 802.15.4, a été développée afin d'économiser l'énergie consommée au niveau des nœuds. Pour ce faire, un nœud du réseau va prendre le rôle de médiateur entre tous les nœuds. Quand un nœud A veut communiquer avec un nœud B, il envoie une requête au médiateur. Tous les nœuds du réseau interrogent

régulièrement le médiateur et lorsque le nœud B interroge le médiateur, ce dernier l'avertit que A veut le contacter. A et B entament alors une communication point à point.

### **3.4.1.3 Couche de réseau (Network layer-NWK)**

La couche réseau est en charge de l'organisation des nœuds et de l'initiation de l'acheminement des informations sur le réseau. Le ZigBee identifie deux types de composants : FFD (Full Function Device) et RFD (Reduced Function Device). Le ZigBee supporte trois topologies de communication: étoile, arbre et maillage.

Il existe trois types de périphérique logique :

- L'End-Device ZigBee correspond à une RFD ou FFD, fonctionnant comme un simple dispositif,
- Le routeur ZigBee est un FFD doté de la capacité de routage,
- Le coordonnateur ZigBee, qui est unique dans le réseau, est un FFD responsable du démarrage d'un réseau ZigBee pour la gestion de l'ensemble du réseau.

Cette couche détermine deux fonctions fondamentales :

- *Formation du réseau et assignation d'adresse* : En utilisant la fonction de détection de la couche MAC, un routeur accumule des informations sur les routeurs voisins pour obtenir la forme (la topologie, la configuration) du réseau. Quand un nouveau nœud veut se joindre au réseau, sa couche d'application choisit le réseau auquel il veut se joindre (plusieurs réseaux ZigBee peuvent opérer dans un même espace, en utilisant différents canaux). Sa couche réseau sélectionne un nœud "père"  $p$  dans le réseau, et demande à la couche MAC de lancer une fonction d'association. A son tour, lorsque le nœud père  $p$  obtient l'indication de la demande d'association MAC, il assigne un "short-address" 16 bits  $c$  en réponse à la demande d'association. Ce nouveau nœud utilisera cette adresse  $c$  pour toute communication sur le réseau
- *Routage* : L'algorithme de routage dépend de la topologie utilisée dans le réseau de capteurs. Les routeurs maintiennent leur adresse et les informations associées à l'adresse de leurs enfants et à celles de leurs parents. Étant donné que les adresses de destinations sont assignées, quand un routeur a besoin de transmettre un message, il peut facilement déterminer si la destination appartient à un arbre enraciné à l'un de ses enfants.

#### **3.4.1.4 Couche d'application**

Le but de la couche d'application (APL) est de fournir une plate-forme de développement (l'Application Framework) pour des applications distribuées. Le ZigBee identifie les ZDOs (ZigBee Device Object) qui sont responsables de la gestion de l'ensemble périphérique et de la sécurité. Le ZDO est comme un objet d'application particulier qui réside sur tous les nœuds ZigBee. Il a son propre profil, auquel les applications et d'autres nœuds peuvent accéder.

- Application Objects - APOs, qui sont des objets logiciels qui contrôlent l'unité matérielle (capteur, interrupteur, lampe) disponible sur le dispositif.
- ZigBee Device Object est un objet spécial qui offre des services aux APOs : il leur permet de découvrir les dispositifs sur le réseau, et aussi le service permet de mettre en œuvre. Il offre également des services de communication, de réseaux et des services de gestion de la sécurité.

L'APL contient l'Application Sub Layer (APS) qui fournit des services de transfert de données pour les APOs et les ZDOs.

### **3.4.2 APPROCHES D'ECONOMIE DE L'ENERGIE DU RESEAU DE CAPTEURS SANS FIL**

Comme nous l'avons vu, les consommations d'énergie sur un nœud capteur sont essentiellement localisées au niveau du module radio, du microprocesseur et du capteur. La communication radio est généralement la plus consommatrice à cause des besoins la propagation des ondes, y compris les pertes de transmission sur l'antenne. Dans un réseau de capteurs sans-fil, la consommation d'énergie peut être réduite en diminuant le nombre et la durée des opérations de réception et de transmission de données, tout en utilisant efficacement des modes de communication intelligents. Les modules radio peuvent avoir plusieurs niveaux de consommation correspondant à leurs degrés d'activité qui sont déterminés par la couche MAC (Tableau 3-3).

Mode	mica2	mica2dot	micaz
Rx	9 mA	9 mA	18.8 mA
Tx (0dBm)	15 mA	15 mA	17.4 mA
Power Down	$10^{-3}$ mA	$10^{-3}$ mA	$10^{-2}$ mA

*Tableau 3-3 : Consommation d'énergie d'un nœud de Crossbow (mA) [119]*

L'utilisation inutile de la communication radio peut voir 4 rigueurs [120] :

- Collisions : une collision a lieu lorsqu'une trame de données transmises est endommagée. Elle doit normalement être écartée puis retransmise. Les pertes de trames forcent les nœuds à retransmettre plusieurs fois, et par conséquent elles font augmenter la consommation d'énergie de transmission
- Overhearing : signifie qu'un nœud ramasse les paquets de données qui sont destinés à d'autres nœuds. L'énergie consommée pour la réception de ces paquets est donc inutile
- Idle listening : C'est l'attente de recevoir des données alors que rien n'a été envoyé. Cette situation apparaît se dans de nombreuses applications de réseaux de capteurs quand les nœuds sont actifs pendant la plupart du temps même si rien n'est transmis
- Overhead: ce gaspillage d'énergie intervient lorsqu'on envoie (et reçoit) trop de paquets de contrôle sur le réseau. Il est aussi lié à tous les bits utilisés pour encapsuler les données. Cet overhead est généré par la couche MAC afin d'assurer le fonctionnement de la communication mais cela augmente la consommation d'énergie.

Il existe plusieurs approches pour économiser l'énergie basées sur la couche MAC. Dans ce document, nous évoquons seulement les solutions compatibles avec le ZigBee.

#### **3.4.2.1 Approche basée sur le modèle du réseau (Connected Dominating Set- CDS)**

L'idée de l'approche CDS consiste à sélectionner certains nœuds dans le réseau et de les considérer comme des stations (backbone nœuds) du réseau. Ces stations seront actives pendant tout le temps de fonctionnement, et prennent en charge le maintien de la connectivité du réseau et stockent temporairement les messages pour les nœuds voisins. Les autres (non-backbone) nœuds sont mis en veille la plupart du temps et réveillés périodiquement pour échanger des messages avec leurs stations voisines.

#### **3.4.2.2 Approche basée sur la couche MAC (Media Access Control)**

Généralement, les solutions appliquées à la couche MAC ont pour but de gérer les transmissions de données de sorte que les transmetteurs radio soient coupés la plupart du temps ou que tous les nœuds sachent exactement le moment où il faut déclencher leur signal radio. Nous allons analyser quatre approches très populaires.

### **3.4.2.3 Approches Slot-Based**

Les méthodes slot-based consistent à diviser le temps, par exemple chaque seconde, en petits intervalles (slots), puis à attribuer un intervalle de temps donné à chaque nœud (End Device). Un nœud ne peut accéder au médium (ressource, message, etc) que dans sa tranche horaire. Tous les nœuds sont mis en mode sommeil pendant les slots de temps attribués aux autres nœuds. Cette approche est retenue dans de nombreuses méthodes comme TDMA, E-MAC, L-MAC,...

L'avantage de cette technique est que les délais sont prédéterminés, ce qui évite l'accident de collision. Chaque nœud opère pendant ses intervalles de temps et contribue à la réduction de la consommation l'efficacité de l'utilisation d'énergie. Son inconvénient est la complexité découlant de la nécessité d'avoir un "nœud maître" pour gérer les tranches de temps. En outre, le protocole n'est pas flexible en termes d'évolutivité, puisqu'il impose de réaffecter tous les intervalles du temps lorsqu'on a besoin d'ajouter un nouveau terminal [121].

La méthode TDMA (Répartition des ressources dans le temps) est un exemple d'approche de Slot-based, très utilisée pendant ces vingt dernières années. Une base de temps commune qui assure le synchronisme en diffusant des messages dans un segment de temps statique est nécessaire. Si certains nœuds sont beaucoup plus occupés que d'autres, TDMA peut se révéler inefficace, car il n'y a pas de données transmises durant les au cours des créneaux réservés aux nœuds silencieux.

### **3.4.2.4 S-MAC (Sensor MAC) [120, 122]**

S-MAC est un protocole développé pour les réseaux de capteurs sans fil, utilisant la méthode d'accès au médium CSMA/CA (IEEE802.11) et le mécanisme RTS/CTS (Request-To-Send, Clear-To-Send). Ce protocole permet d'éviter des activations inutiles telles que "Idle listening, collisions, overhearing" de communication.

Avec le protocole S-MAC chaque nœud est mis en mode sommeil pendant une certaine durée et se réveille pour écouter pendant une autre durée. S-MAC tente de coordonner les horaires des nœuds voisins, tels que leurs périodes de démarrage. Il permet aux nœuds d'échanger leur calendrier de périodes d'écoute. L'avantage est que chaque nœud connaît le calendrier de ses voisins et sait quand il faut se réveiller pour communiquer avec un nœud à sa portée.

La principale difficulté est de synchroniser les nœuds entre eux pour que la communication soit toujours possible [122].

### **3.4.2.5 TMAC (Timeout MAC)**

Le T-MAC utilise le mécanisme du SMAC avec des périodes actives et inactives. Chaque nœud se réveille périodiquement pour communiquer avec ses voisins.

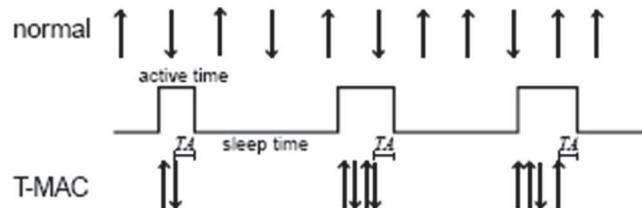


Figure 3-6 : La base T-MAC protocole, avec temps actif adaptatif [123]

Un nœud écoute une chaîne radio et peut potentiellement transmettre tant qu'il est dans la période active. Une période active se termine quand aucun événement d'activation ne se produit pendant un certain temps  $T_A$  prédéfini.

### **3.4.2.6 LPL (Low Power Listening) approaches [124, 125]**

L'un des premiers protocoles MAC pour les réseaux de capteurs basés sur cette technique est BMAC (Berkeley MAC) [125] qui a été développé par l'Université de Berkeley et est actuellement appliqué pour les capteurs compatibles ZigBee. Il peut réduire l'énergie consommée en introduisant des périodes inactives.

L'idée est d'utiliser un long préambule pour permettre au récepteur d'activer son module radio au moment nécessaire. Quand un nœud veut envoyer des données, il doit tout d'abord vérifier l'état d'occupation du canal radio en examinant le "bruit" détecté par un indicateur de puissance du signal. S'il n'y a pas de bruit, cela indique que le canal est libre. Avant d'envoyer des données il doit émettre un préambule. Ce préambule génère du bruit sur le médium et signifie aux autres nœuds que le médium est occupé.

Les autres nœuds sont en sommeil la plupart du temps et se réveillent périodiquement pour détecter la présence d'un bruit (à cause de préambule). Quand les données commencent à arriver, seules les destinataires de ces données continuent à être actifs, les autres retournent en sommeil. S'il n'y a pas de bruit sur le médium (canal radio), les nœuds retournent en sommeil.

### **3.5 CONCLUSIONS**

Ce chapitre a présenté les technologies de communication utilisées pour le système de gestion des charges. Après les rappels des besoins de mesures, les différents types de communications rencontrés dans le domaine domotique ont été présentés. Nous avons analysé la tendance actuelle des systèmes de communication basés sur les techniques de machine à machine (M2M) qui sont particulièrement adaptées pour les développements des systèmes de gestion des charges.

Ensuite, ce chapitre a examiné les capteurs et les technologies de communication des réseaux de capteurs qui sont utilisés dans le système de gestion des charges. Nous avons présenté la technologie de communication sans fil ZigBee, destinée aux réseaux de petits dispositifs et de capteurs. Cette technologie est supportée par la norme IEEE802.15.4, qui standardise deux couches de base PHY et MAC du réseau afin de faciliter l'inter-connectivité des différents capteurs. Elle présente des avantages très intéressants et convient aux applications de contrôle sans-fil des charges dans les bâtiments. Elle offre la possibilité d'établir un réseau sans fil complexe, portable et flexible, et permet aux capteurs d'opérer pendant de très longues durées.

# Chapitre 4

## Conception du système de gestion de charge en temps réel

---

### 4.1 INTRODUCTION

Le contexte de limitation de l'émission de gaz à effet de serre et de diminution de la consommation de combustibles fossiles a un impact sur la consommation d'énergie dans les secteurs résidentiel et tertiaire. Mais le rythme de la rénovation des logements incluant de nouveaux matériaux est extrêmement lent et cela coûte très cher.

Récemment, afin d'éviter les blackouts sur le réseau électrique et pour limiter aux heures de pointe l'utilisation d'énergie qui provient de sources polluantes et chères, la gestion des pics de consommation joue un rôle de plus en plus important. C'est pourquoi, le projet Smart-Grid a été proposé. Dans le projet Smart-Grid, la gestion de la charge, en particulier la gestion des pics de consommation devient essentielle.

Le développement de nouvelles stratégies de gestion du système énergétique des bâtiments est donc une piste très prometteuse et c'est pourquoi dans cette partie, nous allons proposer un système innovant de gestion d'énergie en temps réel dans les bâtiments, qui permet à la fois de

- réduire les pics de consommation
- respecter le confort des occupants
- réduire la consommation
- faciliter l'installation dans les bâtiments existants.

L'objectif principal de notre système est de diminuer la puissance appelée du bâtiment en fonction de la demande des gestionnaires du réseau électrique, tout en respectant le niveau de confort désiré. De plus, le système proposé est non seulement d'une installation facile mais il accepte aussi la modification (ajout/retrait de dispositifs) ou l'intégration de nouvelles fonctions avancées. Ce point fort est basé sur une architecture flexible et sur l'auto-configuration au niveau de communication du système.

Dans cette partie nous allons présenter tout d'abord la conception du système de gestion proposé qui comporte la communication, l'architecture matérielle ainsi que l'architecture logicielle. Nous présenterons ensuite de nouvelles méthodes proposées pour la gestion des charges dans le bâtiment.

## 4.2 ARCHITECTURE MATERIELLE DU SYSTEME

Notre système de gestion en temps réel de charge électrique consiste en un ensemble comportant des capteurs sans fil, un système de contrôle-commande centralisé, et une interface homme-machine. Il permet de réaliser certaines fonctions de conduite des équipements électriques suivant la consommation de l'énergie mesurée par un capteur de puissance sans fil. L'architecture globale du système est présentée sur la Figure 4-1. Plusieurs appareils électriques pilotables en fonction des différents critères peuvent être interfacés au système.

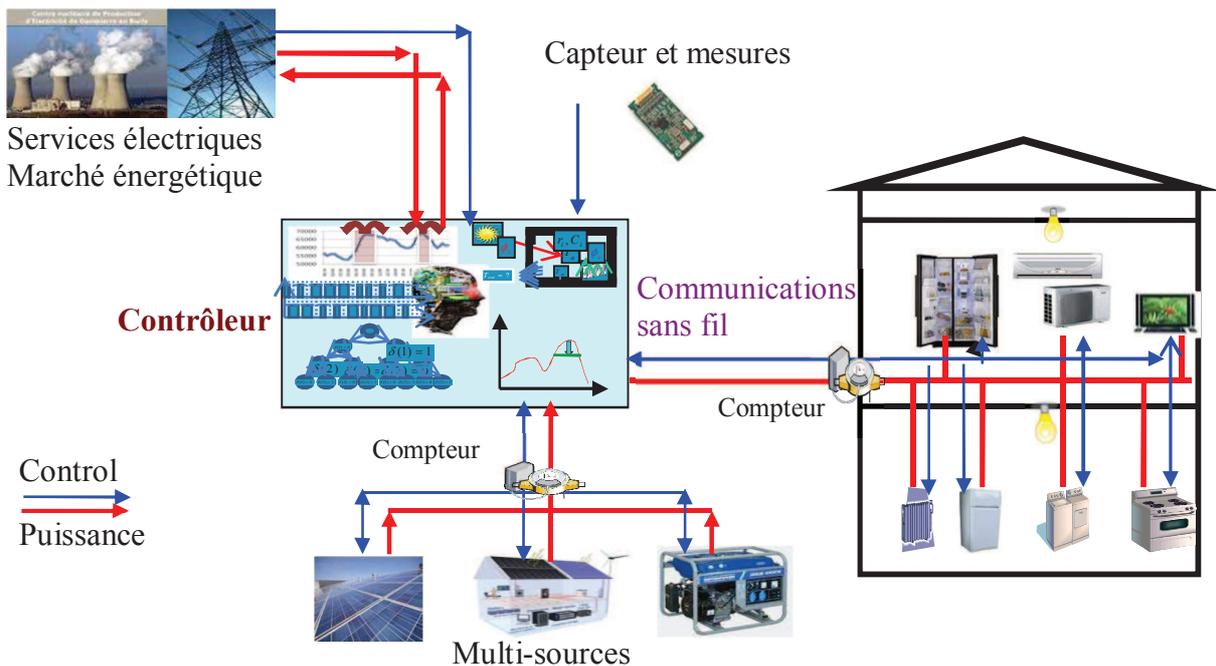


Figure 4-1: Architecture globale du système de gestion énergétique dans les bâtiments

L'application principale du système proposé est la gestion de charge mais il peut être appliqué aussi pour la gestion en temps réel de systèmes multi-sources.

Ce système peut gérer les appareils électriques pilotables ou délestables dans le bâtiment, lesquels requièrent des modes de contrôle différents. Les principaux types de charge et appareils correspondants sont présentés dans le tableau 4-1.

Type d'équipement	Pilotable (direct)	Délestable
Chauffage électrique	Oui	Oui
Chauffe-eau	Oui	Oui
Ventilateur	Oui	Oui
Climatisation	Oui	Oui
Loisirs Hifi	Non	Non
Lave-vaisselle	Non	Oui
Machine à laver	Non	Oui
Réfrigérateur	Non	Non
Four électrique	Oui	Non

Tableau 4-1 : Caractérisation des différents équipements dans un bâtiment

La figure 4-2 présente l'architecture d'un capteur (a) et d'un actionneur (b).

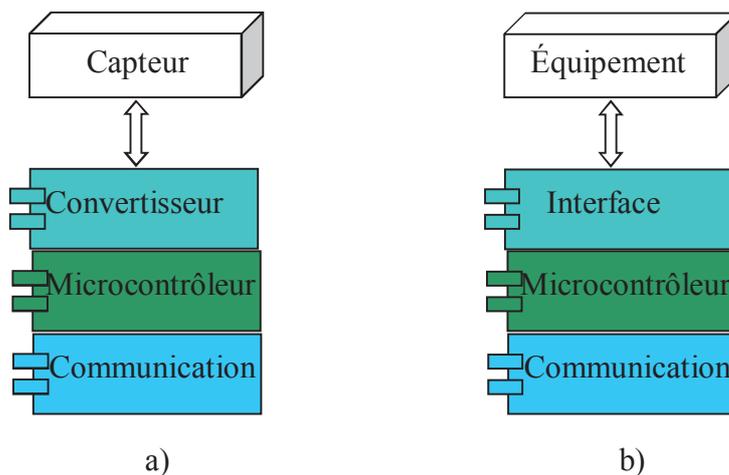


Figure 4-2: Architecture d'un capteur (a) et d'un actionneur (b) du système

Le rôle de chaque module est détaillé ci-dessous :

- Module de communication : Un module communiquant sans fil est intégré dans chaque actionneur ou capteur. Ce module permet de recevoir (actionneur) ou de transmettre (capteur) des informations à traiter. Ce module de conception modulaire est associé à un protocole standardisé permettant l'interchangeabilité et l'évolutivité des composants du système.
- Microcontrôleur : Pour l'actionneur, le microcontrôleur traite les informations reçues pour piloter l'équipement sous le format adapté via le module d'interface. Pour le capteur, le microcontrôleur traite les informations issues des mesures et les envoie vers le module de communication.

- Interface : ce module est utilisé pour les actionneurs. Il reçoit l'ordre envoyé par le microcontrôleur et pilote directement l'équipement.
- Convertisseur : ce module convertit la grandeur à mesurer et la transforme en format digital compatible pour le traitement.

## **4.3 ARCHITECTURE LOGICIELLE DU SYSTEME**

### **4.3.1 DESCRIPTION GENERALE DU SYSTEME**

Actuellement, dans un bâtiment, différents dispositifs de charge ayant des contrôles/commandes individuels coexistent sans coordination de contrôle/commande entre eux. Si toutes ces charges fonctionnent en même temps, cela peut provoquer des dépassements de puissance importants. C'est pourquoi il est nécessaire de développer un système de gestion d'énergie centralisé qui permet de mieux synchroniser et coordonner les différents modes de fonctionnement des charges.

En fonction de l'architecture logicielle le système est plus ou moins intelligent. Dans cette partie nous allons présenter l'architecture logicielle du système permettant de réaliser les différentes tâches qui lui sont assignées. Le diagramme des classes UML (*Unified Modeling Language*) du système de gestion de l'énergie est présenté sur la Figure 4-3 4-3.

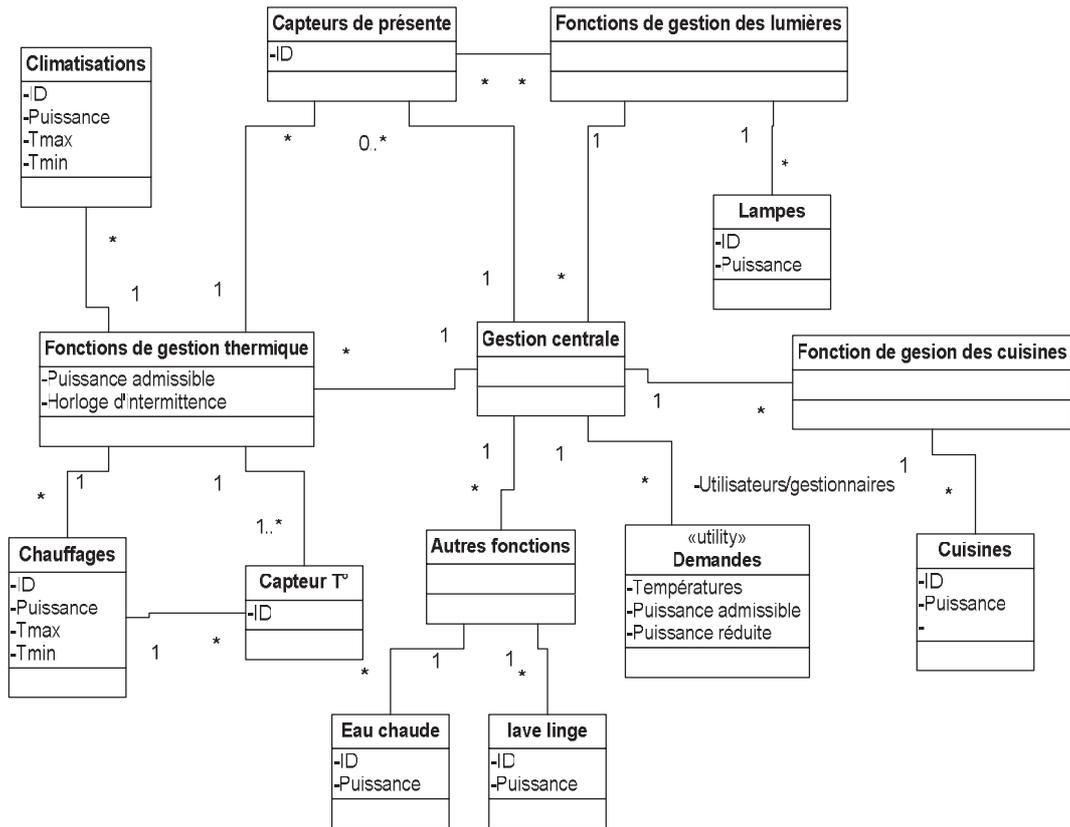


Figure 4-3: Diagramme du système

Dans ce diagramme UML apparaissent les principaux éléments suivants :

- les différentes **fonctions** de gestion énergétique : la gestion thermique, gestion de l'éclairage, gestion des cuisinières et autres équipements (eau chaude, lave-linge, machine à laver, etc)
- les **équipements** à contrôler : chauffages, climatisations, cuisines, etc...
- les **capteurs** : capteur de puissance, capteurs de températures, capteurs de présence, etc
- Les **contraintes** : température (confort), puissance autorisée (puissance souscrite ou puissance imposée par gestionnaire du réseau), énergie...
- l'unité de **gestion centrale** : à partir des informations reçues (à issues des capteurs), cette unité coordonne et optimise les différentes activités (fonctions de gestion) afin de respecter les contraintes fixées.

### 4.3.2 CONCEPTION DU SYSTEME DE COMMUNICATION

Dans un système de gestion énergétique des bâtiments, tous les actionneurs et capteurs ont un module de communication individuel. Dans cette partie, nous présentons l'architecture de communication de l'ensemble du système de gestion.

Les capteurs et les actionneurs sont reliés via un réseau de communication qui doit être conçu pour :

- Faciliter l'installation,
- Avoir plusieurs points de connexion,
- Pouvoir être auto-reconfiguré en cas d'ajout ou de retrait d'un composant.

#### 4.3.2.1 Architecture de communication

Des liaisons de communication sans fil sont établies entre tous les dispositifs du système. Elles sont développées en se basant sur les technologies de communication sans-fil ZigBee. Comme indiqué précédemment, l'avantage le plus important de cette technologie est qu'elle permet de faciliter le déploiement du réseau et rend aisé l'ajout d'autres éléments de communication au système.

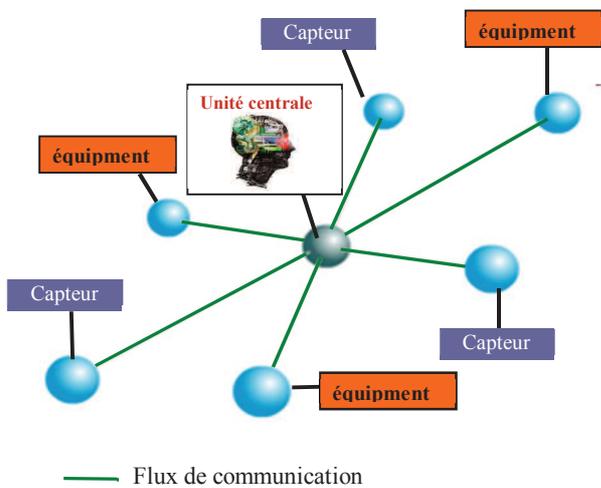


Figure 4-4: Schéma "star topology" de communication du système

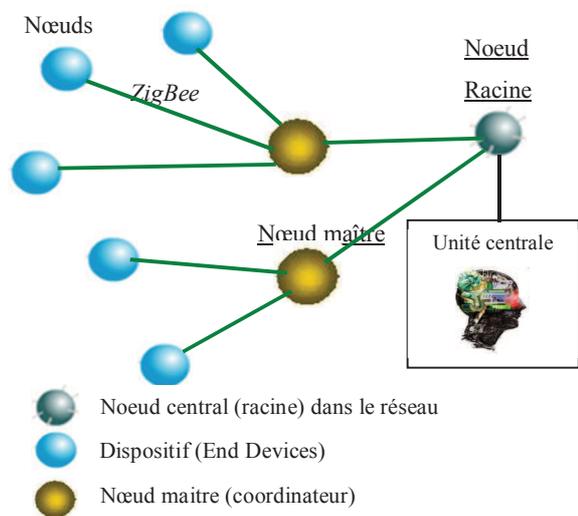


Figure 4-5: Schéma "cluster tree topology" du réseau de capteurs

Pour notre application de gestion de charge, nous avons utilisé deux modèles de communication qui correspondent respectivement à des réseaux utilisant l'architecture "Etoile" (Figure 4-4) et "Cluster-Tree" (Figure 4-5). Les nœuds du réseau sont divisés en

nœud racine, nœud coordinateur (nœud maître) et des nœuds terminaux (équipements ou capteurs).

Le premier modèle de réseau "Etoile" s'adapte bien aux petits bâtiments dans lesquels il n'y a pas beaucoup d'équipements et où la portée du réseau (distance de communication) est limitée. Dans ce modèle (Figure 4-4), il y a seulement un nœud racine et des nœuds terminaux. Le premier se connecte directement à l'unité centrale de contrôle du système de gestion et prend en charge la liaison entre cette unité centrale et les autres nœuds comme par exemple les équipements et les capteurs.

Le deuxième modèle du réseau de communication utilise la topologie "Cluster-Tree" (Figure 4-5), qui permet d'augmenter le nombre de nœuds. Dans ce modèle, à en plus des nœuds présentés précédemment, on ajoute des nœuds maîtres qui interviennent comme des éléments intermédiaires entre le nœud racine et les équipements électriques (ou les capteurs sans fil). Ils ont des capacités de traitement et effectuent des tâches de gestion liées à l'enregistrement de nouveaux nœuds, au routage, au regroupement, au contrôle et à la surveillance. Ils sont quelquefois utilisés comme une unité de contrôle local pour un groupe de nœuds.

**4.3.2.2 Formule des messages**

Nous avons développé des formules de message qui sont spécialement destinées à l'environnement des bâtiments, ou qui seront appliquées pour recueillir les informations concernant la consommation, le capteur de température, et le capteur de présence. Ces messages permettent également de contrôler l'éclairage et différents actionneurs tels que ceux affectés à la climatisation et le chauffage. Les (Figure 4-6) et (Figure 4-7) indiquent les formats de messages pour des tâches typiques de contrôle des bâtiments : surveillance de la température et pilotage des chauffages (climatisations).

<b>Adresse de récepteur</b>	<b>Adresse de transmetteur</b>	<b>Donnée (info de température)</b>	<b>Etats du capteur (signal, alimentation)</b>
<b>4 bits</b>	<b>4 bits</b>	<b>16 bits</b>	<b>8 bits</b>

*Figure 4-6: Format du message à partir d'un capteur de température*

<b>Adresse de récepteur</b>	<b>Adresse de transmetteur</b>	<b>Ordre</b>	<b>Types (mode d'opération)</b>
<b>4 bits</b>	<b>4 bits</b>	<b>8 bits</b>	<b>8 bits</b>

*Figure 4-7: Format du message de contrôle envoyé par l'unité de gestion*

Ces messages, transmis par RF (Radio Frequency), permettent d'identifier chaque équipement dans les bâtiments et sont utilisés pour le transfert des données réelles. Les adresses émises par tous les appareils sont utilisées pour l'identification des émetteurs ou des récepteurs dans le cadre d'une interaction particulière. Elles sont invariables jusqu'au moment où ces équipements sont mis hors service. La génération des adresses est réalisée par un processus d'enregistrement qui génère une adresse 4 bits chaque fois qu'un nouvel appareil participe au réseau.

## **4.4 DEVELOPPEMENT DES STRATEGIES DE GESTION DES CHARGES EN TEMPS REEL**

### **4.4.1 INTRODUCTION**

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre 2, plusieurs méthodes sont applicables à la gestion de la charge dans les bâtiments. L'objectif de cette partie est de déterminer les stratégies de gestion en temps réel des charges électriques comme le chauffage, la climatisation et la cuisinière, ou encore de l'éclairage et autres charges. Il s'agit de méthodes de gestion en temps réel qui s'adaptent aux conditions réelles en tenant compte des aléas apparaissant en pratique (exemple : variations rapides des charges).

Dans cette partie, nous allons aborder la description du système de gestion présenté sur la Figure 4-8 4-8 qui comporte de nouvelles méthodes de gestion en temps réel des charges. Ces méthodes sont intégrées au système comme des fonctions de contrôle. Elles peuvent fonctionner seules pour une charge particulière, ou coopérer pour des charges différentes :

- Fonction de gestion thermique : c'est la méthode de gestion du chauffage et de la climatisation. Nous présentons ici une nouvelle méthode basée sur une régulation adaptative,
- Fonction de gestion des cuisinières : nous proposons une méthode intelligente de délestage en douceur, qui peut être appliquée aux cuisinières, aux chauffe-eau ou encore aux chauffages électriques sans régulation, comme par exemple les convecteurs thermiques,
- Fonction de gestion de l'éclairage : appliquée pour la gestion des foyers lumineux en utilisant des capteurs,
- Autres fonctions qui sont appliquées à d'autres équipements comme par exemple la machine à laver.

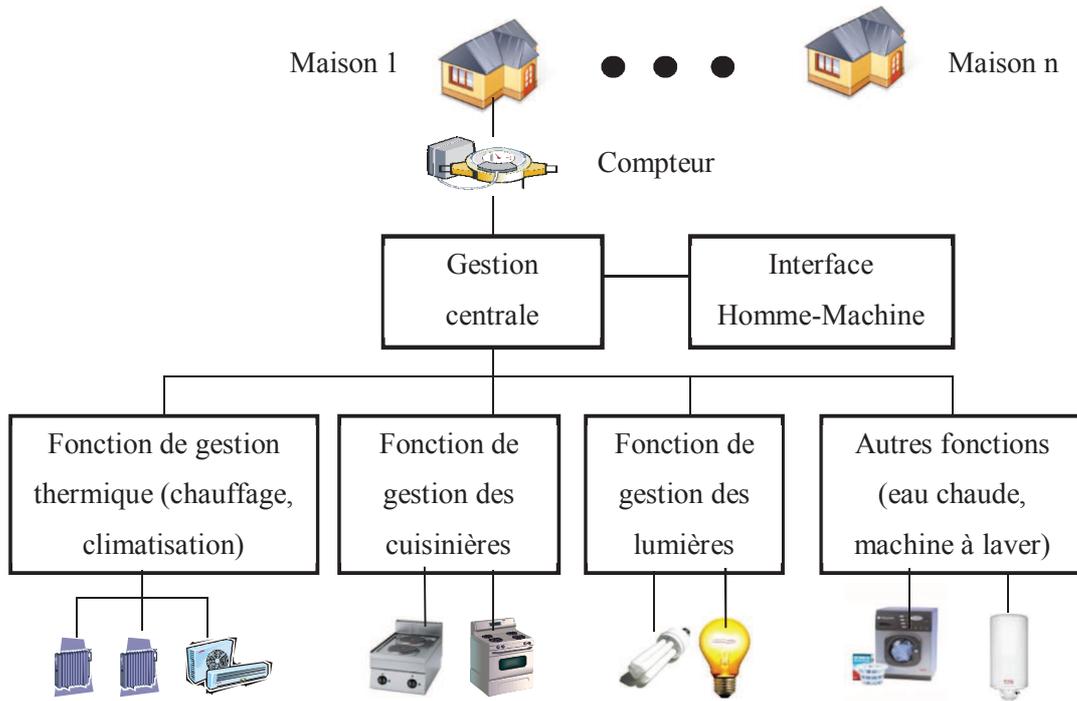


Figure 4-8 : Objectif global du système de gestion des charges

#### 4.4.2 FONCTION DE GESTION EN TEMPS REEL DES RADIATEURS

La méthode proposée peut être appliquée indifféremment pour les dispositifs de chauffages et les climatiseurs. La méthode proposée est décrite pour les dispositifs de chauffages sachant que le fonctionnement de la climatisation est inversé par rapport à celui du chauffage.

##### 4.4.2.1 Analyse du fonctionnement d'un régulateur thermique classique

Les régulateurs actuels agissent de façon à ce qu'une mesure soit égale à une consigne. La Figure 4-9 4-9 présente le modèle d'un régulateur thermique classique (régulateur PID ou TOR) largement utilisé sur le marché:

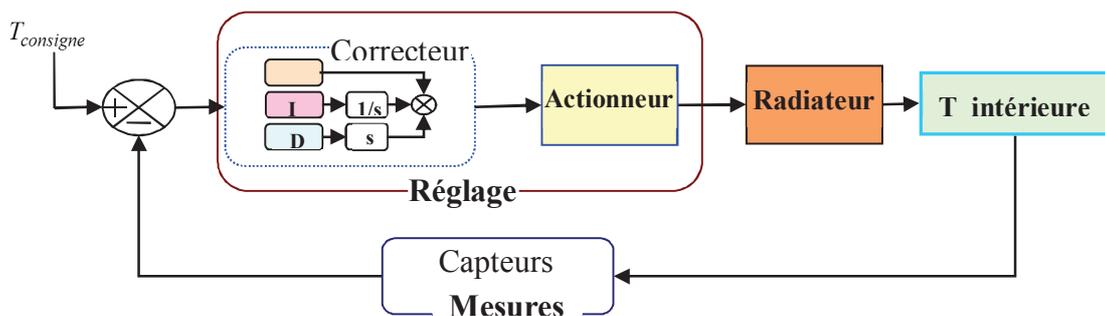


Figure 4-9 : Principe de régulateur des chauffages existant sur le marché (type PID) [70]

À l'origine, les thermostats ont été utilisés pour l'asservissement de la température. Or, avec les thermostats, on observe souvent un dépassement de la température contrôlée, ce qui entraîne une inévitable augmentation de la consommation d'énergie [126].

Afin de résoudre ce problème, le régulateur de type PID (Proportional- Intégrale - Dérivée) a été développé. Ce régulateur est très répandu et il est utilisé aujourd'hui dans la plupart des systèmes de contrôle industriel [127]. Bien qu'il ait amélioré le problème de dépassement de la température, de mauvais choix des gains du régulateur PID peuvent rendre tout le système instable.

Les régulateurs classiques fonctionnent selon le principe suivant de la boucle fermée :

- Mesure de la température intérieure
- Comparaison de la température mesurée avec la valeur de température de consigne
- calcul de la correction en fonction de l'écart de température
- Mise en œuvre de l'action de contrôle du radiateur via un actionneur.

Ce fonctionnement de régulation est présenté sur la Figure 4-10 ci-dessous:

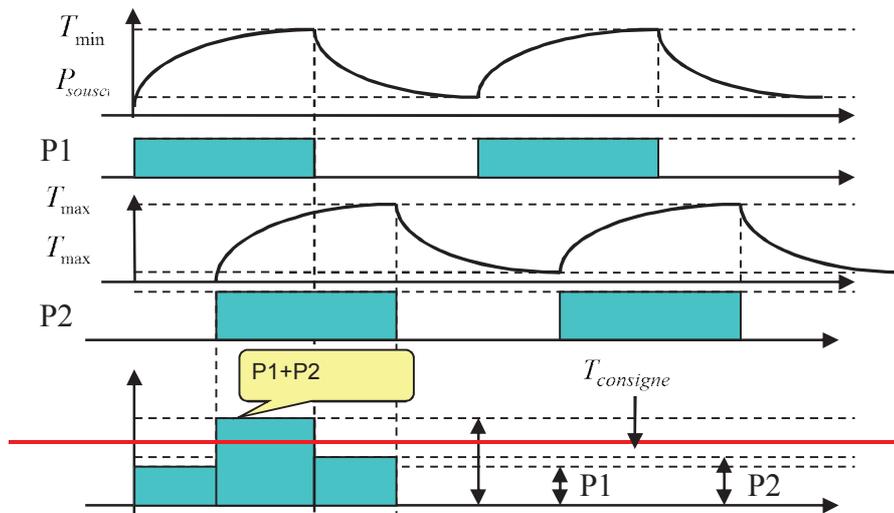


Figure 4-10 : Régulation de température classique avec deux radiateurs

Pour simplifier l'explication, nous considérerons une situation mettant en œuvre uniquement deux radiateurs gérés par des régulateurs en vue d'assurer le confort thermique. La Figure 4-10 montre que le fonctionnement de ces deux radiateurs vise à assurer les objectifs :

$$T_{\min} \leq T_{\text{int}}(i, t) \leq T_{\max}$$

$$T_{\min} = T_{\text{consigne}} - \Delta T$$

$$T_{\max} = T_{\text{consigne}} + \Delta T$$

Où :

$T_{consigne}$  : température de consigne imposée par l'utilisateur

$T_{max}$  : température maximale de la salle/pièce du bâtiment

$T_{min}$  : température minimale de la salle/pièce du bâtiment

$T_{int}(i,t)$  : température intérieure de la pièce  $i$  au moment  $t$ .

En supposant que l'utilisateur ait souscrit un abonnement avec une limitation de la puissance appelée ( $P_{souscrite}$ ), les régulateurs thermiques du marché peuvent provoquer le dépassement de la puissance souscrite:

$$P_{max} = P_1 + P_2 + P_{autres} > P_{souscrite}$$

Où  $P_{autres}$  est la puissance appelée par les dispositifs électriques du bâtiment considéré autres que ceux liés au chauffage.

Or, les systèmes de gestion du confort thermique du marché ne tiennent pas compte de la limite définie par la puissance souscrite. De plus, la température de consigne des régulateurs actuels est configurée manuellement par l'utilisateur et elle ne peut pas être modifiée automatiquement. Ces limitations motivent de nombreuses recherches pour améliorer la régulation thermique, la technologie PID étant orientées vers l'intégration des méthodes disponibles sous la forme d'un logiciel de façon à tirer le meilleur parti du contrôle PID [127].

#### **4.4.2.2 Formulation du problème**

La partie ci-dessus a analysé le fonctionnement des régulateurs actuels et indiqué leurs inconvénients en terme de régulation. Nous proposons dans cette partie une nouvelle méthode de contrôle, dont le but est d'améliorer les régulateurs thermiques. Cette méthode est intégrée dans le premier module de notre système de gestion en temps réel, et peut être indifféremment utilisée pour des radiateurs et des climatiseurs. Elle est applicable à la gestion sur des échelles de temps allant de quelques secondes (temps réel) à quelques heures.

Cette méthode assure le confort thermique des occupants au niveau des locaux du bâtiment tout en respectant les contraintes de puissance maximale autorisée (Puissance souscrite ou puissance fixée par le gestionnaire du réseau). Elle intègre la prise en compte du confort thermique du bâtiment, de la puissance appelée et également du coût de la consommation électrique. Par conséquent, cela permet de réaliser une économie sur le coût de l'abonnement électrique qui est proportionnel à la puissance maximale fixée par le contrat de fourniture. Nous allons analyser son fonctionnement dans les parties suivantes en tenant en compte:

- de coût de la consommation électrique
- de confort thermique
- de la puissance appelée.

#### 4.4.2.2.1 Influence de la puissance souscrite sur la facture énergétique

En France, chaque client particulier établit un contrat avec un fournisseur d'électricité. Le fournisseur à son tour propose des options à ses clients. Ce sont des choix relatifs à la puissance maximum souscrite et aux périodes tarifaires (heures creuses / heures pleines), qui correspondent à des tarifs différents. Ainsi, Electricité de France (EDF) propose différents tarifs avec de nombreuses options et de nombreux seuils de puissances souscrites (Tableau 4-2).

Trois tarifs sont actuellement proposés

- Le tarif bleu de 3 kVA à 36 kVA
- Le tarif jaune de 36 kVA à 250 kVA
- Le tarif vert au-delà de 250 kVA.

Nous nous intéressons au tarif bleu appliqué aux clients domestiques et agricoles. Ce tarif comporte deux éléments de tarification : le prix fixe basé sur un abonnement annuel qui est fonction de la puissance souscrite et sur le prix du kWh consommés.

Puissance souscrite (kVA)	Réglage de disjoncteur (A)	Abonnement annuel TTC (euros)	Prix du kWh TTC (euros)
3	15	66,82	0,1078
6	30	77,08	0,1081
9	45	96,78	0,1125
12	60	168,13	0,1125
15	75	204,76	0,1125
18	90	241,40	0,1125
24	40	412,66	0,1125
30	50	560,19	0,1125
36	60	707,71	0,1125

Tableau 4-2 : Les tarifs électriques d'EDF- les prix en Métropole (au 15/08/2009)

Sur ce tableau, on voit que la modification de la puissance souscrite amène un changement du prix d'abonnement annuel. Le montant de l'abonnement est grossièrement proportionnel à la puissance souscrite par contre le prix du kWh est pratiquement indépendant de la puissance souscrite. Dans le contexte de dérégulation, le prix du kWh peut être changé

selon l'heure de la journée selon l'option "Heure Pleines / Heures Creuses" ou avec le tarif dynamique.

Sur la base des tarifs proposés, la formulation du coût de l'électricité consommée peut être représentée par l'équation suivante:

$$Coût = \sum_{t=0}^T (P_t \cdot a_t + Abon) \Delta t \quad (1)$$

Où:

- $P_t$  : puissance active au moment t (kW),
- $a_t$  : prix électrique au moment t (Euro/kWh). Il varie en fonction de la puissance souscrite et dépend de l'heure de la journée.

$$a_t = g(P_{souscrite}, t)$$

Où : -  $P_{souscrite}$  est la puissance souscrite

-  $g$  est une fonction discrète et non linéaire, qui est déterminée par le fournisseur (Tableau 4-2)

- $T$  : durée de la période de calcul (h)
- $\Delta t$  : échelle de temps de calcul (h)
- $Abon$ : prix de l'abonnement annuel (Euro/h). Il varie en raison directe de la puissance souscrite :

$$Abon = h(P_{souscrite})$$

$h$  est une fonction discrète définie par le fournisseur, qui représente le prix d'abonnement correspondant à  $P_{souscrite}$

$$Abon = \frac{\text{prix abonnement annuel}}{365 \times 24} \text{ (euro/h)}$$

Par exemple, avec la puissance souscrite 12 kVA sur le (Tableau 4-2)

$$Abon = \frac{168.13}{365 \times 24} = 0.0192 \text{ (euro/h)}$$

L'équation (1) peut être représentée comme :

$$Coût = \sum_{t=0}^T (P_t \cdot g(P_{souscrite}, t) + h(P_{souscrite})) \Delta t \quad (2)$$

Puisque les deux fonctions  $h(P_{souscrite})$  et  $g(P_{souscrite}, t)$  sont variées en fonction de la  $P_{souscrite}$ , le coût électrique varie en fonction de la puissance souscrite. Pour conclure, il est

évident qu'en diminuant  $P_{souscrite}$ , le montant de la facture énergétique payée par le client sera diminué.

#### 4.4.2.2.2 *Modèle thermique d'un bâtiment*

Un modèle thermique de radiateur ou de climatisation d'une salle dépend de plusieurs paramètres, comme la température, le rayonnement solaire, la taille de la salle, etc. En général, le comportement thermique d'une salle de bâtiment peut être représenté en utilisant le modèle de N.Mendes [68]:

$$p.c.V \frac{dT_k^{int}}{dt} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{R_k^{eq}} [T_i^{ext}(t) - T_k^{int}(t)] + Q_k(dt) + q_1 + \dots \quad (3)$$

Où:

- $p$ : densité de l'air (kg/m<sup>3</sup>)
- $c$ : chaleur spécifique de l'air (J/kg·K)
- $V_k$ : volume de la salle k (m<sup>3</sup>)
- $Q_k(dt)$ : flux thermique produit par le radiateur k (ou la climatisation) pendant l'intervalle de temps  $dt$  (W)
- $R_k^{eq}$ : résistance thermique équivalente de la salle k,
- $T_i^{ext}(t)$ : température extérieure du mur  $i$  au moment  $t$ , (température extérieure ou température de la salle voisine, selon la position du mur  $i$ )
- $m$ : nombre de murs de la salle
- $T_i^{int}(t)$ : température intérieure de la salle au moment  $t$ ,
- $q_1, q_2, \dots$ : chaleur produite par les équipements ou les personnes qui sont dans la salle (apport gratuit)

Dans cette étude, nous nous intéressons plutôt au confort thermique qui est caractérisé par la température intérieure de la salle, en considérant que les autres paramètres physiques ( $\rho, c, V, R^{eq}$ ) sont constants. Un autre paramètre qui peut être considéré dans notre système est la température d'ambiance extérieure, caractérisée par une vitesse de variation plutôt plus lente que celle de la température intérieure.

On s'aperçoit que les régulateurs thermiques cherchent à régler la température autour d'une température de consigne désirée  $T_{consigne}$ . Cependant, la variation de la température

intérieure est limitée entre  $T_{\max}$  (température maximum) et  $T_{\min}$  (température minimum) qui en pratique sont imposées par la norme de confort ISO 7730 [128]. La valeur de  $T^{\text{int}}$  est donc entre  $T_{\max}$  et  $T_{\min}$  ( $T_{\min} \leq T^{\text{int}} \leq T_{\max}$ ). Normalement, la valeur de température intérieure moyenne  $T_{\text{moyenne}}^{\text{int}}$  est :

$$T_{\text{moyenne}}^{\text{int}} = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (4)$$

Pour calculer l'énergie consommée sur une longue durée, nous nous intéressons à la valeur de la température intérieure moyenne  $T_{\text{moyenne}}^{\text{int}}$ .

Tout d'abord, en hiver, nous nous intéressons à un système de chauffage. La température extérieure  $T^{\text{ext}}$  est toujours plus faible à la valeur intérieure  $T^{\text{int}}$  ( $T^{\text{ext}} \leq T^{\text{int}}$ ). D'après l'équation (3), on voit que plus la différence entre  $T^{\text{ext}}$  et  $T^{\text{int}}$  est élevée, plus d'énergie consommée sera importante. Donc, pendant une longue durée, si l'on diminue la température moyenne interne ( $T_{\text{moyenne}}^{\text{int}}$ ), <la différence entre  $T^{\text{ext}}$  et  $T_{\text{moyenne}}^{\text{int}}$  est moins élevée et par conséquent, la consommation énergétique est diminuée>. Par ailleurs, dans l'équation (4), la valeur de  $T_{\text{moyenne}}^{\text{int}}$  est proportionnelle à la température maximale  $T_{\max}$ . Donc, la reconfiguration de  $T_{\max}$  permet de changer  $T_{\text{moyenne}}^{\text{int}}$  et par conséquent de changer l'énergie consommée.

Pour conclure, pendant l'hiver, si on maintient  $T_{\min}$  et si on diminue  $T_{\max}$ , le confort thermique étant assuré, la consommation énergétique peut être diminuée.

Ensuite, pour l'été, nous nous intéressons aux systèmes de climatisation. La température intérieure  $T^{\text{int}}$  doit toujours être maintenue inférieure à  $T^{\text{ext}}$  ( $T^{\text{int}} \leq T^{\text{ext}}$ ). La différence entre  $T^{\text{ext}}$  et  $T^{\text{int}}$  est inversement proportionnelle à  $T^{\text{int}}$ . Cela veut dire que si l'on augmente  $T_{\text{moyenne}}^{\text{int}}$ , on consomme moins d'énergie. Avec l'équation (4) nous pouvons considérer aussi que, pendant l'été, en maintenant  $T_{\max}$  et en augmentant  $T_{\min}$ , le confort thermique étant assuré, la consommation énergétique peut être diminuée.

#### 4.4.2.2.3 Puissance appelée

Nous nous intéressons à la valeur de puissance appelée:

$$P(t) = \sum_i P_i(t) + P_s \quad (5)$$

Où:

- $P_s(t)$  : puissance appelée par les autres équipements électriques au moment  $t$ ,
- $P_i(t)$  : puissance du radiateur  $i$  au moment  $t$

$$P_i(t) = P_i \times u_{i,t} \quad \text{avec } P_i \text{ la puissance du radiateur } i$$

- $u_{i,t}$  : état de fonctionnement (0 ou 1) du radiateur  $i$  au moment  $t$

$u_{i,t} = 0$  : radiateur est à l'arrêt,

$u_{i,t} = 1$  : radiateur est en marche,

L'état de fonctionnement de chaque radiateur dépend de la température de la salle où il est installé et des températures de consignes  $T_{\max}, T_{\min}$ . Il peut être présenté comme une fonction  $f$  de la température suivante :

$$u_{i,t} = f(T^{\text{int}}(i,t), t) = \begin{cases} 1 & \text{Lors que } T^{\text{int}}(i,t) \leq T_{\min} \\ 0 & \text{Lors que } T^{\text{int}}(i,t) \geq T_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

L'équation (5) est représentée comme :

$$P(t) = \sum_i P_i \times f(T^{\text{int}}(i,t), t) + P_s(t) \quad (7)$$

Si l'on considère que  $T^{\text{int}} = T_{\max} - \Delta T$  avec  $\Delta T$  la différence entre  $T_{\max}$  et  $T^{\text{int}}$ , l'équation (5) devient alors :

$$P(t) = \sum_i P_i \times f(T_{\max} - \Delta T(i,t), t) + P_s(t) \quad (8)$$

Sur l'équation (8), nous voyons que la puissance appelée par le chauffage peut être considérée comme une fonction de la température maximale  $T_{\max}$  et de l'écart  $\Delta T$ .

### **4.4.2.3 Méthode proposée**

#### **4.4.2.3.1 Introduction**

Les analyses de la partie précédente ont montré que :

- le coût de la facture électrique varie proportionnellement à la puissance souscrite  $P_{\text{souscrite}}$ ,
- la puissance appelée varie en fonction de la température maximale  $T_{\max}$ .
- En hiver, l'énergie consommée est proportionnelle à  $T_{\max}$ ,

Une stratégie de réglage intelligente de la valeur de température de consigne  $T_{\max}$  en hiver (ou  $T_{\min}$  en été) permet d'économiser l'énergie consommée, de diminuer la puissance

souscrite et par conséquent contribue à réduire la facture électrique. Donc, si l'on considère que la température maximale est une variable, nous en déduisons les points suivants :

- pendant l'hiver, la diminution de  $T_{\max}$ , en maintenant  $T_{\min}$ , permet d'assurer le confort thermique et la consommation énergétique peut être diminuée.
- en diminuant  $P_{\text{souscrite}}$ , la facture électrique sera elle aussi diminuée.

A cette fin, nous proposons un régulateur adaptatif qui permet de reconfigurer automatiquement la température de consigne. Ce régulateur utilise une nouvelle méthode de gestion intelligente, qui détermine en temps réel la température de consigne  $T_{\max}$  à réguler. La méthode développée a pour objectif de :

- garantir le confort thermique dans le bâtiment,
- diminuer les pics de consommation à un niveau prédéfini,
- économiser l'énergie consommée,
- réduire la facture d'électricité.

Ce régulateur adaptatif peut aussi répondre à des demandes émises par des signaux extérieurs, grâce à une régulation automatique, performance intéressante dans le contexte de la gestion électrique. Afin d'atteindre ces objectifs, nous allons développer un système capable de s'adapter en temps réel en fonction des signaux tarifaires, des signaux envoyés par les gestionnaires du réseau et du comportement réel des charges et des occupants.

#### **4.4.2.3.2 Formulation mathématique**

Dans le but de diminuer la puissance souscrite jusqu'à la valeur  $P_{\text{souscrite}}$  prédéfinie, notre méthode consiste à modifier/ faire varier la température de consigne maximum  $T_{\max}$  de manière intelligente pour que la puissance appelée d'ensemble de la maison ne dépasse pas la valeur  $P_{\text{souscrite}}$ . Il s'agit de modifier non seulement la température maximale d'une pièce au moment donné  $t$ , mais également celle des autres pièces de la maison ( $T_{\max}(i, t)$ ).

La méthode appliquée prend en compte à la fois la contrainte de puissance autorisée et le confort thermique des utilisateurs. Ces contraintes sont représentées par les équations suivantes :

- la contrainte de puissance appelée :  $P(t) \leq P_{\text{souscrite}} \forall t$ , où  $P(t)$  est la puissance active appelée du bâtiment au moment  $t$  (W)
- la contrainte du confort thermique de l'utilisateur:

$$T_{\min}(i) \leq T_{\text{int}}(i, t) \leq T_{\max}(i, t) \forall i, t$$

$T_{\max}(i, t), T_{\min}(i), T^{\text{int}}(i, t)$  sont respectivement les températures de consignes maximale et minimale et la température intérieure de la salle/pièce  $i$ , au moment  $t$ .

Les températures de consigne maximum  $T_{\max}(i, t)$  sont considérées comme des variables à déterminer dans notre système. Elles sont calculées et mises à jour instantanément à l'instant correspondant au changement de la puissance appelée en fonction de la température intérieure des pièces. La variation de la température consigne maximale  $T_{\max}(i, t)$  peut être représentée par une fonction  $\varphi$  de  $\Delta P$  et  $\Delta T$  :

$$T_{\max}(i, t) = \varphi(\Delta P, \Delta T(i, t)) \quad (9)$$

Où :

- $\Delta P(t)$  est l'écart entre la puissance appelée actuelle et la puissance souscrite :

$$\Delta P(t) = P_{\max} - P(t)$$

- $\Delta T(i, t)$  est l'écart de la température de salle  $i$ , au moment  $t$  :

$$\Delta T(i, t) = T^{\text{int}}(i, t) - T_{\min}(i)$$

Notre objectif est alors reformulé comme un objectif d'optimisation afin de déterminer :

$$T_{\max}(i, t) = \varphi(\Delta P, \Delta T(i, t))$$

En respectant les contraintes:

$$T_{\min}(i) = \text{const}$$

$$T_{\min}(i) \leq T^{\text{int}}(i, t) \leq T_{\max}(i, t) \forall i, t$$

$$P(t) \leq P_{\text{souscrite}} \forall t \text{ avec } P(t) = \sum_i P_i \times f(T_{\max} - \Delta T(i, t), t) + P_s(t)$$

Cet objectif peut être résolu de manière mathématique avec des méthodes de recherche d'optimum. Cependant, cette direction implique de construire un modèle thermique de la maison et des radiateurs. Outre la complexité d'une telle modélisation, elle comporte d'inévitables incertitudes. C'est pourquoi, plutôt que d'utiliser de tels modèles, nous utilisons un réseau de capteurs pour mesurer toutes les grandeurs nécessaires, qui permettent de déterminer les valeurs  $T_{\max}(i, t)$ . Les parties suivantes vont présenter le fonctionnement du régulateur adaptatif et expliquer l'algorithme utilisé pour déterminer  $T_{\max}(i, t)$ .

#### **4.4.2.4 Fonctionnement de la régulation adaptative proposée**

Notre système de régulation a deux modes de fonctionnement qui correspondent au seuil de dépassement de la puissance appelée. Par la mesure de la puissance consommée en

temps réel, on peut détecter la possibilité de dépasser la puissance souscrite autorisée. S'il n'y a pas de dépassement de la puissance souscrite, les radiateurs de chaque pièce fonctionnent normalement avec leur propre régulateur classique pour assurer le confort thermique dans la zone de température  $[T_{\min}, T_{\max}]$  prédéfinie. Ces régulateurs opèrent selon le principe de boucle fermée qui est expliqué dans la partie 4.4.2.1 de ce chapitre.

Par contre, lorsque le dépassement de la puissance souscrite est détecté, le régulateur central du système bascule en mode de fonctionnement intelligent (adaptatif) où  $T_{\max}$  devient variable. Au niveau local de chaque radiateur particulier, le régulateur fonctionne toujours selon le principe classique de la boucle fermée, sauf que sa température de consigne sera modifiée dans chaque boucle de contrôle par l'unité de régulation centrale. Nous nous intéressons maintenant au régulateur central en mode adaptatif qui modifie automatiquement les températures de consigne de chaque radiateur.

Pour simplifier cette explication, nous supposons que l'installation comporte deux radiateurs. La Figure 4-11 explique le fonctionnement du régulateur proposé utilisant la méthode de contrôle adaptatif.

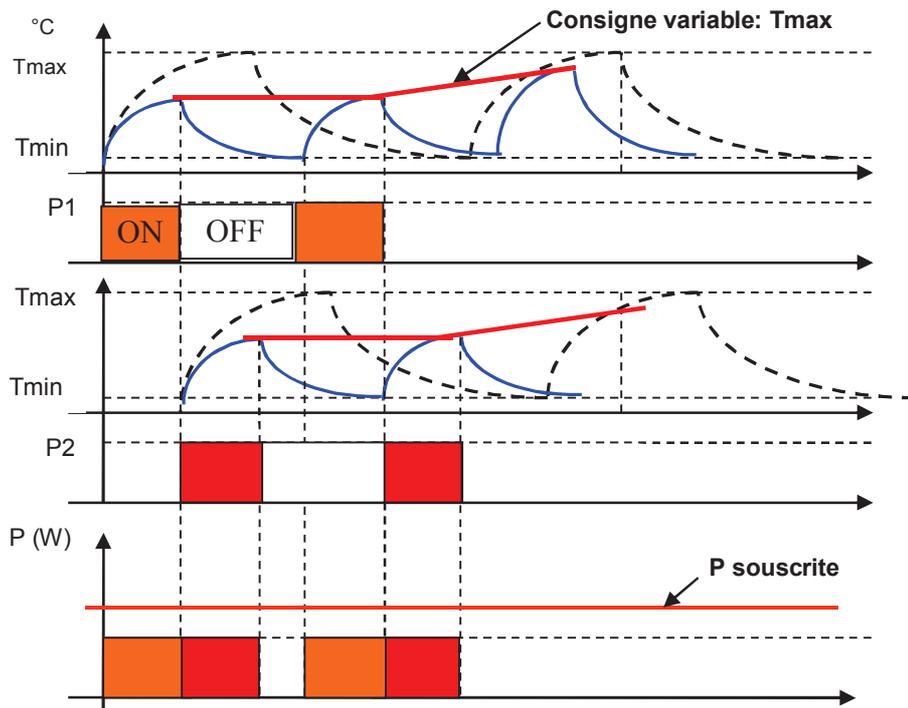


Figure 4-11 : Exemple de fonctionnement du régulateur adaptatif proposé avec deux radiateurs

L'idée principale s'appuie sur l'adaptation de la température de consigne de régulateur local. Sur la Figure 4-11, la température intérieure de chaque pièce est maintenue supérieure à  $T_{\min}$  et la puissance totale ne dépasse plus la puissance souscrite. L'opération (on-off) des

radiateurs peut être traduite par rapport à la variation des consignes de températures maximales  $T_{\max}$  comme suit :

- le radiateur de la pièce  $i$  est mis à l'arrêt si la température intérieure actuelle de cette salle,  $T_{\text{int}}(i, t)$ , est supérieure à la valeur de consigne maximale  $T_{\max}(i, t)$ . Par conséquent, quand le radiateur est en marche (on ou état de marche=1), son action d'arrêt peut être réalisée par la mise à jour de  $T_{\max}(i, t)$  à la valeur effective de la température intérieure  $T_{\text{int}}(i, t)$ . En pratique, au lieu d'envoyer la nouvelle consigne de température, nous proposons envoyer un ordre d'arrêt (off ou état de marche=0) à ce radiateur
- le radiateur se met en marche si  $T_{\text{int}}(i, t)$  descend à la valeur limite  $T_{\min}$ .

En mode adaptatif, le régulateur central change les  $T_{\max}$  de chaque régulateur local en fonction de l'écart entre la puissance appelée et la puissance autorisée ( $P_{\text{souscrite}}$ ) selon le principe de la boucle fermée suivante:

1. mesure de la puissance appelée totale de la maison et des températures intérieures relatives à chaque pièce,
2. comparaison de ces valeurs de températures pour déterminer l'ordre de priorité de chaque radiateur,
3. comparaison de la valeur de puissance mesurée à la puissance souscrite,
4. à partir de l'ordre de priorité et du dépassement de puissance, détermination des radiateurs mis en marche (on) ou mis en arrêt (off)
5. envoi des ordres à chaque radiateur.

Cet algorithme de contrôle sera expliqué en détail dans le chapitre 5 et les résultats expérimentaux de cette méthode seront présentés dans le chapitre 5.

#### **4.4.3 FONCTION DE GESTION EN TEMPS REEL DES CUISINIÈRES**

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'utilisation des cuisinières est généralement liée aux facteurs sociaux et à l'habitude de vie de l'utilisateur. C'est la raison pour laquelle dans la plupart des systèmes de gestion des charges, la cuisinière est considérée comme une charge non contrôlable. Dans ce cas, le fonctionnement de la cuisinière est régulé selon des marches/arrêts pilotés localement par son thermostat afin de maintenir la température de la

plaque ou du four autour de la valeur choisie par la position du bouton de réglage. Par ailleurs, il existe quelques systèmes de gestion de charge qui pilotent les cuisinières selon la méthode de délestage, celles-ci étant arrêtées de façon instantanée en fonction du seuil de dépassement de puissance consommée.

Afin de surmonter ces limitations, nous avons développé une nouvelle méthode, qui permet de contrôler les cuisinières de manière plus optimale au niveau du système de gestion global. Cette méthode est capable de gérer des cuisinières de manière automatique sans besoin d'intervention manuelle avec le bouton de réglage de la cuisine. Nous présentons cette méthode dans la partie suivante, laquelle est applicable aux les cuisinières électriques, et également aux chauffe-eau, aux radiateurs électriques sans régulation ou à ceux non dotés de fil pilote comme par exemple les convecteurs dont la régulation est assurée par un thermostat à bilame métallique.

Nous allons considérer la gestion en temps réel appliquée aux cuisinières, les autres applications possibles (chauffe-eau, radiateurs électriques sans régulation) étant similaires.

#### **4.4.3.1 Principe de la méthode**

##### **4.4.3.1.1 *Objectif de la méthode***

Nous avons développé une méthode qui a pour objectif de :

- délester l'appareil afin de diminuer la puissance appelée à un niveau désiré lorsqu'il y a un dépassement de la puissance admissible
- d'économiser l'énergie consommée
- de maintenir la puissance moyenne totale des appareils à la valeur la plus grande possible (exemple : égale à la puissance souscrite du contrat) pour assurer le meilleur confort possible.

##### **4.4.3.1.2 *Principe de la méthode***

Par hypothèse, la puissance maximale de consommation autorisée est une valeur moyenne pour une période de référence donnée. Cette période de référence est soit de quelques minutes pour des fournitures utilisant les compteurs classiques ou de quelques secondes pour celles utilisant des compteurs plus modernes. Par conséquent, si on divise chaque période de référence en quelques intervalles de temps (« le cycle de contrôle »), l'appareil peut être mis en marche pendant certains intervalles et on peut diminuer la valeur moyenne de la puissance appelée à l'énergie consommée constante.

L'idée de cette méthode est basée sur un délestage adaptatif. Au lieu d'arrêter l'opération d'une cuisinière lorsqu'il y a dépassement de consommation, l'alimentation de la cuisinière est discontinuée.

Pour l'explication, nous utiliserons le coefficient de fonctionnement  $\alpha$  de l'appareil. Ce coefficient  $\alpha$  est le rapport cyclique entre la durée de fonctionnement  $\Delta t$  d'une cuisinière et un intervalle de temps  $T$  (voir la Figure 4-12).

Le rapport cyclique est défini comme:  $\alpha = \frac{\Delta t}{T}$ .

Avec

- $\Delta t$ : Durée du fonctionnement d'une cuisinière pendant un cycle
- $T$ : intervalle de temps, ou période d'un cycle de contrôle

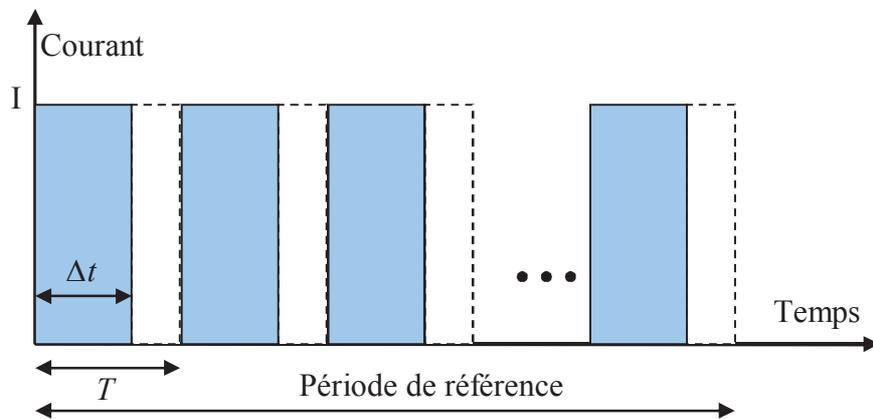


Figure 4-12: Principe de la méthode

La puissance moyenne ( $P^{moy}$ ) peut être définie comme :

$$P^{moy} = \frac{W}{T} \quad (10)$$

$$W = P^{norminale} \times \Delta t = P^{moy} \times T \quad (11)$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta t}{T} = \frac{P^{moy}}{P^{norminale}} = \frac{P^{norminale} - \Delta P}{P^{norminale}} < 1 \quad (12)$$

Où

- $P^{moy}$  : Puissance moyenne totale des cuisinières
- $P^{norminale}$  : Puissance totale nominale des cuisinières
- $W$  : énergie consommée pendant une période  $T$
- $\Delta P$  : Réduction de puissance

D'après les équations (11) et (12) nous voyons qu'en modifiant la valeur de  $\Delta t$ , on peut gérer la puissance moyenne appelée par les cuisinières et l'énergie consommée. Autrement dit, s'il est nécessaire de réduire la puissance appelée, nous pouvons agir en fonction du niveau de réduction  $\Delta P$  demandé.

Actuellement, les compteurs électriques ou les capteurs de puissance sans-fil peuvent mesurer en temps réel la puissance moyenne appelée pendant un intervalle de temps de l'ordre de la seconde. Nous avons développé une application de gestion sans fil, qui permet de contrôler  $\Delta t$  dans les intervalles de temps de quelques millisecondes (ms) pour s'adapter à tous les modèles de compteur électrique. Cette application permet de diminuer la puissance appelée en fonction de la puissance de dépassement mesurée par un capteur de puissance. Cette méthode sera présentée dans le chapitre 6 avec les résultats expérimentaux correspondants.

#### 4.4.3.2 Résultats

Pour valider la méthode, nous avons développé un module de contrôle et testé pour une cuisinière.

- Cas sans gestion

En l'absence de gestion, le fonctionnement d'une cuisinière électrique de 850 W est présenté sur la Figure 4-13. Nous voyons que la puissance appelée est toujours égale à la puissance nominale de la cuisinière ( $P^{\text{appelée}} = P^{\text{nominale}} = 850\text{W}$ ).

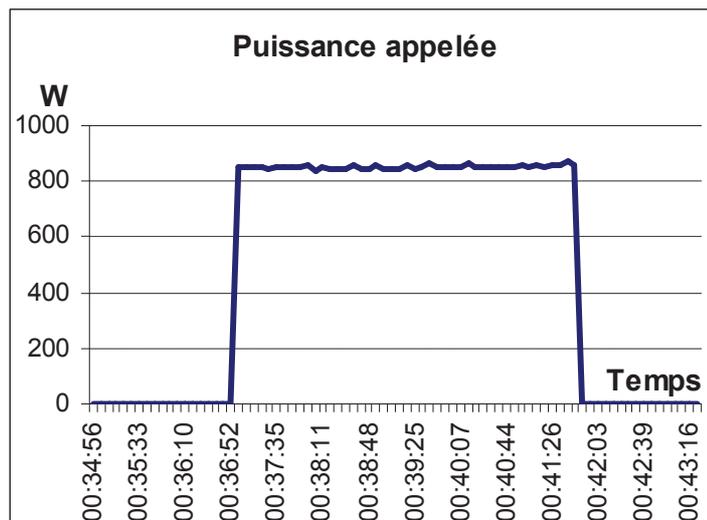


Figure 4-13 : Puissance consommée d'une cuisinière en l'absence de gestion

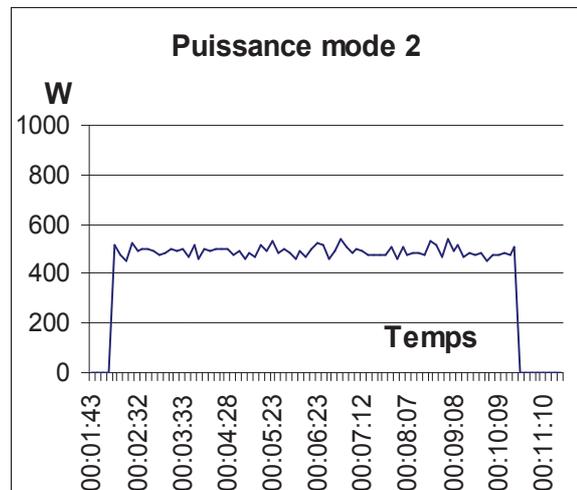
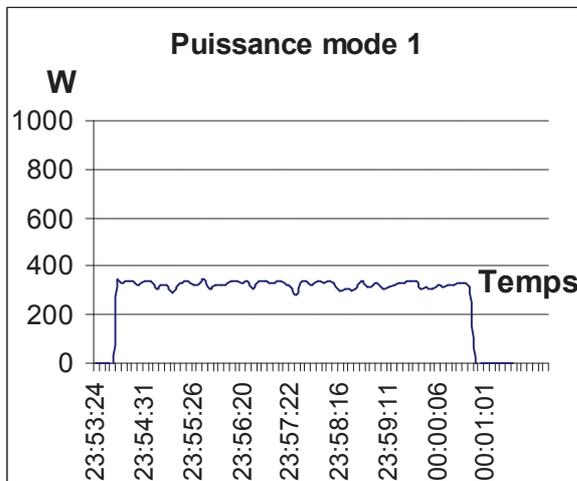
- Cas avec gestion

Afin de montrer la capacité à réduire la puissance appelée des cuisinières de manière automatique, nous avons développé un module de gestion basé sur la méthode proposée. Une cuisinière est alors gérée en fonction du niveau de réduction de puissance demandé. Ce module a différents modes de contrôle. Ces modes correspondent aux différentes demandes de réduction de puissance appelée.

Mode	1	2	3	4	5	6
$P^{\text{mesurée}}$ (W)	325,7	489,5	613,6	693,7	762	<b>851,7</b> (P nominale)
$P^{\text{mesurée}}/P^{\text{nominale}}$ (%)	38	57	72	81	90	100
Réduction de puissance (%)	62	43	28	19	10	0

Tableau 4-3 : Modes de contrôle des cuisinières

La Figure 4-14 ci-dessous présente la puissance consommée d'une cuisinière en considérant différents niveaux de réduction de la puissance appelée : (La précision des valeurs est le résultat des calculs, elle est évidemment supérieure à la précision de compteur)



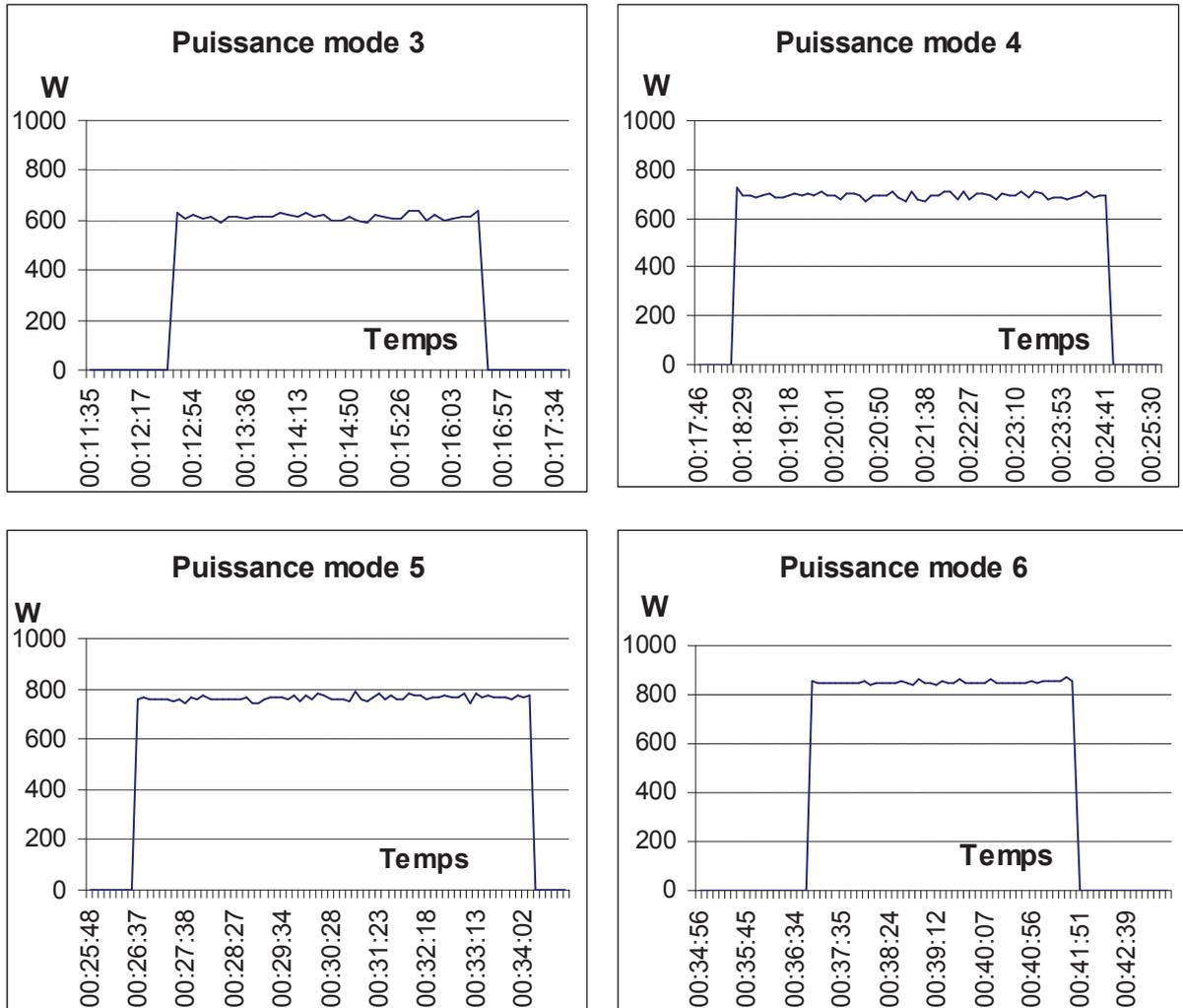


Figure 4-14 : Les puissances consommées d'une cuisinière pour différents modes de contrôle de gestion

Sur cette figure, nous pouvons observer que la puissance appelée est diminuée en fonction de la demande de réduction, et que la cuisinière est encore alimentée afin de maintenir le niveau de thermique requis.

**Les avantages de cette méthode** : Cette méthode présente des avantages très intéressants:

- Permettre d'intégrer les cuisinières dans le système de gestion globale d'un bâtiment,
- Contrôler les cuisinières de manière automatique sans avoir besoin de changer la valeur déterminée par la position du bouton de réglage,
- Diminuer la puissance appelée

- Maintenir la meilleure performance : En utilisant cette méthode, les cuisinières (ou bien les radiateurs, chauffe-eau) ..., ne sont pas arrêtées totalement. Le niveau de performance est encore assuré à un niveau acceptable.

#### **4.4.4 CONCLUSIONS**

Dans ce chapitre, nous avons abordé la conception d'un système de gestion en temps réel et des nouvelles méthodes de gestion de la charge domestique.

Deux nouvelles méthodes de gestion de charge en temps réel (parties 4.4.2 et 4.4.3) ont été mises au point et présentées, l'une pour le chauffage et l'autre pour les cuisinières. Les méthodes proposées présentent des avantages importants par rapport aux méthodes classiques (fonctionnement automatique avec respect du confort, meilleure gestion des pics de puissance). Elles permettent de gérer les charges sans effectuer de délestage violent comme c'est le cas des méthodes classiques. Elles agissent en temps réel et requièrent un temps de calcul très faible, performance qui les rendent exploitables dans les applications utilisant des capteurs. Les méthodes proposées ont pris en compte le comportement réel des charges et aussi les aléas en utilisant un réseau de capteurs et un compteur électrique sans fil.

Ces méthodes dégagent des intérêts significatifs pour les clients, car elles permettent de réduire le coût d'abonnement ou réduire la facture globale de consommation d'énergie électrique.

La conception du système de gestion et les méthodes proposées peuvent être utilisées par le gestionnaire du réseau afin de faire participer les clients aux services du réseau électrique. Par exemple, en utilisant ce système de gestion intelligente de charge (« délestage en douceur ») on peut influencer le réglage de la tension, gérer des congestions, prévenir des blackouts ou améliorer la stabilité du réseau.

Un tel système exploitant la flexibilité du réseau sans-fil ZigBee peut être utilisé efficacement pour des systèmes de gestion énergétique dans les secteurs résidentiel (maison individuelle) et tertiaire (Hôtel, centre de commerce...), ou bien pour un groupe de charges relatives à plusieurs bâtiments.

## **Chapitre 5**

# **Application à la gestion en temps réel de charges chauffage**

---

Ce chapitre concerne le développement d'un système prototype de gestion des charges de chauffage en temps réel. Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, les systèmes de chauffage et notamment les radiateurs ont une contribution importante à la consommation globale pendant l'hiver. Pour cette raison, nous examinons d'abord le cas du chauffage, celui des cuisinières sera l'objet du chapitre 6.

Nous présentons dans ce chapitre la conception du système de gestion avec son architecture de contrôle en y intégrant un module pour les dispositifs thermiques (radiateurs et climatiseurs). Ce système utilise une méthode de gestion novatrice utilisant des capteurs destinés à la gestion en temps réel. La mise au point et le test du système prototype avec cette nouvelle méthode de gestion ont été effectués dans un appartement réel. Les résultats expérimentaux ainsi obtenus ont permis de valider la méthode de contrôle proposée.

## **5.1 INTRODUCTION**

Dans le chapitre 2 nous avons analysé différentes techniques de gestion des charges et mis en évidence les difficultés et insuffisance de solutions existantes. Nous avons notamment montré qu'à ce jour les méthodes de gestion optimales présentées dans la littérature ne parviennent pas à satisfaire des besoins de gestion plus avancés, en particulier si l'on intègre les contraintes qu'imposent des actions en temps réel.

Il ressort de notre étude bibliographique que la plupart des méthodes existants sont appliquées essentiellement à grande échelle (centres commerciaux ou pour le secteur industriel), mais qu'il n'existe pas beaucoup d'études applicables au niveau de la maison individuelle ou du bâtiment (consommations résidentielles). De surcroît, la plupart des méthodes proposées nécessitent un investissement important, ou conduisent à un système difficile à installer et à déployer. Ce sont les raisons pour lesquelles nous avons choisi de développer un système intelligent de gestion en temps réel, qui soit à la fois, capable d'augmenter l'efficacité énergétique, relativement peu coûteuse, facile à déployer et flexible, c'est à dire à même d'intégrer de nouveaux modules de contrôle ou d'appliquer divers méthodes alternatives de gestion.

Concernant les méthodes d'estimation/prévision trouvées dans littérature, l'échelle de temps de calcul est en générale longue, et certaines besoins d'une puissance de calcul trop élevée. Dans ce cas, la complexité de calcul dépend essentiellement du modèle utilisé et du nombre de variables prises en compte. Par contre, les variations des charges observées dans les bâtiments sont généralement assez rapides (constantes de temps de l'ordre de quelques minutes) et des modèles complexes sont donc mal adaptés. De plus, il n'existe actuellement aucun modèle qui soit à même d'estimer la charge consommée en tenant compte des aléas et des non-linéarités de la consommation domestique.

Les méthodes de prévision statistique (réseaux de neurones, logique floue, etc) appliquées à la gestion des charges électriques sont quant à elles souvent confrontées à de grandes erreurs de prédiction en cas de fluctuations rapides de la température ou face à des événements de consommation imprévus, car elles ne peuvent pas réagir en temps réel à de tels événements imprévues. Or la variabilité des usages, liée à des facteurs psychologiques et aux habitudes de vie des utilisateurs, est difficile à définir et à prévoir avec précision. En outre pour chaque type de bâtiment à contrôler, un grand nombre de données est nécessaire pour réaliser un apprentissage statistique en vue d'exploiter des modes de contrôle prévisionnels.

Par conséquent, on tend à utiliser des réseaux de capteurs pour remplacer les méthodes d'estimation, et dans ce cas un système de gestion intelligent temps réel est envisageable.

La partie suivante présente notre première application de gestion en temps réel utilisant un réseau de capteurs, appliquée à des radiateurs équipant une maison individuelle.

## **5.2 METHODE DE GESTION EN TEMPS REEL DES RADIATEURS**

### **5.2.1 CONCEPTION DU PILOTAGE DES RADIATEURS EN TEMPS REEL**

En accord avec l'étude de la régulation proposée au chapitre 4 (voir la partie 4.4.2), l'objectif est de construire un système appliquant notre méthode de gestion des radiateurs électriques, qui puisse agir rapidement, donc en temps réel. La conception du système doit prendre en compte les besoins suivants :

- efficacité de gestion énergétique des radiateurs
- maintien du confort thermique (température)
- respect des contraintes de puissance maximale autorisée (puissance souscrite ou puissance imposée par le gestionnaire du réseau)
- facilité d'installation dans une maison
- facilité à coopérer avec les modules de contrôle des autres équipements
- flexibilité, pour permettre l'extension du réseau et l'application de nouvelles méthodes de gestion.

La (Figure 5-1) ci-dessous présente la conception du nouveau système de régulation proposé.

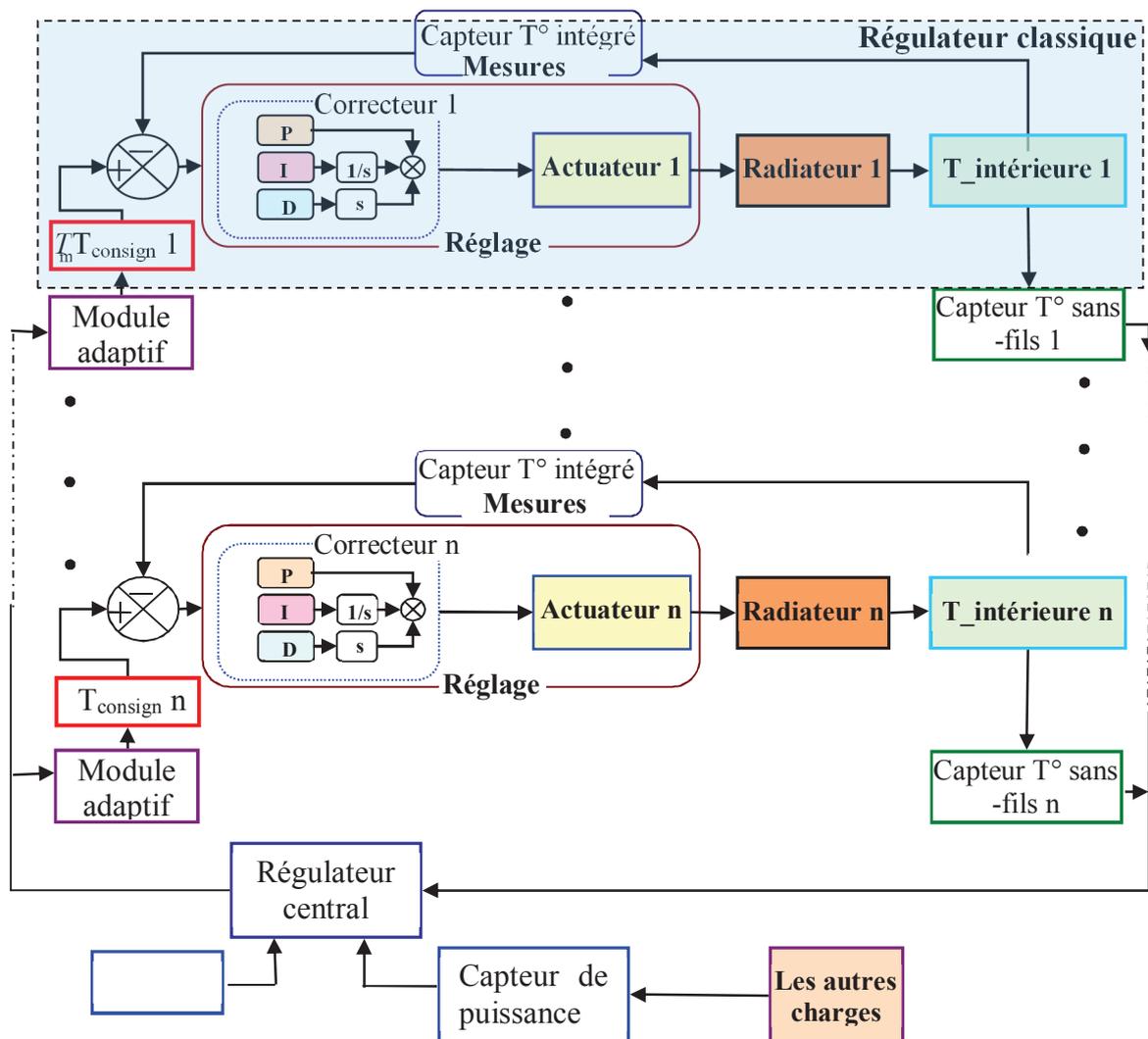


Figure 5-1 : Principe du régulateur développé pour le contrôle des radiateurs

Ce système est équipé d'un réseau de capteurs de température sans-fil et d'un capteur de puissance sans-fil, qui permettent de connaître en temps réel le comportement des équipements et de mesurer la puissance de consommation de tout l'appartement. Tous les capteurs de température, les modules adaptatifs et le capteur de puissance peuvent communiquer avec l'unité de gestion centrale. Des liaisons de communication sans fil sont établies entre tous les dispositifs du système. Elles utilisent un même protocole de communication (ZigBee) ce qui facilite le déploiement du réseau et l'ajout éventuel d'autres dispositifs.

Dans cette figure, la partie classique est inchangée, chaque radiateur ayant son propre régulateur (que nous appelons le régulateur local), mais nous intégrons à chaque régulateur local un module externe sans fil, qui permet de reconfigurer sa température de consigne. Ce

module est inséré entre le radiateur classique et la prise électrique. Par conséquent, notre système associe désormais deux types de régulateurs :

- régulateur local : chaque radiateur a son propre régulateur. C'est un régulateur classique intégré à un module adaptatif sans-fil qui gère son radiateur avec des températures de consigne ( $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$ ).
- régulateur central : il reçoit toutes les informations des capteurs sans-fil et calcule des valeurs de température maximale  $T_{\max}$  à affecter à chaque régulateur local.

Ce principe permet à chaque radiateur de fonctionner avec deux modes opératoires, soit comme un régulateur classique, soit comme un régulateur adaptatif. Le système de gestion peut choisir le mode de fonctionnement selon la valeur de la puissance mesurée.

Puisque toutes les communications sont réalisées par des liaisons sans-fil, cela permet de faciliter le déploiement et l'installation d'un tel système. La partie suivante expliquera le fonctionnement du régulateur adaptatif.

## **5.2.2 ALGORITHME DE CONTROLE**

Cette partie présente l'algorithme du programme de contrôle intégré au régulateur central qui détermine et reconfigure automatiquement à chaque pas de temps les températures de consigne maximale de tous les radiateurs du système. L'objectif de la stratégie de contrôle proposée est de :

- maintenir la puissance de consommation totale inférieure ou égale à la puissance maximale autorisée (puissance souscrite ou puissance fixée par le gestionnaire du réseau)
- maintenir le confort (température).

La Figure 5-2 ci-dessous présente l'algorithme développé :

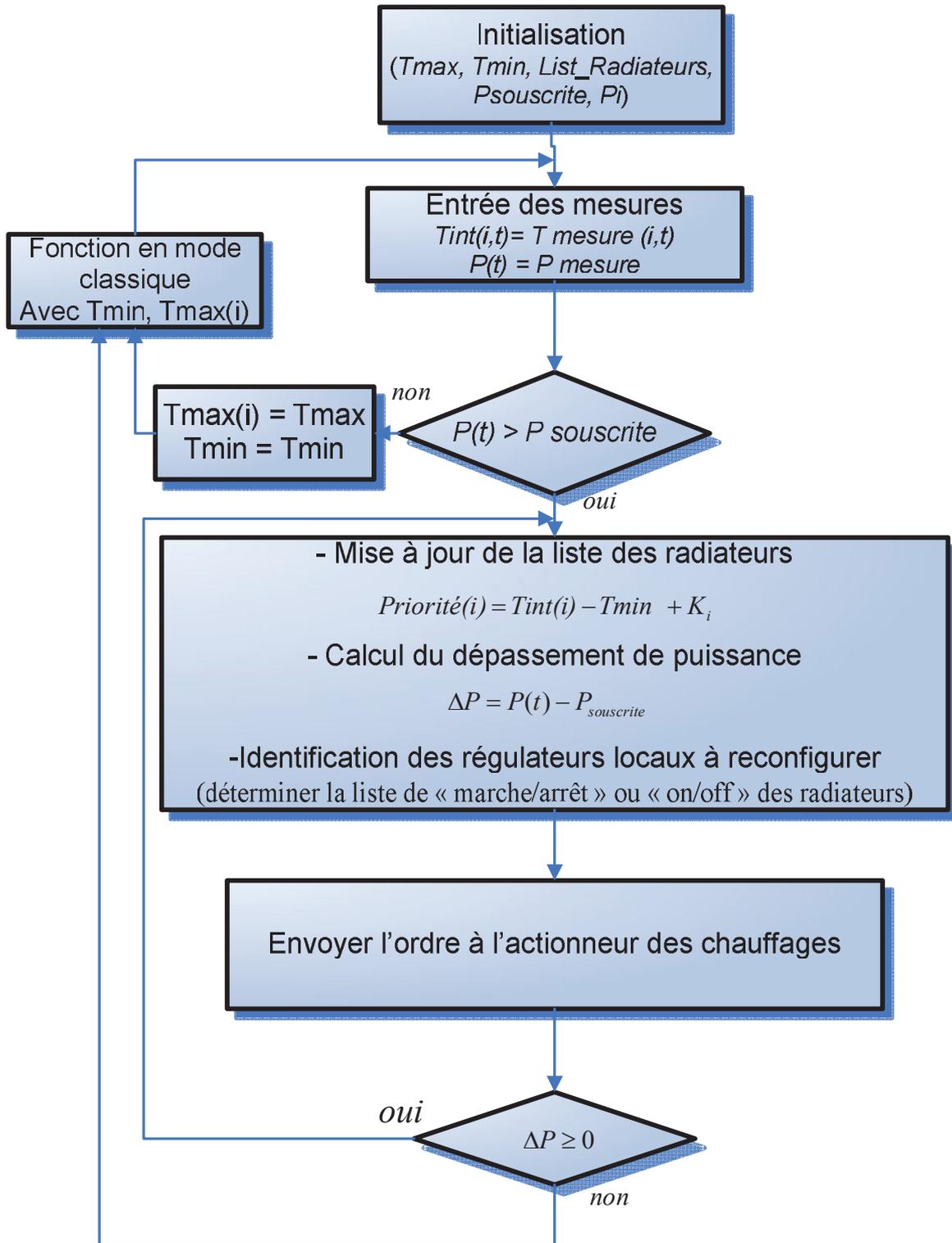


Figure 5-2: Algorithme de contrôle en temps réel des radiateurs en utilisant des capteurs sans fil

Concrètement, le fonctionnement de l'algorithme est basé sur des informations issues des mesures en temps réel de la puissance totale de consommation et de la température de chaque pièce. Il comporte les étapes suivantes :

**Initialisation** : Il s'agit de l'étape d'initialisation et de collecte des données. L'initialisation consiste à définir la puissance limite admissible ( $P_{souscrite}$ ), la température de consigne ( $T_{min}, T_{max}$ ) et la liste des radiateurs  $List\_priorité(i)$  avec la puissance de fonctionnement  $P(i)$  de chaque radiateur.

**Entrée de mesures** : cette étape consiste à regrouper les données mesurées par des capteurs :

- récupération en temps réel de la puissance appelée totale mesurée par un capteur de puissance sans-fil.
- récupération des informations de température intérieure des pièces de l'appartement. Toutes ces informations sont mesurées en temps réel par un réseau de capteurs sans-fil.

Cette étape s'occupe aussi du processus d'enregistrement de tout nouvel équipement qui veut participer au système. Grâce au réseau de communication ZigBee présenté dans le chapitre 4 (partie 4.3.2), s'il y a un autre radiateur (et également son capteur de température associé) qui se raccorde au réseau, il se verra automatiquement attribuer un numéro d'identification et sera ensuite ajouté à la liste des radiateurs.

**Traitement des données** : le programme traite les informations mesurées. En premier lieu, il compare la puissance appelée actuelle de tout l'appartement avec la puissance souscrite et calcule ensuite l'éventuel dépassement de la puissance souscrite.

S'il n'y a pas de dépassement de puissance, les régulateurs locaux fonctionnent avec les températures de consignes ( $T_{min}, T_{max}$ ) initialisées. Lorsqu'un dépassement de la puissance souscrite est détecté, le système bascule en mode de régulation adaptatif. En utilisant notre nouvelle méthode régulation présentée au chapitre 4 (partie 4.4.2.3), le problème revient à modifier les températures maximales  $T_{max}(i)$  de certains régulateurs locaux pour diminuer la puissance appelée. Il s'agit de résoudre les deux sous-problèmes qui sont explicités ci-après :

- quels sont les régulateurs locaux sur lesquels il convient d'intervenir?
- à quelle valeur leur température maximale doit-elle être fixée?

**Contrôle intelligent** :

Pour résoudre le premier problème, nous utilisons les notions de "*priorité*" pour chaque radiateur et une liste dynamique d'indexation des radiateurs ( $List\_Radiateur$ ).

- A chaque radiateur est attribuée une priorité dont la valeur est calculée à partir de son écart de température par rapport à la valeur de  $T_{\min}$ . Cette valeur sera mise à jour dans chaque boucle de contrôle grâce aux informations mesurées.

$$\text{Priorité}(i) = T_{int}(i) - T_{min} + K_i$$

avec  $K_i$  le coefficient d'ajustement du radiateur  $i$ , utilisé pour modifier la priorité de ce dernier. Dans notre exemple,  $K_i$  est initialement réglé à zéro.

- la "*List \_ Radiateur*" est classée par ordre de priorité descendante : le dernier élément de la liste indique le radiateur de plus faible priorité qui sera arrêté avant les autres lorsqu'on rencontre la contrainte de puissance appelée. Cette liste est mise à jour dans chaque boucle de contrôle selon les changements de priorité des radiateurs.

Grâce à la liste des radiateurs classés par ordre de priorité (*List \_ Radiateur*), le niveau du dépassement de puissance appelée ( $\Delta P$ ) et les puissances nominales de chaque radiateur ( $P(i)$ ), nous pouvons identifier les régulateurs locaux qui sont à reconfigurer dans chaque boucle de contrôle.

Après cette identification, le programme va déterminer la liste de « marche/arrêt » ou « on/off » des radiateurs pour que la puissance totale consommée soit inférieure ou égale à la puissance maximale autorisée.

**Etape 4 :** envoyer les ordres d'action aux radiateurs.

### **5.3 PROTOTYPE DEVELOPPEE POUR LA GESTION EN TEMPS REEL DES RADIATEURS**

Ce prototype utilise l'architecture et le protocole de communication présentés au chapitre 4, et permet d'intégrer aisément de nouveaux composants et leurs modules de contrôle. Cette partie représente le système prototype de gestion thermique en temps réel utilisé dans un appartement individuel. L'ensemble des composants utilisés ainsi que la conception de l'architecture du système avec des capteurs sans-fil sont présentés.

### **5.3.1 ARCHITECTURE PHYSIQUE DU SYSTEME**

#### **5.3.1.1 Installation du système développé**

Aujourd'hui, lorsque l'on modifie l'installation électrique d'un bâtiment pour y ajouter un système de contrôle, on prend le risque de rencontrer des difficultés du fait notamment des perturbations causées par la nécessité de tirer de nouvelles liaisons filaires. C'est pourquoi, concernant l'architecture matérielle du système de gestion, nous avons décidé de développer un système dont un module communicant est intégré dans une prise électrique et constitue alors une interface de communication entre l'équipement et le système de pilotage. Cette interface permet d'une part de récupérer les informations disponibles sur les équipements, d'autre part d'exécuter la commande envoyée par l'unité de contrôle. Elle est facile à intégrer ou à retirer d'un équipement sans causer de perturbations connexes.

La figure ci-dessous (Figure 5-3) représente l'architecture matérielle du prototype pour la gestion des radiateurs en temps réel.

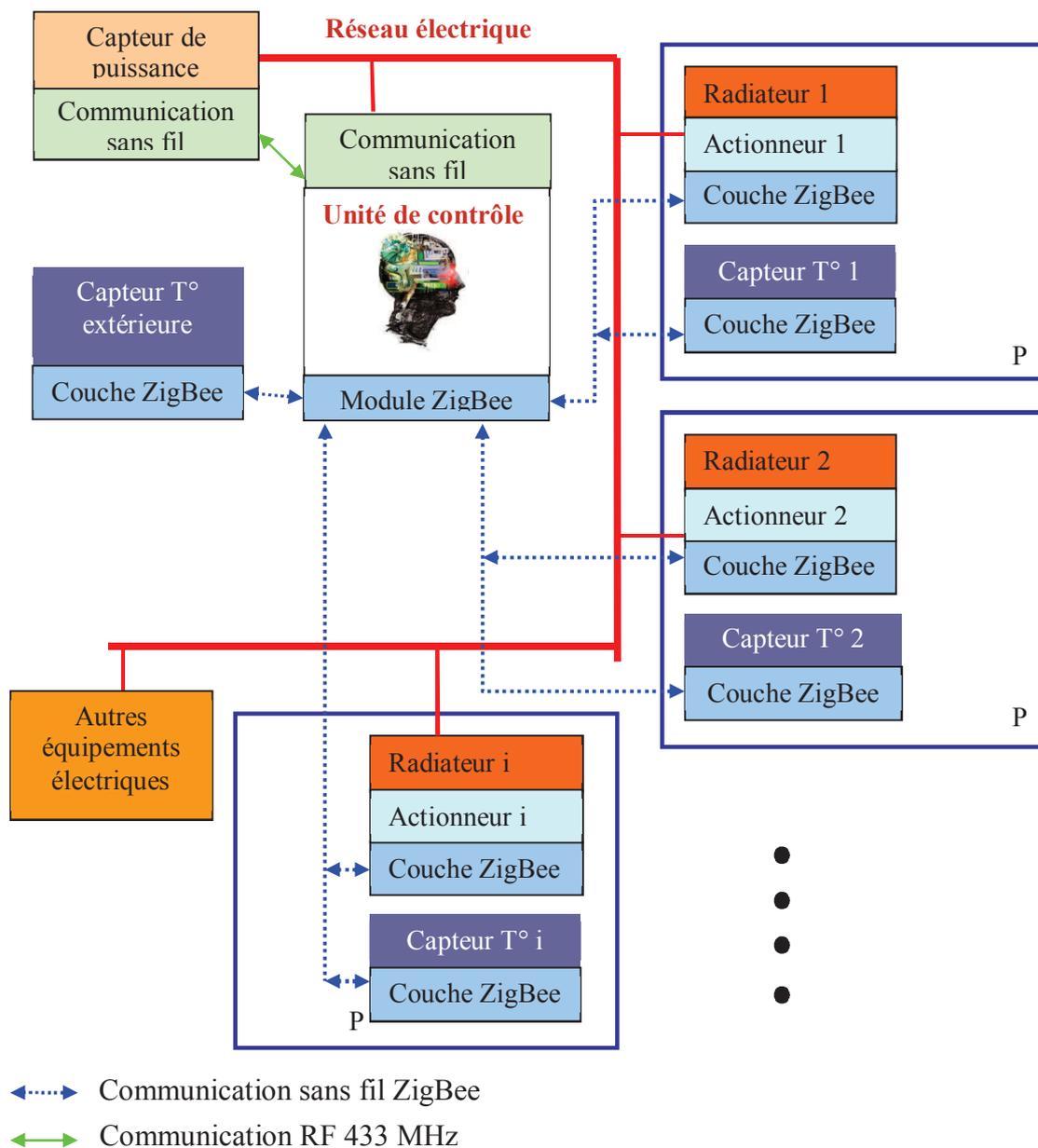


Figure 5-3 : Architecture matérielle du système prototype

Ce système se compose des composants suivants :

Liste des matériels développés	
1	Radiateurs adaptatifs sans fil
2	Capteurs de température sans fil
3	Capteur de puissance sans fil
4	Unité de contrôle centrale – qui prend le rôle de régulateur central

Tableau 5-1 : Liste des composants utilisés

La partie suivante va présenter en détail ces composants du système prototype.

### **5.3.1.2 Radiateur adaptatif**

La figure (Figure 5-4) présente la conception d'un radiateur adaptatif. Chaque radiateur classique est équipé d'un actionneur et d'un module de communication, regroupés dans un circuit électrique contrôlable.



*Figure 5-4 : Structure du radiateur adaptatif*

Ce radiateur prototype est équipé d'un microcontrôleur MSP430 de Texas Instrument incluant un programme embarqué. Il va créer une interface de communication entre le radiateur et le système de pilotage (unité centrale/régulateur central). Lorsque le radiateur est branché sur le réseau électrique, le module de communication sera automatiquement allumé et établira une liaison de communication avec le régulateur central. Le système reconnaît alors qu'il y a un nouveau radiateur qui vient se rattacher au réseau existant et qu'il est prêt à le gérer. Ce module envoie régulièrement un signal au régulateur central, pour lui indiquer qu'il est toujours connecté.

Si le radiateur est débranché du réseau électrique, ce module s'éteint lui aussi. L'absence de signal issu de ce module pendant une durée prédéfinie, permet au régulateur central de reconnaître que ce radiateur est débranché du réseau.

Le nombre de radiateurs pouvant participer au système dépend du modèle de communication ZigBee utilisé. En théorie, ZigBee accepte jusqu'à 65000 nœuds, ce qui est largement suffisant pour les systèmes domotiques. Après l'établissement de la communication, ce module reçoit des ordres du régulateur central et il intervient en liaison avec le radiateur classique via son actionneur. Grâce à ce module de communication, le radiateur adaptatif est contrôlable via des signaux envoyés par le régulateur central (l'unité de contrôle).

### **5.3.1.3 Capteur de température sans fil**

Un capteur de température sans-fil se compose d'une unité de communication (ZigBee) et d'un capteur de température. Il est équipé aussi d'un microcontrôleur (MCU) qui comporte un programme embarqué pour gérer toutes les opérations du capteur :

- mesure de la température ambiante
- envoi des informations à un ordinateur.

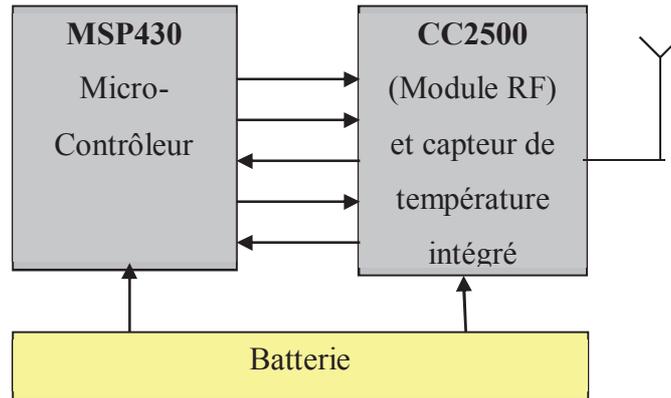


Figure 5-5: Capteur de température sans fil

#### 5.3.1.4 Capteur de puissance sans-fil

Nous utilisons dans notre système prototype un capteur de puissance sans-fil "Current Cost Ltd". Il se présente sous la forme d'un compteur électrique numérique sans fil, très utilisé en Angleterre pour surveiller en temps réel l'énergie consommée d'un bâtiment [129]. La figure (**Error! Reference source not found.**) ci-dessous présente les composants du capteur de puissance qui comportent de trois parties :



Figure 5-6 : Capteur de puissance sans fil

- les deux premières parties sont la sonde de puissance sans fil et le transmetteur de signal, installés au niveau du compteur du bâtiment. La mesure de la puissance appelée de la maison, effectué tous les 7 secondes, est ensuite envoyée automatiquement vers l'unité de surveillance par une transmission sans-fil.
- la troisième partie est une unité de surveillance qui reçoit les signaux du transmetteur

L'unité de surveillance peut stocker et afficher elle-même des données captées ou les transférer à l'ordinateur via un port USB standard. La liaison entre les deux parties est établie par une communication radiofréquence à 433MHz, utilisant le protocole de "C2 Technology".

Nous avons développé un programme qui permet de communiquer avec l'unité de surveillance de ce capteur de puissance. C'est un module de décodage intégré à l'unité de contrôle qui nous permet de récupérer les données de puissance consommée en temps réel.

#### **5.3.1.5 Unité de contrôle – régulateur central**

L'unité de contrôle réalise les fonctions d'un régulateur central :

- surveillance de l'état du système : il peut communiquer avec les capteurs de température et les radiateurs adaptatifs via la communication sans-fil ZigBee, ou bien faire la liaison via le lien radio à 433MHz avec le capteur de puissance afin de récupérer les données mesurées par celui-ci
- calcul d'optimisation du fonctionnement des radiateurs ; dans notre application, il peut gérer de manière optimale le fonctionnement des radiateurs pour que la puissance totale consommée par appartement ne dépasse pas la puissance autorisée maximale, tout en maintenant le confort thermique dans chaque pièce
- Envoi des ordres correspondants aux radiateurs.

Dans notre prototype, l'unité de contrôle est un ordinateur équipé d'un module ZigBee. Il prend le rôle du nœud racine (ZigBee Coordinateur-ZC) du réseau de communication et établit les liaisons de communication avec tous les composants du système. Les températures mesurées et les informations issues de capteur de puissance ainsi que les états des radiateurs et autres paramètres sont stockés sur l'ordinateur.

- Température, puissance : informations analogiques continues, ensuite finement discrétisées
- Etat radiateur (ON/OFF) : informations logique de nature discrète

### 5.3.2 RESULTATS OBTENUS

Pour valider le système prototype, cette partie présente les résultats préliminaires de notre application de gestion des charges, de chauffage dans un appartement. Il s'agit d'un appartement d'habitat individuel qui se compose de 3 pièces : un salon, une salle de bain et une pièce avec cuisine intégrée. Le plan de l'appartement utilisé pour ce cas d'étude est présenté sur la figure (Figure 5-7). Ces trois pièces de différentes tailles sont équipées chacune d'un radiateur électrique adaptatif, soient deux radiateurs de 800W et un radiateur de 1900W (Tableau 5.2).

No Pièce	Pièce/salle	Equipement et puissance
1	Salle de bain	Radiateurs 1-800W, capteur 1 de T°
2	Salle de séjour	Radiateurs 2-800W, capteur 2 de T°
3	Chambre	Radiateurs 3-1900W, capteur 3 de T°
	Au niveau du compteur	Capteur de puissance

Tableau 5-2 : Répartition des équipements (radiateurs et capteurs)

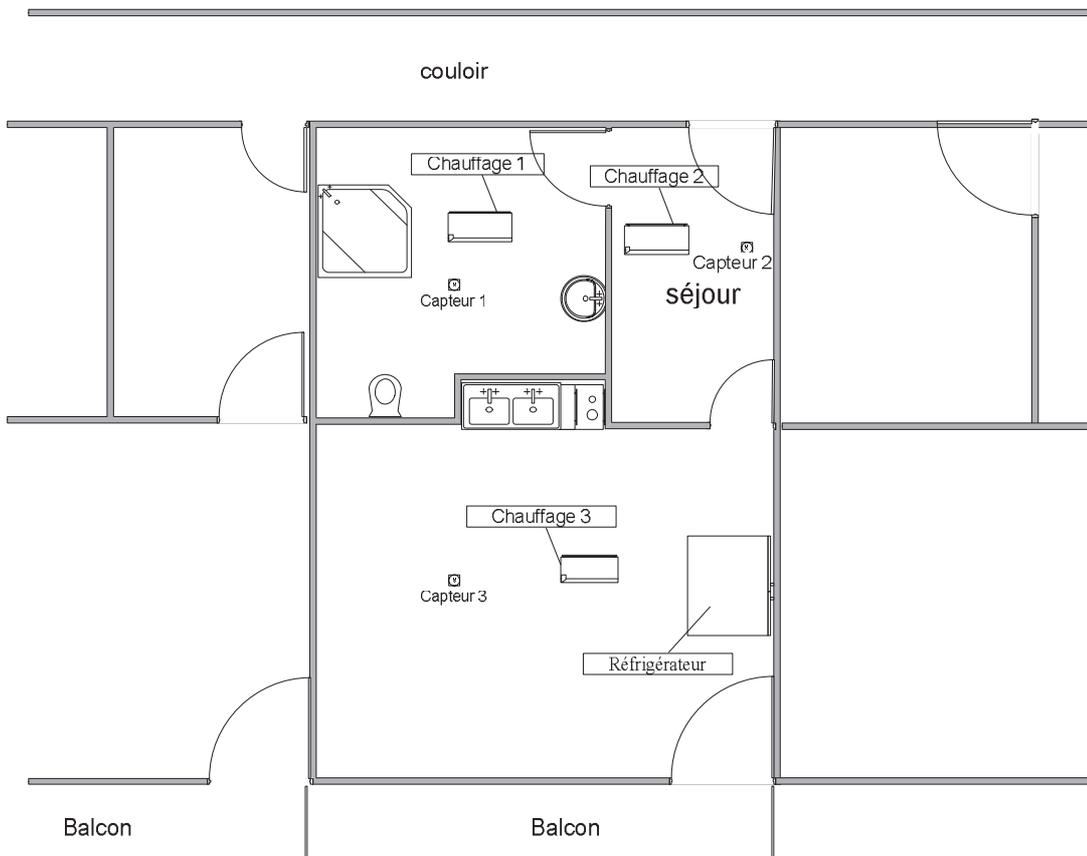


Figure 5-7: Plan de l'appartement expérimental

Dans chaque pièce est installé un capteur de température sans-fil, tous ces composants étant connectés au réseau de communication ZigBee sans-fil. Dans ce qui suit, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus grâce à la mise en œuvre de la méthode de gestion proposée.

### **5.3.2.1 Cas initial sans gestion de charge**

En l'absence de gestion de charge, tous les radiateurs fonctionnent en mode de régulation classique. Les valeurs des températures de consigne ( $T_{\min}$  et  $T_{\max}$ ) sont fixées à 20°C et 22°C, respectivement. La température de toutes les pièces doivent être maintenues à une température supérieure à  $T_{\min}$  afin d'assurer le confort thermique. Les charges électriques correspondantes de l'appartement sont présentées dans le (Tableau 5-3) suivant:

<b>Equipment</b>	<b>Puissance</b>
2 Radiateurs	2 x 800 W
1 Radiateur	1900 W
1 Réfrigérateur	150 W
1 Ordinateur	120 W
Puissance totale	3770 W

*Tableau 5-3 : Charges dans l'appartement*

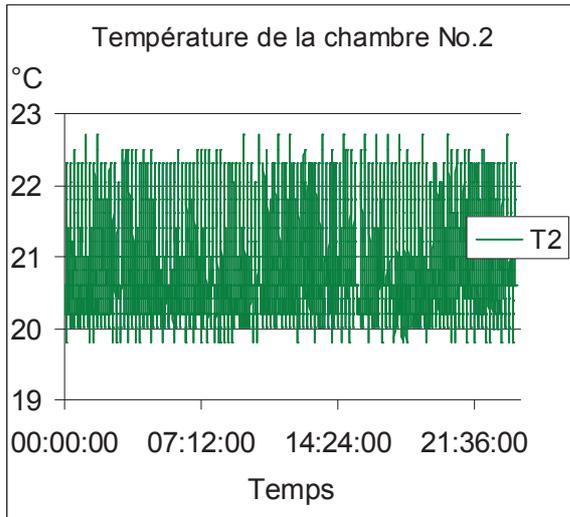


Figure 5-8: Température de la pièce No.2

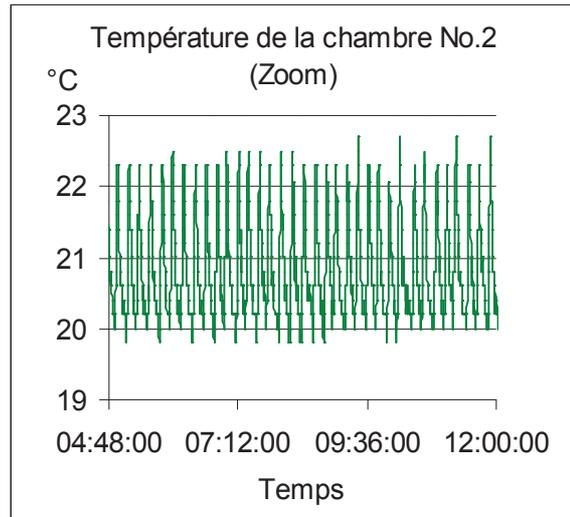


Figure 5-9: Température de la pièce No.2 (Zoom)

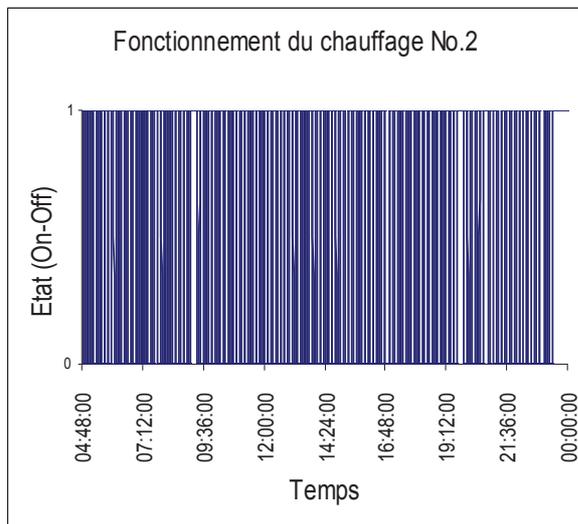


Figure 5-10: Fonctionnement du radiateur No.2

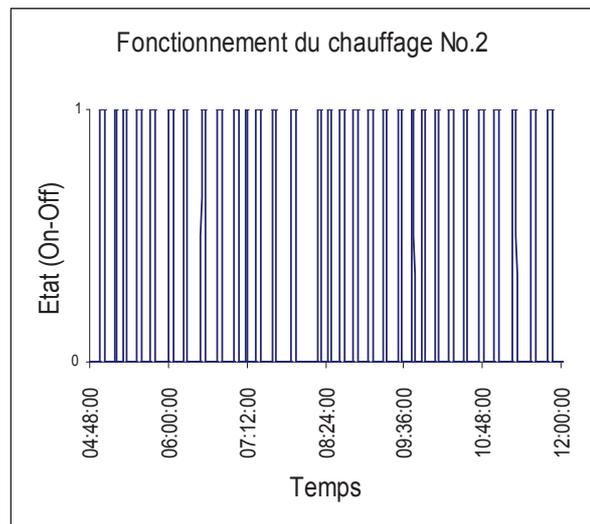


Figure 5-11: Fonctionnement du radiateur No.2 (Zoom)

On observe les températures intérieures des toutes les pièces et la puissance totale consommée de l'appartement. Les températures intérieures des pièces sont représentées sur les (Figure 5-8 et Figure 5-9) et le fonctionnement des radiateurs correspondants sont présenté sur les figures (Figure 5-10 et Figure 5-11).

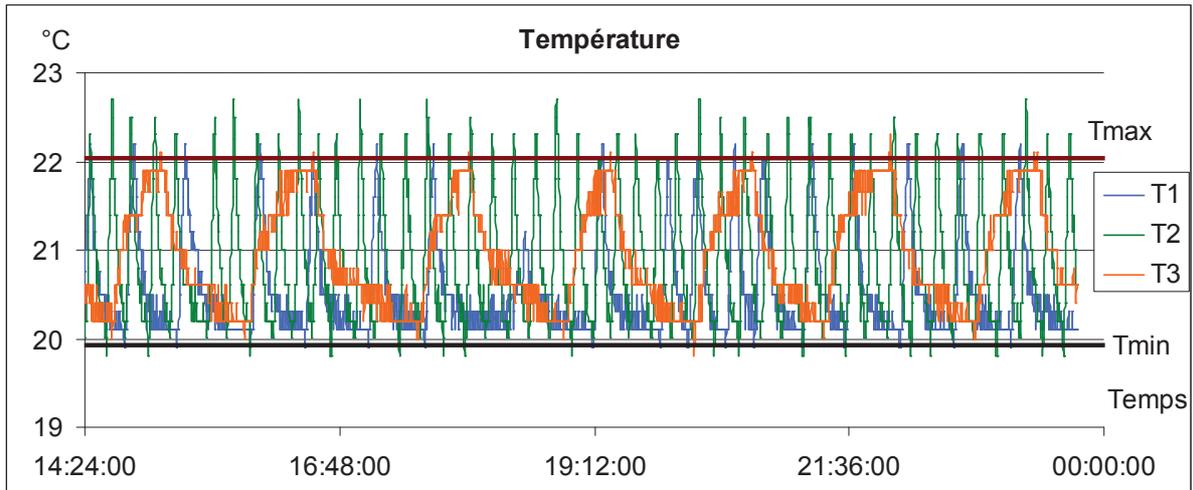


Figure 5-12: Températures intérieures de 3 pièces dans le cas sans gestion

La Figure 5-12 regroupe l'ensemble des températures des trois pièces de l'appartement. Les courbes (T1, T2, T3) présentent les températures intérieures des pièces 1, 2 et 3, respectivement. Bien entendu, le confort thermique est toujours assuré : les températures de toutes les pièces sont toujours maintenues entre 20°C ( $T_{\min}$ ) et 22°C ( $T_{\max}$ ). L'utilisateur obtient alors un niveau de confort maximal dans ce mode de fonctionnement. En l'absence de contrôle adaptatif, les valeurs des températures de consignes ( $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$ ) sont constantes, et par conséquent il n'y a pas de changement au niveau de la température maximale et minimale.

On observe également le profil de la puissance totale appelée correspondant à ce cas sans gestion de charge. Les résultats illustrés dans la (Figure 5-13) montrent qu'en l'absence de gestion de charge, la puissance totale appelée sur le réseau peut atteindre 3770 W, autrement dit la demande instantanée est égale à la somme des puissances nominales de tous les appareils raccordés :

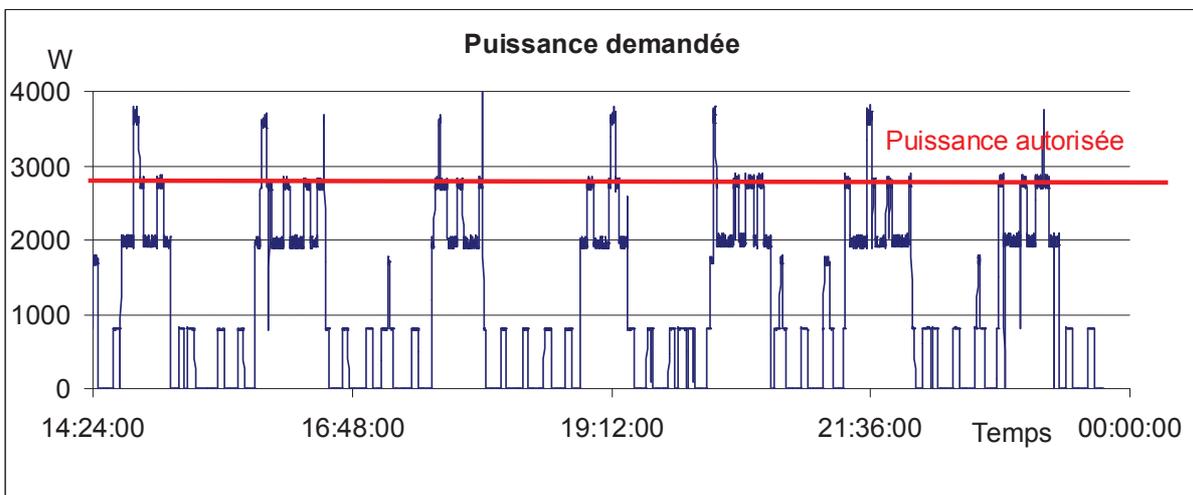


Figure 5-13: Puissance appelée dans le cas sans gestion

L'utilisateur de cet appartement doit alors souscrire chez son fournisseur une puissance souscrite ( $P_{\text{souscrite}}$ ) supérieure ou égale à la valeur maximale (correspondant à la somme des puissances nominales de tous les appareils, soit  $> 3,770\text{kW}$ ).

### 5.3.2.2 Gestion en temps réel des radiateurs par la méthode adaptative

Nous appliquons la méthode de gestion proposée au même appartement. Notre système de gestion avec des radiateurs adaptatifs est mis en œuvre, la température minimale des toutes les pièces étant configurée à  $20\text{ °C}$  et la puissance maximale autorisée est fixée à  $2700\text{W}$  (donc environ 70% de la somme de puissance nominale des appareils).

La puissance totale demandée est fortement variable selon l'heure de la journée. Bien évidemment il y a des périodes où l'on ne rencontre pas de problème de limitation de la puissance, comme la période de non-occupation de l'habitat (de 9h à 17h typiquement pour les maisons individuelles, ou de 17h jusqu'à 9h du matin dans les bâtiments de commerce). Ce sont des cas triviaux et notre système de contrôle oriente tous les radiateurs vers un mode de fonctionnement classique. Le fonctionnement de tous les radiateurs est alors similaire au cas précédent sans gestion de charge.

On examine seulement dans cette partie le cas critique où l'on rencontre une limitation de puissance appelée. On utilise la même architecture matérielle qui est présenté dans le tableau (Tableau 5-3).

Les mesures expérimentales ont été réalisées dans plusieurs jours afin de valider la méthode proposée (voir l'annexe 1) Les résultats présentés dans ce qui suit correspondent à une courbe de charge de l'appartement expérimental mesurée en période d'hiver le 17 janvier 2010.

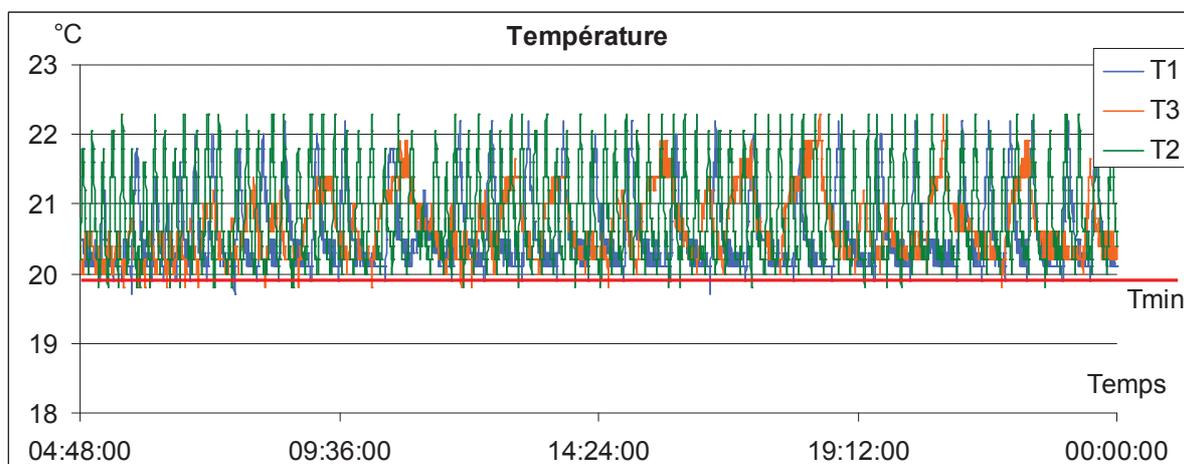


Figure 5-14: Températures intérieures de 3 pièces dans le cas de la méthode de gestion adaptative

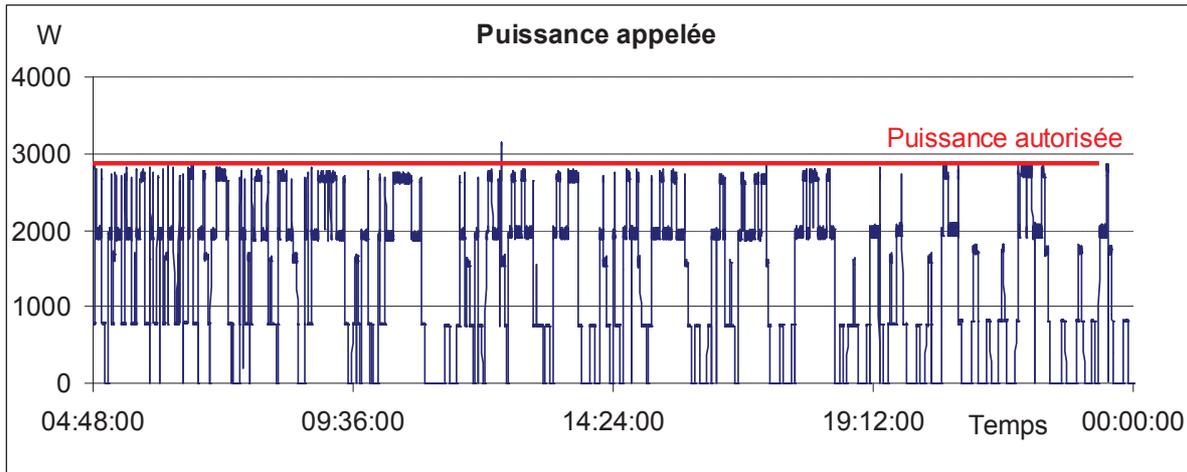


Figure 5-15: Puissance appelée dans le cas de la méthode de gestion proposée

Les deux figures (Figure 5-14 et Figure 5-15) représentent la température des trois pièces et la puissance totale appelée correspondante. On constate qu'en utilisant cette méthode de régulation adaptative, la puissance maximale totale peut être ramenée à 2700W au lieu de 3770W précédemment et qu'il n'y a plus de dépassement de la puissance maximale autorisée. Concernant le niveau de confort, les températures de toutes les pièces restent toujours maintenues entre 20°C et 22°C (Figure 5-14), ce qui montre que le confort thermique de l'utilisateur est satisfait sans dépassement de la puissance maximale autorisée. Ces résultats expérimentaux montrent que notre système de régulation adaptative en temps réel a la capacité de diminuer la pointe de consommation tout en respectant le confort thermique.

En analysant les valeurs des températures de chaque pièce, nous avons constaté que les températures minimales sont toujours supérieures à 20°C, mais que les valeurs des températures maximales variaient au cours du temps. Les figures suivantes (Figure 5-16, Figure 5-17, Figure 5-18) représentent en détail les variations de température dans chaque pièce de l'appartement et le fonctionnement des radiateurs correspondants.

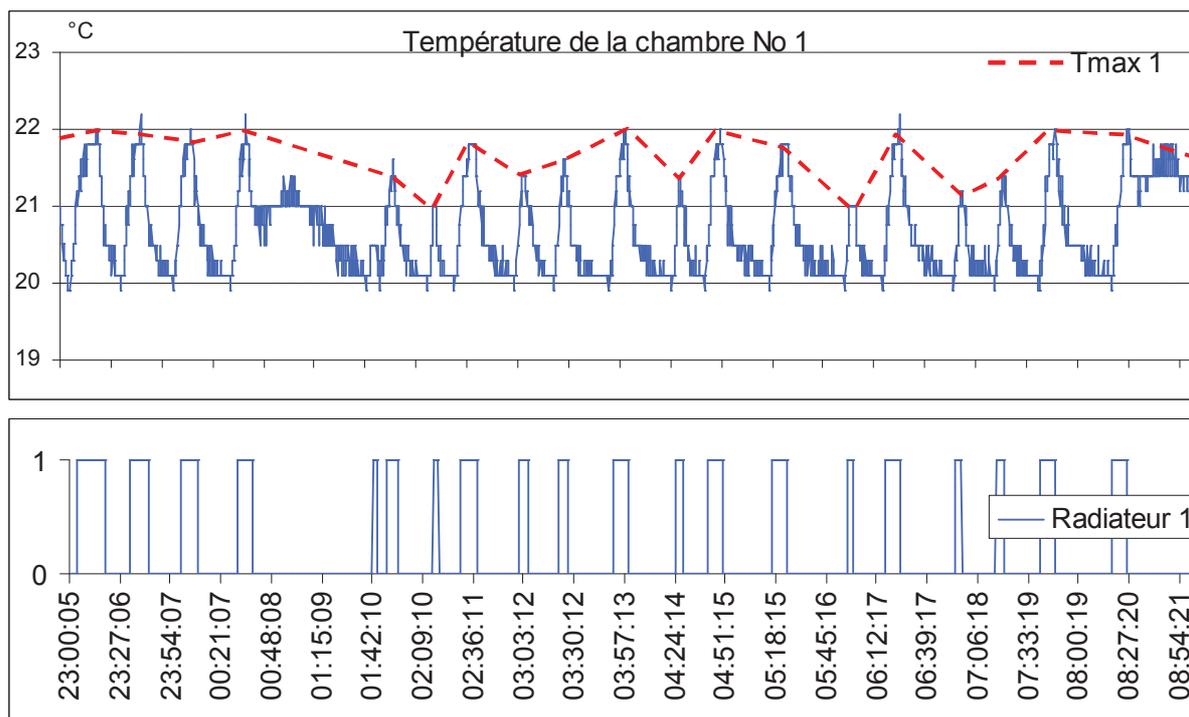


Figure 5-16: Température et fonctionnement du radiateur de la pièce No. 1 (Zoom)

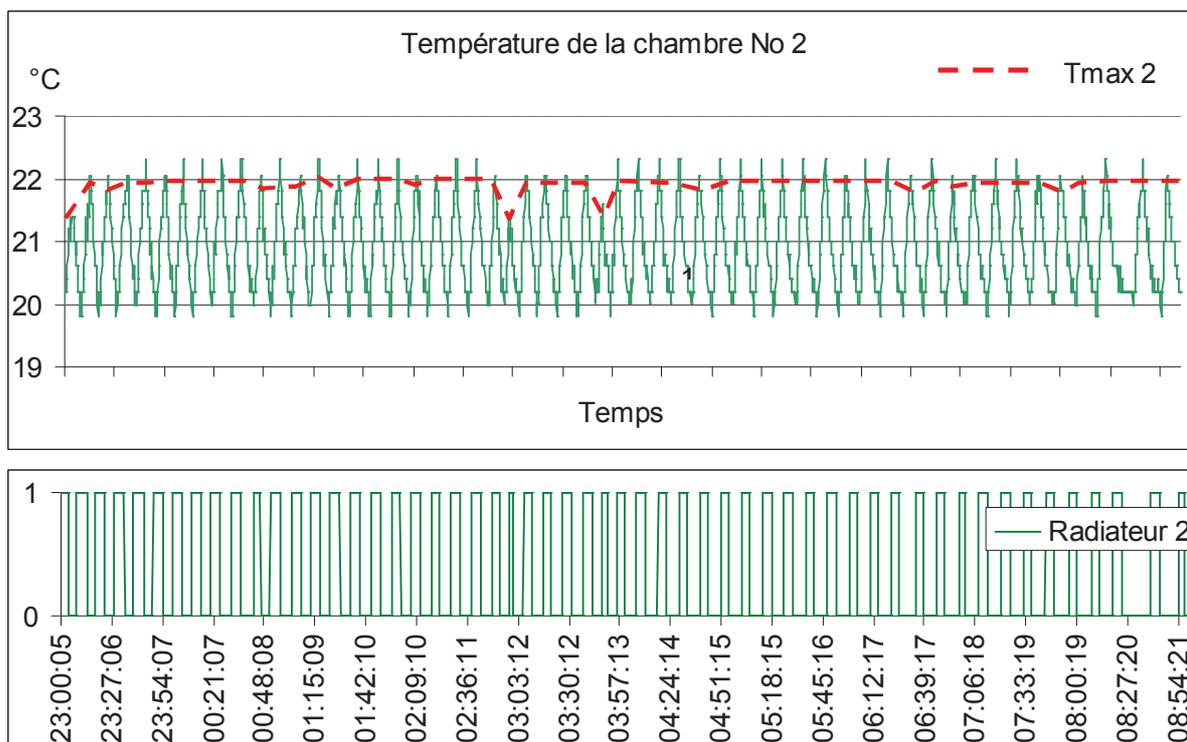


Figure 5-17: Température et fonctionnement du radiateur de la pièce No.2 (Zoom)

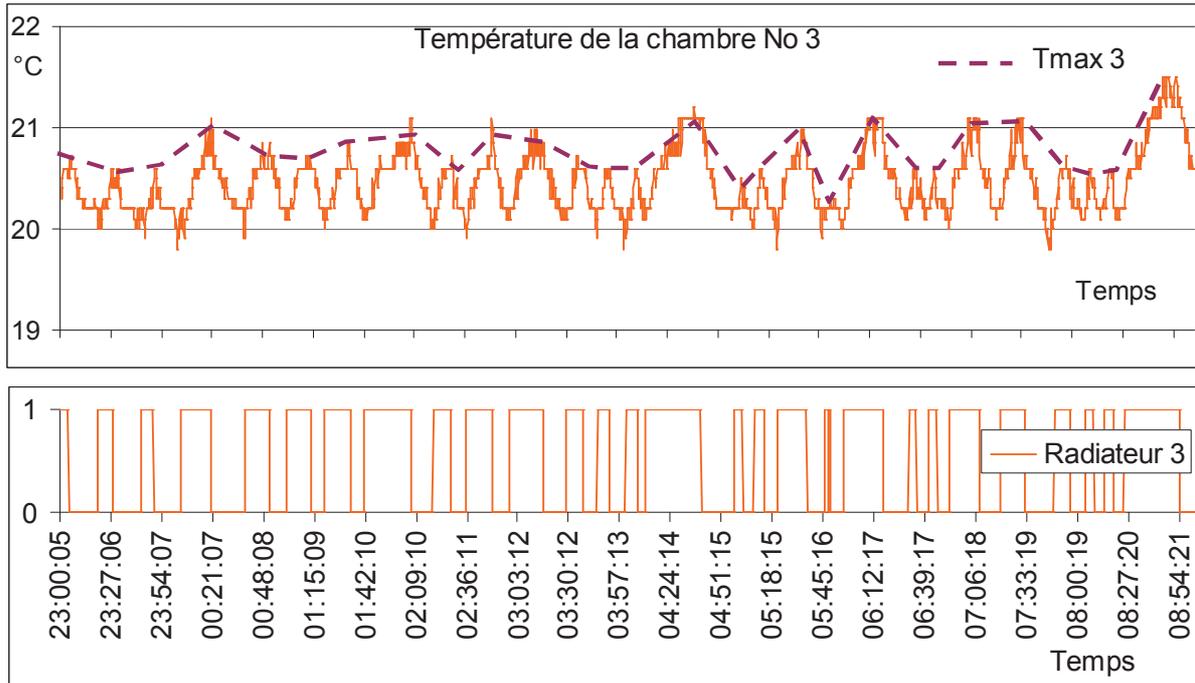


Figure 5-18: Température et fonctionnement du radiateur de la pièce No.3 (Zoom)

Nous voyons que tous les radiateurs sont contrôlés en temps réel et que le changement d'état d'un radiateur est une conséquence de la modification de  $T_{max}$ . Les  $T_{max}$  sont ajustés selon la puissance instantanée. Les  $T_{max}$  sont considérées comme des variables afin de réaliser une affectation de ressource électrique aux radiateurs. Le fonctionnement des radiateurs correspond bien aux prévisions théoriques de notre méthode de contrôle exposée au chapitre 4 (<partie 4.4.2.4>).

En bref, cette méthode de gestion peut limiter la demande de puissance consommée :

$$P(t) \leq P_{souscrite} \quad \forall t, \text{ où } P_{souscrite} \text{ est la puissance autorisée prédéfinie} = 2700W$$

$$T_{min} \leq T^{int} \leq T_{max}, \text{ où } T_{min} = 20^{\circ}C \text{ et } T_{max} \text{ varie entre } T_{min} \text{ et } 22^{\circ}C,$$

	$P_{moyenne}$ (W)	$T_{min}$ (°C)	$T_{max}$ (°C)	Energie consommée (kWh/jour)	Puissance autorisée (W)
Sans gestion	952.33	20	22	24.84	3700
Avec gestion	1042.68	20	22 °C au début - Variable	22.843	2700

Tableau 5-4: Récapitulatif des résultats obtenus avec la méthode de régulation adaptative

Afin d'illustrer l'économie d'énergie qu'apporte notre méthode, nous avons recherché dans les données mesurées (voir l'annexe 1) les informations concernant la puissance consommée pendant deux jours où les températures extérieures sont similaires. Les méthodes de gestion de charge et de non gestion de charge étant successivement appliquées pour ces

deux jours, nous constatons que les consommations totales sont respectivement de 22.84 kWh/jour et de 24.84 kWh/jour. Notre méthode permet donc de réduire la consommation énergétique, de l'ordre de 8% en période d'hiver, ce qui n'est pas négligeable (le rapport

$$\frac{22,84}{24,84} = 0,92 \Rightarrow - 8\%$$

Ce résultat peut être expliqué par le fait que la consommation d'une installation de chauffage est proportionnelle à la différence entre les températures intérieure et extérieure. Plus cette différence diminue, moins d'énergie sera consommée. La variation de température Tmax mise en œuvre dans notre méthode de gestion a également permis de réduire la température moyenne intérieure d'une pièce, ce qui a donc tendance à diminuer la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Il suffit donc de baisser Tmax.

Le gain obtenu, grâce au pilotage de charges présenté dans cette étude, n'est pas lié principalement à la réduction de la consommation électrique totale (- 8%), mais plutôt à la limitation des pics de consommation qui permet de diminuer la puissance souscrite et par voie de conséquence la facture électrique (y compris une participation éventuelle au service de gestion de congestion du réseau).

### 5.3.3 CONCLUSIONS

	Régulateur classique	Régulateur adaptif proposé
Objectif	<ul style="list-style-type: none"> <li>Assurer le confort thermique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Assurer le confort thermique minimal</li> <li>Réduire le pic de consommation</li> <li>Réduire l'énergie totale de consommation</li> <li>Réduire la facture électrique.</li> </ul>
Fonctionnement		
Principe	<ul style="list-style-type: none"> <li>Régler la température ambiante autour d'une température de consigne fixe.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Régler la température ambiante selon une température de consigne dynamique. La</li> </ul>

	<p>S'exécute sous forme d'une boucle fermée de régulation:</p> <p>A. mesure de la température ambiante intérieure</p> <p>B. comparaison de la température mesurée avec la valeur de consigne</p> <p>C. établissement de la correction en fonction de l'écart</p> <p>D. action sur le fonctionnement du radiateur.</p>	<p>température de consigne dynamique est calculée en fonction de la température et de la puissance.</p> <p>A. <b>Sans dépassement</b> de la puissance souscrite : le régulateur fonctionne comme un régulateur de température classique.</p> <p>B. <b>En cas de dépassement de la puissance souscrite</b> : principe de contrôle basé sur la variation de la température maximale <math>T_{max}</math>, en gardant la température minimale pour assurer le confort thermique</p> <p>Ce principe a été expliqué en détail (voir la partie &lt;4.4.2.4&gt;)</p>
Avantage	Facile à contrôler Assure le confort thermique	Gère les dépassements de la puissance souscrite. Réduit le pic de consommation Assure un confort thermique acceptable
Inconvénient	Puissance consommée peut dépasser la puissance autorisée /souscrite	- Contrôle complexe.

*Tableau 5-4 : Comparaisons entre les deux types de régulateurs*

### 5.3.4 REGULATION EN TEMPS REEL AVEC CONFORT REDUIT

#### 5.3.4.1 Définition du régulateur avec confort réduit

Le régulateur avec confort réduit permet de réduire la température intérieure en période d'inoccupation et de maintenir cette température au niveau désiré pendant la période d'occupation. Ceci est réalisable grâce à une horloge mécanique à programme journalier ou hebdomadaire.

Il y a normalement deux configurations pour le régulateur avec confort réduit. La première correspond aux maisons individuelles où l'habitant est absent pendant les heures de travail (de 9h à 17h). Par contre, la deuxième s'applique aux bureaux de travail, salles de commerce,... où la situation est inversée avec des occupants entre 9h et 17h.

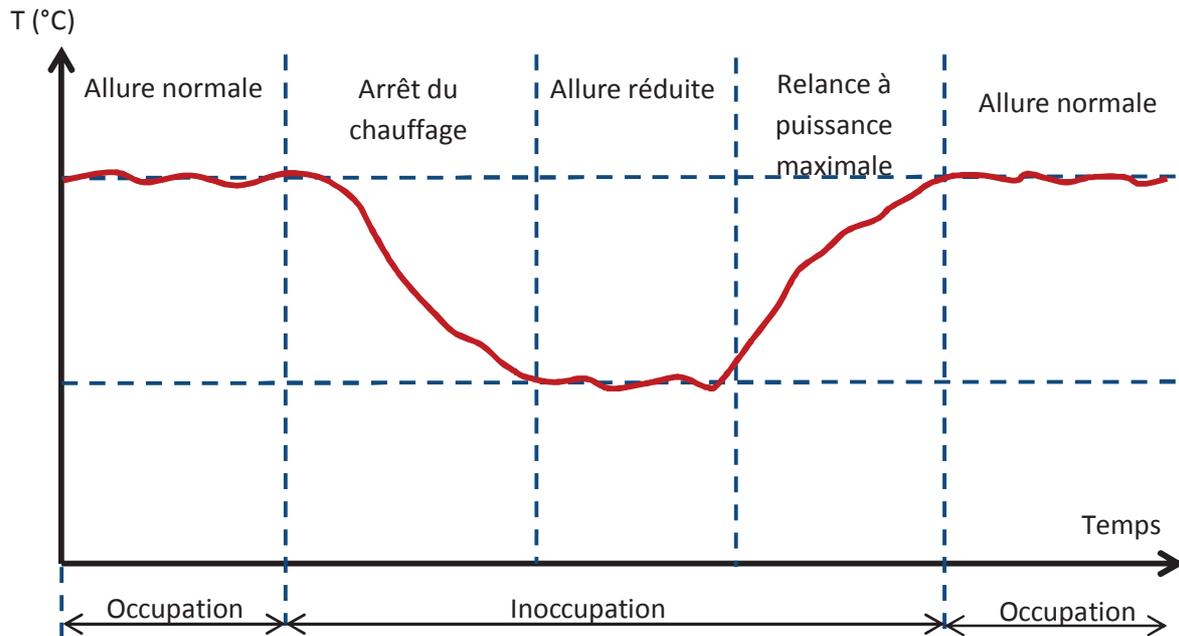


Figure 5-19 : Profils de chauffage en mode intermittent

La figure (Figure 5-19) présente les différentes allures du chauffage au cours du temps : l'allure normale en période d'occupation, l'allure réduite (température de consigne abaissée) en période d'inoccupation et la relance du chauffage. La plupart des bâtiments sont équipés d'un système de régulation permettant de réaliser des intermittences ou des ralentissements. En analysant la courbe de charge journalière d'une maison individuelle, on s'aperçoit qu'il y a un pic de consommation au début de la soirée. Une des causes de cette pointe de consommation est la relance des chauffages intermittents à ce moment. Le régulateur d'intermittence classique relance à puissance maximale les radiateurs au moment prédéfini par l'horloge.

#### 5.3.4.2 Régulation

Notre objectif est la gestion des radiateurs en mode intermittent afin d'éviter le pic de consommation au moment de la relance. Pour atteindre cet objectif, nous avons appliqué la méthode de gestion en temps réel précédente ci-dessus à la régulation intermittente. A chaque période de régulation intermittente, les radiateurs sont contrôlés par la méthode adaptative avec des plages de température différentes (allure normale, allure réduite, relance...)

$$P(t) \leq P_{\max} \quad \forall t, \quad \text{où } P_{\max} \text{ est la puissance souscrite} = 2500\text{W}$$

$$T_{\min} \leq T^{\text{int}} \leq T_{\max}, \quad \begin{array}{l} \text{de 9h à 17h: } T_{\min} = 22^{\circ}\text{C}, T_{\max} \text{ consigne varie entre } 24^{\circ}\text{C et } 22^{\circ}\text{C}, \\ \text{de 19h à 9h: } T_{\min} = 19^{\circ}\text{C}, T_{\max} \text{ consigne varie entre } 21^{\circ}\text{C et } 19^{\circ}\text{C} \end{array}$$

Ces paramétrages sont effectués sur le régulateur central du système prototype. Nous avons appliqué cette stratégie de gestion au même appartement expérimental de trois pièces dont les charges électriques sont présentées dans le (Tableau 5-5) :

No pièce	Equipement	Puissance (W)
1	1 Radiateur	800
2	1 Radiateur	800
3	1 Radiateur	1900
	Puissance totale	3500 W

Tableau 5-5 : Charges dans l'appartement d'étude du cas de gestion intermittente

### 5.3.4.3 Résultats

Les résultats présentés dans ce qui suit correspondent à la courbe de charge de l'appartement expérimental mesurée le 22 janvier 2010.

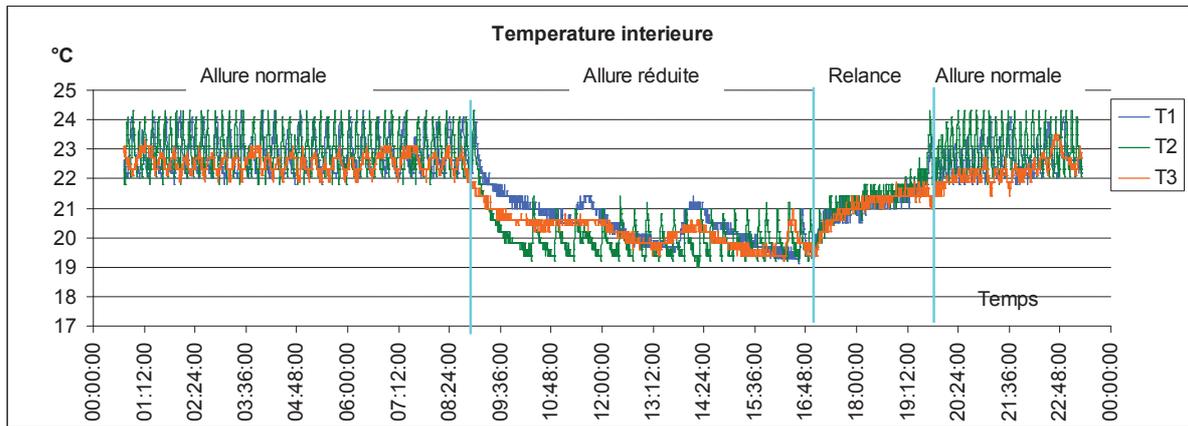


Figure 5-20: Températures intérieures des 3 pièces dans le cas de gestion adaptative intermittente

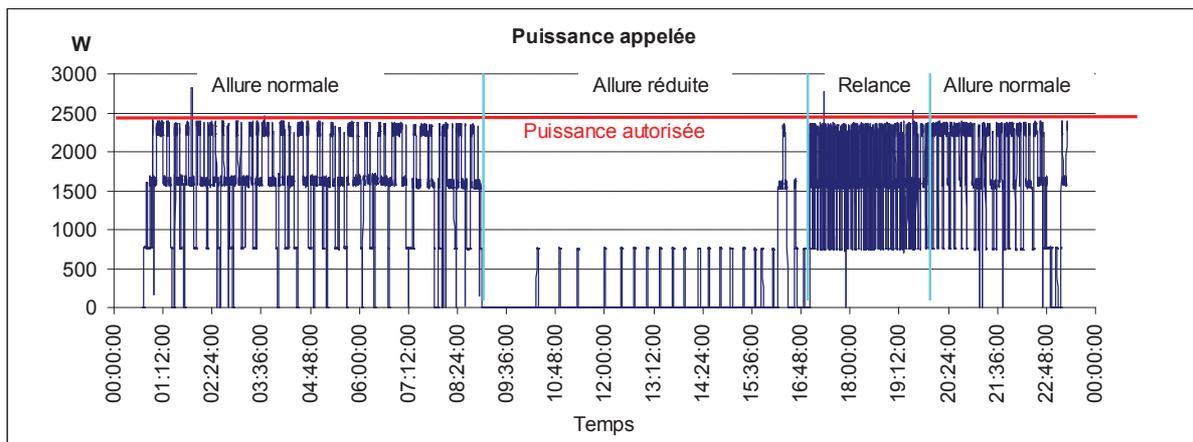


Figure 5-21: Puissance appelée dans le cas de gestion intermittente adaptative

Ces deux figures (Figure 5-20 et Figure 5-21) illustrent respectivement la température des trois pièces et la puissance totale appelée correspondante. Les mesures effectuées ont montré que la courbe de température intérieure en période d'inoccupation est réduite de 3°C.

En ce qui concerne la puissance appelée (Figure 5-21), le problème lié à la contrainte de puissance disparaît pratiquement en période d'inoccupation. On rencontre cette contrainte dans la période d'occupation en particulier au moment de la relance. Les résultats démontrent que même dans la période d'occupation et de relance, la puissance appelée ne dépasse jamais la puissance autorisée.

<b>Méthode</b>	<b>Energie consommée (kWh/jour)</b>
Gestion avec contrainte de puissance admissible	32,768
Gestion avec confort réduit, contrainte de puissance admissible et gestion intermittente	20,37

*Tableau 5-6: Résultat de la méthode proposée adaptative associée au régulateur intermittent (22 janv 10)*

En ce qui concerne l'économie d'énergie, nous comparons l'énergie consommée mesurée le 22 janvier 2010 en appliquant cette méthode intermittente avec l'énergie consommée sans ce régime flexible. Les résultats montrent que cette méthode de gestion peut économiser largement l'énergie consommée tout en respectant les contraintes de puissance et le confort de l'habitat (Tableau 5-6).

#### **5.3.4.4 Optimisation de la régulation d'intermittence adaptative**

Les performances du régulateur intermittent sont liées à l'aptitude de régulation de la température intérieure en période d'occupation et à l'optimisation de l'heure de relance du chauffage de façon à atteindre le niveau de confort à l'heure désirée. Cette optimisation permet d'effectuer la relance du chauffage le plus tard possible afin de minimiser l'énergie consommée.

La relance du système utilisant un programmeur d'intermittence, intervient à heure fixe ou en fonction des températures intérieure et extérieure, mais ces méthodes ne sont pas optimales. Nous proposons une méthode de calcul de la durée de relance plus performante, fonction des températures extérieure et intérieure, basée sur le modèle thermique adaptif du bâtiment, en utilisant un réseau de capteurs sans fil.

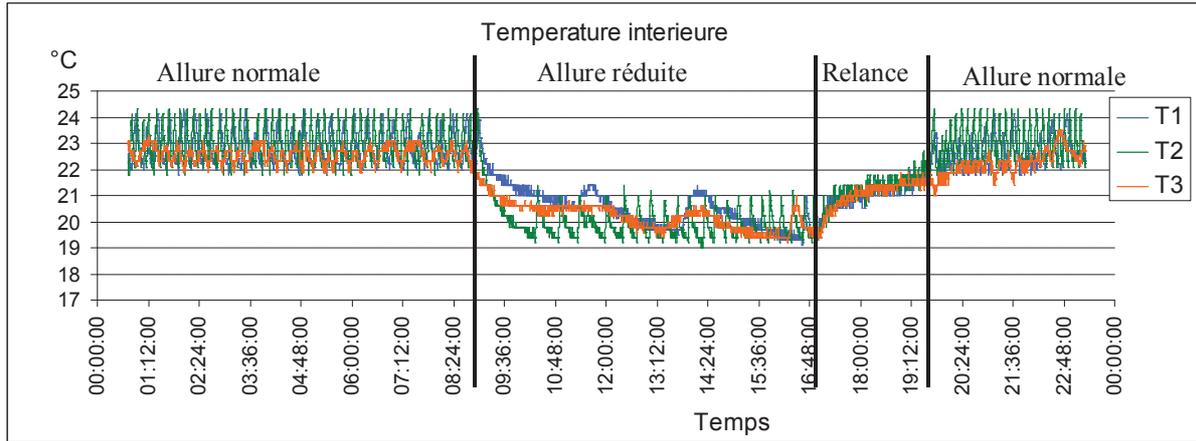


Figure 5-22: Températures intérieures de 3 pièces avec les différentes allures du chauffage en mode intermittent adaptatif

Notre méthode est basée sur le modèle de N.Mendes [68] présenté dans la partie (4.4.2.2.2 de chapitre 4):

$$\rho.c.V \frac{dT_k^{\text{int}}}{dt} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{R_k^{\text{eq}}} [T_i^{\text{ext}}(t) - T_k^{\text{int}}(t)] + Q_k(dt) + q_1 + q_2 \dots \quad (13)$$

Il permet de modéliser le changement thermique d'une pièce d'un bâtiment en fonction d'un ensemble de variables dont la température intérieure, la température extérieure, les chaleurs internes ( $q_1, q_2, q_3, \dots$ ), la chaleur produite par le radiateur de chaque salle ( $Q_k(dt)$ ) et les résistances thermiques des murs.

Avec notre méthode de gestion adaptative, on s'aperçoit que pendant l'intervalle de relance, à cause de la contrainte de la puissance autorisée, la ressource d'électricité, grâce à la liste dynamique de priorité classée des charges en fonction de la température (voir l'algorithme de contrôle 5.2.2), est toujours affectée à chaque pas de temps de contrôle à la pièce de plus basse température. Par conséquent, les courbes de températures intérieures de toutes les pièces sont similaires pendant la période de relance (Figure 5-22 et Figure 5-25).

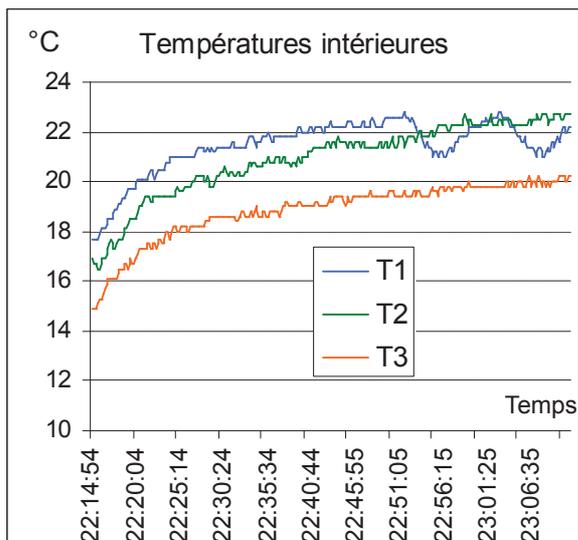


Figure 5-23 : Températures intérieures de 3 pièces en période de relance normale à puissance maximale – sans gestion

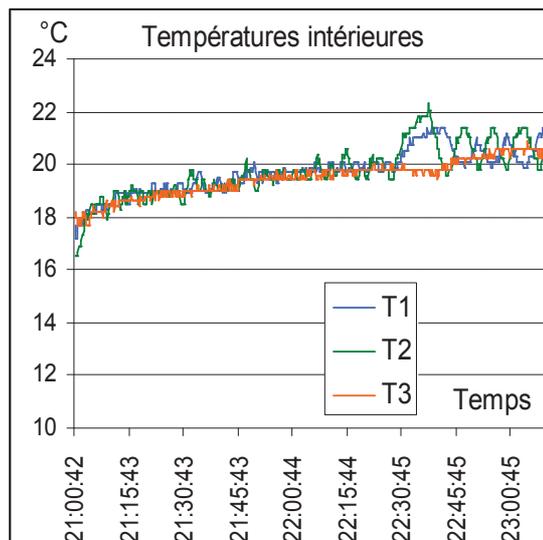


Figure 5-25 : Températures intérieures de 3 pièces en période de relance avec gestion intermittente adaptative

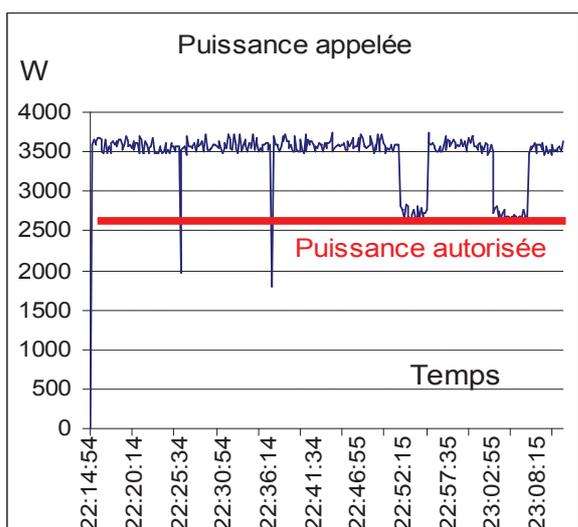


Figure 5-24: Puissance appelée dans le cas de relance à puissance maximale sans gestion

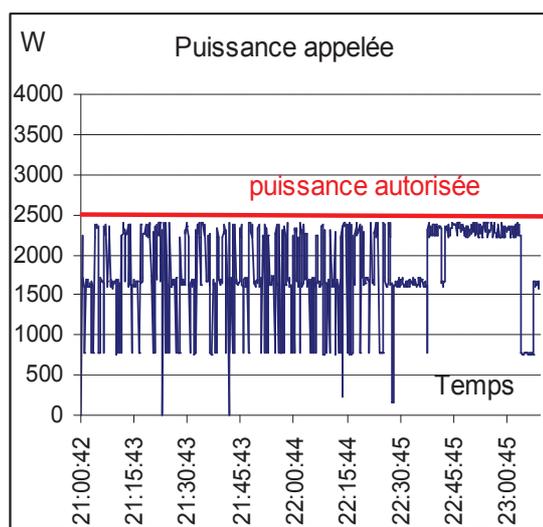


Figure 5-26: Puissance appelée dans le cas de relance avec la gestion intermittente adaptative

On considère qu'il n'y a pas de transfert thermique entre pièces voisines, c'est-à-dire que toutes les pièces peuvent être considérées comme mutuellement indépendantes, caractérisées par résistance thermique globale équivalente  $R^{eq}$ . L'équation (13) devient alors :

$$\rho.c.V \frac{dT^{int}}{dt} = \frac{1}{R^{eq}} [T^{ext}(t) - T^{int}(t)] + Q(dt) + q_1 + q_2 \dots \quad (14)$$

Ce modèle est complexe et difficile à exploiter en raison de plusieurs incertitudes en particulier celles correspondant aux propriétés des matériaux (mur, plafond, etc), aux

conditions météorologiques extérieures, aux effets de rayonnement, à la lumière ambiante, aux caractéristiques des équipements, etc...

Pendant la période d'inoccupation, tous les apports thermiques des personnes et des appareils sont négligés, donc  $q_1, q_2, \dots = 0$ .

L'équation (14) peut alors être écrite comme :

$$\rho.c.V \frac{dT^{\text{int}}}{dt} = \frac{1}{R^{\text{eq}}} [T^{\text{ext}}(t) - T^{\text{int}}(t)] + Q(dt)$$

$$A \frac{T^{\text{int}}(t + dt) - T^{\text{int}}(t)}{dt} = \frac{1}{R^{\text{eq}}} [T^{\text{ext}}(t) - T^{\text{int}}(t)] + Q(dt) \quad (15)$$

Avec  $p.c.V = A$

Si l'on considère que :

$$\begin{aligned} [T] &= T^{\text{int}}(t + dt) - T^{\text{int}}(t) \\ [T'] &= T^{\text{ext}}(t) - T^{\text{int}}(t) \\ [Q] &= Q(dt) \end{aligned} ,$$

$$B = \frac{1}{R^{\text{eq}}}$$

L'équation (12) devient alors :

$$\frac{A[T]}{dt} = [T']B + [Q] \quad (16)$$

L'équation (16) décrit l'évolution de la température intérieure en fonction de la température extérieure et de la puissance fournie. D'après cette équation (16), on constate que si l'on connaît les valeurs de  $[T], [T'], [Q]$  à différents instants, on peut évidemment déterminer les valeurs de  $A$  et  $B$ . Or ces valeurs de  $[T], [T'], [Q]$  sont mesurées par le réseau de capteurs de température et de puissance. Par conséquent, les valeurs de  $B$  et  $A$  sont également calculables.

$$A = \frac{dt(Q_{i+dt} T'_i - Q_i T'_{i+dt})}{T'_i T'_{i+dt} - T_i T'_{i+dt}}$$

$$B = \frac{Q_i T'_{i+dt} - Q_{i+dt} T'_i}{T'_{i+dt} T'_i - T_i T'_{i+dt}} \quad (17)$$

Avec:

- $T_i$  et  $T_{i+dt}$  les valeurs de  $[T]$  aux instants  $i$  et  $i + dt$ ,
- $T'_i$  et  $T'_{i+dt}$  les valeurs de  $[T']$  aux instants  $i$  et  $i + dt$ ,
- $Q_i$  et  $Q_{i+dt}$  les chaleurs produites par les radiateurs pendant une durée  $dt$  à partir de l'instant  $i$ .

Évidemment, une fois déterminée le paramètre  $A$  et la variable  $B$ , on peut estimer la durée de relance liée à la puissance maximale autorisée.

## **5.4 CONCLUSIONS**

Dans les secteurs résidentiel et tertiaire, l'innovation technique a été focalisée principalement sur l'isolation des habitats neuf et ancien, l'efficacité des chaudières et la gestion des radiateurs, ou encore le changement des moyens de production de chaleur et d'eau chaude sanitaire. Les meilleurs rendements des appareils électroménagers et des modes d'éclairage sont aussi à prendre en compte.

Dans ce chapitre, un système de gestion en temps réel applicable au secteur résidentiel a été présenté. Une régulation thermique est proposée, basée sur l'utilisation d'un réseau de capteurs sans fil et d'un mécanisme d'adaptation. Les résultats expérimentaux montrent que ce type de régulateur thermique permet de réduire efficacement la consommation de pointe tout en assurant le confort thermique. La proposition de solution en temps réel a été développée sur un prototype. Elle peut être appliquée à un groupe de charges ou de bâtiments afin de satisfaire les contraintes d'énergie et réduire les pics de consommation. Cette méthode ouvre des perspectives intéressantes pour la gestion des pics de consommation dans un projet de smart-grid.

# Chapitre 6

## Application à la gestion en temps réel des cuisinières

---

### 6.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre 4, nous avons présenté le principe d'un système de gestion en temps réel des charges appliqué au secteur du bâtiment. Nous avons aussi exposé de nouvelles méthodes intéressantes pour la gestion des charges, en particulier adaptées aux contraintes de gestion de temps réel. Dans le chapitre 5 nous avons présenté la mise en œuvre et les résultats d'un prototype destiné à la gestion des charges de chauffage électrique. Ce chapitre concerne sur une application de gestion des cuisinières en temps réel en utilisant la méthode proposée.

Nous aborderons dans ce chapitre la conception de cette application. Ensuite, nous présenterons quelques résultats expérimentaux correspondant à la méthode proposée.

## **6.2 DESCRIPTION DU SYSTEME DE PILOTAGE DES CUSINIÈRES**

### **6.2.1 OBJECTIFS**

Parmi les charges résidentielles, les cuisinières électriques représentent une consommation très importante. De plus, la durée d'utilisation des cuisinières électriques coïncide généralement avec la période de pointe. Cette consommation d'énergie électrique en période de point peut entraîner des risques de congestion ou des blackouts sur le réseau. De plus, l'énergie électrique produite en période de pointe est en général très chère et plus polluante qu'en période normale. C'est pourquoi contribuer à la limitation des pics de consommation par la gestion des cuisinières est une piste très prometteuse dans le contexte de smart-grid.

Nous avons montré dans le chapitre 4 sur la base de résultats expérimentaux (voir la partie (4.4.3.2 du chapitre 4) que la méthode proposée pour des cuisinières nous permet de diminuer leur puissance appelée instantanée et leur énergie consommée. Dans cette partie, nous développons un module (application) de gestion des cuisinières qui peut être intégré dans le système global de gestion du bâtiment. Cette application peut gérer des cuisinières via la communication sans fil de manière automatique en prenant en compte les opérations d'autres charges dans le bâtiment. L'objectif principal de la méthode proposée dans cette partie est la limitation des pics de consommation par la gestion adaptative des cuisinières électriques. La méthode proposée permet d'agir rapidement et donc en temps réel. La conception doit prendre en compte les besoins suivants :

- facilité d'installation dans une maison
- capacité à coopérer avec les modules de contrôle des autres équipements
- réduction de la puissance appelée des cuisinières en fonction du niveau de dépassement de la puissance admissible.
- maintenir la puissance moyenne totale des appareils à la valeur maximale (c'est à dire égale à la puissance du contrat) pour assurer le meilleur confort.
- économie de l'énergie consommée.

## 6.2.2 CONCEPTION DU PILOTAGE EN TEMPS REEL DES CUISINIÈRES

### 6.2.2.1 Conception du système intégré aux cuisinières

Le matériel du système de gestion est intégré aux cuisinières. Ce système est lié au système global via la communication sans-fil pour recevoir des signaux de pilotage. La conception pour une cuisinière est similaire à celle du radiateur adaptatif. Chaque cuisinière est équipée d'un actionneur et d'un module de communication avec un microcontrôleur, formant un circuit électrique contrôlable.

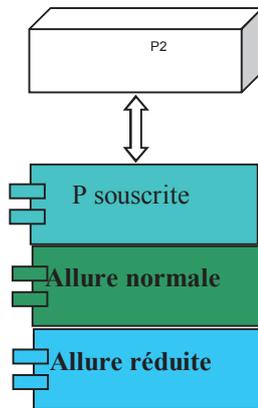


Figure 6-1 : Structure d'un système de pilotage des cuisinières

- Cuisinière : une cuisinière électrique (modèle commercial disponible sur le marché),
- Interface : un actionneur contrôlable qui nous permet de mettre en marche/arrêt la cuisinière
- Communication : établit la liaison entre la cuisinière et l'unité de contrôle
- Microcontrôleur : Contrôle le fonctionnement de la cuisinière. A la différence d'un radiateur adaptatif, ce microcontrôleur prend en compte non seulement le rôle de transfert des ordres marche/arrêt à partir de l'unité de contrôle, mais il sert également de régulateur local de la cuisinière afin d'assurer le fonctionnement selon le mode de délestage envoyé par l'unité de contrôle.

Grâce à la liaison de communication sans fil et au circuit électrique contrôlable intégré, les cuisinières peuvent participer au système de gestion du bâtiment. Chaque cuisinière comporte désormais deux types de régulateurs :

- régulateur local : il est composé de deux parties. La première est son propre régulateur qui est représenté sous la forme d'un thermostat avec un bouton de réglage pour maintenir la température de la plaque ou du four à la valeur choisie. La deuxième est

le circuit électrique contrôlable intégré, qui exploite la méthode proposée en régulant la cuisinière avec le rapport cyclique  $\alpha$  envoyé par l'unité de contrôle central.

- régulateur central : il reçoit toutes les informations provenant des autres équipements, la valeur de la puissance consommée en temps réel et attribue les ordres aux régulateurs locaux des cuisinières. Ces ordres sont des niveaux de réduction de puissance, en fonction du rapport cyclique  $\alpha$ .

#### **6.2.2.2 Fonctionnement du système**

Avec la conception proposée, chaque cuisinière peut fonctionner suivant deux modes d'opération, soit comme un régulateur classique, soit comme un régulateur adaptatif en fonction du rapport cyclique  $\alpha$ . Le système de gestion global du bâtiment affecte le mode de fonctionnement selon la valeur de la puissance mesurée par le capteur de puissance :

- Fonctionnement normal : Chaque cuisinière fonctionne comme une cuisinière classique avec son propre thermostat (régulateur classique)
- Fonctionnement adaptatif : Lorsque le système de gestion du bâtiment détecte un dépassement de la puissance autorisée, il bascule les cuisinières en mode de régulation adaptative en utilisant la méthode de délestage intelligent proposée.

Nous nous intéressons maintenant au mode adaptatif qui permet de gérer automatiquement les  $\alpha$  de chaque cuisinière.

Notre méthode de gestion est basée sur une définition de priorité des appareils qui doit être prédéfinie par l'utilisateur. On suppose que la priorité des cuisinières est plus élevée que celle de radiateurs. Lorsqu'il y a un dépassement de la puissance autorisée, le système va basculer tout d'abord les radiateurs en mode de régulation adaptative (présenté dans chapitre 5) afin de diminuer la puissance appelée. Si la puissance appelée reste malgré tout au-dessus du seuil de puissance admissible, le régulateur central du système bascule les cuisinières en mode de fonctionnement intelligent (adaptatif) où  $\alpha$  devient variable.

La Figure 6-2 ci-dessous présente la conception du nouveau système de régulation proposé :

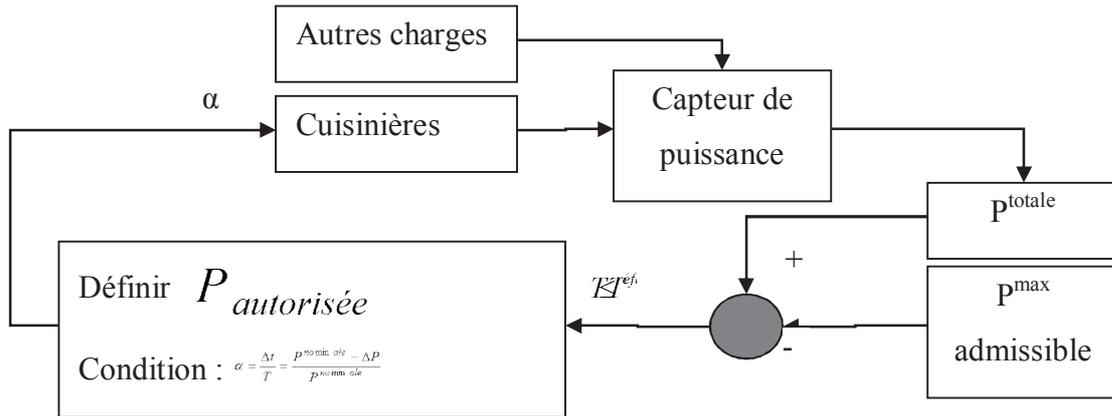


Figure 6-2 : Principe de la méthode de gestion adaptative des cuisinières

Au niveau de la gestion centrale, le régulateur calcule la valeur du rapport cyclique  $\alpha$  selon le dépassement instantané de la puissance appelée ( $\Delta P$ ). Cette valeur est ensuite envoyée aux régulateurs locaux des cuisinières. Ce rapport cyclique  $\alpha$  des cuisinières peut être déterminé automatiquement en utilisant l'équation ci-dessus :

$$\Rightarrow \alpha = \frac{\Delta t}{T} = \frac{P^{totale}}{P^{no\ min\ ale}} = \frac{P^{no\ min\ ale} - \Delta P}{P^{no\ min\ ale}} < 1 \quad (1)$$

Avec :

- $\Delta t$ : durée du fonctionnement d'une cuisinière (ou radiateur) pendant un cycle de contrôle
- $T$ : intervalle de temps, ou durée d'un cycle de contrôle,  $T < T^{référence}$
- $T^{référence}$ : la fourniture d'électricité ne contrôle pas la puissance instantanée appelée mais l'énergie moyenne consommée sur une période de référence, de quelques secondes à quelques minutes, en fonction du type de compteur électrique.
- $P^{moy}$  (ou bien  $P^{totale}$ ): Puissance totale demandée par des cuisinières
- $P^{nominale}$ : Puissance totale nominale des cuisinières
- $W$ : énergie consommée pendant une période  $T$
- $\Delta P$ : Réduction de puissance

Au niveau de chaque cuisinière particulière, le fonctionnement est contrôlé en fonction de la valeur de  $\alpha$  obtenue. Le microcontrôleur intégré dans la cuisinière calcule la valeur de  $\Delta t$  et ensuite commande l'ouverture du circuit (actionneur de contrôle) seulement pendant une durée  $\Delta t$  correspondant à chaque intervalle de temps ( $T$ ),

Par exemple : on suppose que

- La puissance nominale des cuisinières  $P^{nominale} = 2500W$ .

- $T = 60 \text{ ms}$
- Le système demande aux cuisinières de réduire la puissance appelée :  $\Delta P = 500\text{W}$

$$\alpha = \frac{P^{nominale} - \Delta P}{P^{nominale}} = \frac{2500 - 500}{2500}$$

$$\alpha = \frac{\Delta t}{T} = \frac{\Delta t}{60}$$

$$\Rightarrow \Delta t = 48\text{ms}$$

Pour chaque cycle de contrôle  $T= 60\text{ms}$ , les cuisinières sont mises en marche pendant 48ms et arrêtées pendant 12ms. Par conséquent, la puissance appelée des cuisinières est réduite de 500W. L'énergie économisée par les cuisinières dans ce cas pendant une heure est égale à 500Wh (si la cuisinière fonctionne pendant une heure).

### 6.3 RESULTATS OBTENUS

Pour valider cette méthode de gestion, nous avons développé une application qui considère une cuisinière et d'autres appareils électriques. On suppose que cette application comporte les charges dont la puissance nominale est présentée dans le tableau (Tableau 6-1):

Nom	Puissance (W)
Cuisinière électrique	850W
Micro-onde	1200 W
radiateur	1800W
Autres (éclairage)	85W
<b>Puissance totale</b>	<b>3935W</b>
<b>Puissance autorisée</b>	<b>3300W</b>

Tableau 6-1: Usages électriques (puissances nominales)

La figure ci-dessous représente l'installation matérielle de cette application pour la gestion en temps réel des cuisinières, tenant compte d'autres appareils électriques.

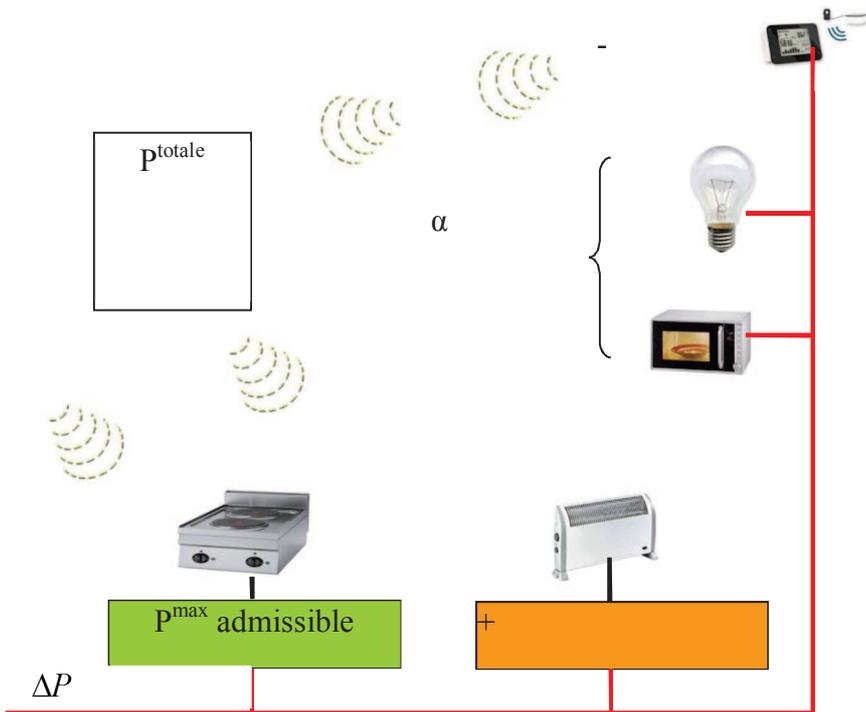


Figure 6-3: Schéma du système de gestion avec la cuisinière intégrée

Nous avons mesuré la puissance totale du système en l'absence de gestion et utilisant la méthode de gestion adaptative proposée. Les résultats expérimentaux sont présentés dans les parties suivantes.

### 6.3.1 CAS SANS GESTION

La Figure 6-4 6-4 présente la puissance totale appelée du système ainsi que les instants de déclenchement/arrêt des appareils électriques. Cette figure montre qu'en l'absence de notre méthode de gestion de charge, la puissance totale appelée peut atteindre 3935 W, soit un dépassement de puissance  $\Delta P=600W$ . La puissance demandée instantanée peut atteindre la somme des puissances nominales de tous les appareils raccordés (3935 W).

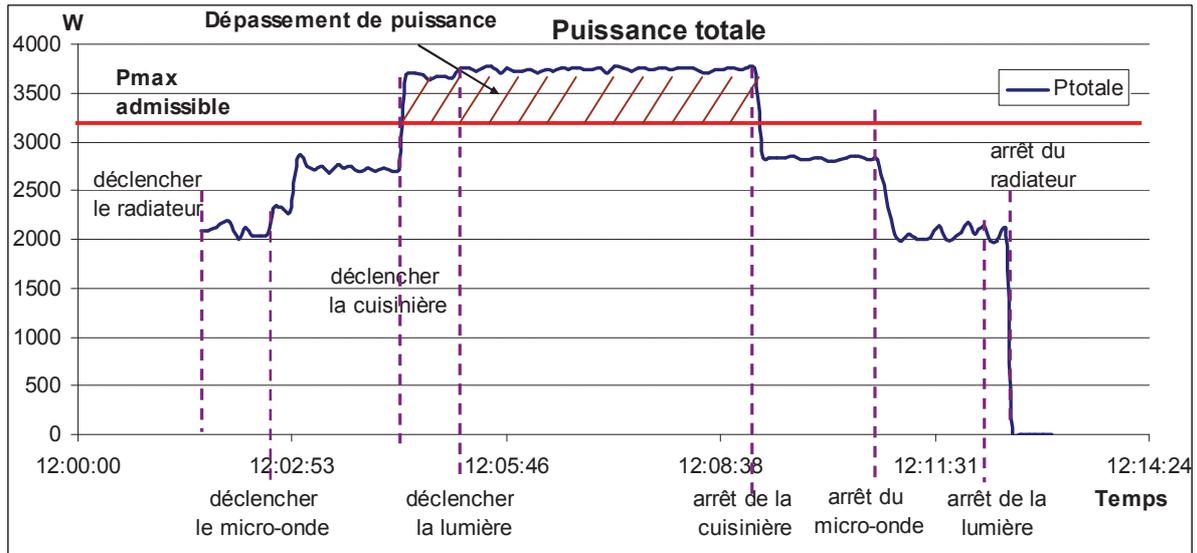


Figure 6-4: Puissance totale consommée par le système sans gestion

Le fonctionnement de la cuisinière est présenté sur la Figure 6-5. Lorsqu'elle est déclenchée, sa puissance appelée instantanée est toujours égale à sa valeur nominale.

Un dépassement de puissance admissible apparaît au moment du déclenchement de la cuisinière pendant une durée approximative de  $\Delta t = 6$  minutes (durée de fonctionnement de la cuisinière). On peut calculer l'énergie de dépassement correspondante :

$$\Delta W = \Delta P \frac{\Delta t}{3600} = 600 \frac{6 \times 60}{3600} = 60 Wh$$

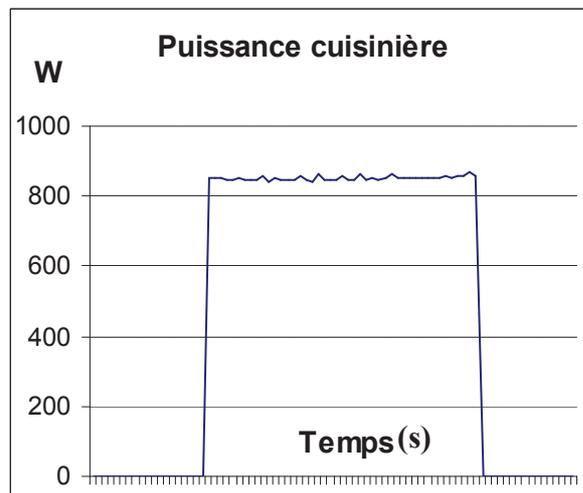


Figure 6-5: Puissance consommée par la cuisinière sans gestion

### 6.3.2 CAS AVEC GESTION ADAPTATIVE

La Figure 6-6 présente la puissance totale appelée lorsqu'on applique la méthode de gestion proposée. On constate qu'avec cette méthode de régulation, la puissance maximale

totale peut être ramenée de 3935W à 3200W et qu'il n'y a plus de dépassement de la puissance maximale autorisée.

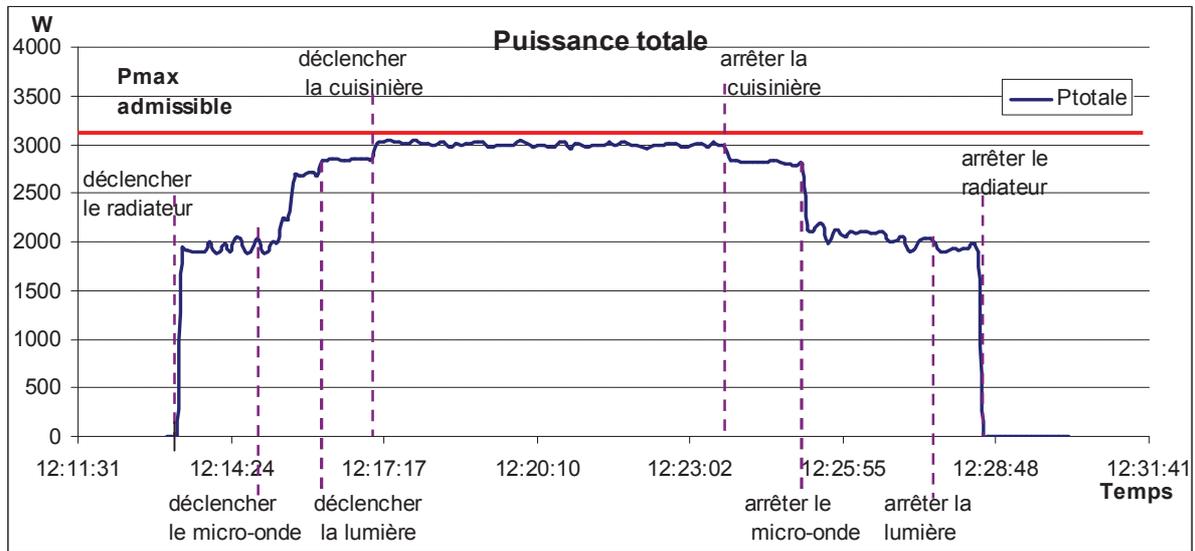


Figure 6-6: Puissance totale consommée par le système avec gestion adaptative

Le fonctionnement de la cuisinière est présenté sur la Figure 6-7. Lorsqu'elle est déclenchée, sa puissance appelée instantanée est diminuée au niveau désiré pour éviter le dépassement de puissance instantanée totale.

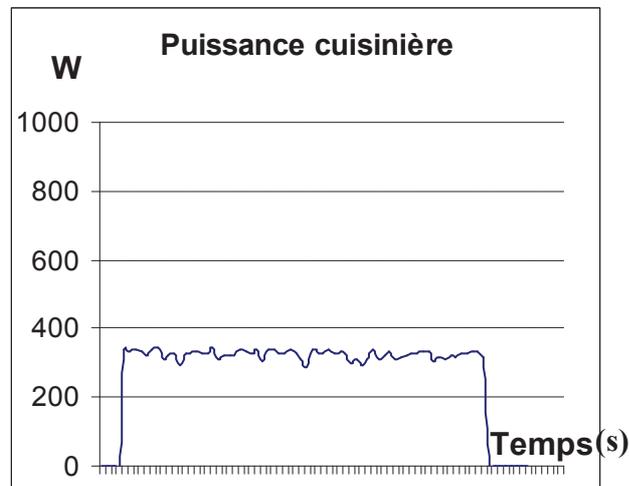


Figure 6-7: Puissance consommée par la cuisinière avec gestion

Il n'y donc a pas de dépassement de puissance et le gain obtenu grâce à cette méthode de gestion est lié à la limitation des pics de consommation, ce qui permet de diminuer la puissance souscrite et par voie de conséquence la facture électrique.

Évidemment, en contrepartie de la puissance réduite, la cuisinière doit fonctionner pendant une période plus longue, ce qui introduit une contrainte qui n'est pas prise en compte explicitement

## **6.4 CONCLUSIONS**

Dans ce chapitre on a présente une application développée pour la gestion intelligente des cuisinières électriques. La méthode proposée présente des avantages importants par rapport aux systèmes de gestion électrique actuels qui ne peuvent pas contrôler de manière automatique et intelligente des cuisinières, ou les contrôlent en tout ou rien.

La méthode proposée permet de contrôler en temps réel des cuisinières en tenant compte du comportement réel des autres charges dans le bâtiment. Elle utilise la stratégie de délestage mais de manière douce, optimisée et intelligente qui permet de diminuer automatiquement la puissance appelée totale au niveau désiré sans intervention de l'utilisateur (en changeant la position du bouton de réglage par exemple).

Pour des utilisateurs particuliers, l'intérêt de cette méthode est de diminuer la puissance souscrite (réduction du coût d'abonnement) et de réduire la facture globale de consommation.

Les méthodes proposées permettent aux clients de participer aux services système (niveau réseau électrique) en utilisant une gestion intelligente des charges (« délestage en douceur ») pour éviter les pics de consommation, gérer les congestions, prévenir les blackouts ou améliorer la stabilité du réseau.

Les principes proposés peuvent être appliqués non seulement aux cuisinières mais aussi à d'autres groupes de charge dans le bâtiment, comme les chauffe-eau ou les radiateurs électriques sans régulation (ou régulés par un thermostat à bilame métallique).

# Chapitre 7

## Conclusions et perspectives

---

En analysant les problèmes liés à la consommation énergétique et à son impact environnemental, nous avons montré que la gestion optimale des charges du bâtiment, de manière active et intelligente, présente un fort enjeu, sachant que ces préoccupations majeures sont partagées par tous les acteurs électriques (gestionnaires du réseau, fournisseurs, commercialisateurs et consommateurs).

Les travaux que nous avons présentés dans ce mémoire concernent les problèmes de gestion intelligente de l'énergie électrique dans les bâtiments. Nous avons recherché des solutions relatives à la gestion automatique de l'énergie électrique en vue de réduire les pics de consommation en prenant, en compte le du confort des occupants, les coûts économiques ainsi que l'impact sur l'environnement.

Après avoir présenté un état de l'art des stratégies de gestion des charges dans le bâtiment, nous les avons classées selon deux grandes familles (indirectes et directes) en analysant leurs différents avantages et limitations. Suite à cette étude, nos recherches se sont orientées vers des méthodes de gestion intelligente en temps réel, reposant sur la mise en œuvre de réseaux de capteurs sans fil. Nous avons ainsi proposé des méthodes innovantes qui permettent de surmonter efficacement les limitations des systèmes actuels.

Ces orientations étant définies, nous avons tout d'abord présenté la conception d'un système de gestion des charges en temps réel, associant la technologie de communication ZigBee à des réseaux de capteurs et actionneurs sans fil qui permettent de mettre en œuvre et d'exploiter les méthodes proposées. Nous avons développé un protocole de communication bidirectionnel qui permet d'échanger diverses informations, telles que des consignes, le comportement ou l'état des appareils électriques. L'architecture du système a été conçue de manière à faciliter son installation dans une maison en tenant compte des contraintes liées à la flexibilité d'extension du réseau et à l'intégration aisée de nouvelles méthodes de gestion

économiques en énergie. Puis, nous avons présenté la conception et la mise en œuvre d'un système de gestion globale qui contient des modules de gestion affectés à des appareils électriques différents. Tous les modules de gestion et les appareils concernés partagent le même système de communication, ce qui permet d'établir facilement un lien entre eux. <>

Nous avons ensuite porté notre effort sur les méthodes de gestion en temps réel avec la prise en compte de trois facteurs : la minimisation des pics de consommation, le maintien du confort lié à la température intérieure et la minimisation du coût lié à la consommation globale. Nous avons montré l'influence significative de la puissance instantanée appelée par une maison sur ces trois facteurs représentés par des équations différentielles.

A partir des études des principes de fonctionnement des appareils électriques classiques, nous avons proposé deux méthodes originales, qui permettent de modifier automatiquement le fonctionnement des appareils électriques classiques :

- La première méthode est applicable à la gestion du chauffage et de la climatisation. Elle est basée sur l'utilisation d'un réseau de capteurs sans fil et d'un système de régulation adaptatif. Cette méthode a été développée sur un appartement en utilisant notre conception du système de gestion.
- La deuxième méthode est appliquée à la gestion des cuisinières et groupes de charge comme les chauffe-eau, et les radiateurs électriques sans régulation (ou régulés par un bilame). Elle est basée sur une stratégie de délestage intelligent qui permet de diminuer automatiquement la puissance instantanée des cuisinières en fonction de la réduction de puissance souhaitée.

Des mesures réalisées sur un appartement expérimental nous ont permis de montrer l'intérêt de ces méthodes innovatrices, ces deux méthodes ayant confirmé leur intérêt pour la diminution des pics de consommation et la réduction des coûts en diminuant la consommation durant les périodes où les prix de l'énergie sont les plus élevés.

Notre système, développé avec les méthodes de gestion proposées ouvre de nouvelles perspectives aux fournisseurs et aux gestionnaires du réseau qui auraient désormais un moyen d'intervenir sur la consommation de leurs clients. En effet le principal avantage de ces méthodes est que l'on peut demander aux clients de réduire la puissance appelée et la

consommation jusqu'à certains niveaux tout en assurant le confort requis par l'utilisateur. La réduction des pics de consommation pourrait se révéler, en cas d'urgence, une solution très efficace et pour éviter les blackouts sur le réseau. Ceci permettrait d'améliorer la stabilité du réseau (stabilité de tension et stabilité transitoire) et de contribuer aux réglages de tension et de fréquence du réseau. Elles pourraient aussi permettre aux fournisseurs d'optimiser leur production, en réduisant leurs coûts et leurs émissions de gaz à effet de serre. Dans le contexte d'ouverture du marché de l'énergie et d'évolution de la distribution électrique, toutes ces possibilités de modulation de la consommation peuvent être considérées comme l'annonce de progrès significatif.

Avec les développements basés sur les micro et nano technologies, la miniaturisation des capteurs et des dispositifs électroniques est cours de réalisation. Ceci permettra de disposer de capteurs à basse consommation qui pourront être alimentés par des modules de récupération énergie. Alors un système de gestion des charges dans le bâtiment à base de réseaux sans fils et de dispositifs autonomes (capteurs et actionneur) pourra fonctionner sans interactions avec les utilisateurs.

Les méthodes proposées pour la gestion en temps réel des charges sont très efficaces et il est possible de les développer pour une maison, ou un quartier. Lorsqu'elles sont étendues à un quartier par exemple, le gestionnaire du réseau peut les utiliser pour résoudre plus efficacement les problèmes techniques rencontrés par le réseau de distribution d'énergie. Il paraît donc intéressant d'étudier le déploiement des méthodes en tenant compte de l'architecture du système, des communications à longue distance, etc.

Nos travaux appliqués aussi à la gestion des consommations d'énergie dans le bâtiment ouvrent aussi des perspectives intéressantes contribuant à la mise en œuvre de la maîtrise de la demande énergétique dans les domaines résidentiels et tertiaires, qui sont les plus grands consommateurs d'énergie électrique.

Ce type de travail s'inscrit parfaitement dans le projet smart-grid et la gestion intelligente de charge proposée est une fonction essentielle et indispensable pour ce projet.

De plus, aujourd'hui nous assistons au développement rapide des sources d'énergie renouvelables. On peut donc envisager une extension des méthodes de gestion en temps réel proposées dans l'optique d'un coopérant avec des ressources électriques complémentaires ou des moyens de stockage électrique.

La nouveauté de ces solutions ouvre donc de multiples perspectives de recherches dans des domaines très différents.

---

## Références

- [1]. Ky Le, *Gestion optimale des consommations d'énergie dans les bâtiments*, Thèse de l'Ecole Doctorale « Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications, Signal», 2008, Institut Polytechnique de Grenoble et Université de Danang.
- [2]. Dgemp, *L'Electricité en France en 2007 : une analyse statistique*, 2008, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie.
- [3]. L Pérez-Lombard, J Ortiz, and C Pout, *A review on buildings energy consumption information*, *Energy & Buildings*, 2008, **40**(3), p. 394-398.
- [4]. Soes, *CO2 et énergie France et monde - édition 2009*, 2009, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, p. 23.
- [5]. Cec, *Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings*, *Official Journal of the European Communities* 4 (1) L1/65–71, 2003.
- [6]. IEA, *Key world energy statistics*, 2009, International Energy Agency
- [7]. *Le Protocole de Kyoto*. 2008, Available from: [http://unfccc.int/portal\\_francoophone/essential\\_background/kyoto\\_protocol/items/3274.php](http://unfccc.int/portal_francoophone/essential_background/kyoto_protocol/items/3274.php).
- [8]. G Naudet and P Reuss, *Energie, électricité et nucléaire*, 2008, EDP Sciences, 129.
- [9]. RTE, *La consommation en temps réel*, 2010, RTE.
- [10]. Meedm, *Conjoncture énergétique Décembre 2009*, 2010, Ministère de l'Écologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer, p. 6.
- [11]. Insee. *Consommation d'énergie corrigée des variations climatiques*. Available from: <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/cons-corr-var-climatiques.htm>.
- [12]. Meedm, *L'électricité en France : La consommation finale d'électricité par secteur de 1973 à 2008*, 2009, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer.
- [13]. IEA, *Energy Technology Perspectives 2010, Scenarios & Stratégies to 2050*, 2010, International Energy Agency

- 
- [14]. Meedm, *Les consommations d'énergie par usage, La consommation d'électricité en 2007*, 2007, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer.
- [15]. Soes, *Parcs du secteur résidentiel : Parc des chauffages centraux des résidences principales, en milieu d'année jusqu'en 2007*, 2007, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer.
- [16]. Soes, *Le mode de chauffage des maisons individuelles*, 2009, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer
- [17]. O Sidler, *Connaissance et maîtrise des consommations des usages de l'électricité dans le secteur résidentiel*, ENERTECH, 2009a.
- [18]. O Sidler, *Connaissance et maîtrise des consommations des usages de l'électricité dans le secteur résidentiel*, ENERTECH, 2009b, p. 92.
- [19]. RTE, *Le bilan électrique français 2009*, 2009, Réseau de Transport d'électricité.
- [20]. B.Bourzai, *Politique énergétique européenne*, Sénat, Session ordinaire de 2009-2010, 12-2009, p. 31.
- [21]. M Breton, et al., *Monitoring and Control Systems to Manage Energy Use in US Homes*, International Energy Efficiency In Domestic Appliances & Lighting Conference, June 2006, London, United Kingdom.
- [22]. K. Le and T. Tran-Quoc. *Peak load reduction by using air-conditioning regulators*, The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON2008, Ajaccio, France, 2008.
- [23]. K Le, et al., *Peak load reduction by using heating regulators*, Technical impacts of small distributed generation units on LV networks, CIRED, Vienna, Austria, 2007, p. 21-24.
- [24]. H.K Grover and M.W Pretorius. *The technology assessment of demand side bidding within the South African context*, AFRICON 2007, Windhoek, Namibia.
- [25]. J Vasconcelos, *Survey of regulatory and technological developments concerning smart metering in the European Union electricity market*, 2008/01; Florence School of Regulation.
- [26]. P. Jazayeri, et al., *A Survey of Load Control Programs for Price and System Stability*, IEEE Transactions on Power Systems, 2005, **20**(3), p. 1504-1509.
- [27]. D. J. Lawrence and B. F. Neenan. *The status of demand response in New York*, Power Engineering Society General Meeting 2003, July 2003, Toronto, Canada.
- [28]. IEA, *The Power To Choose-Demand Response in Liberalised Electricity Markets*, International Energy Agency Editor, 2003.

- 
- [29]. F Ygge, H Akkermans, and A Andersson. *A multi-commodity market approach to power load management*, 1998, Citeseer.
- [30]. F Ygge, *Market-oriented programming and its application to power load management*, 1998, Lund University: PHD Thesis.
- [31]. N. F. Hubele and C. S. Cheng, *Identification of seasonal short-term load forecasting models using statistical decision functions*, IEEE Transactions on Power Systems, 1990, **5**(1), p. 40-45.
- [32]. C. N. Kurucz, D. Brandt, and S. Sim, *A linear programming model for reducing system peak through customer load control programs*, IEEE Transactions on Power Systems, 1996, **11**(4), p. 1817-1824.
- [33]. M. Bojic, N. Trifunovic, and S. I. Gustafsson, *Mixed 0-1 sequential linear programming optimization of heat distribution in a district-heating system*, Energy and Buildings, 2000, **32**(3), p. 309-317.
- [34]. D. Karlsson and D. J. Hill, *Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems*, IEEE Transactions on Power Systems, 1994, **9**(1), p. 157-166.
- [35]. N Mendes, et al. *A Matlab-based simulation tool for building thermal performance analysis*, Proc. of the Eighth International Conference on Building Performance Simulation (IBPSA'03), 2003, Eindhoven The Netherlands.
- [36]. Z El Khoury, et al. *A multizone building model for MATLAB/SIMULINK environment*, The 9th IBPSA Conference (Building Simulation 2005), 2005, Montreal, Canada.
- [37]. Mr Brambley, et al., *Advanced sensors and controls for building applications: Market assessment and potential R&D pathways*, Prepared by Pacific Northwest National Laboratory for the US Department of Energy, PNNL Report Number PNNL-15149, April. Available at: [http://www.eere.energy.gov/buildings/tech/controls/pdfs/pnnl-15149\\_market\\_assessment.pdf](http://www.eere.energy.gov/buildings/tech/controls/pdfs/pnnl-15149_market_assessment.pdf), 2005.
- [38]. P. Oksa, et al., *Kilavi platform for wireless building automation*, Energy and Buildings, 2008, **40**(9), p. 1721-1730.
- [39]. F. L. Zucatto, et al. *ZigBee for building control wireless sensor networks*, Microwave and Optoelectronics Conference, IMOC 2007. SBMO/IEEE MTT-S International, Salvador, Brazil
- [40]. M. Bayart, et al., *Capteurs et actionneurs intelligents*, Techniques de l'ingénieur, 2005, **Vol S2**(SS7520).
- [41]. P. Davidsson and M. Boman, *Distributed monitoring and control of office buildings by embedded agents*, Information Sciences, 2005, **171**(4), p. 293-307.
- [42]. F Ygge, et al. *The HOMEBOTS System and Field Test: A Multi-Commodity Market for Predictive Power Load Management*, PAAM 99, 1999, Citeseer.

- 
- [43]. EDF. *Les prix de l'électricité*. mise à jour au 15/08/2010, Available from: <http://bleuciel.edf.com/abonnement-et-contrat/les-prix/les-prix-de-l-electricite/tarif-bleu-47798.html#acc52401>.
- [44]. The European Parliament And Council, *Directive 2003/54/EC concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 96/92/EC*, 26 June 2003.
- [45]. J. Torriti, M.G. Hassan, and M. Leach, *Demand response experience in Europe: Policies, programmes and implementation*, Energy, 2010, **35**(4), p. 1575-1583.
- [46]. F. C. Schweppe, B. Daryanian, and R. D. Tabors, *Algorithms for a spot price responding residential load controller*, IEEE Transactions on Power Systems, 1989, **4**(2), p. 507-516.
- [47]. D. Ju-Long, *Control problems of grey systems*, Systems & Control Letters, 1982, **1**(5), p. 288-294.
- [48]. A. B. Philpott and E. Pettersen, *Optimizing demand-side bids in day-ahead electricity markets*, IEEE Transactions on Power Systems, 2006, **21**(2), p. 488-498.
- [49]. H. K. Grover and M. W. Pretorius. *The technology assessment of demand side bidding within the South African context*, AFRICON 2007, Windhoek, Namibia.
- [50]. G. Strbac, Ed Farmer, and BJ Cory, *Framework for the incorporation of demand-side in a competitive electricity market*, IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 1996, **143**, p. 232-237.
- [51]. A.B.Philpott and E.Pettersen, *Optimizing demand-side bids in day-ahead electricity markets*, IEEE Transactions on Power Systems, 2006.
- [52]. H. Wang, J. Cai, and W. Lee. *Load participation in the ERCOT market*, Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium, Ames, America, 2005.
- [53]. K. W. Cheung. *Ancillary Service Market design and implementation in North America: From theory to practice*, DRPT 2008. Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing, China, April 2008.
- [54]. Red Electrica. *Electricity demand management-Interruptibility service*. 2010, Available from: [http://www.ree.es/ingles/operacion/servicio\\_interrumpibilidad.asp](http://www.ree.es/ingles/operacion/servicio_interrumpibilidad.asp).
- [55]. Red Eléctrica De Espana, *ITC Order 2370/2007*, 2007.
- [56]. J. H. Doudna. *Overview of California ISO summer 2000 demand response programs*, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, Columbus, Ohio, USA.

- 
- [57]. A. H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, *Optimal Residential Load Control With Price Prediction in Real-Time Electricity Pricing Environments*, IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, **PP**(99), p. 1-1.
- [58]. T. Tran-Quoc, et al. *Air conditioner direct load control in distribution networks*, IEEE PowerTech, Bucharest, Romania,. 2009
- [59]. W. P. Luan, M. R. Irving, and J. S. Daniel, *Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks*, IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution -, 2002, **149**(2), p. 145-151.
- [60]. T. T. Chow, Apple L. S. Chan, and C. L. Song, *Building-mix optimization in district cooling system implementation*, Applied Energy, 2004, **77**(1), p. 1-13.
- [61]. N. Nassif, S. Kajl, and R. Sabourin. *Evolutionary algorithms for multi-objective optimization in HVAC system control strategy*, NAFIPS '04. IEEE Annual Meeting of the North American Fuzzy Information, June 2004, Banff, Alberta, Canada,.
- [62]. K. H. Ng and G. B. Sheble, *Direct load control-A profit-based load management using linear programming*, IEEE Transactions on Power Systems,., 1998, **13**(2), p. 688-694.
- [63]. M Wetter and E Polak, *Building design optimization using a convergent pattern search algorithm with adaptive precision simulations*, Energy and Buildings, 2005, **37**(6), p. 603-612.
- [64]. N Mendes, et al. *A Matlab-based simulation tool for building thermal performance analysis*, Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, August 2003.
- [65]. Z El Khoury, et al., *A multizone building model for MATLAB/SIMULINK environment*, The 9th IBPSA Conference (Building Simulation 2005), August 2005, Montréal, Canada, .
- [66]. F Ygge and H Akkermans. *Power load management as a computational market*, Proceedings of the 2nd International Conference on Multi Agents Systems ICMAS 96, Kyoto, Japan 1996.
- [67]. A Gomes, Ch Antunes, and Ag Martins, *A multiple objective evolutionary approach for the design and selection of load control strategies*, IEEE Transactions on Power Systems, 2004, **19**(2), p. 1173-1180.
- [68]. N Mendes, Ghc Oliveira, and Hx De Araújo. *Building Thermal Performance Analysis by Using Matlab/Simulink “*, International Conference on Building Performance Simulation (IBPSA01), 2001, Rio de Janeiro, Brazil
- [69]. Pr Novak, N Mendes, and Ghc Oliveira, *Simulation of HVAC plants in 2 Brazilian cities unsing Matlab/Simulink*, Ninth International IBPSA Conference , August 2005, Montréal, Canada, .

- 
- [70]. Wikipédia. *Régulateur PID*. Available from: [http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gulateur\\_PID](http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gulateur_PID).
- [71]. G. Fraisse and J. Virgone, *Commande floue et thermique du bâtiment. Proposition d'une loi de chauffe adaptée à la régulation des bâtiments de type tertiaire à occupation discontinue* Fuzzy control and thermal properties of buildings: proposition of a heating law fitting the regulation of tertiary buildings with intermittence, *Revue Générale de Thermique*, 1996, **35**(414), p. 359-372.
- [72]. Gp Henze and M Krarti, *Predictive Optimal Control of Active and Passive Building Thermal Storage Inventory*, 2005, University Of Nebraska.
- [73]. A. Molina, et al. *Approach to multivariable predictive control applications in residential HVAC direct load control*, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, Washington, 16-20 July, 2000.
- [74]. Soliman Abdel-Hady Soliman and Ahmad M. Al-Kandari, *Dynamic Electric Load Forecasting*, Electrical Load Forecasting, 2010, Butterworth-Heinemann, Boston, p. 291-352.
- [75]. Soliman Abdel-Hady Soliman and Ahmad M. Al-Kandari, *Load Modeling for Short-Term Forecasting*, Electrical Load Forecasting, 2010, Butterworth-Heinemann, Boston, p. 79-97.
- [76]. Wikipédia. *Regression analysis*. Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Regression\\_analysis](http://en.wikipedia.org/wiki/Regression_analysis).
- [77]. John Hanke, *Forecasting in business schools: A follow-up survey*, International Journal of Forecasting, 1989, **5**(2), p. 259-262.
- [78]. A. D. Papalexopoulos and T. C. Hesterberg, *A regression-based approach to short-term system load forecasting*, IEEE Transactions on Power Systems,, 1990, **5**(4), p. 1535-1547.
- [79]. S. Thomas Ng, Martin Skitmore, and Keung Fai Wong, *Using genetic algorithms and linear regression analysis for private housing demand forecast*, Building and Environment, 2008, **43**(6), p. 1171-1184.
- [80]. S. Sp Pappas, et al., *Electricity demand loads modeling using AutoRegressive Moving Average (ARMA) models*, Energy, 2008, **33**(9), p. 1353-1360.
- [81]. M. A. Mcneil and V. E. Letschert, *Modeling diffusion of electrical appliances in the residential sector*, Energy and Buildings, 2010, **42**(6), p. 783-790.
- [82]. Wikipédia. *Time series*. Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Time\\_series](http://en.wikipedia.org/wiki/Time_series).
- [83]. D. Fay, et al., *24-h electrical load data--a sequential or partitioned time series*, Neurocomputing, 2003, **55**(3-4), p. 469-498.

- 
- [84]. Antti Sorjamaa, et al., *Methodology for long-term prediction of time series*, Neurocomputing, 2007, **70**(16-18), p. 2861-2869.
- [85]. H. Morita, et al., *Interval prediction of annual maximum demand using grey dynamic model*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1996, **18**(7), p. 409-413.
- [86]. Erdal Kayacan, Baris Ulutas, and Okay Kaynak, *Grey system theory-based models in time series prediction*, Expert Systems with Applications, 2010, **37**(2), p. 1784-1789.
- [87]. N. Amjady, *Short-term hourly load forecasting using time-series modeling with peak load estimation capability*, IEEE Transactions on Power Systems, 2001, **16**(4), p. 798-805.
- [88]. Liu Shu-Liang, Hu Zhi-Qiang, and Chi Xiu-Kai. *Power Load Forecasting Based on Neural Network and Time Series*, Wireless, WiCom '09. 5th International Conference on Communications, Networking and Mobile Computing, September, 2009, Beijing, China,.
- [89]. M. A. Abu-El-Magd and R. D. Findlay. *A new approach using artificial neural network and time series models for short term load forecasting*, IEEE. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE 2003 May 2003, Montréal, Canada .
- [90]. Moncef Krarti, *An Overview of Artificial Intelligence-Based Methods for Building Energy Systems*, Journal of Solar Energy Engineering, 2003, **125**(3), p. 331-342.
- [91]. J.Hopfield, *Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1982, **79**(8), p. 2554.
- [92]. Zhou Zhi-Hua and Xia Ying. *The application of artificial neural network in HVAC system*, Proceedings of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2005.
- [93]. S. A. Kalogirou, *Applications of artificial neural-networks for energy systems*, Applied Energy, 2000, **67**(1-2), p. 17-35.
- [94]. Hu Qinhua, et al. *Two ANN-Based Models for a Real MVAC System*, International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCom 2007, September 2007, Shanghai, China.
- [95]. R. Lamedica, et al., *A neural network based technique for short-term forecasting of anomalous load periods*, IEEE Transactions on Power Systems, 1996, **11**(4), p. 1749-1756.
- [96]. K. Hornik, M. Stinchcombe, and Halbert White, *Multilayer feedforward networks are universal approximators*, Neural Networks, 1989, **2**(5), p. 359-366.

- 
- [97]. E Srinivas and A Jain, *A Methodology for Short Term Load Forecasting Using Fuzzy Logic and Similarity*, The National Conference on Advances in Computational Intelligence Applications in Power, Control, Signal Processing and Telecommunications (NCACI-2009), Bhubaneswar, India, March 20-22, 2009.
- [98]. A. Azadeh, S. F. Ghaderi, and A. Gitiforouz. *Estimating Electricity Demand Function in Residential Sector by Fuzzy Regression*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Montreal, Canada, 2006.
- [99]. H.S.Hippert, C.E. Pedreira, and R.C. Souza, *Neural networks for short-term load forecasting: a review and evaluation*, IEEE Transactions on Power Systems, 2001 **16** (1), p. 44.
- [100]. S. H. Lee and C. L. Wilkins, *A Practical Approach to Appliance Load Control Analysis: A Water Heater Case Study*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, **PAS-102**(4), p. 1007-1013.
- [101]. El Lawler and De Wood, *Branch-and-bound methods: A survey*, Operations research, 1966, **14**(4), p. 699-719.
- [102]. Jh Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, 1992, MIT Press Cambridge, MA, USA.
- [103]. Wikipédia. *Algorithme génétique*. Available from:  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme\\_g%C3%A9n%C3%A9tique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme_g%C3%A9n%C3%A9tique).
- [104]. A. I. Cohen and C. C. Wang, *An optimization method for load management scheduling*, IEEE Transactions on Power Systems, 1988, **3**(2), p. 612-618.
- [105]. R Angioletti and H Desprez, *Maîtrise de l'énergie dans les bâtiments. Techniques*, Techniques de l'ingénieur. Génie énergétique, 2000, **4**(BE 9021).
- [106]. P Ferrand, *Comptage d'électricité: Ensembles de comptage= Electricity counting: counting sets*, Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, 2005, **10**(D4956).
- [107]. Iñigo Cobelo, *Active control of Distribution Networks*, Thesis submitted to The University of Manchester in the Faculty of Engineering and Physical Sciences, 2005.
- [108]. *Réseaux sans fil - Wireless Networks*. 2008, Available from:  
<http://www.commentcamarche.net/wireless/wlintro.php3>.
- [109]. Yj Lin, et al., *A power line communication network infrastructure for the smart home*, IEEE Wireless Communications Magazine, 2002, **9**(6), p. 104-111.
- [110]. J. Anatory, M. M. Kissaka, and N. H. Mvungi. *Powerline Communications: The Effects of Branches on Network Performance*, IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, March 26-29, 2006, Orlando, Florida, USA.

- 
- [111]. Tb Zahariadis, *Home networking technologies and standards*, 2003, Boston, Artech House Publishers.
- [112]. G. Mathisen and A. M. Tonello. *WireNet: An Experimental System for In-House Power Line Communication*, IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, March 26-29, 2006, Orlando, Florida, USA.
- [113]. T. Tran-Quoc, C. Andrieu, and N. Hadjsaid. *Influence of distributed resources on the ripple control signal transmission*, IEEE General Meeting, June 2004, Denver, Colorado, USA.
- [114]. J. Bausch, et al. *Characteristics of Indoor Power Line Channels in the Frequency Range 50 - 500 kHz*, IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, March 26-29, 2006, Orlando, Florida, USA.
- [115]. T. Tran-Anh, T. Tran-Quoc, and P. Auriol. *Distribution network modeling for Power Line Communication applications*, IEEE/ISPLC, 2005, Vancouver, Canada.
- [116]. G Lawton, *Machine-to-machine technology gears up for growth*, Computer, 2004, **37**(9), p. 12-15.
- [117]. I Curran and S Pluta, *Overview of machine to machine and telematics*, [Water Event, 2008 6th Institution of Engineering and Technology](#), ISSN: 0537-9989, 2008.
- [118]. S Farahani, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Elsevier/Newnes; September 2008.
- [119]. P. Baronti, et al., *Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards*, Computer Communications, 2007, **30**(7), p. 1655-1695.
- [120]. W Ye, J Heidemann, and D Estrin. *An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks*, [INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies](#). November 2002, New York, USA
- [121]. Mr.Chungtragarn, *An improvement of energy efficient MAC protocol based S-MAC for Wireless Sensor Networks*, Master Thesis, King MONKUT's Institute of Technology North Bangkok, 2006, p. 15.
- [122]. H Karl and A Willig, *Protocols and architectures for wireless sensor networks*, 2007, Wiley-Interscience, p.123.
- [123]. Tijs Van Dam and Koen Langendoen, *An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks*, Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems, 2003, ACM: Los Angeles, California, USA.
- [124]. J. Vaudour and V. Gauthier, *Comparaison de différentes couches MAC pour les réseaux de capteurs*, Evry : Institut National des Télécommunications, 2006 (N° RR06-006-RST).

- 
- [125]. J Polastre, J Hill, and D Culler. *Versatile low power media access for wireless sensor networks*, *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, 2004, Baltimore, MD, USA, Citeseer.
- [126]. A. I. Dounis and C. Caraiscos, *Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment--A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, **13**(6-7), p. 1246-1261.
- [127]. Li Yun, Ang Kiam Heong, and G. C. Y. Chong, *Patents, software, and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art*, *Control Systems Magazine*, IEEE, 2006, **26**(1), p. 42-54.
- [128]. *ISO 7730*. Available from:  
[http://www.iso.org/iso/fr/catalogue\\_detail.htm?csnumber=39155](http://www.iso.org/iso/fr/catalogue_detail.htm?csnumber=39155).
- [129]. *Current Cost Ltd*. Available from: <http://www.currentcost.com/>.
- [130] Wikipédia, *Compteur intelligent*. Available from :  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Regression\\_analysis](http://en.wikipedia.org/wiki/Regression_analysis)
- [131] <http://www.latribune.fr/green-business/l-actualite/1032109/80-des-foyers-europeens-equipes-en-2020.html>
- [132] *Le compteur électrique Linky en six questions*. Available from:  
[http://www.60millions-mag.com/actualites/archives/le\\_compteur\\_electrique\\_linky\\_en\\_six\\_questions](http://www.60millions-mag.com/actualites/archives/le_compteur_electrique_linky_en_six_questions)
- [133] *Le compteur électrique Linky en six questions*. Available from :  
[http://www.60millions-mag.com/actualites/archives/le\\_compteur\\_electrique\\_linky\\_en\\_six\\_questions](http://www.60millions-mag.com/actualites/archives/le_compteur_electrique_linky_en_six_questions)
- [134] *Linky, le compteur communicant*. Available from:  
<http://www.erdfdistribution.fr/Linky>
- [135] *ERDF teste Linky, son nouveau compteur électrique communicant*. Available from :  
<http://www.lemoniteur.fr/197-eau-energie/article/actualite/604552-erdf-teste-linky-son-nouveau-compteur-electrique-communicant>

---

# Publications

---

1. **N.H.Nguyen**, J-M.Leger, Q-T.Tran, T-P.Vuong, “A real-time control using wireless sensor network for intelligent energy management system in buildings”, IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, 2010
2. **N.H.Nguyen**, J-M.Leger, Q-T.Tran, T-P.Vuong “Intelligent Energy Management in Residential Buildings with a Real-Time Control & Wireless Meter-Recording System”, Fourteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON’10), December 19-21, 2010
3. **N.H.Nguyen**, J-M.Leger, Q-T.Tran, T-P.Vuong, “Application of Micro sensors for the building energy management system”. The second international workshop on nanotechnology an application IWNA, 2009
4. **N.H.Nguyen**, J-M.Leger, Q-T.Tran, T-P.Vuong, “A building energy management system by using Zigbee sensor network”. International forum on strategic technologies (IFOST), 2009
5. **N.H.Nguyen**, J-M.Leger, Q-T.Tran, T-P.Vuong, “Wireless micro sensors for energy management systems in building”. First International Workshop on Nanotechnology and Application , IWNA, 2007



---

# ANNEXE

---

## ANNEXE 1 : RESULTATS EXPERIMENTAUX DE LA METHODE ADAPTATIVE DE GESTION EN TEMPS REEL DES RADIATEURS

Les charges électriques correspondantes de l'appartement sont présentées dans le tableau suivant:

Equipement	Puissance
2 Radiateurs	2x 800 W
1 Radiateur	1900 W
Puissance totale	3500 W

*Tableau A-1 : Charges dans l'appartement*

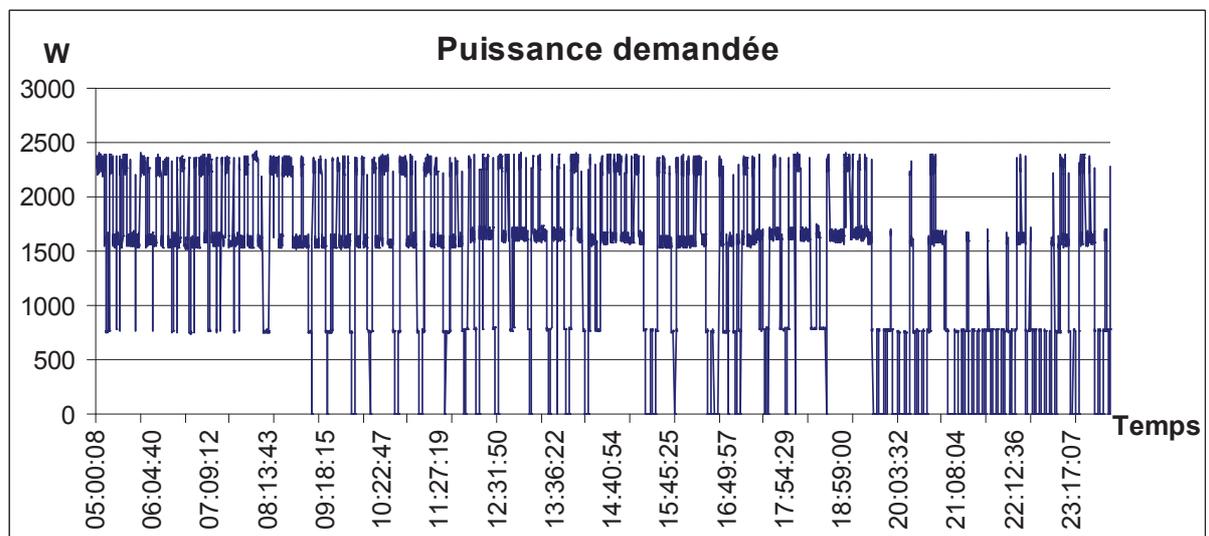
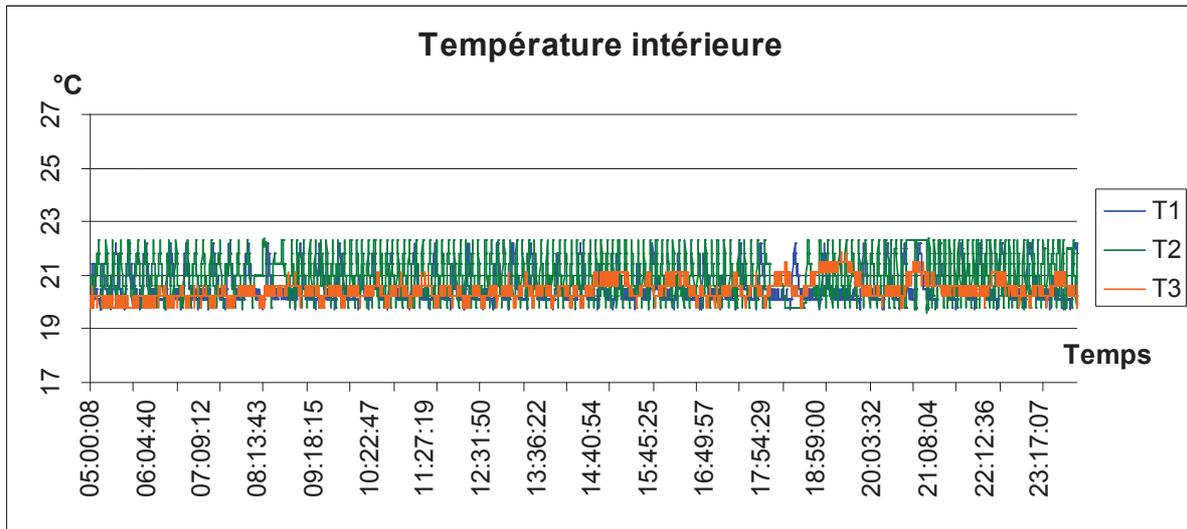
Les résultats présentés dans ce qui suit correspondent à des courbes de charge de l'appartement expérimental mesurée.

1. Les courbes (T1, T2, T3) présentent les températures intérieures des pièces 1, 2 et 3, respectivement. Au niveau de confort thermique : il est toujours assuré. Les températures de toutes les pièces sont toujours maintenues entre ( $T_{\min}$ ) et ( $T_{\max}$ )
2. La puissance maximale totale peut être ramenée à 2500W au lieu de 3500W

- **02 Février 2010**

Températures de consignes ( $T_{\min}, T_{\max}$ ) = (20°C, 22°C)

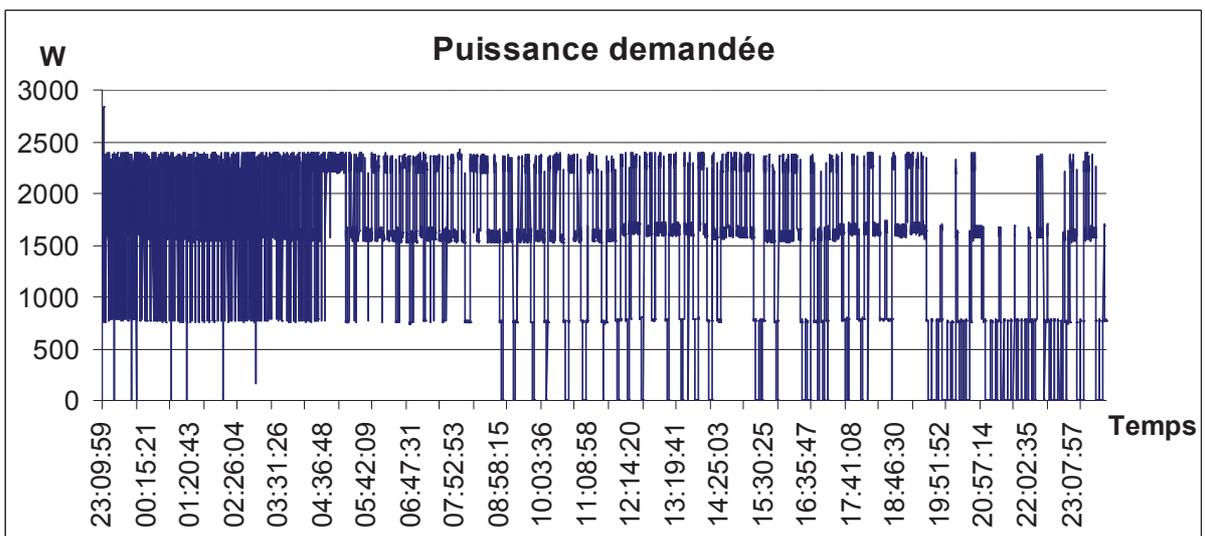
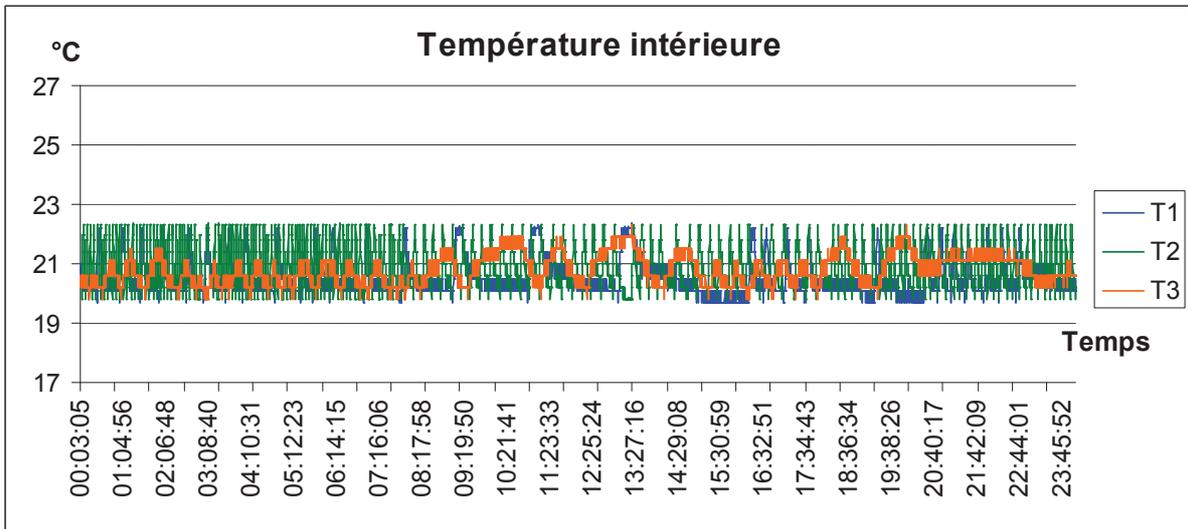
P\_ autorisée = 2500W



- **03 Février 2010**

Températures de consignes ( $T_{\min}, T_{\max}$ ) = (20°C, 22°C)

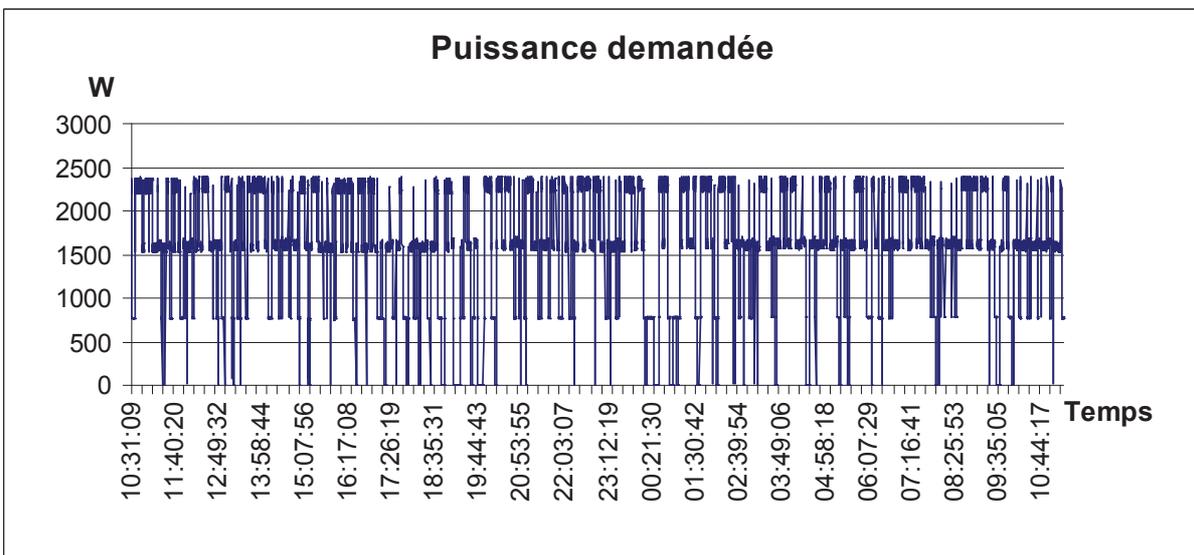
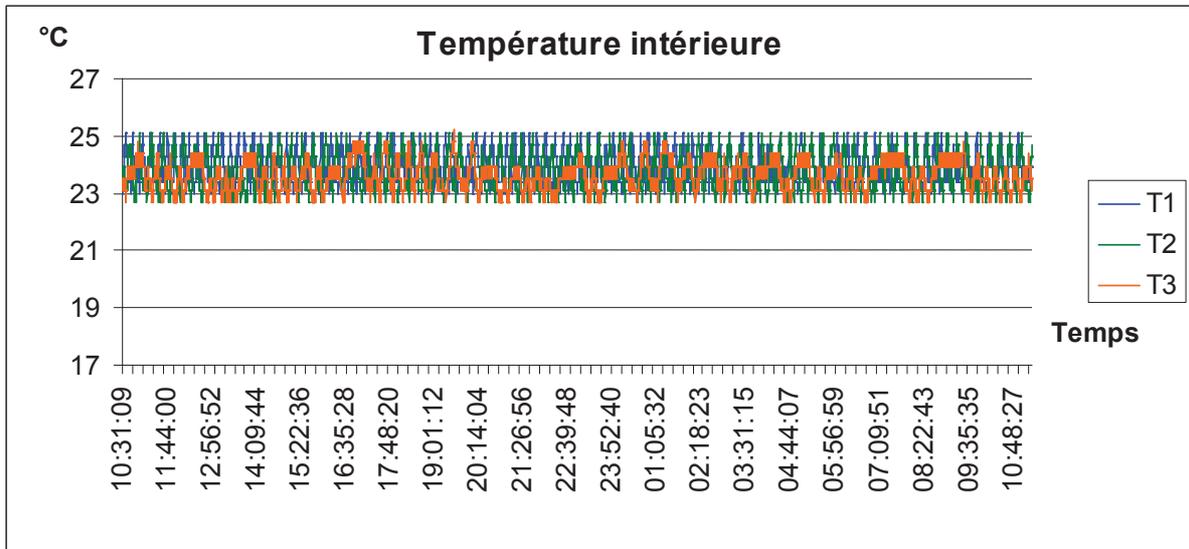
P\_ autorisée = 2500W



- **13 Février 2010**

Températures de consignes ( $T_{\min}, T_{\max}$ ) = (23°C, 25°C)

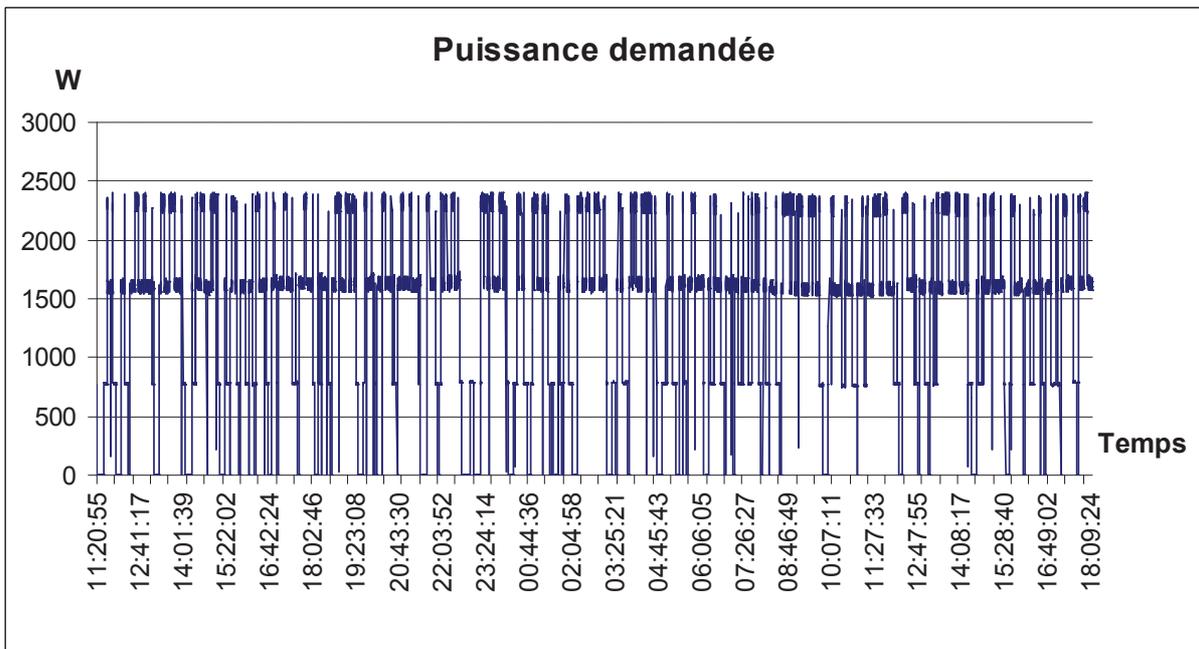
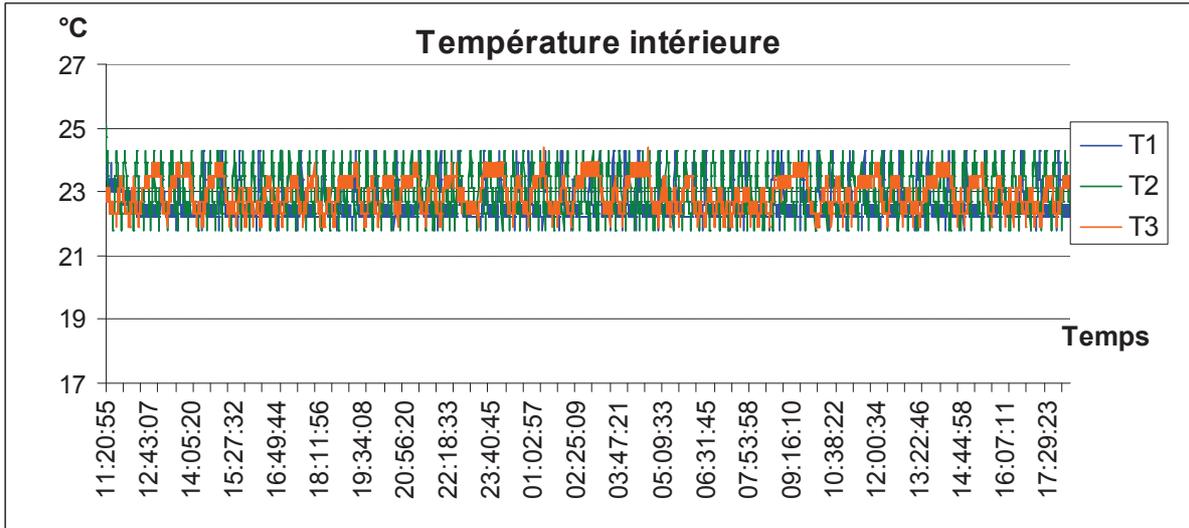
P\_ autorisée = 2500W



- **14 Février 2010**

Températures de consignes ( $T_{\min}, T_{\max}$ ) = (22°C, 24°C)

P\_ autorisée = 2500W



## TABLE DES FIGURES

<i>Figure 1-1 : Consommation finale énergétique en fuel (Mtep) au niveau mondial depuis 1970, .....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 1-2 : Courbe de charge de la journée du 25/01/2010] .....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 1-3 : Energie appelée totale selon les mois de l'année .....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 1-4 : Consommation d'électricité par secteur en 2008 .....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 1-5 : Evolution de la consommation d'électricité par secteur .....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 1-6 : Répartition de consommation électrique dans les bâtiments en 2007 en France .....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 1-7 : Ensemble des permis délivrés à des particuliers pour la construction d'une maison .....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 1-8 : Historique des pics de consommation d'électricité en France .....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 2-1 : Objectifs d'un système de gestion de charge dans les bâtiments .....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 2-2 : Architecture de communication appliquée aux Etats-Unis .....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 2-3 : Mécanisme de contrôle optimal pour un système de gestion de la charge dans le bâtiment .....</i>	<i>44</i>
<i>Figure 2-4 : Modèle de Prédiction de l'indice PMV utilisant un réseau de neurones artificiels .....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 2-5 : Configuration typique d'un système de logique floue (rule-based fuzzy logic).....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 3-1 : Le système de compteurs communicant Linky .....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 3-2 : Catégories de réseaux sans-fil .....</i>	<i>70</i>
<i>Figure 3-3 : Taux de transmission de données des réseaux sans-fil.....</i>	<i>72</i>
<i>Figure 3-4 : M2M architecture .....</i>	<i>79</i>
<i>Figure 3-5 : Architecture du ZigBee .....</i>	<i>84</i>
<i>Figure 3-6 : La base T-MAC protocole, avec temps actif adaptatif .....</i>	<i>90</i>
<i>Figure 4-1: Architecture globale du système de gestion énergétique dans les bâtiments.....</i>	<i>93</i>
<i>Figure 4-2: Architecture d'un capteur (a) et d'un actionneur (b) du système.....</i>	<i>94</i>
<i>Figure 4-3: Diagramme du système .....</i>	<i>96</i>
<i>Figure 4-4: Schéma "star topology" de communication du système .....</i>	<i>97</i>
<i>Figure 4-5: Schéma "cluster tree topology" du réseau de capteurs .....</i>	<i>97</i>
<i>Figure 4-6: Format du message à partir d'un capteur de température.....</i>	<i>98</i>
<i>Figure 4-7: Format du message de contrôle envoyé par l'unité de gestion.....</i>	<i>98</i>
<i>Figure 4-8 : Objectif global du système de gestion des charges .....</i>	<i>100</i>
<i>Figure 4-9 : Principe de régulateur des chauffages existant sur le marché (type PID) .....</i>	<i>100</i>
<i>Figure 4-10 : Régulation de température classique avec deux radiateurs .....</i>	<i>101</i>
<i>Figure 4-11 : Exemple de fonctionnement du régulateur adaptatif proposé avec deux radiateurs ....</i>	<i>110</i>
<i>Figure 4-12: Principe de la méthode.....</i>	<i>113</i>
<i>Figure 4-13 : Puissance consommée d'une cuisinière en l'absence de gestion.....</i>	<i>114</i>

---

<i>Figure 4-14 : Les puissances consommées d'une cuisinière pour différents modes de contrôle de gestion.....</i>	<i>116</i>
<i>Figure 5-1 : Principe du régulateur développé pour le contrôle des radiateurs .....</i>	<i>122</i>
<i>Figure 5-2: Algorithme de contrôle en temps réel des radiateurs en utilisant des capteurs sans fil..</i>	<i>124</i>
<i>Figure 5-3 : Architecture matérielle du système prototype.....</i>	<i>128</i>
<i>Figure 5-4 : Structure du radiateur adaptatif.....</i>	<i>129</i>
<i>Figure 5-5: Capteur de température sans fil.....</i>	<i>130</i>
<i>Figure 5-6 : Capteur de puissance sans fil .....</i>	<i>130</i>
<i>Figure 5-7: Plan de l'appartement expérimental .....</i>	<i>132</i>
<i>Figure 5-8: Température de la pièce No.2.....</i>	<i>134</i>
<i>Figure 5-9: Température de la pièce No.2 (Zoom).....</i>	<i>134</i>
<i>Figure 5-10: Fonctionnement du radiateur No.2 .....</i>	<i>134</i>
<i>Figure 5-11: Fonctionnement du radiateur No.2 (Zoom).....</i>	<i>134</i>
<i>Figure 5-12: Températures intérieures de 3 pièces dans le cas sans gestion .....</i>	<i>135</i>
<i>Figure 5-13: Puissance appelée dans le cas sans gestion .....</i>	<i>135</i>
<i>Figure 5-14: Températures intérieures de 3 pièces dans le cas de la méthode de gestion adaptative</i>	<i>136</i>
<i>Figure 5-15: Puissance appelée dans le cas de la méthode de gestion proposée .....</i>	<i>137</i>
<i>Figure 5-16: Température et fonctionnement du radiateur de la pièce No. 1(Zoom) .....</i>	<i>138</i>
<i>Figure 5-17: Température et fonctionnement du radiateur de la pièce No.2 (Zoom) .....</i>	<i>138</i>
<i>Figure 5-18: Température et fonctionnement du radiateur de la pièce No.3 (Zoom) .....</i>	<i>139</i>
<i>Figure 5-19 : Profils de chauffage en mode intermittent.....</i>	<i>142</i>
<i>Figure 5-20: Températures intérieures des 3 pièces dans le cas de gestion adaptative intermittente</i>	<i>143</i>
<i>Figure 5-21: Puissance appelée dans le cas de gestion intermittente adaptative.....</i>	<i>143</i>
<i>Figure 5-22: Températures intérieures de 3 pièces avec les différentes allures du chauffage en mode intermittent adaptatif.....</i>	<i>145</i>
<i>Figure 5-23 : Températures intérieures de 3 pièces en période de relance normale à puissance maximale – sans gestion.....</i>	<i>146</i>
<i>Figure 5-24: Puissance appelée dans le cas de relance à puissance maximale sans gestion.....</i>	<i>146</i>
<i>Figure 5-25 : Températures intérieures de 3 pièces en période de relance avec gestion intermittente adaptative.....</i>	<i>146</i>
<i>Figure 5-26: Puissance appelée dans le cas de relance avec la gestion intermittente adaptative.....</i>	<i>146</i>
<i>Figure 6-1 : Structure d'un système de pilotage des cuisinières.....</i>	<i>151</i>
<i>Figure 6-2 : Principe de la méthode de gestion adaptative des cuisinières.....</i>	<i>153</i>
<i>Figure 6-3: Schéma du système de gestion avec la cuisinière intégrée.....</i>	<i>155</i>
<i>Figure 6-4: Puissance totale consommée par le système sans gestion.....</i>	<i>156</i>
<i>Figure 6-5: Puissance consommée par la cuisinière sans gestion.....</i>	<i>156</i>

---

*Figure 6-6: Puissance totale consommée par le système avec gestion adaptative.....157*  
*Figure 6-7: Puissance consommée par la cuisinière avec gestion.....157*

---

## TABLE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1-1 : Émissions CO<sub>2</sub> des différentes filières de production d'énergie</i> .....	17
<i>Tableau 1-2 : Consommation finale d'électricité par secteur</i> .....	21
<i>Tableau 1-3 : Consommation d'électricité du secteur résidentiel et tertiaire par usage (Unité TWh)</i>	23
<i>Tableau 2-1 : Tarifs électriques de l'AEM en Etats-Unis</i> .....	36
<i>Tableau 2-2 : Tarifs électriques en France</i> .....	37
<i>Tableau 2-3 : Les programmes interruptible en Espagne</i> .....	41
<i>Tableau 2-4 : Evaluation de trois méthodes fondées sur l'IA et leurs applications aux systèmes de gestion énergétique dans le bâtiment</i> .....	52
<i>Tableau 3-1 : Récapitulatif des types de communication sans-fil</i> .....	71
<i>Tableau 3-2 : Caractérisations de la couche physique du ZigBee</i> .....	85
<i>Tableau 3-3 : Consommation d'énergie d'un nœud de Crossbow (mA)</i> .....	87
<i>Tableau 4-1 : Caractérisation des différents équipements dans un bâtiment</i> .....	94
<i>Tableau 4-2 : Les tarifs électriques d'EDF- les prix en Métropole (au 15/08/2009)</i> .....	103
<i>Tableau 4-3 : Modes de contrôle des cuisinières</i> .....	115
<i>Tableau 5-1 : Liste des composants utilisés</i> .....	128
<i>Tableau 5-2 : Répartition des équipements (radiateurs et capteurs)</i> .....	132
<i>Tableau 5-3 : Charges dans l'appartement</i> .....	133
<i>Tableau 5-4 : Comparaisons entre les deux types de régulateurs</i> .....	141
<i>Tableau 5-5 : Charges dans l'appartement d'étude du cas de gestion intermittente</i> .....	143
<i>Tableau 5-6: Résultat de la méthode proposée adaptative associée au régulateur intermittent</i> .....	144
<i>Tableau 6-1: Usages électriques (puissances nominales)</i> .....	154
<i>Tableau A-1 : Charges dans l'appartement</i> .....	175



---

## DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODES INTELLIGENTES POUR LA GESTION ÉNERGETIQUE DES BÂTIMENTS, UTILISANT DES CAPTEURS SANS FIL

### RESUME

L'utilisation des charges de manière active et intelligente et leur gestion optimale sont parmi les préoccupations majeures des gestionnaires, des fournisseurs, des commercialisateurs et des consommateurs d'énergie, et constitue l'un de axes privilégiés du projet smart-grid.

L'objectif de cette thèse est de développer et réaliser un système de pilotage des charges des bâtiments résidentiels ou tertiaires en temps réel en utilisant des réseaux de capteurs sans fil. Les méthodes de gestion de charge ont été développées afin de minimiser les pics de consommation, maintenir le confort thermique et minimiser le coût global de consommation. Une conception du système de gestion des charges en temps réel sans fil a été proposée avec la communication standardisée ZigBee. Des démonstrateurs basés sur la régulation adaptative des chauffages et des climatisations d'une part et sur une méthode de délestage doux pour des cuisinières d'autre part ont été développés. Le prototype du système proposé a été réalisé et testé lors de campagnes de mesures sur un appartement expérimental afin de montrer l'intérêt et les performances des méthodes proposées. Le système développé permet d'éviter l'utilisation des modèles prédictifs qui sont très difficiles à identifier et à reconfigurer en cas d'ajout de nouveaux appareils électriques dans les bâtiments contrôlés.

#### Mots-clés

Bâtiment, consommation, système d'énergie, gestion intelligente, gestion en temps réel, réseaux de capteurs, régulation adaptative

---

## DEVELOPMENT OF INTELLIGENT METHODS FOR THE BUILDING ENERGY MANAGEMENT SYSTEM, USING WIRELESS SENSOR

### ABSTRACT

Load management in an active and intelligent way is one of the major concerns of distribution systems operators, suppliers and consumers of energy, particularly in the context of the smart-grid project.

The aim of this thesis is to develop and implement a real-time energy management system based on wireless sensor networks in buildings (residential and tertiary sector). The methods of load management have been developed to minimize peak demand, maintain thermal comfort, and minimize the cost of consumption. A concept of real-time load management using a wireless sensor network has been proposed, based on the ZigBee communication standard. Demonstrators of adaptive control of heating and air conditioning and of intelligent load shedding for electrical cookers have been developed. The prototypes of the proposed systems have been built and tested on an experimental apartment to demonstrate the usefulness and effectiveness of these methods. The developed system allows to avoid the use of predictive models that are very difficult to identify and self-reconfigure when new electrical devices are added in a building.

#### Keywords

Buildings, consumption, energy system, intelligent management, real-time management, wireless sensor network, adaptive control