



**HAL**  
open science

# Gestion optimale des consommations d'énergie dans les bâtiments

Ky Le

► **To cite this version:**

Ky Le. Gestion optimale des consommations d'énergie dans les bâtiments. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2008. Français. NNT: . tel-00301368

**HAL Id: tel-00301368**

**<https://theses.hal.science/tel-00301368>**

Submitted on 21 Jul 2008

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

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

**INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

N° attribué par la bibliothèque

|\_|\_|\_|\_|\_|\_|\_|\_|\_|\_|\_|\_|\_|\_|\_|

**THESE EN COTUTELLE INTERNATIONALE**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE  
et  
DE L'UNIVERSITE DE DANANG**

**Spécialité : « Génie Electrique »**

préparée au **Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble**  
dans le cadre de l'**Ecole Doctorale « Electronique, Electrotechnique, Automatique,  
Télécommunications, Signal »**

présentée et soutenue publiquement

par

**Ky LE**

**le 10 Juillet 2008**

**TITRE**

**Gestion optimale des consommations d'énergie dans les bâtiments**

**DIRECTEURS DE THESE**

**Jean Claude SABONNADIÈRE / Quoc Tuan TRAN / Kim Hung LE**

**JURY**

<i>M.</i>	<i>Nouredine HADJSAID</i>	<i>, Président</i>
<i>M.</i>	<i>Xavier GUILLAUD</i>	<i>, Rapporteur</i>
<i>M.</i>	<i>Philippe AURIOL</i>	<i>, Rapporteur</i>
<i>M.</i>	<i>Jean Claude SABONNADIÈRE</i>	<i>, Directeur de thèse</i>
<i>M.</i>	<i>Quoc Tuan TRAN</i>	<i>, Directeur de thèse</i>
<i>M.</i>	<i>Kim Hung LE</i>	<i>, Directeur de thèse</i>
<i>M.</i>	<i>Christophe KIENY</i>	<i>, Examineur</i>



*A ma mère*  
*A ma femme : Xuan Lan*  
*À mes enfants : Na et Bot*  
*À mes frères*  
*A mes soeurs*  
*Je dédie affectueusement ma thèse*



## Remerciements

*Cette thèse a été effectuée au sein du Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble, l'Institut National Polytechnique de Grenoble, dans le cadre de thèse cotutelle avec la collaboration et le financement de l'Université de Da Nang.*

*Mes premiers remerciements iront à mon pays pour la bourse de thèse dont j'ai bénéficié.*

*Je tiens à remercier la nouvelle direction (MM. James ROUDET, Olivier L'ESAINTE et Yves MARECHAL) et l'ancienne direction (MM. Yves BRUNET et Jean Paul FERRIEUX) du Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble, M Gérard MEUNIER, directeur de la formation doctorale, ainsi que l'ensemble de l'équipe Système et Réseaux Electrique (avec les responsables MM. Seddik BACHA et Daniel ROYE) pour m'avoir accueilli.*

*Je remercie monsieur le professeur Nouredine HADJSAID, Professeur à l'INP Grenoble, Directeur du GIE-IDEA, de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury et pour son aide pendant mon travail.*

*Je remercie messieurs Xavier GUILLAUD, professeur à l'Ecole Centrale de Lille et Philippe AURIOL, professeur à l'Ecole Centrale de Lyon d'avoir bien voulu me faire l'honneur d'accepter d'être rapporteurs de ma thèse. Je les remercie pour leur présence et leurs questions pertinentes lors de la soutenance*

*Je remercie monsieur Christophe KIENY, Directeur adjoints du GIE-IDEA, d'avoir bien voulu me faire l'honneur d'accepter de participer à ce jury de thèse. Je le remercie pour ses questions pertinentes, avisées et constructives pendant mon travail.*

*Je remercie tous particulièrement mes trois directeurs de thèse :*

*Je tiens à remercier monsieur Jean Claude SABONNADIERRE, Professeur Emérite de l'INP Grenoble, pour avoir dirigé mes travaux de thèse, pour le temps précieux qu'il m'a consacré pendant la rédaction de thèse.*

*Je tiens à remercier M. TRAN Quoc Tuan, Habilité à Diriger des Recherches qui a pris le temps de me guider et de me conseiller tout au long de mon travail en France. Mon travail n'aurait pas pu aboutir sans lui.*

*Je tiens à remercier M, LE Kim Hung, Professeur à l'Université de DaNang, pour m'avoir donné l'occasion d'étudier à Grenoble et pour son aide pendant ces dernières années.*

*Je remercie également NGUYEN Nhat Tung et RUIZ Lina Maria pour leur collaboration.*

*Je voudrais aussi remercier:*

*Les administratifs et les secrétaires du laboratoire: Danielle, Elise, Monique et à côté du GIE-IDEA: Martin Florence, Laur Julie pour leur aide, leur gentillesse et leur amitié.*

*Tous mes amis du labo et en particulier de l'équipe SYREL pour avoir créé une bonne ambiance de travail et pour leur amitié.*



**TABLE DES MATIERES**

<b>I.</b>	<b>CHAPITRE I : INTRODUCTION .....</b>	<b>11</b>
I.1	CONTEXTE .....	13
I.2	OBJECTIFS DE LA THESE .....	16
I.3	ORGANISATION DU MEMOIRE.....	19
<b>II.</b>	<b>CHAPITRE II : GESTION DE CHARGE DANS LES BATIMENTS ET DEVELOPPEMENT DES MODELES DE CHARGE.....</b>	<b>23</b>
II.1	INTRODUCTION .....	25
II.2	BESOINS ENERGETIQUES ET USAGES DANS LE SECTEUR DE BATIMENT .....	25
II.2.1	<i>Besoins énergétiques</i> .....	25
II.2.2	<i>Usages dans les bâtiments</i> .....	26
II.2.2.1	Secteur résidentiel .....	26
II.2.2.2	Secteur tertiaire.....	29
II.2.2.3	Usages concurrentiels .....	31
II.2.2.4	Quelques usages classiques des bâtiments.....	32
II.3	METHODES DE GESTION DES CHARGES DANS LES BATIMENTS .....	35
II.3.1	<i>Méthodes générales de gestion de charge</i> .....	35
II.3.1.1	Méthodes de délestage /relestage.....	35
II.3.1.2	Décalage de consommation .....	36
II.3.1.3	Programmation temporelle .....	36
II.3.1.4	Production décentralisée locale .....	37
II.3.2	<i>Méthodes de gestion des chauffages</i> .....	37
II.3.2.1	Régulation .....	37
II.3.2.2	Programmation .....	38
II.3.2.3	Gestion de puissance .....	38
II.3.3	<i>Méthodes de gestion optimale de charge des bâtiments</i> .....	39
II.4	DEVELOPPEMENT DES MODELES DE CHARGE .....	40
II.4.1	<i>Introduction</i> .....	40
II.4.2	<i>Modèle des chauffages</i> .....	41
II.4.2.1	Equations de thermodynamique d'une salle de chauffage .....	41
II.4.2.2	Modèle thermique d'une salle par Simulink.....	45
II.4.3	<i>Modèle des climatisations</i> .....	46
II.4.3.1	Principe de fonctionnement de la climatisation .....	46
II.4.3.2	Modèle thermodynamique d'une salle conditionnée .....	47
II.4.4	<i>Modèle des autres usages</i> .....	50
II.4.4.1	Cuisinière électrique.....	50
II.4.4.2	Réfrigérateur.....	53
II.4.4.3	Congélateur .....	55
II.4.4.4	Lave- linge.....	58
II.4.4.5	Lave-vaisselle .....	61
II.5	CONCLUSION .....	63
<b>III.</b>	<b>CHAPITRE III : PREVISION DES CHARGES PAR LA METHODE DES RESEAUX DE NEURONES ET LA METHODE ASCENDANTE (« BOTTOM-UP »).....</b>	<b>65</b>
III.1	INTRODUCTION .....	67
III.2	PREVISION DE CHARGE ELECTRIQUE .....	67
III.2.1	<i>Types de prévision de charge</i> .....	67
III.2.2	<i>Facteurs influencés sur la prévision de charge</i> .....	68
III.2.3	<i>Les Méthodes de prévision de charge</i> .....	69
III.2.3.1	Méthode de régression.....	69
III.2.3.2	Système expert.....	69
III.2.3.3	Réseau de neurones .....	69
III.2.3.4	Méthode ascendante ou «bottom-up» basée sur la connaissance des consommations.....	70
III.3	METHODE BASEE SUR LA TECHNIQUE DES RESEAUX DE NEURONES .....	70
III.3.1	<i>Méthode des réseaux de neurones, pourquoi?</i> .....	70
III.3.2	<i>Théorie des réseaux de neurones</i> .....	71
III.3.2.1	Modèle des réseaux de neurones artificiels (RNA).....	71
III.3.2.2	Apprentissage .....	74
III.3.2.3	Réseau rétro-propagation.....	74
III.3.3	<i>Cas d'application</i> .....	76



## Table des Matières

III.3.3.1	Base des données.....	76
III.3.3.2	Caractéristiques de la base de données.....	76
III.3.3.3	Développement du programme de prévision de charge.....	79
III.3.3.4	Entraînement du réseau et validation par simulation.....	81
III.3.3.5	Résultats de calcul.....	82
III.4	METHODE ASCENDANTE OU « BOTTOM UP » BASEE SUR LA CONNAISSANCE DU COMPORTEMENTS DES CHARGES.....	87
III.4.1	<i>Introduction</i> .....	87
III.4.2	<i>Présentation de la méthode ascendante</i> .....	88
III.4.2.1	Formulation mathématique.....	88
III.4.2.2	Mise en œuvre du modèle.....	92
III.4.2.3	Algorithme de programmation.....	93
III.4.3	<i>Cas d'application</i> .....	94
III.4.3.1	Classification des charges.....	94
III.4.3.2	Validation par simulation.....	95
III.5	CONCLUSION.....	96
<b>IV.</b>	<b>CHAPITRE IV : DEVELOPPEMENT DES STRATEGIES DE GESTION OPTIMALE DES CHARGES.....</b>	<b>99</b>
IV.1	INTRODUCTION.....	101
IV.2	METHODES D'OPTIMISATION.....	103
IV.2.1	<i>Méthodes d'optimisation pour la gestion des charges</i> .....	103
IV.2.2	<i>Programmation non-linéaire</i> .....	105
IV.2.3	<i>Méthode de « branch and bound » (procédure par évaluation et séparation progressive)</i> .....	105
IV.3	STRATEGIES PROPOSEES DE GESTION DES CHAUFFAGES.....	108
IV.3.1	<i>Développement des modèles</i> .....	108
IV.3.2	<i>Minimisation des pics de consommation</i> .....	109
IV.3.2.1	Formulation du problème.....	109
IV.3.2.2	Algorithme proposé.....	110
IV.3.2.3	Résultats.....	112
IV.3.3	<i>Optimisation du confort</i> .....	118
IV.3.3.1	Fonction objectif.....	118
IV.3.3.2	Les contraintes.....	118
IV.3.3.3	Résultats.....	118
IV.3.4	<i>Minimisation des coûts</i> .....	121
IV.3.4.1	Formulation du coût de l'énergie électrique.....	121
IV.3.4.2	Fonction objectif.....	122
IV.3.4.3	Les contraintes.....	123
IV.3.4.4	Résultats.....	123
IV.4	STRATEGIES PROPOSEES DE GESTION DES CLIMATISATIONS.....	124
IV.4.1	<i>Développement des modèles</i> .....	124
IV.4.2	<i>Minimisation des pics de consommation</i> .....	126
IV.4.2.1	Formulation du problème (fonction objectif).....	126
IV.4.2.2	Résultat.....	127
IV.4.2.3	Hypothèses.....	127
IV.5	CONCLUSION.....	131
<b>V.</b>	<b>CHAPITRE V : DEVELOPPEMENT DES STRATEGIES DE GESTION DES CHARGES EN TEMPS REEL.....</b>	<b>133</b>
V.1	INTRODUCTION.....	135
V.2	METHODE BASEE SUR LA REGULATION ADAPTATIVE DE TEMPERATURE.....	136
V.2.1	<i>Principe de la méthode proposée</i> .....	136
V.2.2	<i>Applications de la méthode proposée pour la gestion des radiateurs</i> .....	139
V.2.2.1	Modèle complet de la maison développé sous Matlab/Simulink.....	139
V.2.2.2	Hypothèses.....	142
V.2.2.3	Résultats.....	142
V.2.3	<i>Application de la méthode proposée pour la gestion des climatisations</i> .....	150
V.2.3.1	Modèle d'une salle conditionnée.....	150
V.2.3.2	Hypothèses.....	151
V.2.3.3	Résultats.....	152
V.3	METHODE BASEE SUR LE DELESTAGE EN FONCTION DE LA COURBE DE PROTECTION.....	157
V.3.1	<i>Principe de la méthode</i> .....	157
V.3.2	<i>Application</i> .....	161

## Table des Matières

V.3.2.1	Hypothèses .....	161
V.3.2.2	Résultats .....	162
V.4	CONCLUSION .....	164
<b>VI.</b>	<b>CHAPITRE VI : CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>165</b>
	<b>RÉFÉRENCES .....</b>	<b>169</b>
	<b>ANNEXE .....</b>	<b>175</b>
	ANNEXE 1. CAS DE L'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE EN CAS DE DÉPLACEMENT DES CHARGES POUR UNE MAISON .....	177
	ANNEXE 2. ÉVALUATION ÉCONOMIQUE D'UTILISATION DE LA LUMIÈRE NATURELLE D'UN CENTRE DE COMMERCE.....	178
	ANNEXE 3. SENSIBILITÉ DE LA QUANTITÉ DES DONNÉES D'ENTRÉE SUR L'ERREUR DE LA PRÉVISION DE CHARGE EN UTILISANT LES RÉSEAUX DES NEURONES.....	181
	ANNEXE 3B. RÉSULTATS POUR DE LA PRÉVISION DE CHARGE EN UTILISANT LES RÉSEAUX DES NEURONES EN TENANT COMPTE DE LA TEMPÉRATURE .....	182
	ANNEXE 4. COMPORTEMENT DES CHARGE .....	185
	ANNEXE 5: COURBES DE CHARGE DES APPAREILS OBTENUES PAR LA MÉTHODE ASCENDANTE .....	187
	<b>TABLE DES FIGURES.....</b>	<b>189</b>
	<b>TABLE DES TABLEAUX .....</b>	<b>193</b>



## **Chapitre I : Introduction**

<b>I.</b>	<b>CHAPITRE I : INTRODUCTION .....</b>	<b>11</b>
I.1	CONTEXTE.....	13
I.2	OBJECTIFS DE LA THESE.....	16
I.3	ORGANISATION DU MEMOIRE.....	19

## I.1 Contexte

La consommation énergétique mondiale augmente d'environ 2% par an alors que l'on est confronté à une réduction des ressources énergétiques fossiles et à un risque majeur concernant l'avenir de notre planète avec le 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 constitue avec le recours aux énergies renouvelables, une alternative à ces problèmes. Il faut noter que dans le programme de Maîtrise de la Demande Énergétique (MDE), le gain d'un mégawattheure en améliorant le rendement d'utilisation, nécessite seulement 13,5 € tandis que la production d'un mégawattheure coûte plus de 32,5 €. Dans le nouveau contexte de l'ouverture du marché de l'énergie et de l'évolution de la distribution électrique, l'amélioration de la consommation amènera un progrès important (Fig. I-1).

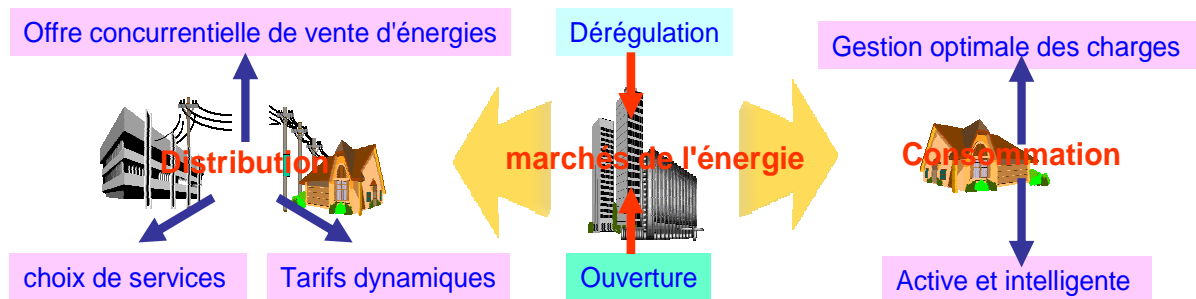


Fig. I-1: Changements majeur dans le domaine d'énergie

L'objectif d'une gestion globale et automatisée de l'énergie est de réaliser des gains (directs ou indirects) en introduisant une gestion analytique des consommations (refacturation, répartition par centre de coût). Les économies d'énergie que l'on peut espérer sont de différents types:

- réduction de la facture énergétique,
- maîtrise des coûts de non qualité,
- maintenance préventive,
- sensibilisation aux dépenses énergétiques.

Parmi toutes les formes d'énergie, l'énergie électrique est le vecteur qui est le plus noble et le plus facile à mettre en œuvre. C'est pourquoi la proportion d'énergie électrique dans l'énergie totale consommée, ne cesse de croître. La gestion de l'énergie électrique, dont il est impératif de se préoccuper est l'une des composantes d'une maîtrise totale de l'énergie. Le développement récent des moyens informatiques et des automatismes programmables apporte des solutions très performantes qui permettent d'appréhender la maîtrise de cette énergie.

Si l'on considère le coût du logement social, la seule marge de manœuvre efficace dont on dispose est la réduction des charges. Et dans le coût des charges, la facture énergétique

représente une part prépondérante sur laquelle nous devons faire porter notre effort. Cependant pour réduire les consommations électriques d'un logement, il faut d'abord les connaître. Dans ce but, après avoir identifié les différents appareils électroménagers responsables de la consommation, il est nécessaire, pour pouvoir évaluer les potentiels d'économies d'électricité, de connaître les caractéristiques de ces équipements: puissance en marche, puissance de veille, consommation sur 24 h, etc...

Enfin, moins de consommation d'énergie c'est aussi moins de nuisances liées à la production au transport ou à la consommation de cette énergie, c'est aussi de contribuer à augmenter la durée de vie des gisements d'énergie primaire. Produire, transporter et distribuer l'électricité coûte très cher. Il faut donc optimiser la demande en cherchant à satisfaire les mêmes besoins avec des quantités d'énergie et des puissances appelées plus faibles.

Toutes les formes de production d'électricité occasionnent des nuisances environnementales qui deviennent de plus en plus préoccupantes au niveau international, et notamment au sein de la communauté européenne. Parmi les nuisances il y a évidemment les déchets nucléaires et les rejets de toutes sortes, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ou NO<sub>x</sub> sans que cette liste soit exhaustive. Minimiser leur génération passe aussi par une meilleure maîtrise de la demande, tant il est vrai que l'énergie la plus propre est celle qu'à service rendu identique on évite de consommer. Réduire nos consommations d'électricité, c'est donc acquérir la certitude d'une réduction des nuisances environnementales

Les figures Fig. I-2 et Fig. I-3 présentent la consommation d'énergie en France [DGM06]. On voit que le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire), présente avec 43 % de la demande finale en énergie et 64% de la demande d'énergie électrique en 2005, l'un des plus grands potentiels d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

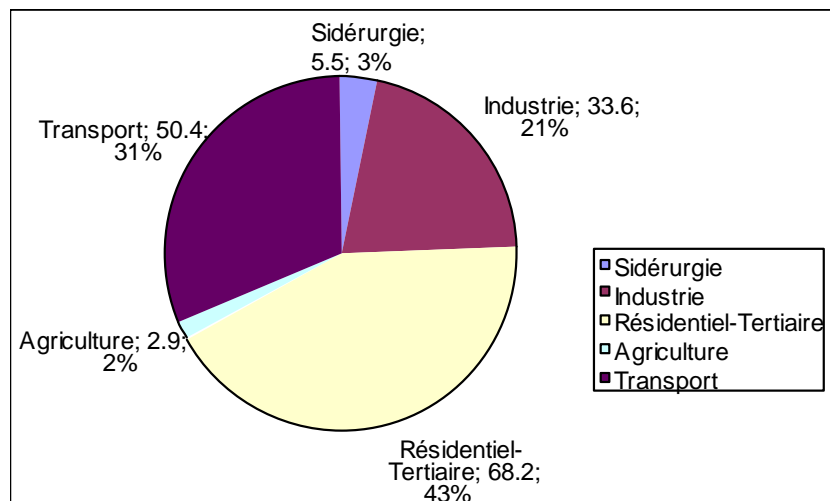


Fig. I-2: Consommation finale énergétique par secteur en France en 2005 (en Mtep)

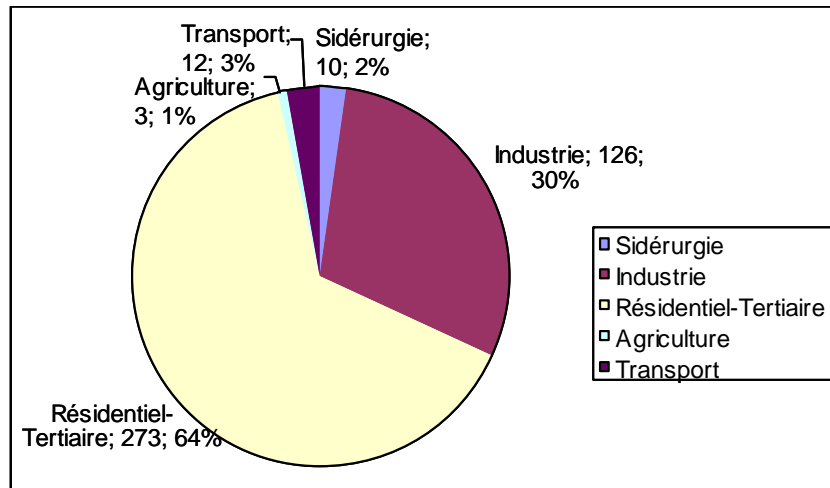


Fig. I-3: Consommation d'électricité par secteur en France en 2005 (en TWh)

Il faut donc apprendre à réduire la consommation d'électricité dans les usages domestiques car dans tous les logements neufs construits depuis vingt ans (qui représentent 30 % du parc actuel [DGM06]), le coût de l'électroménager et de l'éclairage dans la facture énergétique devient supérieur à celui du chauffage. Pour les logements construits en conformité avec la réglementation thermique en vigueur (dite RT 2000), l'électroménager coûte même, quelle que soit la source d'énergie, deux fois plus cher que le chauffage. En outre, pour les logements futurs tels que ceux déjà construits en Allemagne (Passive Haus) l'électroménager coûtera bientôt 6 fois plus cher que le chauffage!

La gestion de la demande d'électricité à court terme chez les grands consommateurs offre également quelques perspectives intéressantes pour le distributeur (respectivement le producteur) et l'utilisateur.

Il est évident que l'utilisateur est intéressé à la diminution du coût de l'énergie distribuée. Pour ce faire, il est disposé à agir. Il agit actuellement pour diminuer ses dépenses, mais pas encore pour diminuer le coût de l'énergie. L'expérience a montré que si l'utilisateur industriel dispose de l'information sur sa consommation, il peut, par des mesures de gestion adaptée, diminuer considérablement son appel maximum de puissance. Les actions possibles sont de plusieurs types :

- Par gestion optimales des procédés consommateurs de jour,
- Par gestion prévisionnelle des procédés à forte inertie ou équipement de stockage,
- Par substitution des procédés et d'agent énergétique au cours de la journée ou de la saison.

La tarification dynamique représente une option tarifaire qui est destinée à jouer un rôle déterminant dans la gestion de la demande industrielle et des services grands consommateurs à court terme.

La dérégulation et l'ouverture des marchés de l'énergie impliquent des changements importants dans la distribution et dans la consommation. Il apparaît une offre concurrentielle



de vente d'énergies et de choix des services avec des tarifs dynamiques en fonction de l'offre, de la demande et de l'état du réseau.

L'utilisation des charges de manière active et intelligente et la gestion optimale de la consommation sont parmi les préoccupations majeures des gestionnaires, des fournisseurs, des commercialisateurs et des consommateurs d'énergie. La gestion optimale du système énergétique des bâtiments présente de l'intérêt pour les différents acteurs :

**Pour la Collectivité Nationale :**

- Réduction de la consommation de combustible (indépendance énergétique)
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre

**Pour les consommateurs:**

- Baisse de la facture, à satisfaction égale
- Meilleure satisfaction, à facture égale
- Facilité d'utilisation de l'énergie grâce au système de gestion automatique.
- .

**Pour les gestionnaires de réseaux : GRT, collectivités locales, régies ...**

- Réduction ou retardement de la nécessité d'investissement sur les réseaux
- Gestion des congestions
- Sécurisation
- Services systèmes ...

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

- Eviter les blackouts sur le réseau (l'énergie non distribuée à cause de 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

**Pour les producteurs d'électricité :**

- Augmenter le bénéfice d'exploitation : par lissage de la courbe de charge
- Faciliter l'intégration des sources renouvelables et intermittentes
- Réduire les besoins de puissance : adaptation des capacités
- Fidéliser la clientèle par des services de qualité
- Respecter les contraintes : normes environnementales, service minimum ...

**Pour le revendeur d'énergie :**

- Réduire les achats d'énergie pendant les périodes où les prix sont élevés
- Maximiser les bénéfices.

## **I.2 Objectifs de la thèse**

La maîtrise de la demande énergétique peut être réalisée par plusieurs solutions. Le tableau I.1 ci-dessus présente quelques solutions possibles pour la maîtrise de consommation.

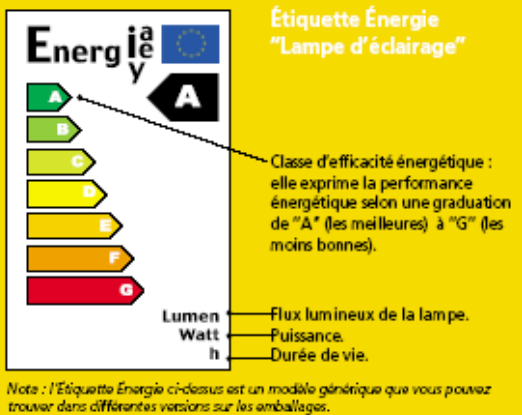
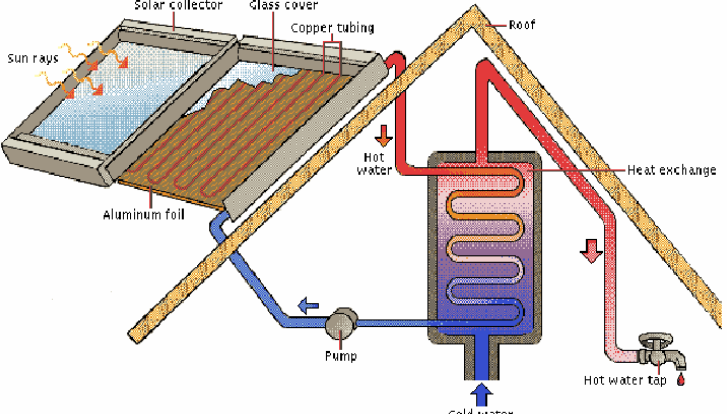

<p><b>Les équipements intrinsèquement performants :</b> =&gt; lampes basse consommation, isolation des bâtiments chauffés à l'électricité, appareils ménagers et professionnels économes, ...</p>	 <p>Étiquette Énergie "Lampe d'éclairage"</p> <p>Classe d'efficacité énergétique : elle exprime la performance énergétique selon une graduation de "A" (les meilleures) à "G" (les moins bonnes).</p> <p>Lumen — Flux lumineux de la lampe. Watt — Puissance. h — Durée de vie.</p> <p>Note : l'Étiquette Énergie ci-dessus est un modèle générique que vous pouvez trouver dans différentes versions sur les emballages.</p>
<p><b>La substitution de l'électricité par d'autres sources</b> (Panneaux solaire, PV, Microturbine, Cogeneration...) pour les usages électriques et thermiques (chauffage, climatisation, eau chaude)</p>	 <p>Solar collector, Glass cover, Copper tubing, Aluminum foil, Sun rays, Roof, Hot water, Heat exchange, Hot water tap, Cold water, Pump.</p>
<p><b>Application d'une gestion intelligente de la charge</b> (systèmes de régulation, gestion optimale, entraînements à vitesse variable, ...)</p>	 <p>Smart Building Management</p>

Tableau I-1: *Quelques solutions pour la maîtrise de consommation*

La gestion des charges peut être réalisée en (Fig. I-4):

- Réduisant la consommation d'énergie
- Réduisant les pics de consommation
- Déplaçant la consommation vers les heures creuses (lorsque le tarif est intéressant).

Pour analyser le potentiel de gain sur la gestion des charges nous avons évalué l'économie réalisée sur quelques solutions proposées pour les bâtiments résidentiels et commerciaux (Voir Annexe AI et AII):

- + Déplacement des consommations (Lave linge, lave vaisselle ...)
- + Utilisation des capteurs de photo-électriques (en utilisant le maximum de la lumière naturelle) pour réduire les consommations de lumière

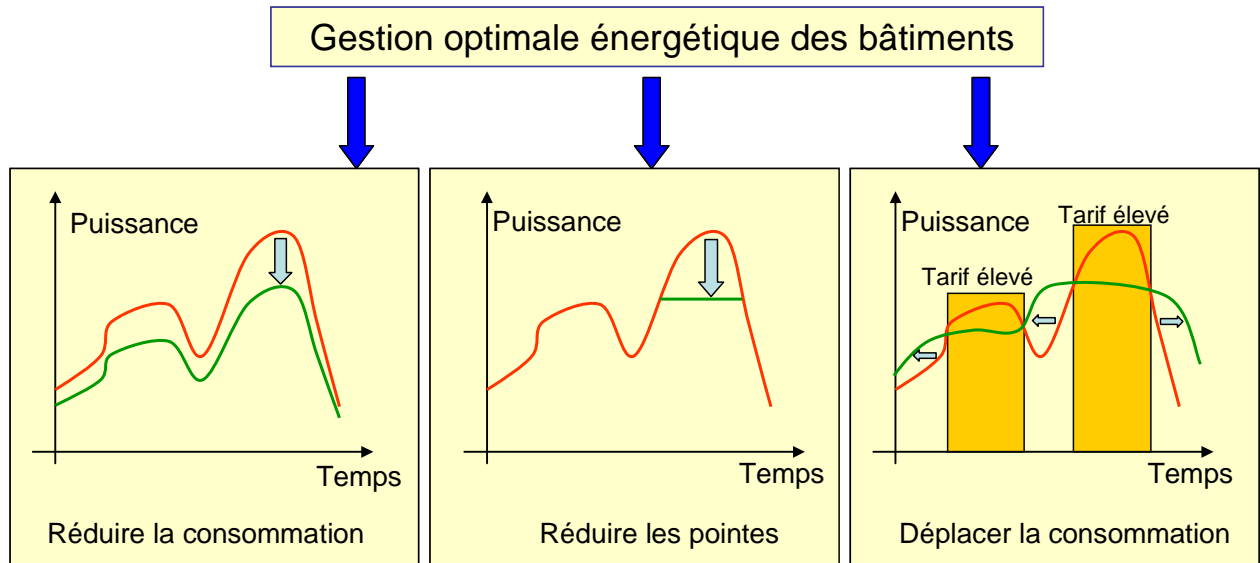


Fig. I-4: Solutions pour la gestion des charges dans les bâtiments

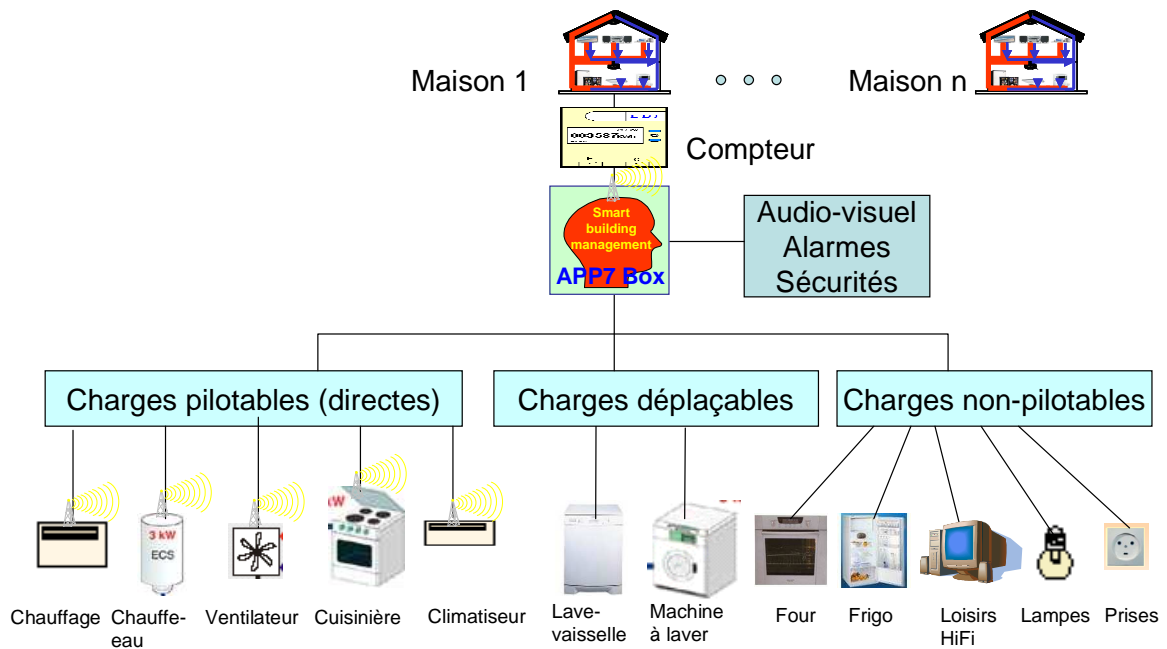


Fig. I-5: Gestion des charges après le compteur

Comme nous venons de le montrer dans la partie précédente, le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire), présente l'un des plus grands potentiels d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. C'est pourquoi, dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons au développement des méthodes de gestion de la consommation dans les bâtiments. La gestion de la consommation peut porter sur les charges pilotables directes comme sur les charges déplaçables (Fig. I-5).

L'objectif principal de la thèse est de déterminer les stratégies d'exploitation optimale des consommations pour un bâtiment résidentiel ou tertiaire afin de :

- Réduire sa facture énergétique globale
- Minimiser le coût énergétique

- Maximiser les services et les bénéfices pour le commercialisateur et le fournisseur d'énergie
- Participer à la gestion de congestion ou résoudre des problèmes techniques du réseau (pour le gestionnaire du réseau).

Le l'objectif final de la thèse comme nous l'avons résumé sur la Fig. I-6 est de proposer une solution efficace à un gestionnaire ou utilisateur des bâtiments.

Les méthodes proposées devront prendre en compte les éléments suivants:

- Le confort des clients
- La puissance souscrite (ou puissance permissible)
- Les signaux de gestionnaire du réseau (ex : congestion) et de service système
- Les signaux des commercialisateurs (ex : Tarifications dynamiques)...

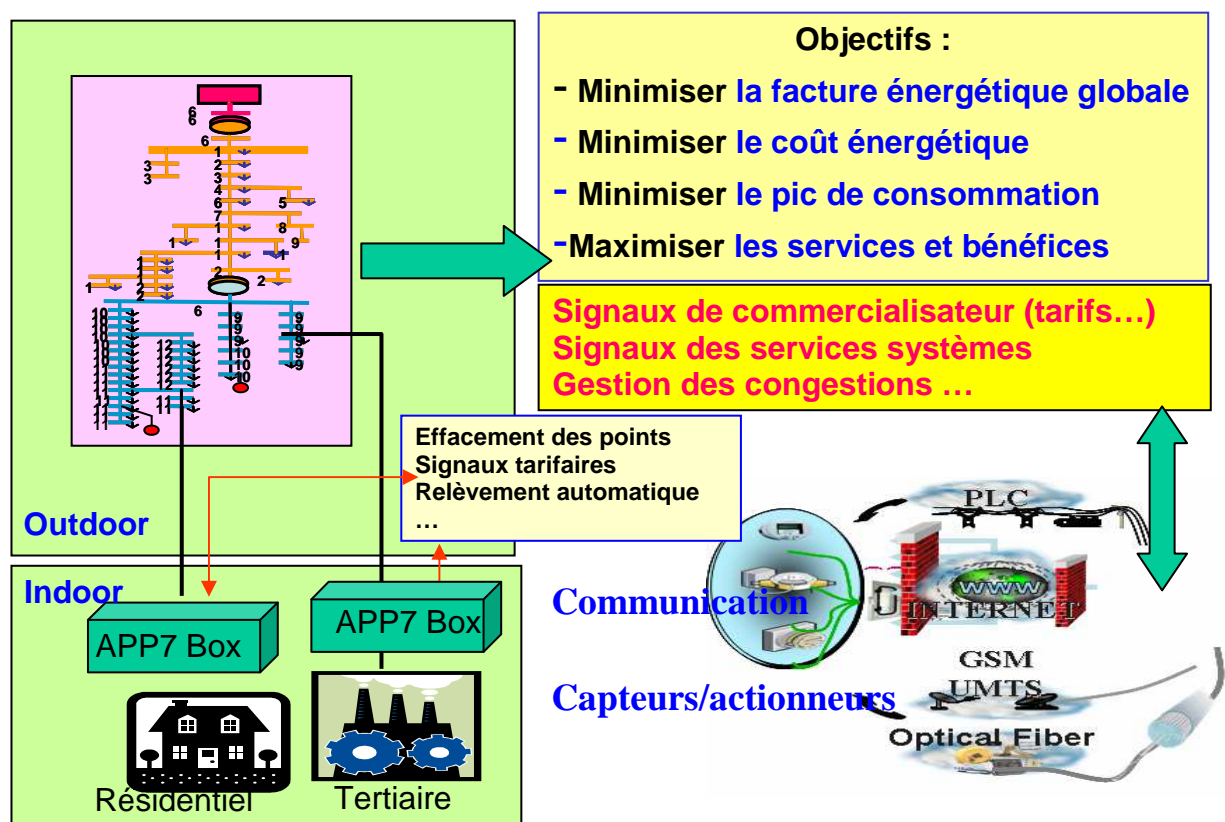


Fig. I-6: Objectif global du travail

### I.3 Organisation du mémoire

Dans le cadre de notre travail nous proposons, pour le développement des stratégies de gestion des charges dans les bâtiments, un schéma qui comporte trois phases principales (Fig. I-7):

- Une phase de prédiction des charges
- Une phase de gestion prédictive des charges
- Une phase de gestion en temps réel des charges.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons tout d'abord les besoins énergétiques liés aux usages dans le secteur de bâtiment. Afin de mieux comprendre les méthodes de gestion de charge existant dans le but de développer les méthodes efficaces, cette partie poursuivra par la présentation de plusieurs moyens possibles comme les méthodes de délestage et de relestage, le déplacement de la consommation, la programmation temporelle. L'essentiel de ce chapitre sera consacré le développement des modèles des appareils de consommation.

Cette partie est très importante car toutes les méthodes qui sont proposées dans les chapitres suivants vont utiliser les modèles développés dans ce chapitre. Les modèles développés sous matlab/simulink concernent le chauffage, la climatisation, le lave-linge, le réfrigérateur, la cuisinière et les autres charges... Ces modèles de charge résidentielle seront validés par les mesures.

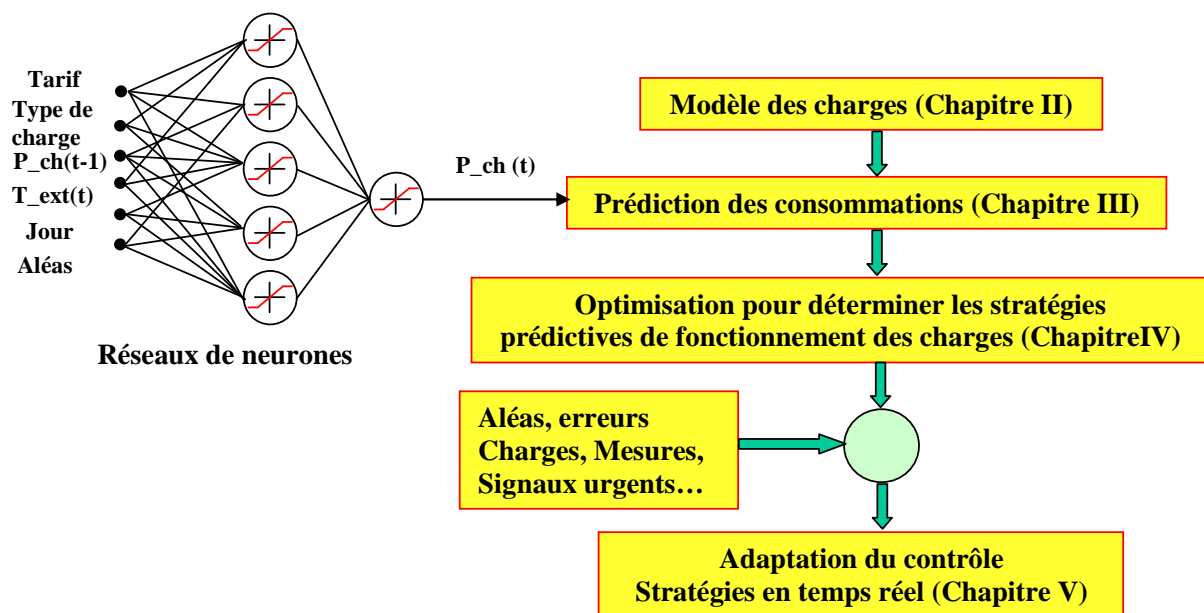


Fig. I-7: Organisation de thèse

L'objectif du troisième chapitre de la première phase (Fig. I-7) est de proposer les méthodes de la prévision de consommation à court-terme afin de reproduire les courbes de charge des bâtiments résidentiels ou multi-bâtiments (quartier, ou région) pour chaque heure du lendemain, en tenant compte de différents facteurs comme la consommation historique et les facteurs sociologiques et météorologiques.

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu une méthode de prévision de charge qui utilise les réseaux de neurones. Nous rappellerons d'abord le fonctionnement d'un réseau de neurones. Nous présenterons ensuite un programme développé sous Matlab qui permet de réaliser une prévision de charge pour un groupe des bâtiments (ou pour une région). Le programme sera testé par un jeu de données réelles de consommation relevées pendant 9 ans dans un quartier de Hanoi au Vietnam.

Ensuite, nous aborderons une méthode ascendante souvent baptisée «bottom-up» qui est basée sur la connaissance de l'usage final. Cette méthode permet de déterminer la consommation d'un ensemble des appareils ou de la totalité d'une maison comme la combinaison des consommations des appareils individuels et de leur taux d'utilisation. Cette méthode est bien adaptée pour le secteur résidentiel.

Pour la deuxième phase, qui est la gestion prédictive des charges (Fig. I-7), nous proposons dans le quatrième chapitre, trois méthodes originales de gestion optimale du chauffage et de la climatisation:

- *Une première méthode de gestion du chauffage et de la climatisation qui repose sur la minimisation des pics de consommation*
- *Une deuxième méthode de gestion du chauffage qui est basée sur le maintien du confort de la température intérieure*
- *Une troisième méthode de gestion du chauffage repose sur la minimisation des coûts de consommation.*

Ces trois méthodes sont validées par la simulation pour une maison (consommation résidentielle) et étendues à plusieurs bâtiments résidentiels et à un bâtiment à usage tertiaire (comme par exemple un hôtel). Ces méthodes sont valables pour une durée de quelques minutes à quelques heures. Elles peuvent être utilisées pour déterminer les stratégies prédictives de fonctionnement des systèmes thermiques pour l'heure suivante (one hour ahead) ou la journée du lendemain (one day ahead).

Les informations obtenues dans cette phase (ex : puissance de consommation maximale autorisée) seront utilisées par le pilotage en temps réel de la consommation du bâtiment (qui fera l'objet du chapitre suivant).

Nous allons aborder cette partie par une revue des méthodes d'optimisation pour déboucher par la suite de l'étude sur des méthodes d'optimisation non linéaire couplées avec la méthode «branch and bound». Nous présenterons ensuite, les trois méthodes différentes pour la gestion du chauffage et enfin de la climatisation.

L'objectif de la dernière phase, qui est la gestion en temps réel des charges (Fig. I-7) et fait l'objet du cinquième chapitre est de déterminer les stratégies de gestion en temps réel des systèmes thermiques comme le chauffage, la climatisation et la cuisinière. Les méthodes de régulation auto-adaptative seront proposées. Nous la qualifions de gestion en temps réel, car, à partir de la gestion prédictive des consommations déterminée par la deuxième phase, présentée dans le chapitre précédent, il faut réguler le fonctionnement des charges (chauffage et climatisation) en s'adaptant aux conditions réelles qui tiennent compte des aléas (ex : des variations rapides des charges) et des erreurs commises lors de la phase prédictive.

Dans ce chapitre, nous avons proposé deux méthodes originales de gestion de la charge en temps réel:

- *La première méthode est basée sur un système de régulation adaptative des chauffages et des climatisations*

- *La deuxième méthode sera appliquée à un système « intelligent » de délestage en douceur des cuisinières.*

Ces méthodes sont valables pour une durée de quelques secondes à quelques heures. Le dispositif proposé au niveau local doit assurer le confort des occupants et tout en respectant la contrainte de puissance maximale autorisée qui peut être un signal tarifaire envoyé par le commercialisateur ou une consigne envoyée par le gestionnaire des réseaux (comme par exemple un signal de délestage pour éviter une congestion, un blackout ou pour améliorer la stabilité du réseau).

Dans cette partie nous aborderons tout d'abord la méthode de gestion des chauffages par la variation adaptative de la consigne de température des moyens de chauffage. Cette méthode sera appliquée à une maison tout entière (dans l'application au secteur résidentiel), puis à la gestion des climatisations d'un hôtel (secteur tertiaire) par la variation adaptative de consigne de température en fonction de la puissance admissible.

Une deuxième méthode originale est proposée pour la gestion des moyens de chauffage classiques (sans fil pilote), les cuisinières ou encore l'eau chaude sanitaire. Cette méthode est basée sur le délestage en fonction de la courbe de protection ou la courbe de puissance autorisée.

Enfin, ce rapport se terminera par la conclusion et une ébauche de quelques perspectives de développement pour le futur.

## **Chapitre II : Gestion de charge dans les bâtiments et développement des modèles de charge**



<b>II. CHAPITRE II : GESTION DE CHARGE DANS LES BATIMENTS ET DEVELOPPEMENT DES MODELES DE CHARGE.....</b>	<b>23</b>
II.1 INTRODUCTION .....	25
II.2 BESOINS ENERGETIQUES ET USAGES DANS LE SECTEUR DE BATIMENT .....	25
II.2.1 <i>Besoins énergétiques</i> .....	25
II.2.2 <i>Usages dans les bâtiments</i> .....	26
II.2.2.1 Secteur résidentiel .....	26
II.2.2.2 Secteur tertiaire.....	29
II.2.2.3 Usages concurrentiels .....	31
II.2.2.4 Quelques usages classiques des bâtiments.....	32
II.3 METHODES DE GESTION DES CHARGES DANS LES BATIMENTS .....	35
II.3.1 <i>Méthodes générales de gestion de charge</i> .....	35
II.3.1.1 Méthodes de délestage /relestage.....	35
II.3.1.2 Décalage de consommation .....	36
II.3.1.3 Programmation temporelle .....	36
II.3.1.4 Production décentralisée locale .....	37
II.3.2 <i>Méthodes de gestion des chauffages</i> .....	37
II.3.2.1 Régulation .....	37
II.3.2.2 Programmation .....	38
II.3.2.3 Gestion de puissance .....	38
II.3.3 <i>Méthodes de gestion optimale de charge des bâtiments</i> .....	39
II.4 DEVELOPPEMENT DES MODELES DE CHARGE .....	40
II.4.1 <i>Introduction</i> .....	40
II.4.2 <i>Modèle des chauffages</i> .....	41
II.4.2.1 Equations de thermodynamique d'une salle de chauffage .....	41
II.4.2.2 Modèle thermique d'une salle par Simulink.....	45
II.4.3 <i>Modèle des climatisations</i> .....	46
II.4.3.1 Principe de fonctionnement de la climatisation .....	46
II.4.3.2 Modèle thermodynamique d'une salle conditionnée .....	47
II.4.4 <i>Modèle des autres usages</i> .....	50
II.4.4.1 Cuisinière électrique.....	50
II.4.4.2 Réfrigérateur.....	53
II.4.4.3 Congélateur .....	55
II.4.4.4 Lave- linge.....	58
II.4.4.5 Lave-vaisselle.....	61
II.5 CONCLUSION .....	63

## II.1 Introduction

La gestion de charge peut être réalisée à l'aide de solutions directes et indirectes. La gestion directe de la charge (commande) est basée sur des mesures technologiques et commande les charges en commutant directement les différents équipements par une solution du type "Marche/Arrêt". Le confort peut être maintenu sans assurer la continuité de fourniture de l'électricité. Des technologies de communication modernes sont employées de nos jours pour mettre des stratégies de contrôle de charge en application.

La gestion de charge indirecte est basée sur des mesures économiques. Différents tarifs et mécanismes d'évaluation sont utilisés afin d'encourager le client à optimiser la demande de charge. On peut citer comme exemple le tarif concernant les charges interruptibles et le tarif avec le composant de charge.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord les besoins énergétiques et les usages dans le secteur de bâtiment. Afin de mieux comprendre les méthodes existantes de gestion de charge dans le but de développer les méthodes efficaces, cette partie poursuivra par la présentation de plusieurs moyens comme les méthodes de délestage/relestage, le déplacement de consommation, la programmation temporelle. La gestion peut être effectuée par les systèmes de régulation des équipements électriques ou par un programme de gestion optimale..

La dernière partie sera consacrée au développement des modèles de charges. Cette partie est très importante car toutes les méthodes proposées dans les chapitres suivants utiliseront les modèles développés dans ce chapitre. Les modèles développés sous matlab/simulink concernent le chauffage, la climatisation, le lave-linge, le réfrigérateur, la cuisinière et les autres charges... Ces modèles de charge résidentielle seront validés par les mesures.

## II.2 Besoins énergétiques et usages dans le secteur de bâtiment

### II.2.1 Besoins énergétiques

La consommation d'électricité de l'ensemble du secteur résidentiel et tertiaire représente presque les deux tiers de l'électricité finale consommée [DGM05]. La partie résidentielle représente environ 55% du secteur total, soit 150 TWh, tandis que la partie tertiaire représente 123 TWh (Fig. II-1). Entre 1970 et 2005, la consommation d'électricité du résidentiel-tertiaire a augmenté beaucoup plus vite que celle de l'industrie, avec un rythme moyen de croissance annuel de plus de 5%, contre seulement 2% pour l'industrie (35% pour le résidentiel et 29% pour le tertiaire, contre 30% pour l'industrie). Le Tableau II-1 présente l'évolution de la consommation d'électricité du secteur résidentiel et tertiaire par usage. La consommation par les chauffages électriques et l'eau chaude sanitaire prend une partie importante.

Unité TWh	1985	1990	1995	2000	2002	2003	2004	2005
Sidérurgie	9,9	10,5	10,4	11,1	11,2	11,7	11,8	10,1
Industrie	86,6	105	114,1	127,4	128	126,2	127,2	125,7
Résidentiel-Tertiaire	143	179,6	211,5	240,5	248,3	258	266,4	272,6
Agriculture	1,4	2	2,5	2,7	3	3,4	3,3	3,4
Transports	7,4	8,3	8,6	10,4	10,8	11,8	12,2	12
TOTAL	248,3	305,5	347,1	392,2	401,3	411,1	420,8	423,7

Tableau II-1: Consommation d'électricité du secteur résidentiel et tertiaire par usage

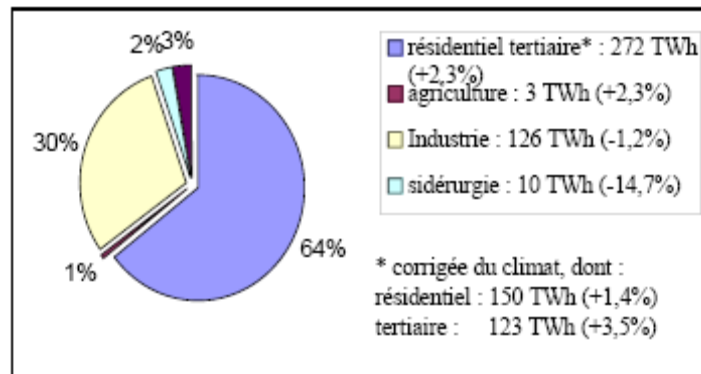


Fig. II-1: Consommation finale d'électricité en 2005 : 424 TWh

Consommation résidentielle	Consommations tertiaires
Froid	Bureautique
Éclairage	Éclairage
Loisir	Climatisation
Chaudière	Éclairages locaux
Electroménager	Ascenseur
Eau chaude sanitaire	Ventilateur
Chauffage électrique	Chaudière
Cuissons	

Tableau II-2: Classification des usages dans le secteur résidentiel et tertiaire  
Des usages dans le secteur résidentiel et tertiaire est présentée dans le Tableau II-2.

## II.2.2 Usages dans les bâtiments

Dans secteur résidentiel et tertiaire, les techniques d'utilisation de l'électricité, se divisent en deux grandes catégories :

- Les **usages spécifiques** pour lesquels aucune autre forme d'énergie n'est substituable à court terme à l'électricité
- Les **usages concurrentiels** pour lesquels l'électricité est en concurrence directe avec les autres énergies.

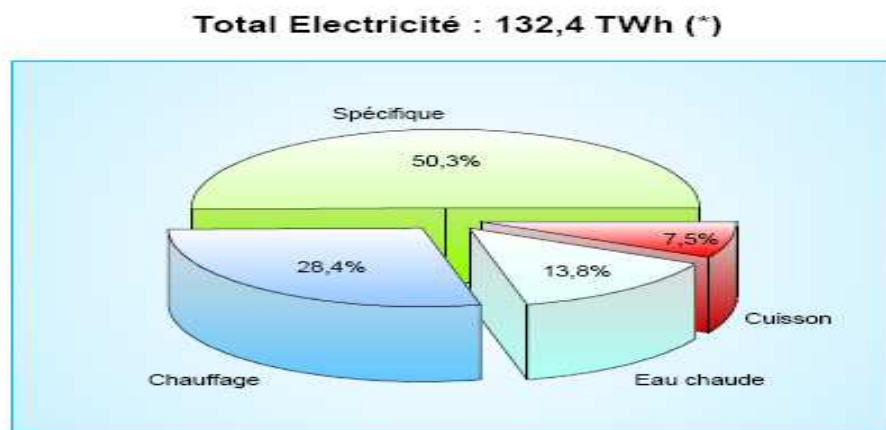
### II.2.2.1 Secteur résidentiel

#### II.2.2.1.1 Usages spécifiques

La part des usages spécifiques – électroménager et éclairage – dans la consommation totale du secteur résidentiel est d'environ 47 %. Ces usages se sont développés rapidement durant

les trente glorieuses (années 50-80) tant et si bien qu'aujourd'hui une très large majorité des ménages français possède les équipements de base (réfrigérateur, lave-linge, télévision).

En France, avec 66,6 TWh, les usages spécifiques de l'électricité représentent en 2005, la moitié de la consommation totale d'électricité de l'Habitat, loin devant le chauffage (37,7 TWh), l'eau chaude (18,3 TWh) et la cuisson (9,9 TWh). En évolution, les usages spécifiques assurent à eux seuls la croissance de l'électricité. Avec respectivement 16 et 15 TWh, le froid et le lavage constituent les premiers postes de consommation spécifique, devant l'éclairage (12 TWh) et les produits bruns (11 TWh). Le solde (13 TWh), intégrant notamment les micro-ordinateurs, apparaît de plus en plus important au fil des années du fait de l'équipement massif des ménages [CER07]. La Fig. II-2 présente la consommation des usages spécifiques dans le résidentiel par rapport au reste.



(\*) année 2005 à climat normal

Fig. II-2: Consommation des usages spécifiques et des autres usages dans le résidentiel

L'énergie électrique a des fonctions différentes pour ces usages. Pour le froid, elle assure le fonctionnement des compresseurs; pour le lavage (linge ou vaisselle), elle a une fonction essentiellement thermique puisque 80 % de l'énergie consommée durant un cycle de lavage est utilisée pour le chauffage de l'eau.

#### II.2.2.1.2 Usages concurrentiels

En France, les usages concurrentiels représentent 30 % environ de la consommation d'électricité. Ce sont, pour l'essentiel, des usages thermiques de l'électricité, qui se substituent à des utilisations directes de combustibles fossiles.

Les usages concurrentiels se sont fortement développés dans le secteur résidentiel notamment des chauffages électriques dont la part dans l'ensemble des résidences principales est passée entre 1970 et aujourd'hui de 5 % environ à plus de 25 %. La technique de chauffage la plus répandue est celle des convecteurs classiques (environ 90 % des installations).

La production d'eau chaude sanitaire électrique est présente dans plus de 40 % des foyers, essentiellement sous forme de ballons d'accumulation. Un tel développement a été facilité par la mise en place de l'option tarifaire avec heures creuses, qui traduit la différence de coûts

marginiaux existant entre les heures de la journée, plus chargées, et les heures de nuit. Le chauffage à accumulation de l'eau permet donc de tirer pleinement parti de ce tarif et s'avère ainsi particulièrement compétitif. Enfin la cuisson électrique s'est beaucoup développée, aussi bien dans le domaine des fours (les deux tiers sont aujourd'hui électriques) que des plaques (succès des vitrocéramiques).

La Fig. II-3 représente la répartition des consommations d'énergie électrique par usage dans les logements [SID02].

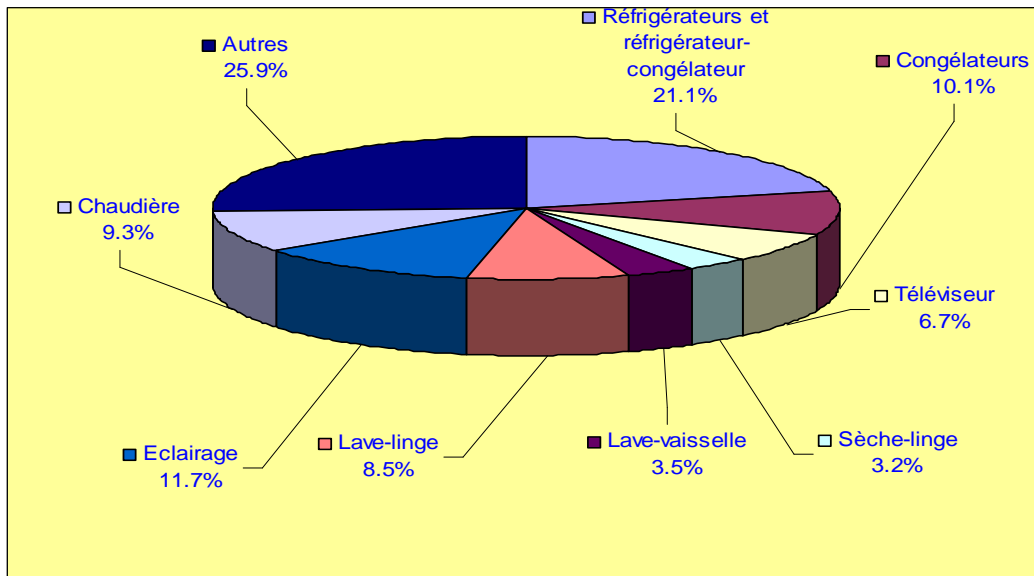


Fig. II-3: Répartition des consommations d'énergie électrique par usage dans les logements

La consommation annuelle moyenne des appareils électrodomestiques est présentée sur les deux Tableau II-3et Tableau II-4, ces valeurs sont extraites des campagnes de mesure par le Cabinet O.Sidler.

### Cuisson électrique

Appareils	Consommation annuelle moyenne (kWh)	Appareils	Consommation annuelle moyenne (kWh)
Totalité des consommations électriques en cuisine	568	Micro-ondes (selon le type)	50 à 75
Four de cuisine	224	Mini-four	99
Cuisinière	457	Cafetière	31
Plaques fonte	198 <sup>1</sup>	Bouilloire	58
Plaques vitro	281 <sup>1</sup>	Friteuse	11
Table à induction	337 <sup>1</sup>	Grille-pain	14
Plaques de cuisson (tous types confondus)	273	Cuiseur à vapeur	15

Tableau II-3: La consommation annuelle moyenne des cuissons électriques

### Appareils ménagers et éclairage

Cabinet O.Sidler

Appareils	Consommation annuelle moyenne (kWh)	Appareils	Consommation annuelle moyenne (kWh)
Réfrigérateur	250	Répondeur téléphonique	25
Réfrigérateur-congelateur	600	Téléphone répondeur	45
Congélateur	615	Téléphone sans fil	23
Congélateur américain	1640	Aspirateur	18
Lave-linge	250	Eclairage	465
Lave-vaisselle	285	Lampe halogène	292
Sèche-linge	430	Fer à repasser	40
TV	160	Chaudière murale mal asservie	350 à 500
Magnétoscope	122	Chaudière murale bien asservie	59
Décodeur Canal +	96	Aquarium à poissons exotiques	500 à 1300
Démodulateur d'antenne parabolique	80	Pompe de piscine	1000 à 2000
		Ventilation mécanique contrôlée individuelle	311

Tableau II-4: *La consommation annuelle moyenne des appareils ménagers et éclairage*

La puissance minimale prévue en fonction du dimensionnement des logements est représentée sur le Tableau II-5 [ROL01] :

Logement	Puissance (kVA)
Local annexe non habitable	3
Logement de 1 à 3 pièces principales (1)	6
Logement de 4 à 6 pièces principales (1)	9
Logement de 7 pièces principales (1) et plus	12
(1) ne sont pas comptées comme pièces principales les cuisines, salles d'eau, wc, dégagements, volumes de rangement.	

Tableau II-5: *Puissances minimales de dimensionnement à prévoir par point de livraison*

#### II.2.2.2 Secteur tertiaire

##### II.2.2.2.1 Usages spécifiques

L'usage spécifique le plus important dans le secteur tertiaire est l'éclairage (un tiers de la consommation du secteur) avec une large diffusion des techniques utilisant la fluorescence. Certains secteurs d'activité spécifique utilisent l'électricité pour des fonctions similaires à celles déjà mentionnées dans le secteur résidentiel (froid dans le commerce, chauffage ou lavage pour les hôpitaux par exemple). Au niveau d'un avant-projet sommaire, les puissances de référence installées pour l'éclairage peuvent être fixées comme l'indique le Tableau II-6 [ROL01].

Destination de la zone	Puissance de référence (W/m <sup>2</sup> )
Commerces et bureaux	16
Établissements d'enseignement Établissement sanitaire sans hébergement Salles de spectacle, de conférences Industrie	15
Établissement sanitaire avec hébergement Hôtellerie. Restauration Locaux non compris dans une autre catégorie	12
Établissement sportif Stockage. Transport	10

Tableau II-6: Puissance installée de référence de l'éclairage

La bureautique, qui s'est fortement développée ces dernières années, a contribué au dynamisme de la croissance des consommations de ce secteur. D'importantes évolutions techniques devraient cependant, à moyen terme, réduire sensiblement cette contribution, la consommation unitaire des appareils étant appelée à décroître fortement.

La technique d'éclairage utilisée dans l'industrie est essentiellement celle des lampes fluorescentes, qui combinent la facilité de mise en œuvre avec une bonne efficacité énergétique.

La Fig. II-4 représente la répartition des consommations électriques annuelles du supermarché en 2000. On voit que les postes de froid et l'éclairage représentent à eux seuls 83% de la consommation globale.

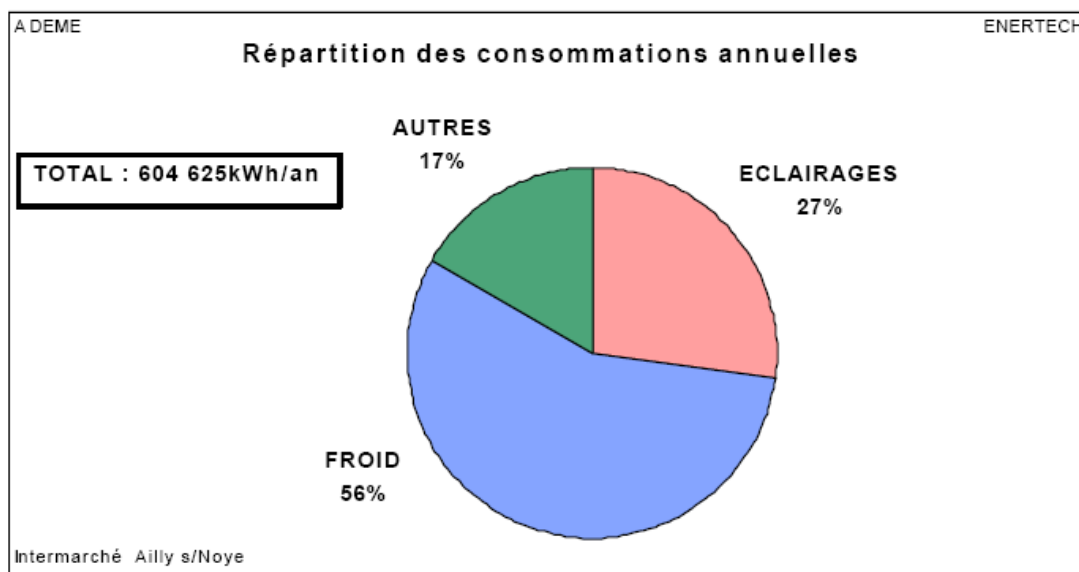


Fig. II-4: Répartition des consommations annuelles d'un super marché de moyenne surface [ADE01]

### II.2.2.3 Usages concurrentiels

Le chauffage est le principal usage concurrentiel dans le secteur tertiaire et est largement implanté dans les bureaux, dans l'hôtellerie et la restauration, ainsi que dans les grands commerces, pour lesquels l'offre combinée chaleur/climatisation est un plus indéniable. La production électrique d'eau chaude sanitaire est également fortement présente dans ces secteurs. Le Tableau II-7 représente la consommation de chauffage dans secteur tertiaire.

Secteur	Gwh	poids
Bureaux-administration	28.148	25%
Commerce	21.456	19%
Santé-action sociale	14.666	13%
Enseignement	19.667	17%
Cafés hôtels restaurants	9.502	8%
Sport-loisirs-culture-équipements collectifs divers	8.640	8%
Habitat communautaire	6.938	6%
Transport	4005	4%

Tableau II-7: Consommation de chauffage de secteur tertiaire en 2000 [SON02]

La cuisson électrique est aujourd'hui en tête dans la restauration commerciale structurée (chaînes), mais est encore devancée par le gaz dans les cuisines centrales et la restauration collective. Cette situation devrait s'avérer bénéfique pour l'électricité puisque le poids de la restauration commerciale de chaîne devrait continuer à croître fortement. Plusieurs facteurs expliquent la réussite de l'électricité sur ce secteur :

Les techniques électriques sont plus faciles à mettre en œuvre (moindre encombrement, modularité, évolutivité)

La réglementation est plutôt favorable à l'électricité, qui présente moins de problèmes de sécurité (auto certification plus libérale pour les appareils électriques que pour les appareils à gaz)

Les évolutions technologiques sont actuellement assez porteuses pour l'électricité (micro-ondes, induction).

La Fig. II-5 présente la consommation énergétique dans les bâtiments tertiaires [COM01]

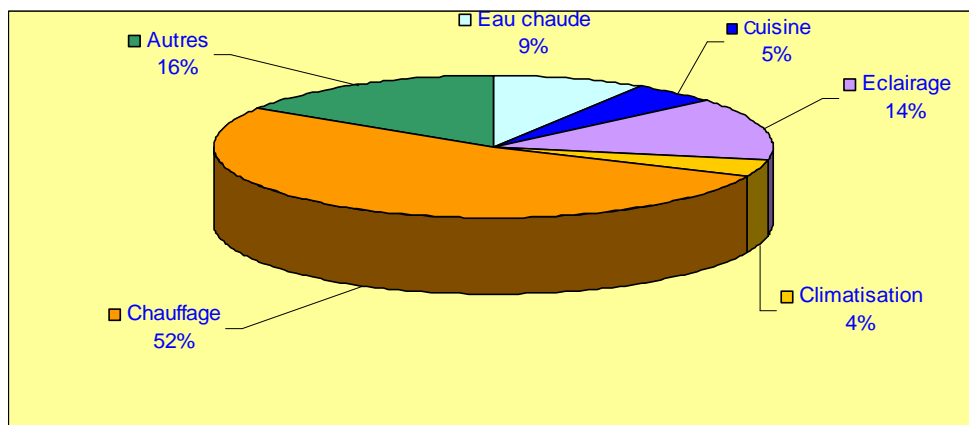


Fig. II-5: Consommation énergétique dans les bâtiments tertiaires de l'UE



### ***II.2.2.4 Quelques usages classiques des bâtiments***

#### ***II.2.2.4.1 Chauffage***

##### **❖ Chauffage central**

L'équipement interne des chaufferies dépend de la nature des générateurs de chaleur et de leur puissance. À côté des solutions traditionnelles faisant appel au gaz ou au fioul, voire au charbon, il existe une solution « tout électrique » à base de chaudière électrique directe, qui peut assurer la totalité des besoins tant en chauffage qu'en eau chaude.

Il faut noter deux points particuliers :

- aucune canalisation électrique étrangère au service de la chaufferie ne doit y pénétrer
- un coffret de coupure d'urgence doit être placé sur une voie d'accès, à l'extérieur de la chaufferie ; il comprend (généralement sous verre dormant) des dispositifs de coupure distincts pour l'éclairage et pour les autres utilisations.

##### **❖ Chauffage électrique**

Les émetteurs de chaleur peuvent être de type ponctuel ou de type intégré.

###### **• Type ponctuel**

Il s'agit des appareils suivants :

- Convecteurs, chauffant l'air par convection naturelle (avec une légère part de rayonnement), à éléments tissés ou à fil nu ;
- Panneaux rayonnants, à basse température (avec une part de convection de 20 à 40 %) ;
- Accumulateurs, stockant l'énergie thermique en heures creuses de la tarification pour la restituer ensuite (que ce soit par voie sèche ou humide) ; ils ont nécessairement une masse et des dimensions supérieures aux précédents. Il existe des modèles dynamiques 8 heures, n'accumulant qu'en heures creuses, et des dynamiques 24 heures dont l'alimentation peut être relancée en cas de besoin.

###### **• Type intégré**

Il s'agit des appareils suivants :

- Plancher rayonnant, constitué de câbles électriques chauffants noyés dans une dalle de béton de moyenne épaisseur, la température du sol ne devant pas excéder 28 °C ;
- Plancher mixte, constitué d'un plancher chauffant accumulant (en heures creuses), avec un complément par appareils individuels dans chaque pièce ;
- Plafond chauffant, réalisé par des éléments en feuilles minces recouverts par le parement du plafond ;
- Cassettes chauffantes, éléments surtout réservés pour les locaux de grande hauteur (6 à 12 m).

###### **• Chauffage mixte**

Certaines installations (c'est surtout le cas en renouvellement de chauffage central par eau chaude utilisant comme combustible le fioul), peuvent utiliser une chaudière bi - énergie électrofioul, soit compacte soit « duo », dont le fonctionnement est étroitement asservi aux options tarifaires de l'électricité.

#### II.2.2.4.2 *Climatisation*

Comme en chauffage, on retrouve des solutions tant individuelles que centralisées.

❖ **Climatisation centralisée** : elle assure le chauffage et le rafraîchissement :

— par système « tout air » ;

— par ventilo-convecteurs (à une ou deux batteries, à une batterie plus une résistance électrique);

— par cassettes à eau glacée (reprenant la même mise en œuvre que les ventilo-convecteurs).

❖ **Climatiseurs individuels** : ils sont destinés à des locaux de petites dimensions (10 à 50m<sup>2</sup>), et n'assurent pas le contrôle de l'humidité relative. On distingue :

— les monoblocs à condensation à air ;

— les monoblocs à condensation à eau ;

— les split - systèmes (dont le compresseur et le condenseur sont placés à l'extérieur du local) à condensation à air ;

— les Split - systèmes à condensation à eau (même principe que ceux à air).

#### • **Pompe à chaleur (PAC)**

Extrayant la chaleur de diverses sources possibles, elle est généralement utilisée en complément d'un autre système (chauffage ou climatisation).

Dans le secteur tertiaire, la PAC, réversible, est utilisée sur boucle d'eau, pour réutiliser la chaleur extraite de certains locaux ayant des besoins de froid, au profit d'autres demandant de la chaleur.

#### II.2.2.4.3 *Autres usages*

❖ **Ascenseurs et monte-charge**

Les entraînements électriques des cabines sont effectués avec différents types de motorisations :

— entraînement à adhérence avec moteur alternatif asynchrone mono ou bi-vitesse, réservé aux faibles vitesses (jusqu'à 1,6 m/s) ;

— ensemble génératrice/moteur à courant continu, à vitesse variable (avec ou sans réducteur)

— ensemble avec variation de vitesse d'un moteur à courant continu associé à un variateur à thyristors (pour des courses moyennes ou importantes), à rendement amélioré ;

— ensemble à variation de vitesse et moteur à courant alternatif régulé.

Sauf cas d'un immeuble existant (et sous certaines conditions), les canalisations d'alimentation ne doivent pas passer dans la gaine d'ascenseur ; dans chaque machinerie, un tableau alimenté directement depuis les services généraux regroupe les protections des différents circuits, l'éclairage étant l'objet d'une alimentation distincte de celle des machines.

Le calcul des alimentations doit tenir compte des appels de courant importants au démarrage ; dans le cas de batteries d'ascenseurs, on peut être amené à échelonner les démarrages pour éviter le cumul des surintensités.

#### ❖ **Pompes et supprimeurs**

De la même façon que pour le chauffage ou les ascenseurs, le service des eaux doit être alimenté directement à partir des services généraux et être équipé d'un tableau particulier.

#### ❖ **Ventilation mécanique contrôlée (VMC)**

Dans la construction individuelle, il est recommandé d'installer le dispositif de commande sur le tableau de répartition (et non dans la cuisine), pour éviter des interruptions répétées, génératrices de condensations et de moisissures.

Dans le cas d'immeuble collectif, de nombreuses conditions en règlent l'installation et l'exploitation (notamment réseau d'alarme en cas de dysfonctionnement). Lorsque la VMC sert également à l'extraction des produits de combustion des chaudières à gaz individuelles, un dispositif de sécurité collective, comportant des éléments à intégrer dans l'installation électrique individuelle, est imposé (VMC-gaz).

#### ❖ **Eau chaude sanitaire (ECS)**

**Chauffe-eau à accumulation** : ils sont alimentés pendant les heures creuses (l'installation est alors dotée d'un comptage à double tarif), la mise en service étant assurée soit par une horloge, soit par un relais recevant les ordres transmis via le réseau de distribution ; un bilan économique favorable peut être tributaire d'autres utilisations conjointes (chauffage électrique à accumulation).

**Chauffe-eau instantané** : ils sont de forte puissance (3 à 6 kW) pour des débits faibles (3 à 4 L/min, lave-mains, douche).

**Chauffe-eau double puissance**, combinant les deux principes précédents.

#### ❖ **Éclairage**

Il y a plusieurs types de moyens d'éclairage :

Les lampes à incandescence « classiques » sont utilisées pour des applications à faible durée annuelle de fonctionnement ou cas d'espèce, comme certains hublots.

Les lampes incandescentes aux halogènes courantes sont soit des types tubulaires de puissances allant de 100 à 1 000 W en basse tension (220 V), soit des modèles miniaturisés allant de 25 à 150 W en très basse tension TBT (12 V en général, quoique certains modèles soient également disponibles en 220 V).

Les lampes fluorescentes tubulaires (longueurs courantes 0,60 m – 1,20 m – 1,50 m ; diamètres 26 et 16 mm) nécessitent pour leur fonctionnement un accessoire ( ballast), qui peut être du type ferromagnétique courant, dont la disparition est programmée, ou électronique.

Aujourd’hui, les LED peuvent produire toutes les couleurs, ou presque. Certaines émettent même dans l’infrarouge ou l’ultraviolet. Néanmoins, toute diode lumineuse est par nature monochromatique et son efficacité de conversion dépend de la longueur d’onde d’émission.

## II.3 Méthodes de gestion des charges dans les bâtiments

### II.3.1 Méthodes générales de gestion de charge

L’objectif général des méthodes de gestion de charge est de :

- Réduire la consommation
- Réduire les pointes de consommation
- Déplacer des consommations de la période tarif plus cher vers celle de tarif plus basse

La Fig. II-6 représente les effets des méthodes de gestion de charge :

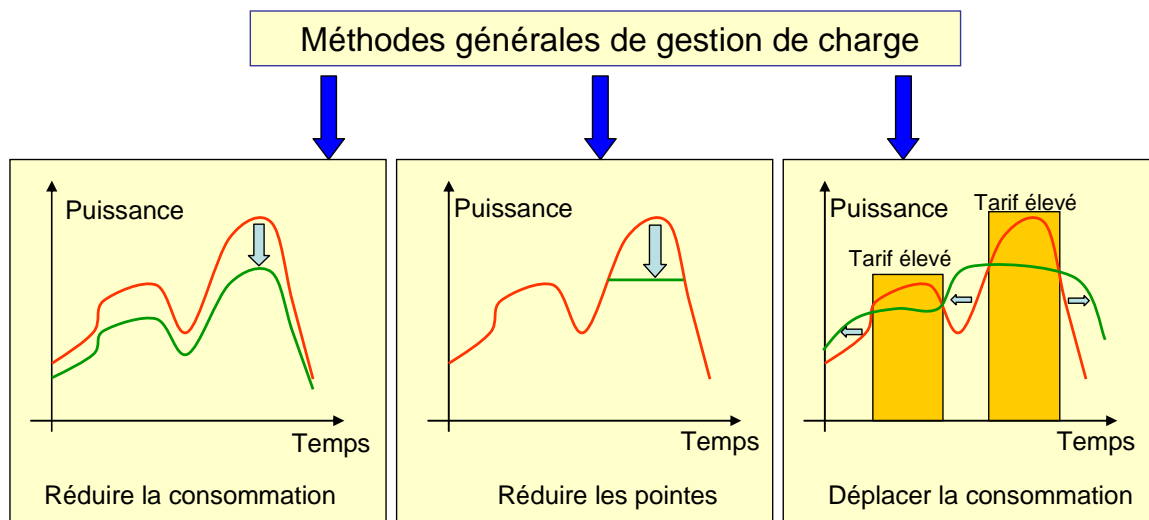


Fig. II-6: Les méthodes générales de gestion de charge

Les méthodes de gestion de charge les plus fréquemment utilisées sont :

- Délestage/relestage
- Décalage des consommations
- Programmation temporelle
- Production décentralisée local.

#### II.3.1.1 Méthodes de délestage /relestage

Le délestage permet de décharger temporairement une installation afin de limiter l'appel de puissance. Cette solution peut être utilisée de manière intelligente pour la gestion optimale des charges en utilisant les techniques de délestage invisible. Les équipements qui sont ciblés par cette solution sont les unités d’air conditionné domestiques et commerciales et les unités de

chauffage central. L'idée est d'utiliser l'inertie thermique offerte par ces équipements pour réduire leur consommation, en maintenant un niveau de confort minimal.

❖ Délestage sur ordre

Les équipements sont délestés selon un ordre de priorité qui a été établi préalablement et mémorisé par l'automate.

Par exemple, le délestage /relestage suit l'ordre extérieure (ex: EDF ; ordre HP heures de pointe ...), plusieurs circuits non prioritaires sont délestés pendant tout la durée de l'ordre et reconnectés dès sa disparition.

❖ Délestage sur seuil de puissance ou l'intensité

Si la puissance appelée dépasse le seuil fixé, il y a délestage des équipements qui sont raccordés au délesteur durant des périodes courtes.

Les relais d'intensité donnent les ordres de délestage un circuit non prioritaire lors que le courant absorbé dépasse sa valeur prédéfinie. Si cette valeur est toujours dépassé un autre circuit sera délesté, et ainsi de suite.

Dès la disparition de dépassement les circuits seront reconnectés

❖ Délestage sur comptable énergie

En tarif vert les appels de puissance ne sont pas enregistrés de manière instantanée. La puissance est intégrée sur des périodes successives de 10 mm et l'énergie consommée pendant cette période est comparée à celle correspondant à la puissance souscrite. Il est donc possible au cours d'une même période d'appeler une puissance supérieure à la puissance souscrite à condition d'avoir une compensation à l'intérieur de cette même période. En fonction de l'énergie consommée, l'automate de gestion d'énergie délestera automatiquement un ou plusieurs départs. Ce délestage pourra s'effectuer toujours dans le même ordre ou pourra être cyclique. En cas de contrat avec dénivelé de puissance l'automate s'ajustera sur la puissance souscrite dans chaque période tarifaire.

### ***II.3.1.2 Décalage de consommation***

Déplacer plusieurs usages (Eau chaude sanitaire, chauffage à inertie..) de la période des tarifs plus chers vers celles des tarifs plus basses.

### ***II.3.1.3 Programmation temporelle***

La programmation temporelle permet de commander l'ouverture et la fermeture des circuits en fonction de l'occupation et de l'utilisation des locaux.

Elle peut être : Journalière, Hebdomadaire, Annuelle

La programmation utilise pour :

- D'améliorer le confort des utilisateurs en prévoyant leur présence et en anticipant le fonctionnement de certains récepteurs (chauffage...)
- D'éviter les gaspillages d'énergie en coupant les récepteurs en dehors des périodes d'occupation des locaux.

La programmation temporelle pourra être associée à des consignes programmables (température, niveau d'éclairage...).

#### **II.3.1.4 Production décentralisée locale**

La gestion des productions locales répond à deux préoccupations :

- Assurer la continuité d'alimentation
- Optimiser le prix de l'énergie
- Gestion de congestion

#### **II.3.2 Méthodes de gestion des chauffages**

Le chauffage est une charge contrôlable la plus importante dans les bâtiments tertiaires et résidentiels (75% pour le secteur résidentiel, 30% pour le secteur tertiaire et 61% pour le secteur résidentiel et tertiaire, DGEMP, 05/12/2005).

Pourtant les caractères particuliers liés aux installations thermiques, notamment l'inertie thermique, permettent de supporter une durée de dizaine de minutes de délestage de la source. Les méthodes de gestion de charge seront appliquées en tenant compte du caractère particulier du chauffage.

Les méthodes de gestion de chauffage sont classées en trois groupes :

##### **II.3.2.1 Régulation**

La régulation maintient la température à une valeur de consigne. Elle permet d'assurer le confort attendu mais aussi de participer à la maîtrise des consommations. Il y a deux types de la régulation :

❖ **Régulateur en fonction de la température intérieure** : il fonctionne en général sur la température ambiante selon le principe de la boucle fermée suivant :

- Mesure de la température ambiante intérieure ;
- Comparaison de cette mesure avec la valeur de consigne ;
- Etablissement de la correction qu'il doit réaliser en fonction de l'écart ;
- Action sur la fourniture énergétique.

On distingue deux modes de réglage: Tout ou rien non modulé (TOR) et Tout ou rien modulé (PID).

❖ **Régulateur en fonction de la température extérieure** : fonctionne en fonction des données climatiques et particulièrement de la température extérieure selon principe la boucle ouverte suivant :

- Mesure de la (les) grandeur(s) perturbatrice(s)
- Etablissement de la fourniture à apporter selon une loi de correspondance
- Action sur la fourniture énergétique.

Ce type de régulation ne permet pas d'assurer précisément les besoins locaux par local et nécessite en complément une régulation en boucle fermée.

On distingue deux modes de réglage : Chrono proportionnel et Par étages

### **II.3.2.2 Programmation**

La programmation est un automatisme qui permet :

- De libérer l'utilisateur d'interventions de type répétitif
- D'éviter les erreurs de réglage
- De limiter la consommation d'énergie au strict minimum sans nuire au confort.

On peut présenter quelques exemples d'utilisation des programmeurs :

- Horloge programmable associée à un thermostat de zone
- Installation utilisant des convecteurs à fil pilote. L'intermittence est réalisée soit :
  - \* Soit par une horloge ou un interrupteur horaire à contacts inverseurs installé pour couper la phase
  - \* Soit par une centrale spécifique.

### **II.3.2.3 Gestion de puissance**

En général, les méthodes de gestion de la puissance de chauffage sont identiques à celles présentées sur la gestion de charge. Cependant les méthodes de gestion du chauffage sont différentes grâce aux caractères particuliers de thermique, notamment par l'inertie thermique. On peut présenter les méthodes de gestion de puissance de chauffage suivantes :

**a. Les relais d'asservissement** autorisent ou condamnent un ou plusieurs équipements de manière impérative. Par exemple, l'autorisation d'un chauffage à accumulation pendant les heures creuses ou au contraire l'interdiction du chauffage des locaux de circulation (couloirs, halls, etc.) pendant les heures de pointe.

**b. Les combinateurs cycliques** alimentent périodiquement des équipements pendant une période définie. Ils sont particulièrement utilisés pour les relances de chauffage à accumulation pendant les heures pleines ou pour un fractionnement du chauffage direct pendant les heures de pointe.

#### **c. Délesteurs ampèremétriques**

Cette méthode est identique à la méthode de délestage sur seuil de puissance ou l'intensité. Les entreprises (comme Hager, Delta-dore...) les classent en les deux types suivants :

- ❖ **Délestage hiérarchisé** (Hager ou Delta-dore) : délestage d'un groupe après l'autre en fonction du niveau de dépassement, ou deux groupes si l'appel est trop important (délestage par l'ordre de priorité: commence toujours par la groupe D1)
- ❖ **Délestage cyclique** (Delta-dore) **ou délestage tournant** (Hager) : délestage des groupes de chauffage de manière alternée. Le cycle de délestage est de 5 mn à 6 mn (délester la groupe D1 puis D2 puis D3 puis D1...)

La Fig. II-7 ci-dessous représente le tableau de distribution électrique avec la mise en place d'une combinaison de délestage hiérarchisés et de délestage tournant à trois sorties cycliques.

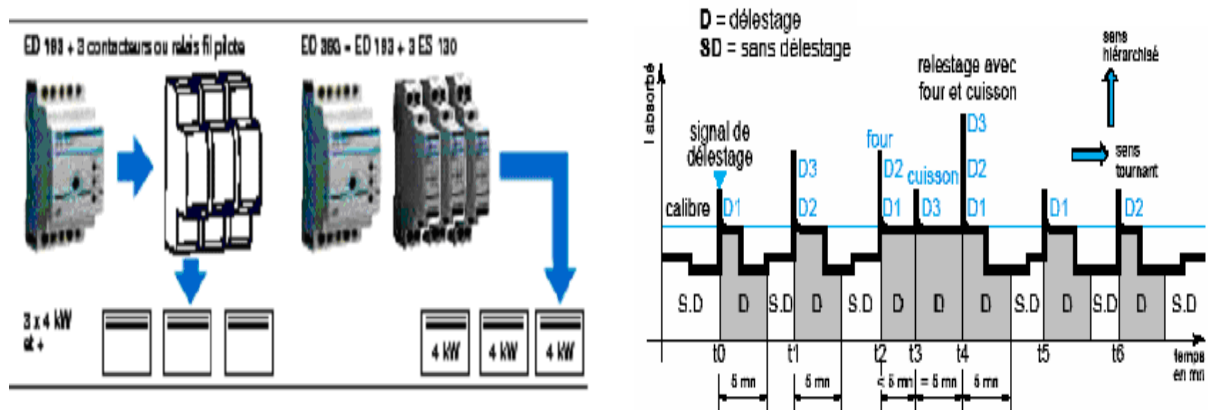


Fig. II-7: Délestage tournant et hiérarchisé

On voit que les méthodes de Délestage hiérarchisé et Délestage cyclique peuvent être nuisible au confort thermique lors d'un appel trop important (trop de appareils en même temps : cuisinière, four, chauffage ECS.. radiateurs)

#### d. Délestage avec intégration

Cette méthode concerne certains contrats de fourniture d'électricité ne contrôlent pas la puissance instantanée appelée mais l'énergie moyenne consommée sur une période de référence (quelques minutes).

Cette méthode est identique à méthode de décalage de consommation.

### II.3.3 Méthodes de gestion optimale de charge des bâtiments

Une série de méthodes d'optimisation ont été appliquées pour la gestion de charge des bâtiments dont seulement quelques unes parmi les plus importantes seront discutées ici : optimisation linéaire et non linéaire (LP et NLP), programmation dynamique (DP), commande optimale linéaire-quadratique (LQ), et la méthode génétique (GA).

Deux groupes des méthodes ont été couramment utilisés pour la gestion optimale des charges.

Le premier groupe [KEE96] de gestion optimale des charges dans un bâtiment comporte les méthodes pour minimiser le coût. Le coût est une combinaison pondérée du coût de l'électricité et du confort humain. Le principe de ces méthodes est d'identifier les stratégies importantes de délestage et de proposer les conseils pour que les opérateurs du bâtiment délestent convenablement la charge de ce bâtiment.

Le deuxième groupe consiste à la réalisation de simulations étendues avec différentes combinaisons de paramètre; la comparaison parmi ces simulations indique le point optimal, qui est une solution sub-optimale. Par exemple, [HEN97] a développé un environnement de simulation pour étudier un éventail de paramètres principaux qui influencent les coûts



d'exploitation du système. La stratégie de commande optimale consiste à réduire au minimum tous les coûts d'électricité a été validée par les simulations.

Une analyse détaillée des méthodes de gestion optimale des charges sera présentée dans le chapitre IV.

## **II.4 Développement des modèles de charge**

### **II.4.1 Introduction**

Pour développer un système de gestion énergétique des bâtiments, il est nécessaire de comprendre les comportements des usagers. L'objectif de ce travail est de modéliser sous matlab/simulink avec quelques hypothèses les principaux types d'usage résidentiels. Ces modèles permettent de reconstituer les courbes de charge des usages.

Il existe plusieurs campagnes de mesure sur les usages électriques des bâtiments réalisées comme par exemple les campagnes de l'ADEME. Ces campagnes ont permis de préciser plusieurs caractéristiques des usages.

Ce système de mesure permet de déterminer la puissance moyenne toutes les dix minutes. Cet intervalle de temps n'est pas compatible avec les stratégies de gestion de charge en temps réel. C'est pourquoi il est nécessaire de réaliser les mesures des différents types de charges avec un échantillon de temps plus fin.

Pour ce faire, nous avons effectué les mesures sur les différents types de charge avec l'appareil de mesure LEM avec un échantillon d'une seconde. Les paramètres (la tension, la puissance active, réactive et le facteur de puissance...) de chaque type de charges sont enregistrés.

#### **❖ Caractéristique de l'appareil de mesure LEM**

- Mesure isolée de courant continue et alternatif
- TRMS (Valeur efficace vraie), facteur de crête et THD (Taux de distorsion harmonique) pour les ondes complexes et déformées
- Volts / Watts / VA / Cosφ / kWh
- Mesures triphasées
- Acquisition de données en interne et sur PC
- Mode MIN, MAX, AVE (moyenne), REC (enregistrement)
- Modes d'affichage multi – paramètres et de formes d'ondes.

Conditions de référence: toutes les précisions sont référencées à  $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

#### **❖ Le développement des modèles sont réalisés suite les pas suivants :**

- Le modèle de l'équipement sous Matlab/simulink est développé en analysant son fonctionnement et ses caractéristiques physiques.
- Nous utilisons l'appareil de mesure LEM pour mesurer et enregistrer des courbes réelles de charge (la puissance active, la puissance réactive, la puissance apparente, le facteur de puissance) avec un pas de temps d'une seconde.

- Les courbes réelles mesurées et celles mesurées par les autres campagnes de mesure (notamment ADEME) permettent une identification plus sûre et plus précise les modèles développés.

## II.4.2 Modèle des chauffages

### II.4.2.1 Equations de thermodynamique d'une salle de chauffage

Cette partie présentera le développement le model thermique d'une salle de chauffage. En général, le transfert thermique dans une salle comprend trois modes de transferts principaux :

- Conduction
- Conversion
- Rayonnement

Appliquant l'équation de conservation d'énergie pour chaque élément, le modèle dynamique d'une salle k qui comporte m murs et un radiateur électrique peut être écrit comme [MEN01]:

$$\rho_c c_o V_k^c \frac{dT_k^{\text{int}}}{dt} = \sum_{i=1}^m h^{\text{int}} A_i [T_i^n(t) - T_k^{\text{int}}(t)] + h^c A^c [T^c(t) - T_k^{\text{int}}(t)] + D(t) \quad (\text{II-1})$$

Où

- $\rho_c, c_o, V_k^c, T_i^n, h^{\text{int}}$  et  $A_i$  sont la densité d'air, le chaleur spécifique, le volume de salle k, la température de n<sup>ème</sup> couche du mur i, le coefficient d'échange thermique intérieur et la surface du mur i.
- $T_k^{\text{int}}$  la température intérieure de la salle k et  $T^c(t)$  la température du radiateur
- $D(t)$  la perturbation comprend la chaleur échangée avec l'air extérieur à travers les surfaces de l'enveloppe de faible masse du bâtiment, tels que les portes et les fenêtres et la chaleur produite par des équipements, des gens et du système de d'éclairage

$$D(t) = \sum_{j=1}^m \frac{T^{eq}(t) - T_k^{\text{int}}(t)}{R_j} + q_1 + q_2 \dots$$

- $q_1, q_2 \dots$  la chaleur produite par des équipements, des gens et du système de d'éclairage
- $R_j$  la résistance thermique de la surface j :

$$R_j = \frac{1}{h^{\text{ext}} A_j} + \frac{L_j}{\lambda_j A_j} + \frac{1}{h^{\text{int}} A_j}$$

- $A_j, \lambda_j, L_j$  et  $h^{\text{ext}}$  sont la surface j, la conductibilité thermique, l'épaisseur surface j et le coefficient d'échange thermique extérieur

Pour chaque couche k du mur i, on a :

$$\rho_{k,j} c_{k,j} V_{k,i} \frac{dT_{k,i}}{dt} = K_{k+1,i} A_i [T_{k+1,i}(t) - T_{k,i}(t)] - K_{k,i} A_i [T_{k,i}(t) - T_{k-1,i}(t)]$$

K la conduction thermique peut être estimée :

$$K_{k,i} = \frac{1}{(L_{k-1,i}/2)/\lambda_{k-1,i} + (L_{k,i}/2)/\lambda_{k,i}}$$

- $L_{k,i}$  et  $\lambda_{k,i}$  sont la conductivité thermique et l'épaisseur surface de la couche k du mur i

Pour la couche extérieure :

$$K_{1,i}(T_{2,i} - T_{1,i}) = h^{ext}(T_{1,i} - T^{eq})$$

La température équivalente  $T^{eq}$  est calculée par:

$$T^{eq} = T^{ext} + \frac{\alpha I}{h^{ext}}$$

- $\alpha$  et I sont l'absorptivité extérieure de surface du mur et la radiation solaire totale

Pour la couche intérieure (k=n) du mur i, on a :

$$K_{n,i} A_i (T_{n-1,i} - T_{n,i}) = h^{int} A_i (T_{n,i} - T^{int}(t)) + \sigma \varepsilon_c A^c F_{s,c-i} [T_{n,i}^4(t) - T^{c4}(t)] + \sigma \varepsilon_i A_i \sum_{j=1}^m F_{s,j-i} [T_{n,i}^4(t) - T_{n,j}^4(t)]$$

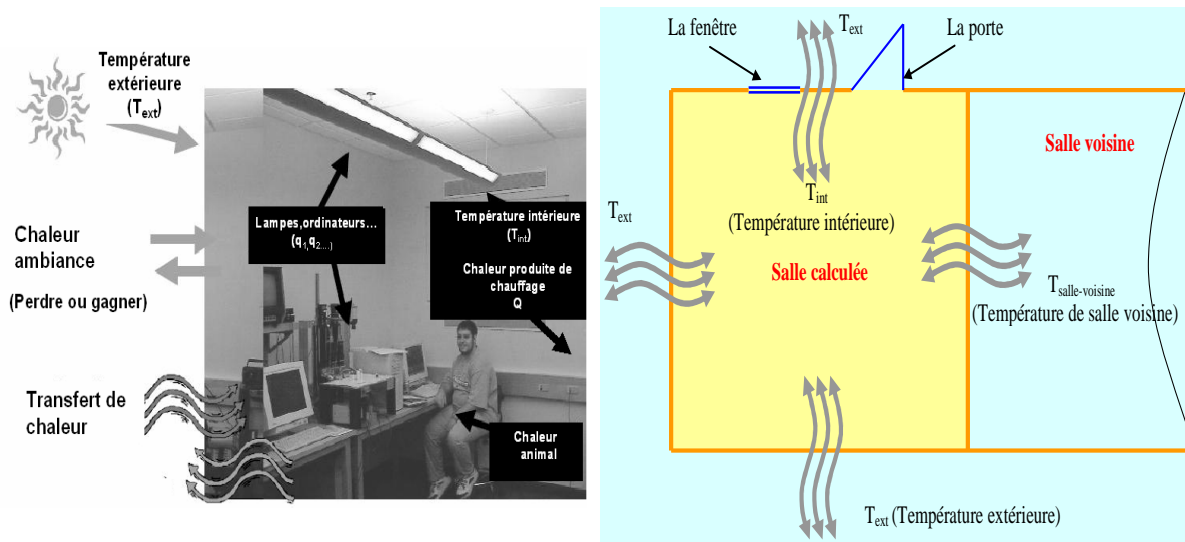
- $\sigma$ ,  $\varepsilon$  et F sont la constante de Stefan-Boltzmann, l'émissivité et le facteur de forme

Pour le radiateur électrique :

$$\rho^c c V_c \frac{dT^c}{dt} = Q(t) - h^c A^c [T^c(t) - T_k^{int}(t)] - \sigma \varepsilon A^c \sum_{i=1}^m F_{s,c-i} [T^{c4}(t) - T_{n,i}^4(t)]$$

- Q(t) est la puissance thermique produite par l'effet de Joule
- $\rho$ ,  $c$ ,  $V_c$ ,  $h^c$  et  $A_c$  sont la densité, la chaleur spécifique, le volume, le coefficient d'échange thermique entre l'air et le radiateur, et la surface d'échange thermique

Plusieurs variables comme la température, le rayonnement solaire, la vitesse du vent, les infiltrations d'air, ... influent sur l'écoulement et le stockage de la chaleur dans une pièce de façon très complexe. La représentation de toutes les composantes et du processus en détail devient très difficile. Par conséquent, les hypothèses sont posées pour obtenir un modèle simple, et pourtant assez précis. Dans ce cas, la salle est considérée comme système fermé avec une distribution uniforme d'énergie de l'intérieur, on ne tient pas compte du transfert thermique par rayonnement et convection. C'est-à-dire nous ne considérons que les pertes thermiques justes par la chaleur échangée avec de l'air externe (ou l'air des salles voisines) par des surfaces de l'enveloppe de faible masse des murs, des portes et des fenêtres. Le transfert thermique dans une salle peut être décrit par la Fig. II-8 :


 Fig. II-8: *Transfert thermique dans une salle*

Pour simplifier, en appliquant l'équation de conservation d'énergie pour chaque élément, le modèle dynamique d'une salle  $k$  qui comporte  $m$  murs et un radiateur électrique peut être décrit par l'équation ( II-2) [MEN01]:

$$\rho_c c_o V_k^c \frac{dT_k^{\text{int}}}{dt} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{R_k^{\text{eq}}} [T_i^{\text{ext}}(t) - T_k^{\text{int}}(t)] + Q_k + q_1 + q_2 \dots \quad (\text{II-2})$$

Où :

- $\rho_c$  densité d'air ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $c_o$  chaleur spécifique d'air ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )
- $V_k^c$  volume de salle  $k$  ( $\text{m}^3$ )
- $T_k^{\text{int}}$  température intérieure de la salle  $k$  ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_i^{\text{ext}}$  température extérieure du mur  $i$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) (peut être la température extérieure ou la température de salle voisine, ça dépende de position de mur  $i$ )
- $Q_k$  puissance thermique produite par le radiateur de la salle  $k$  (W)
- $q_1, q_2 \dots$  chaleur produit par des équipements, des gens et du système de d'éclairage (J/s).
- $R_k^{\text{eq}}$  résistance thermique équivalente de salle  $k$  ( $^{\circ}\text{K}/\text{W}$ )

La résistance thermique équivalente d'une salle  $k$  ( $R_k^{\text{eq}}$ ) dépend de la résistance thermique des fenêtres, des portes ( $R_k^{\text{fp}}$ ) et du mur ( $R_k^{\text{m}}$ ).

La résistance thermique des fenêtres et des portes dépend de sa dimension et aussi de la conductivité thermique du matériau utilisé :

$$R^{\text{fp}} = \frac{L^{\text{fp}}}{\lambda^{\text{fp}} A^{\text{fp}}} \quad (\text{II-3})$$

La résistance thermique du mur:

$$R^m = \frac{L^m}{\lambda^m A^m} \quad (\text{II-4})$$

La résistance thermique équivalente de la salle :

$$R^{eq} = \frac{R^m R^{fp}}{R^m + R^{fp}} \quad (\text{II-5})$$

Avec :

- $L^{fp}$  épaisseur des fenêtres et des portes (m)
- $L^m$  épaisseur surface du mur (m)
- $A^{fp}$  surface des fenêtres et des portes (m<sup>2</sup>)
- $A^m$  surface du mur (m<sup>2</sup>)
- $\lambda^{fp}$  conductibilité thermique des fenêtres et des portes (W/m°K)
- $\lambda^m$  conductibilité thermique du mur (W/m°K)

Le Tableau II-8 présente les conductivités thermiques de quelques matériaux principaux

Matériaux	Conductivité thermique (W·m-1·K-1) Valeurs pour une température de 20 °C
Aluminium (pureté de 99,9%)	237
Al-SiC	150-200
Acier inoxydable (18% Chrome, 8% Nickel)	26
Font	60
Titane	20
Quartz	6,8-12
Marbre	2,5
Verre	1,35
Eau	0,6
Bois de pin (parallèle aux fibres)	0,36
Bois de pin (perpendiculaire aux fibres)	0,15
Dihydrogène (gaz)	0.18
Laine	0,05
Laine de verre	0,04
Polystyrène expansé	0,03
Dioxygène (gaz)	0,027
Air (100 kPa)	0,0262
Terre (sèche)	0,75
Béton	1 à 2,1
brique (terre cuite)	0,3 à 0,96
Adobe (terre crue)	0,32
Liège	0,04 à 0,05
Roseau (en panneau)	0,056
Mortier de chaux	0,87
Schiste	

Tableau II-8: Conductivités thermiques de quelques matériaux

L'équation ( II-2) peut être simplifiée dans les quelques cas particuliers suivants :

- ❖ En cas où les consignes de température des salles sont identiques, on peut considérer qu'il n'a pas de transfert thermique avec les salles voisines, l'équation ( II-2) devient :

$$\rho_c c_o V_k^c \frac{dT_k^{int}}{dt} = \frac{1}{R_k^{eq}} [T_k^{ext}(t) - T_k^{int}(t)] + Q_k + q_1 + q_2 \dots \quad (II-6)$$

On remarque que :

- $R_k^{eq}$  : est la résistance thermique équivalent de la salle. Dans ce cas, on tient compte seulement les murs de la salle k qui est en contact direct avec l'air extérieur
  - $T_k^{ext}$  : température extérieure de la salle k.
- ❖ En cas où les sources thermiques des autres équipements et des personnes sont négligées ( $q_1, q_2 \dots = 0$ ) et les consignes de température des salles sont identiques, l'équation ( II-2) devient :

$$\rho_c c_o V_k^c \frac{dT_k^{int}}{dt} = \frac{1}{R_k^{eq}} [T_k^{ext}(t) - T_k^{int}(t)] + Q_k \quad (II-7)$$

### II.4.2.2 Modèle thermique d'une salle par Simulink

Cette partie présente la modélisation du modèle thermique d'une salle k sous Matlab/Simulink.

A partir de l'équation ( II-7), le modèle thermique d'une salle k est représenté dans la Fig. II-9.

Le modèle de chauffage de la salle k comprend les blocs principaux suivants :

- 2 entrées (la température extérieure  $T_k^{ext}$ , la puissance thermique  $Q_k$  du radiateur k)
- 1 sortie (la température intérieure de la salle k  $T_k^{int}$ )
- Deux blocs de gain :  $\frac{1}{R_k^{eq}}$  et  $\frac{1}{Mc_o} = \frac{1}{\rho_c c_o V_k^c}$
- Un bloc intégral sert à donner la température intérieure

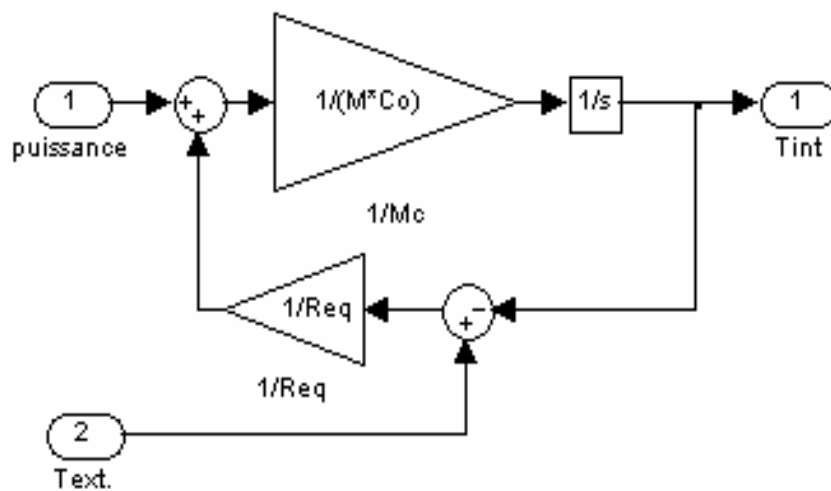


Fig. II-9: Modèle thermique de la salle en simulink

Sur cette figure :

- $M = \rho_c V_k^c$  : la masse d'air de la salle

- Puissance =  $Q_k$  puissance thermique produite par le radiateur de la salle k
- $R_{eq}$  : résistance thermique équivalent de la salle
- $T_{ext}$  et  $T_{int}$  : Température extérieure et intérieure de la salle

### II.4.3 Modèle des climatisations

#### II.4.3.1 Principe de fonctionnement de la climatisation

Le système de la climatisation a deux fonctions de base :

- Assurer le refroidissement de l'air intérieur afin de maintenir une température confortable
- Assurer la qualité de l'air par le renouvellement d'air neuf hygiénique (maintien de la teneur en  $CO_2$  et des odeurs à un niveau acceptable défini par les normes en vigueur), et bien sûr la filtration de l'air soufflé.

Le fonctionnement d'un climatiseur est basé sur le changement de phase d'un réfrigérant liquide: l'évaporation avec l'absorption de la chaleur, la condensation avec la production de la chaleur. Le principe de fonctionnement de la climatisation est présenté par la Fig. II-10.

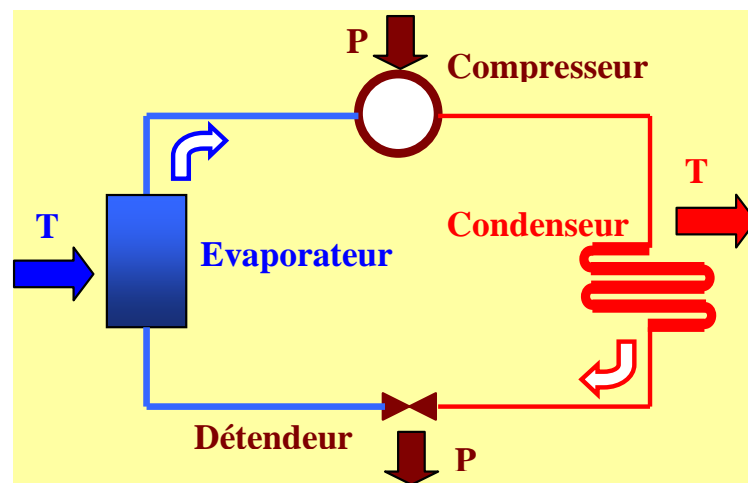


Fig. II-10: Principe de fonctionnement de la climatisation

Quels que soient les climatiseurs qui se composent de:

- Un vaporisateur où le refroidissement lié à l'évaporation du réfrigérant est transmis à l'air ambiant
- Un compresseur qui comprime le fluide frigorigène en provenance de l'évaporateur, ce travail du compresseur a pour effet d'augmenter la température du gaz
- Un condenseur où le gaz transfère sa chaleur par la condensation
- Un détendeur où le liquide frigorigène se diminue la pression. Cette chute brutale de la pression s'accompagne d'une chute de température en permettant au fluide frigorigène de prélever la chaleur dans le milieu qui l'entoure.

En général, le climatiseur se compose deux moteurs monophasés : un pour la ventilation d'air qui fonctionne en continu et autre pour le compresseur qui fonctionne sur une opération du cycle « marche/arrêt ».

#### II.4.3.2 *Modèle thermodynamique d'une salle conditionnée*

Le modèle thermique d'une salle devra tenir compte des charges sensibles et des charges latentes.

La charge sensible (gain de la chaleur):

- Écoulement de la chaleur des environnements plus chauds
- Écoulement de la chaleur de rayonnement solaire
- Écoulement de la chaleur produite par des objets dans l'espace: des équipements, des personnes , le système de d'éclairage...

La charge latente (gain de vapeur d'eau) :

- Humidité venant dans l'espace environnant.
- Humidité produite dans l'espace de l'humidité produisant des objets : occupants faisant la cuisine, appareils de chauffage industriels ou machines de production qui évaporent l'eau.

Mendes [MEN01] a présenté un modèle dynamique d'analyse de performance thermique bâtiment basé sur un modèle capacitif multi-couches .

Hudson et Underwood [HUD99] et [SUR00] ont proposé un modèle de simulation pour le bâtiment qui est représenté par un circuit électrique RC.

Dans cette partie nous développons un modèle dynamique de la salle conditionnée qui est basé sur le principe physique du fonctionnement du climatiseur et sur le modèle électrique avec quelques hypothèses pour simplifier le modèle, et pour assurer une précision acceptable du modèle. Les variables importantes comme la température, le rayonnement solaire, l'infiltration, la source de chaleur interne devront être prises en compte.

La figure Fig. II-11 présente ce modèle où :

- $R^m$  : la résistance thermique de conduction de la salle (mur, base et toit) ( $^{\circ}\text{K}/\text{W}$ )
- $C^m$  : la capacité thermique de la salle (mur, base et toit) ( $\text{J}/^{\circ}\text{K}$ )
- $R^f$  : la résistance thermique de conduction de l'infiltration moyenne d'air (fenêtre, vitre...) ( $^{\circ}\text{K}/\text{W}$ )
- $C_o$  : la capacité thermique de l'air à l'intérieur de la salle ( $\text{J}/^{\circ}\text{K}$ )
- $T^{\text{int}}$  : la température intérieure ( $^{\circ}\text{K}$ )
- $T^{\text{ext}}$  : la température extérieure ( $^{\circ}\text{K}$ )
- $I^s$  : la source de courant de rayonnement solaire ( $\text{W}$ )
- $I^{\text{inst}}$  : la source de courant de chaleur produite par des équipements, des personnes et du système de d'éclairage ...( $\text{W}$ )
- $I^{\text{ac}}$  : la source de courant de la chaleur produite par le climatiseur ( $\text{W}$ )



- $S(t)$ : La fonction de commutation qui prend la valeur 1 quand le compresseur est mis en marche et 0 lorsque le compresseur est arrêté.

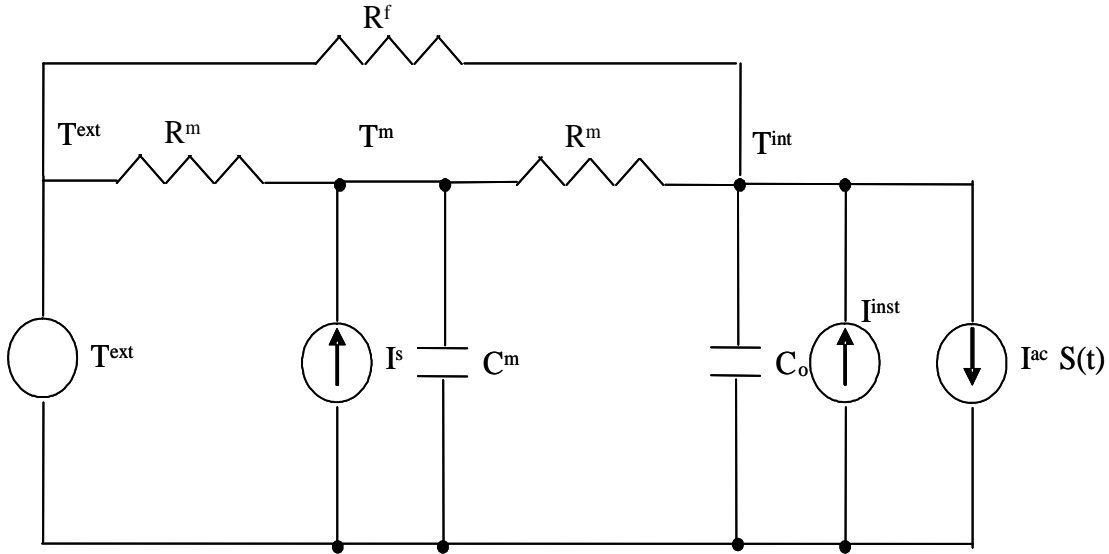


Fig. II-11: *Modèle électrique pour une salle conditionnée*

Dans ce modèle, l'addition de chaleur due à la condensation de l'eau dans le tube de vaporisateur n'est pas prise en compte parce que cette source est petite.

Les murs, le toit de la salle sont représentés par un circuit électrique avec  $R^m$  et  $C^m$ .

La conduction des fenêtres, des vitres qui est considérée comme la moyenne d'infiltration d'air est représentée par une résistance équivalente  $R^f$ .

Le rayonnement solaire  $I_s$  ne chauffe directement pas l'air intérieur, mais la majeure partie de cette énergie est d'abord absorbée par les murs, le toit et la masse des autres appareils dans la salle, puis envoyée dans l'air intérieur. Par conséquent, le rayonnement solaire est représenté par une source de courant électrique dans le circuit analogique. Cette source de courant est reliée à travers  $C^m$  pour représenter l'effet de stockage de chaleur.

La valeur des résistances thermiques peut être calculée selon les équations ( II-3)-( II-5).

La capacité thermique de la salle (mur, fenêtre) dépend de la chaleur spécifique et de la densité du matériau utilisé, et aussi de sa dimension:

$$C^m = \rho_m c_m V^m \quad (II-8)$$

- $\rho_m$  = densité du matériau ( $\text{kG/m}^3$ )
- $c_m$  = chaleur spécifique du matériau ( $\text{J/kG}^\circ\text{K}$ )
- $V^m$  = volume du mur, de la fenêtre ( $\text{m}^3$ )

La capacité thermique de l'air à l'intérieur de la salle :

$$C_o = \rho_c c_o V^c \quad (II-9)$$

- $\rho_c$  = densité d'air ( $1.225 \text{ kG/m}^3$ )
- $c_o$  = chaleur spécifique d'air ( $1005.4 \text{ J/kG}^\circ\text{K}$ )

- $V^c = \text{volume de salle (m}^3\text{)}$

A partir du circuit électrique équivalent du modèle thermodynamique de la salle conditionnée, le système d'équation différentielle est obtenu en appliquant la loi de Kirchhoff aux nœuds:

$$\frac{dT^m}{dt} = \frac{I^s}{C^m} + \frac{T^{\text{int}}}{R^m C^m} + \frac{T^{\text{ext}}}{R^m C^m} - \frac{2T^m}{R^m C^m} \quad (\text{II-10})$$

$$\frac{dT^{\text{int}}}{dt} = \frac{I^{\text{inst}}}{C_o} - \frac{I^{\text{ac}} S(t)}{C_o} + \frac{T^{\text{ext}}}{R^f C_o} + \frac{T^m}{R^m C_o} - \frac{T^{\text{int}}}{C_o} \left( \frac{1}{R^m} + \frac{1}{R^f} \right) \quad (\text{II-11})$$

Avec  $T^m$  et  $T^{\text{int}}$  sont les inconnues.

- A partir des équations ( II-10) et( II-11), le modèle thermique d'une salle conditionnée est représentée sur la Fig. II-12. .

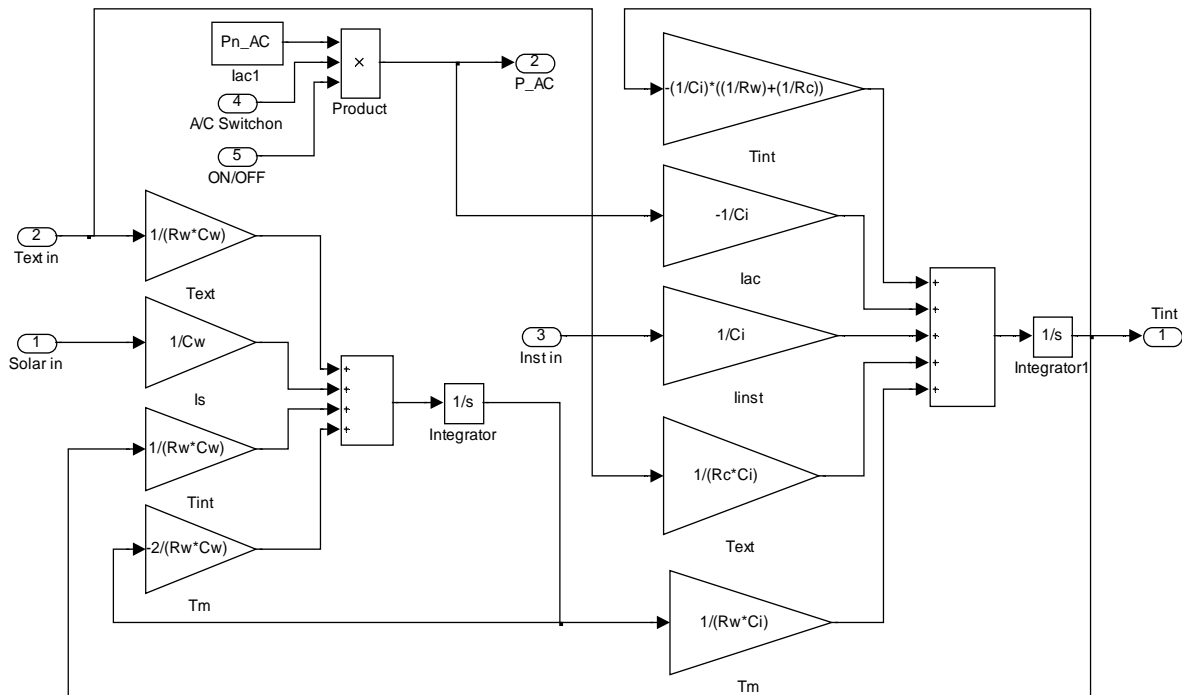


Fig. II-12: *Modèle thermique en Simulink d'une salle conditionnée*

Ce modèle comporte 5 entrées :

- La source de rayonnement solaire  $I^s$
- La source interne :  $I^{\text{inst}}$
- La température extérieure  $T^{\text{ext}}$
- Le signal marche/arrêt de commande (ON/OFF)
- Le signal du contact (A/C Swicth on)

et également 2 sorties :

- La puissance instantanée du climatiseur ( $P_{AC}$ )

La température intérieure  $T^{int}$

#### II.4.4 Modèle des autres usages

##### II.4.4.1 Cuisinière électrique

###### ❖ Caractéristiques :

- La cuisinière est chauffée par une résistance
- Le réglage de puissance est assuré par un commutateur à 7 positions. Cette opération est assurée par un thermostat qui ajuste la puissance moyenne nécessaire afin d'obtenir une température souhaitée.
- La température de surface est limitée à une valeur inférieure à  $500^{\circ}\text{C}$  pour éviter le rougeoiement de la plaque et la réduction notable de sa durée de vie.

###### ❖ Modèle thermique d'une cuisinière électrique par Simulink

Le transfert thermique de la cuisinière est représenté sur la Fig. II-13.

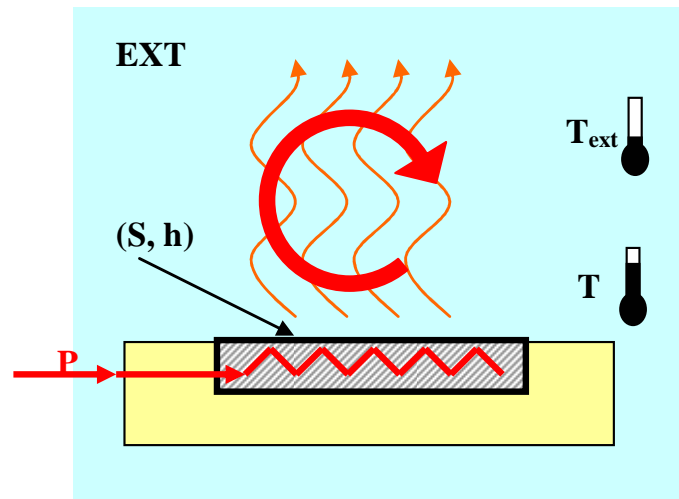


Fig. II-13: Transfert thermique de la cuisinière électrique

A partir des caractéristiques de structure de la cuisinière, cette dernière peut être considérée comme un système qui comprend une source thermique (puissance de la cuisinière  $P$ ), une plaque en fonte (chaleur spécifique  $C$  et masse  $M$ ) et l'ambiance extérieur (température d'ambiance  $T^{ext}$ ). On ne considère que les pertes thermiques par convection et par rayonnement dans de l'air autour de la cuisinière. De façon générale la convection dépend de la surface de la plaque et des caractéristiques de l'air.

Appliquant l'équation de conservation d'énergie pour un écoulement à une température d'ambiance  $T^{ext}$  autour d'une plaque à une température uniforme  $T$  de surface  $S$ , le modèle dynamique de cuisinière peut être décrit par l'équation ( II-12) ci-dessous où:

$$MC \frac{dT}{dt} = hS [T^{ext}(t) - T(t)] + P \quad (\text{II-12})$$

- C chaleur spécifique de plaque électrique (J/kg-°K)
- M masse de la plaque électrique (kg)
- S surface d'échange thermique de la cuisinière (m<sup>2</sup>)
- h coefficient d'échange thermique (W/m<sup>2</sup>K)
- P = Q puissance de chaleur produite par la cuisinière (W)
- T<sup>ext</sup> température d'ambiance autour de la cuisinière (K)
- T température uniforme de la cuisinière (K)

h est le coefficient d'échange thermique superficiel entre une paroi et une ambiance extérieure

En cas de paroi horizontale et flux chaleur vers haut : h = 23 (W/m<sup>2</sup>K)

Les valeurs de S et de P de cuisinière selon le Tableau II-9 :

Diamètre (mm)	Puissance maximale (W)
145	1000 à 1500
180	2000
220	2000 à 2600

Tableau II-9: Diamètre et puissance maximale de cuisinière électrique

A partir de l'équation ( II-12) et les caractéristiques de la cuisinière électrique, son modèle qui comprend un commutateur à 7 positions par Simulink est représenté sur la Fig. II-14. Chaque position de commutateur assure le maintien de température T ±2°C.

❖ **Courbe de charge électrique mesurée et obtenue par simulink :**

Dans le cas d'une cuisinière électrique, les paramètres sont représentés dans tableau suivant

P (W)	h (W/m <sup>2</sup> K)	S (m <sup>2</sup> )	MC (J/K)	T <sup>ext</sup> (°C)	T (°C)
1000	23	0.021	1656.4	20	400±2

Où:

Chaleur spécifique de la fonte : C = 627 (J/kg-K)

Densité de la fonte : ρ = 6290(kg/m<sup>3</sup>)

Volume de la plaque électrique : V = S d = 0.021\*0.02 = 0.00042 (m<sup>3</sup>)

Masse de la plaque électrique : M = Vρ = 0.00042\*6290 = 2.6418 (kg)

MC = 2.6418\*627 = 1656.4 (J/K)

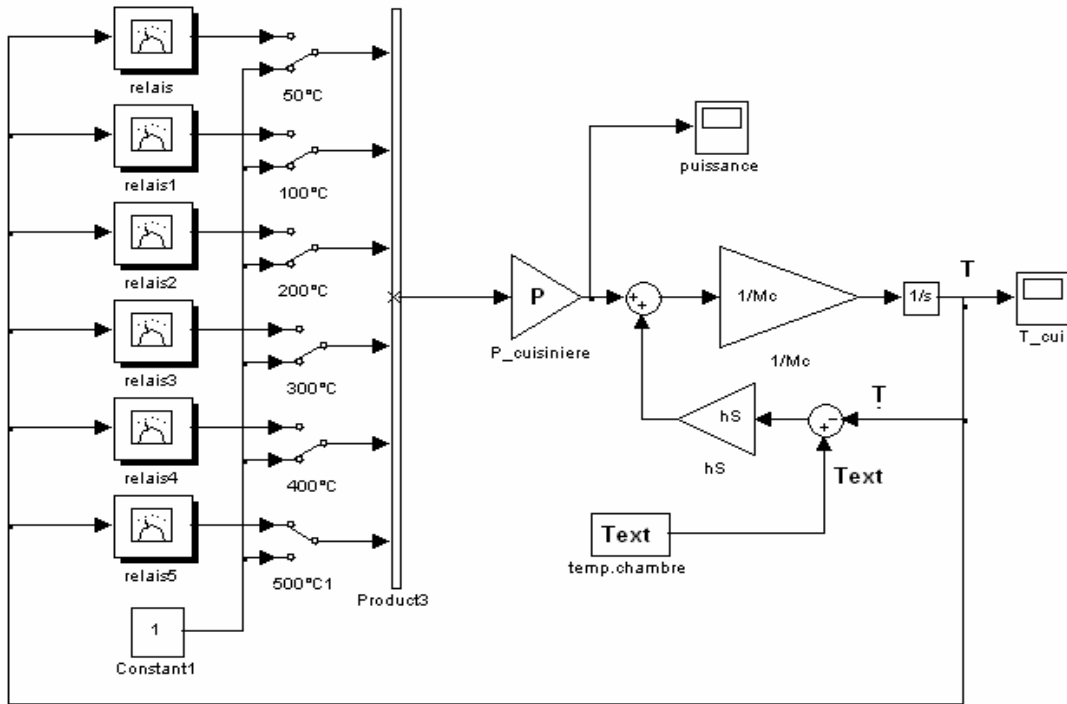


Fig. II-14: *Modèle de cuisinière électrique sous Simulink*

La Fig. II-16 présente la courbe de la puissance mesurée pour une cuisinière électrique concrète tandis que celle obtenue par Simulink est présentée dans la Fig. II-15.

On constate que sur les deux ces courbes de charge :

- Le fonctionnement de cuisinière est régulé selon des marches/arrêts pilotés par un thermostat. Le fonctionnement comprend deux étapes :
- La première étape, on met la marche à la puissance nominale, environ de 1kW pendant une durée de 10 à 15 minutes pour atteindre la température de consigne
- La seconde étape, la cuisinière électrique fonctionne de façon alternative à fin de maintenir la température de la plaque autour de la valeur choisie par la position du bouton de réglage, cet appareil est régulé par un thermostat de température.

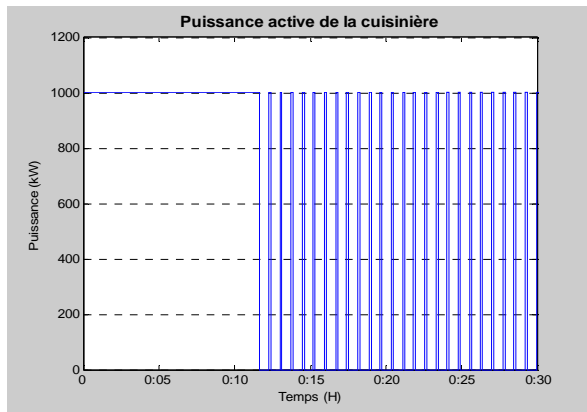


Fig. II-15: *Courbe de charge obtenue par Simulink*

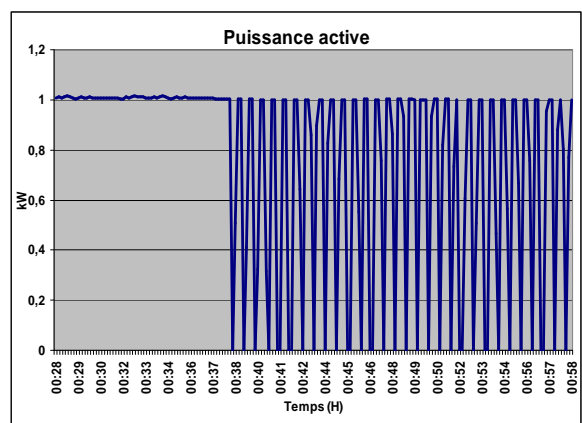


Fig. II-16: *Courbe de charge mesurée de la cuisinière*

### II.4.4.2 Réfrigérateur

#### ❖ Caractéristiques

Le réfrigérateur est normalement une armoire isolée thermiquement avec deux compartiments qui assurent chacun le maintien d'une température différente :

- Un compartiment pour les denrées fraîches, sa température est toujours supérieure à 0°C, mais la température moyenne ne peut pas dépasser 5°C pour permettre une conservation de courte durée.
- Un compartiment pour la production de glace, sa température est toujours inférieure à 0°C
- Pour obtenir du froid à l'intérieur du réfrigérateur, on utilise un circuit frigorifique composé principalement des 4 éléments, représenté par la Fig. II-17, qui réalisent des 4 changements physiques suivants : évaporation, compression, condensation et détente.

Le fonctionnement du circuit frigorifique est cyclique. Le cycle est la période d'opération entre deux démarrages successifs. Le réglage de source de froid est réalisé par le principe tout ou rien.

Le rapport de fonctionnement est défini :

$$R_f = 100 d/D$$

Avec : d est durée de l'opération du réfrigérateur pendant un nombre entier cycles

D est durée totale de ce nombre entier cycles

Le rapport de fonctionnement varie en fonction des conditions réelles de fonctionnement du réfrigérateur.

La puissance du circuit de frigorifique varie de 120 à 160W environ.

Il n'y a pas de consommation en veille pour un réfrigérateur si leurs lampes sont coupées lorsque la porte était fermée.

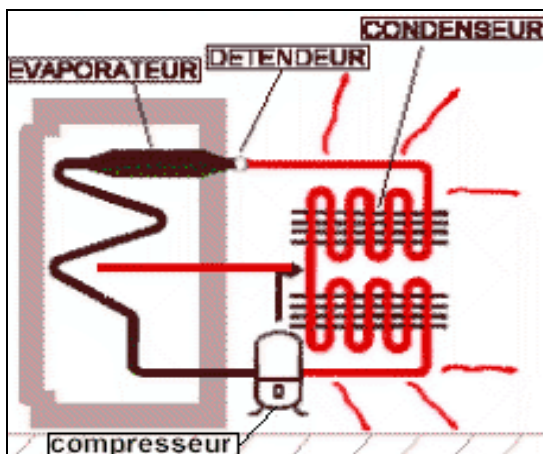


Fig. II-17: Circuit frigorifique du réfrigérateur

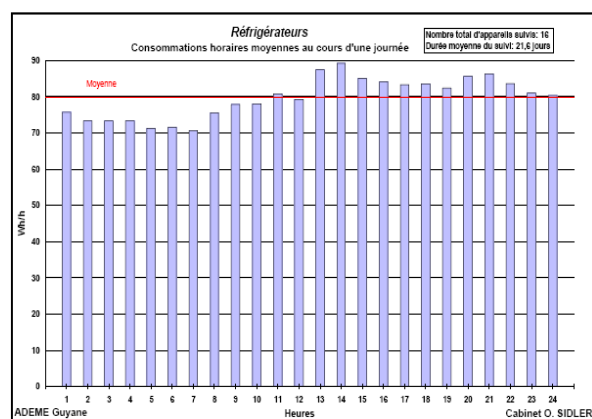


Fig. II-18: Consommation d'un réfrigérateur mesurée par ADEME

La Fig. II-18 présente la consommation au cours d'une journée par un réfrigérateur (mesure réalisée par ADEME).

Cette figure montre la consommation à deux pointes journalières à l'heure du repas : l'une autour de 14h et l'autre autour de 21h. La consommation est toujours importante dans l'après midi et basse dans la nuit à cause de la température ambiante. La consommation autour de valeur moyenne journalière est de +12 % à -9 %. La puissance appelée est entre 80 et 240W.

❖ **Modèle d'un réfrigérateur par Simulink**

A partir des caractéristiques et les besoins électriques du réfrigérateur, le modèle de réfrigérateur est développé avec les caractères particuliers suivants :

- Le rapport de fonctionnement normal  $R_f$  est de 37%
- Le rapport  $R_f$  journalière varie entre -9% et 12% de la valeur normale 37%

Horaire	0h – 7h	8h – 12h	13h-15h	16-19h	20h-22h	22h-23h
Variation	-9%	Normale	12%	5%	12%	Normale
$R_f$	34%	37%	41%	39%	41%	37%

- Puissance active maximale est entre 80 et 240W
- Puissance active minimale est de zéro

Les figures II-19 et II-20 présentent le modèle d'un réfrigérateur et sa courbe de la puissance au cours d'une journée (24h).

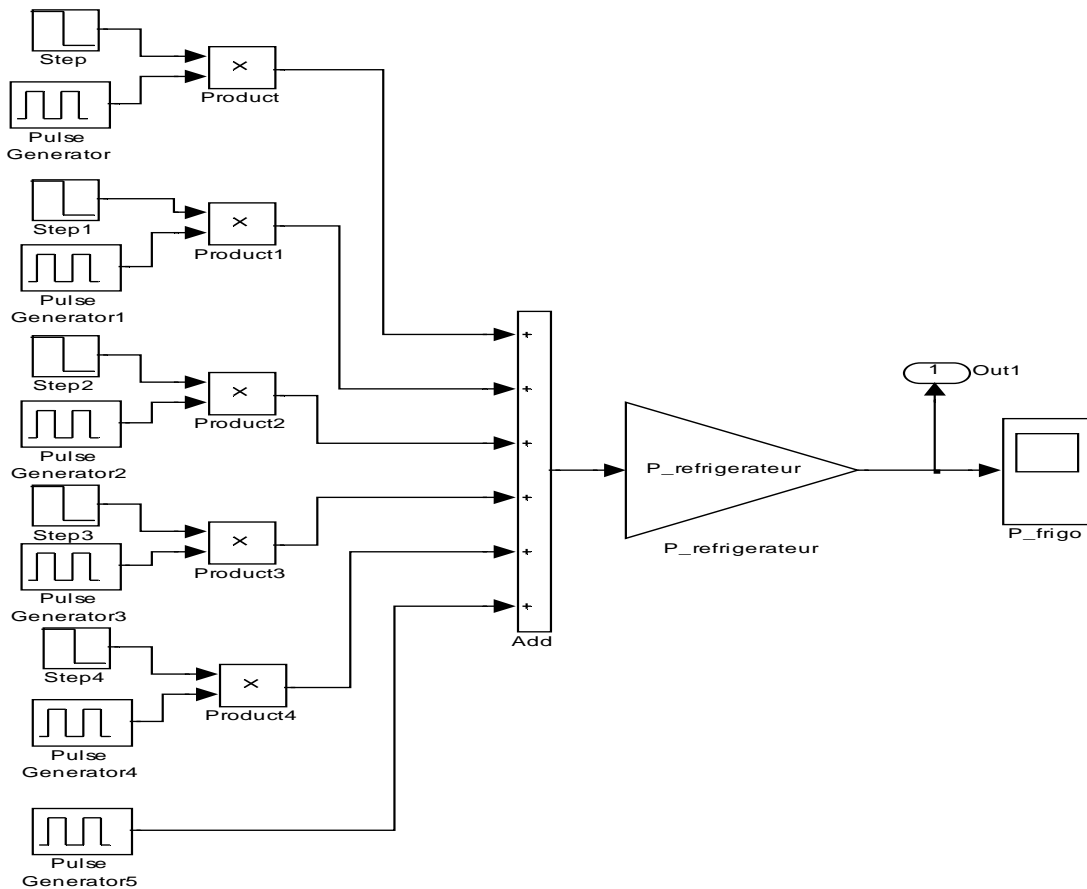


Fig. II-19: Modèle du réfrigérateur

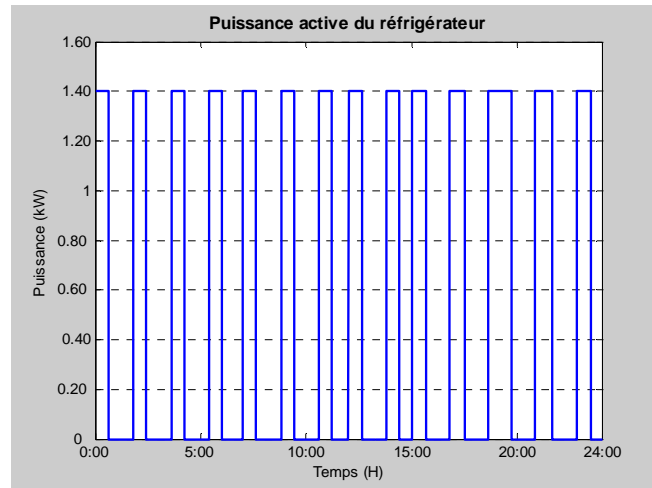


Fig. II-20: Puissance active obtenue par simulation de réfrigérateur (24h)

❖ **Courbes de charge mesurée**

La Fig. II-22 présente le courbe de charge mesurée d'un réfrigérateur Thomson de 100 litres, de 23h23 à 7h20. Le réfrigérateur est supposé rempli

La figure Fig. II-21 présente la courbe de la puissance active obtenue par la simulation du réfrigérateur, de 0h à 8h. On voit que :

Le rapport de fonctionnement normal  $R_f$  est de 38% environ. La puissance active varie de 0 à 148W. Il n'y a pas de consommation de veille.

Il y a des différences entre la courbe obtenue par la simulation Fig. II-21 et celle réelle de la Fig. II-22 à cause du vieillissement de l'appareil qui entraîne une dégradation des qualités thermiques de ses parois, ou une dégradation du joint, ou encore une dégradation des performances du compresseur.

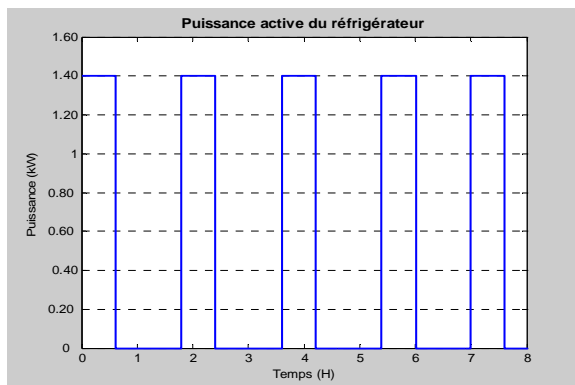


Fig. II-21 : Puissance active obtenue par simulation du réfrigérateur

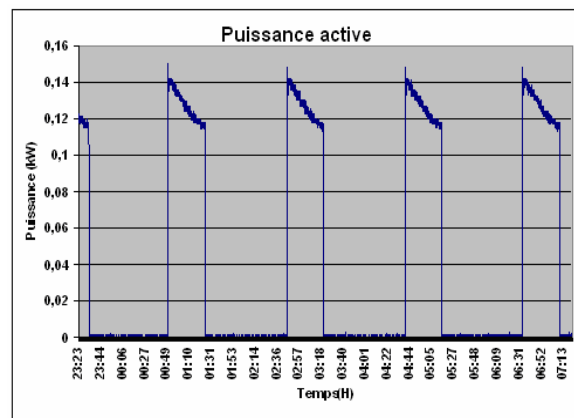


Fig. II-22 : Puissance active mesuré du réfrigérateur

**II.4.4.3 Congélateur**

❖ **Caractéristiques :**



- Le congélateur est une armoire isolée thermiquement permettant de congeler les aliments et de conserver pour une longue durée à  $-18^{\circ}\text{C}$ .
- Le système de frigorifique de congélateur est ressemblent comme celui de réfrigérateur.
- Le rapport de fonctionnement  $R_f$  varie en fonction des conditions d'opération réelle du congélateur
- Consommation des congélateurs

La consommation horaire de congélateur varie très un peu autour de valeur moyenne par rapport au celle de réfrigérateur. La Fig. II-23 montre que [SID-Guy] :

+ Les variations de consommation autour de la valeur journalière sont assez faibles : 4 % (à 15h) et -6 % (à 8 h)

+ Les puissances appelées vont de 90 à 300 W (mode principal : 110 W)

+ Le rapport de fonctionnement moyen est de 81 % (soit 19,5 h/jour). On constate que la norme impose un rapport de fonctionnement maximum de 80 % à  $32^{\circ}\text{C}$  pour les appareils neufs. Avec une valeur moyenne de 81 % alors que la température moyenne est très inférieure à  $32^{\circ}\text{C}$ , il est patent qu'une inadaptation des matériels (mauvaise qualité, sous-dimensionnement) en est la cause.

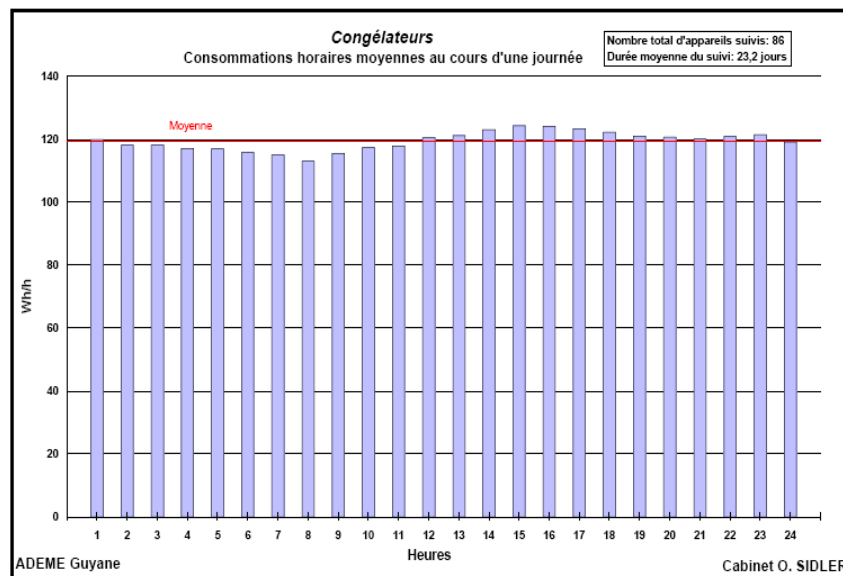


Fig. II-23: Consommation d'un congélateur mesurée par ADEME [SID-Guy]

- Consommation en veille des congélateurs

A partir de les notre mesure et des caractéristique de congélateur, on peut considérer qu'il n'y a pas de consommation en veille pour un congélateur s'il n'y pas de problème lié au matériel (mauvaise qualité, sous-dimensionnement).

#### ❖ **Modèle d'un congélateur par Simulink**

A partir des caractéristiques de structure et les besoins électriques du congélateur, le modèle du congélateur est développé avec les caractéristiques suivantes:

- Rapport de fonctionnement normal  $R_f$  est de 50%
- Rapport  $R_f$  journalière varie entre  $-4\%$  et  $6\%$  de la valeur normale 50%. On considère que  $R_f$  est toujours égal à 50%.
- Puissance active maximale est entre 90 et 300W en fonction de type de congélateur
- Puissance active minimale est de zéro (il n'y a pas de la consommation de veille)

Les Fig. II-24 et Fig. II-25 présentent le modèle d'un congélateur et sa courbe de la puissance active.

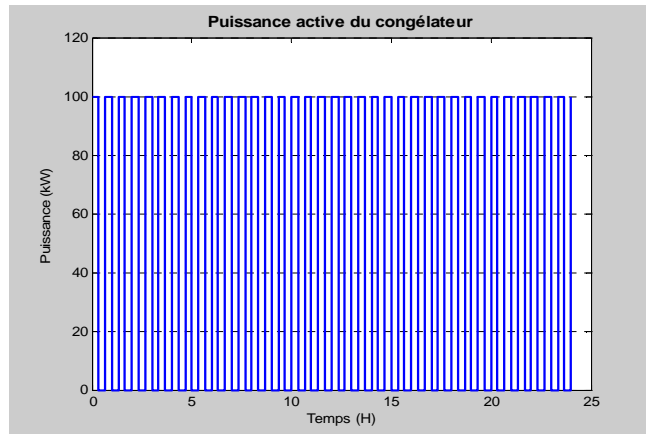
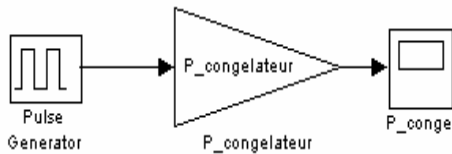


Fig. II-24: *Modèle de congélateur*

Fig. II-25: *Puissance active de congélateur (24h)*

### ❖ Courbes de charge mesurée

La Fig. II-27 présente la courbe mesurée de puissance active d'un congélateur mesurée à la température extérieure à  $27^{\circ}\text{C}$ , de 0h à 8h.

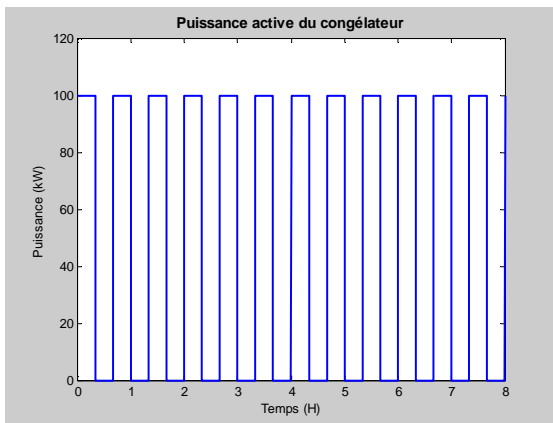


Fig. II-26: *Courbe obtenue par la simulation*

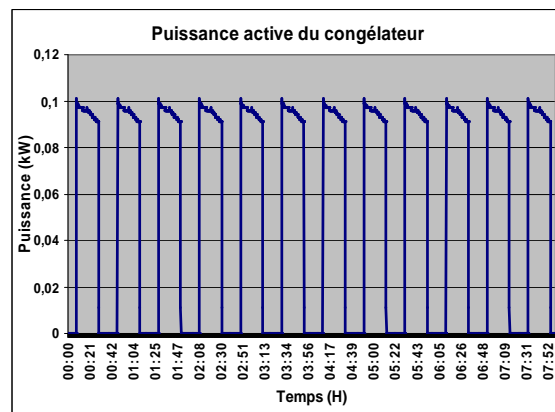


Fig. II-27: *Courbe mesurée*

La Fig. II-26 présente la courbe de puissance de congélateur obtenue par la simulation.

On voit que les deux courbes sont très proches.

Les caractéristiques électriques de congélateur sont un peu différents que celles de réfrigérateur.

Le rapport de fonctionnement normal  $R_f$  est de 50% environ. La puissance active varie de 0 à 100W. Il n'y a pas de consommation de veille.

#### II.4.4.4 Lave- linge

##### ❖ **Caractéristiques :**

Les éléments principaux constitutifs d'un lave-linge se composent [CAS95]:

- Une **cuve** reçoit l'eau chauffée avec additionnée de produits détergents. La cuve porte en partie basse les éléments chauffants (thermoplongeur) qui trempent dans le bain lessiviel; leurs puissances actuelles sont de 1 800 à 2 500 W
- Un **tambour** perforé contient le linge et permet son brassage selon les solutions de lessive
- Un **moteur** à induction monophasé à phase auxiliaire et condensateur de démarrage ou un moteur collecteur à aimants permanents (ferrites). La puissance des moteurs de lavage est de l'ordre de 500 W
- Un **système hydraulique** est automatisé. Il porte une électropompe qui assure l'évacuation de l'eau. Ce moteur est du type synchrone ou à induction à spires en court-circuit, sa puissance de quelque dizaine de watts.

L'opération de lave-linge comprend trois étapes principales :

- **Prélavage** : cette opération est aujourd'hui, de moins en moins nécessaire grâce à l'amélioration de la qualité des lessives
- **Lavage** : la rotation du tambour brasse la charge du linge et assure la circulation du bain lessiviel à travers les fibres. Le chauffage de l'eau atteint à la température de 40 à 90°C en fonction du type de fibre
- **Rinçages** : ils éliminent le bain lessiviel et les salissures
- **Essorage** : il amène le degré d'humidité du linge à la valeur souhaitée pour un séchage dans un temps raisonnable (étendage, utilisation d'un séchoir).

##### ❖ **Nature des besoins électriques**

Les courbes sur la Fig. II-28 montrent la puissance appelée pour les différentes températures effectuées par ADEME [SID-Ciel].

Selon ADEME [SID-Ciel], la consommation des lave-linges a les caractéristiques suivantes :

- + Ils sont utilisés cinq fois/semaine
- + Les cycles sont pour 70% à 30/40°C, 24 % à 60°C, 6% à 90°C
- +La consommation annuelle moyenne des lave-linge est de 235 kWh/an
- + La consommation moyenne d'un cycle (tous cycles confondus) étant de 717 Wh. Une proportion de 80% de l'électricité absorbée sert à chauffer l'eau et peut donc être remplacée par n'importe quelle autre énergie plus intéressante.

+ Quant à la durée et l'énergie de chaque type de cycle, on observe que ses valeurs moyennes sont présentées dans le tableau suivant [SID-Ciel] :

Température	30/40°C	60°C	90°C
Chauffage	76%	87%	92%
Lavage et Rinçage	11%	6%	4%
Essorage	13%	7%	4%
Durée moy. de cycle (minutes)	70	90	130

Tableau II-10: Répartition d'énergie et durée moyenne de chaque type de cycle

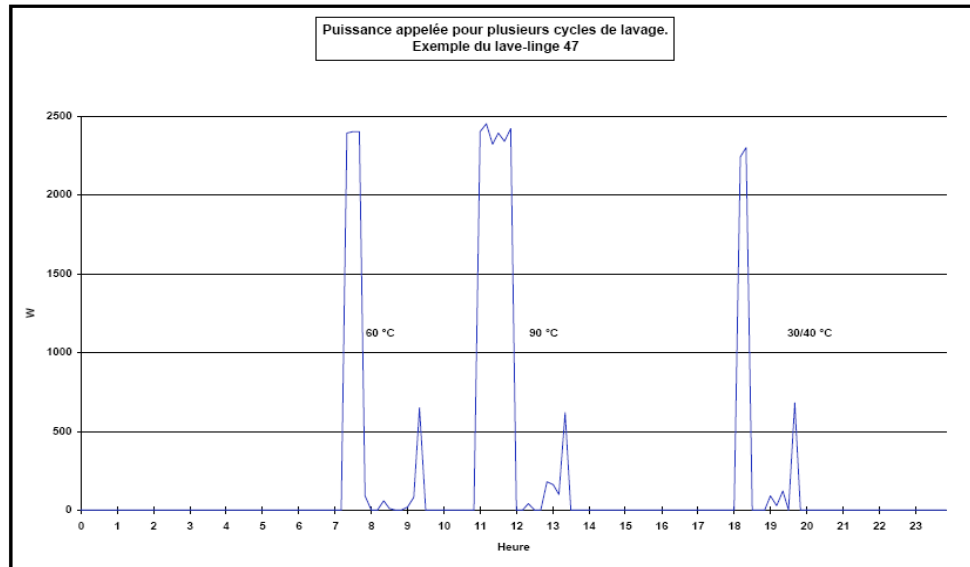


Fig. II-28: Puissance appelée pour les températures différentes

#### ❖ Modèle Simulink d'un lave linge

A partir des caractéristiques et des besoins électriques du lave-linge, le modèle de lave-linge est développé avec les caractères particuliers suivants (Tableau II-11 et Tableau II-12):

Durée de chaque type de cycle (mn)			
Température	30/40°C	60°C	90°C
Durée moy. de cycle	70	90	130
Chauffage	15	20	30
Lavage et Rinçage	40	50	80
Essorage	15	20	20

Tableau II-11: Durée de chaque type de cycle

Puissance de chaque type de cycle (W)	
Chauffage	2400
Lavage et Rinçage	80
Essorage	150

Tableau II-12: Puissance de chaque type de cycle

La durée de chaque cycle peut varier selon les utilisateurs.

Les figures Fig. II-29 et Fig. II-30 présentent le modèle d'un lave-linge et de sa courbe de la puissance active (60°C) obtenue par la simulation.

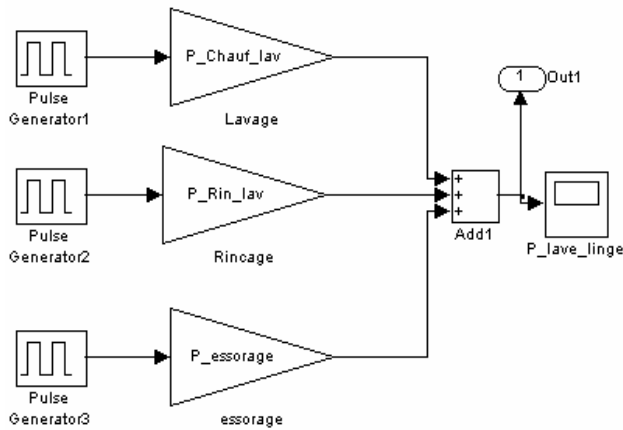


Fig. II-29: *Modèle de lave-linge*

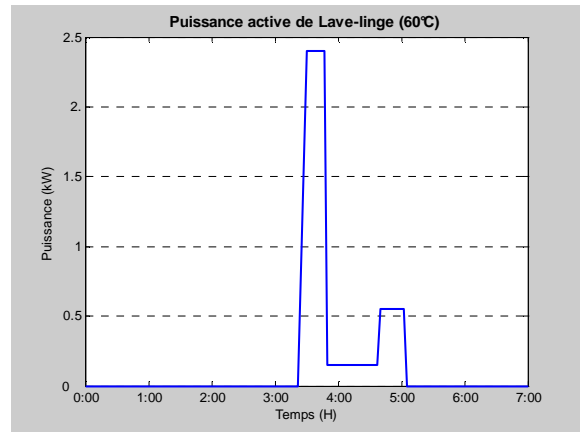


Fig. II-30: *Puissance active de lave-linge*

❖ **La courbe mesurée:**

La Fig. II-31 présente la courbe de charge mesurée d'un lave-linge avec un échantillon d'une seconde. On peut observer, comme le montre la courbe de simulation de la Fig. II-30 les étapes principales du lave-linge :

+ Chauffage de l'eau : la durée de la phase de chauffage de l'eau est environ de 10 minutes. La puissance de la phase de chauffage est environ de 2100W selon la température préfixée (30, 60 ou 90°C).

+Lavage et rinçage : ils sont caractérisés par un une faible consommation dont la durée est environ de 40 minutes

+ Essorage : caractérisée par une puissance environ de 150W pour une durée environ de 10 minutes.

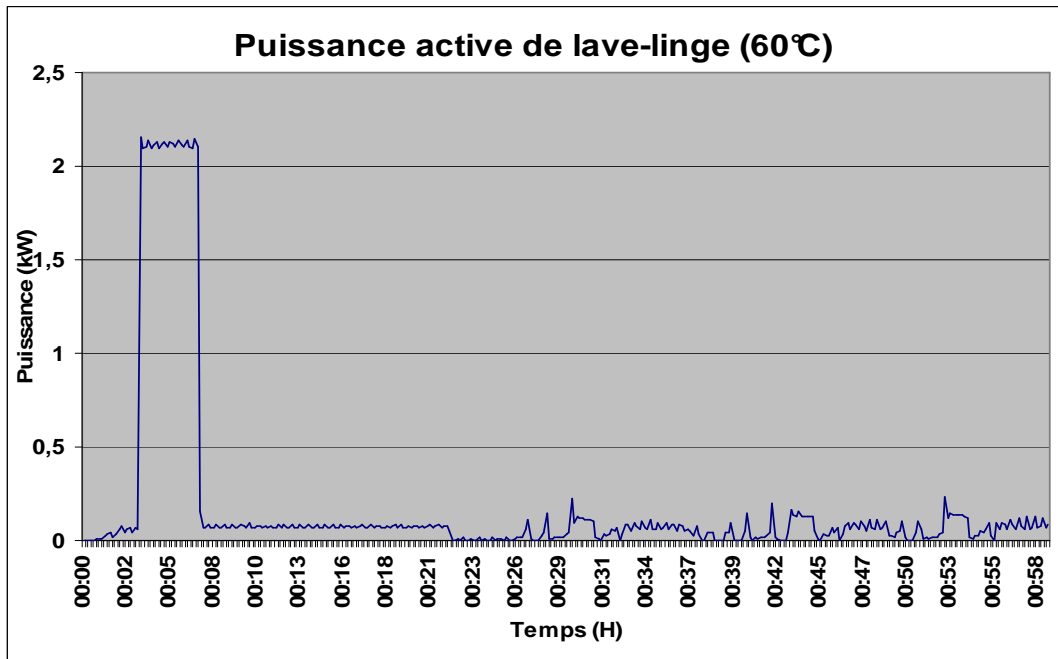


Fig. II-31: *Puissance active mesurée d'un lave-linge*

#### **II.4.4.5 Lave-vaisselle**

##### **❖ Caractéristiques**

Un lave-vaisselle se compose des éléments principaux constitutifs suivants [CAS] :

- Une cuve où se déroulent toutes les fonctions de lavage
- Une pompe de cyclage entraînée par un moteur asynchrone
- Une pompe de vidange
- Plusieurs éléments chauffants pour chauffer et sécher de l'eau ; sa puissance est de 2.5 à 3 kW
- Un programmateur.

Chaque lave-vaisselle est au minimum équipé de 3 programmes: un programme économique pour la vaisselle normale (50°C), un programme normal pour la vaisselle peu grasse (50°C) et un programme intensif pour les casseroles, les plats et la vaisselle très sale (65°C).

Chacun de ces programmes se compose à son tour de 4 phases:

**Le pré-lavage :** Grâce aux bras d'aspersion, l'eau est pulvérisée sur toute la vaisselle. Les résidus alimentaires tenaces sont ainsi éliminés.

**Le lavage principal :** En fonction du programme choisi, l'eau est chauffée à 50-65°C et est ensuite puissamment pulvérisée par les bras d'aspersion qui tournent. Plus la température est élevée, plus le lavage est puissant.

**Le rinçage :** Après le lavage principal, la vaisselle est rincée plusieurs fois. Grâce au liquide de rinçage, il ne subsiste pas de stries ou de gouttes sur la vaisselle.

**Le séchage :** L'espace dans la machine est chauffé, ce qui permet à la vaisselle de sécher facilement.

##### **❖ Nature des besoins électrique**

Selon l'ADEME [SID-Guy], la consommation des lave-vaisselle a les caractéristiques suivantes :

- + En moyenne, ils servent 3,6 fois/semaine
- + La consommation annuelle moyenne des lave-vaisselles est de 280 kWh/an en métropole
- + La consommation moyenne d'un cycle (tous cycles confondus) étant de 1039 Wh. Une proportion de 85% de l'électricité absorbée sert à chauffer l'eau et peut donc être remplacée par n'importe quelle autre énergie plus intéressante.

##### **❖ Modèle thermique d'un lave-vaisselle**

A partir des caractéristiques et les besoins électriques du lave-vaisselle, le modèle de lave-vaisselle est développé avec les caractères particuliers suivants (Tableau II-13 et Tableau II-14):

Durée de chaque type de cycle (mn)			
Programme	ECO	Normal	Intensif
Température	50°C	50°C	65°C
Durée moyenne de cycle (mn)	84	90	94
Chauffage (mn)	15	20	24
Lavage et Rinçage (mn)	54	50	50
Séchage (mn)	15	20	20

Tableau II-13: Durée de chaque type de cycle

Puissance de chaque type de cycle (W)	
Chauffage	1500-3000
Lavage et Rinçage	50-100
Séchage	1500-3000

Tableau II-14: Puissance de chaque type de cycle

La durée de chaque cycle peut varier selon les utilisateurs.

Les figures Fig. II-32 et Fig. II-33 présentent le modèle d'un lave-vaisselle et sa courbe de la puissance active obtenue par la simulation.

Avec P-chauffage = 1600W, P-lavage = 80W et le programme ECO

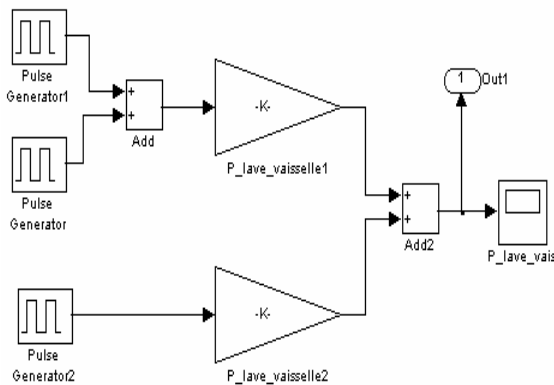


Fig. II-32: Modèle de lave-vaisselle

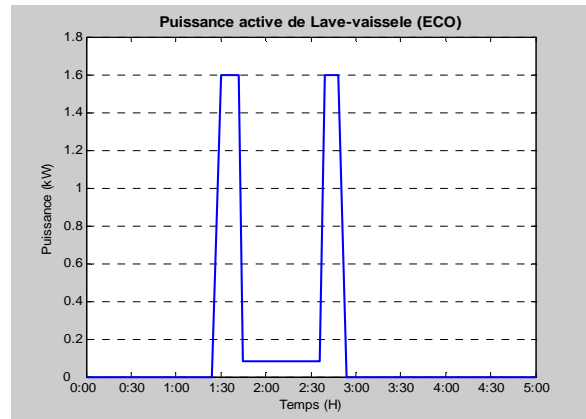


Fig. II-33: Puissance active de lave-vaisselle

#### ❖ La courbe mesurée :

La Fig. II-34 présente la courbe de charge mesurée d'un lave-vaisselle. On peut observer les étapes principales du lave-vaisselle étant près identique à celle obtenue par la simulation Fig. II-33 :

- + D'abord un pré-lavage qui a un appel plus faible
- + Puis un lavage principal qui se fait à l'eau chaude, ce qui correspond au premier pic de puissance (environ 1600W).
- + Puis un appel de puissance plus faible (environ 60W) et correspondant à la phase de lavage (où seule fonctionne la pompe) et un ou deux rinçages à l'eau froide
- + A la fin, un rinçage à l'eau chaude et une courte phase de séchage qui correspondent au second pic (environ 1600W).

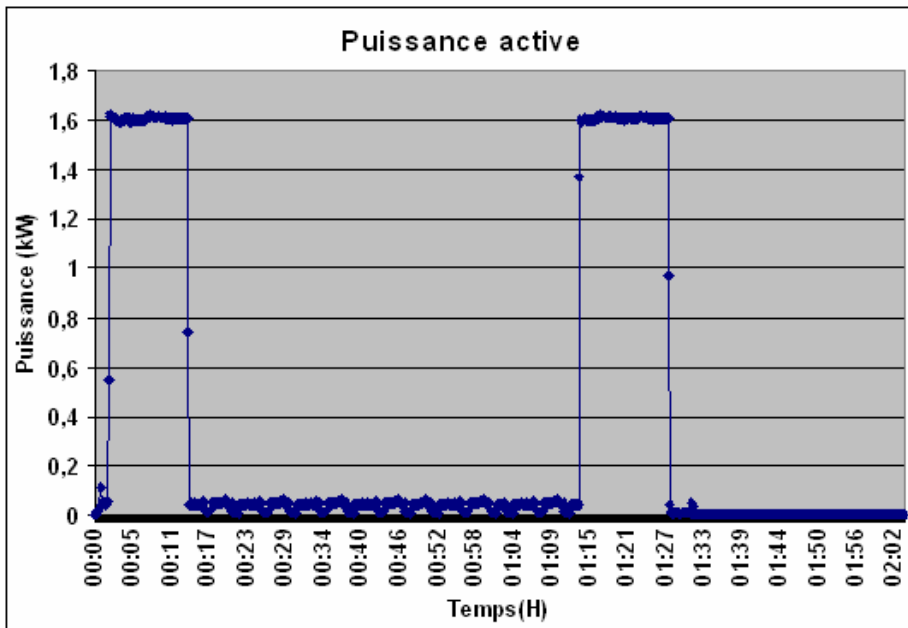


Fig. II-34 : Courbe mesurée d'un lave-vaisselle

## II.5 Conclusion

Ce chapitre a donné une vision sur les besoins énergétiques en France qui concerne les usages dans le secteur de bâtiment. Le secteur de bâtiment présente l'un des plus grands potentiels d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Parmi les charges analysées, le chauffage et la climatisation prennent la part la plus importante de la consommation. C'est pourquoi nous présenterons dans les chapitres suivants les méthodes de gestion des chauffages et de climatisations.

Parmi les méthodes de gestion de charge, la méthode basée sur les systèmes de régulation présente les performances et la rapidité de réponse. Cette méthode est bien adaptée pour les applications de la gestion de charge en temps réel. Par contre, les méthodes existantes ne permettent pas de réduire les consommations de manière adaptative. Les méthodes de délestage par un programme défini ne peuvent pas toujours assurer le confort nécessaire. C'est pourquoi, il faut développer les méthodes sophistiquées et bien adaptées aux nouveaux enjeux de l'avenir. Les méthodes de gestion optimale de la charge sont bien adaptées aux problèmes de gestion prédictive pour les heures ou les jours suivants. Ces méthodes ont besoin d'une prédiction efficace de la consommation.

Dans la dernière partie nous présenterons les modèles de charge que nous avons développés. Ces modèles de charge (chauffage, climatisation, lave-linge, réfrigérateur, congélateur, cuisinière...) sont développés sous Matlab/Simulink. Ces modèles ont été validés par les mesures ; ils seront utilisés dans les chapitres suivants.





## **Chapitre III : Prévision des charges par la méthode des réseaux de neurones et la méthode ascendante (« bottom-up »)**

<b>III. CHAPITRE III : PREVISION DES CHARGES PAR LA METHODE DES RESEAUX DE NEURONES ET LA METHODE ASCENDANTE (« BOTTOM-UP »)</b> .....	<b>65</b>
III.1 INTRODUCTION .....	67
III.2 PREVISION DE CHARGE ELECTRIQUE .....	67
III.2.1 <i>Types de prévision de charge</i> .....	67
III.2.2 <i>Facteurs influenc�es sur la prévision de charge</i> .....	68
III.2.3 <i>Les Méthodes de prévision de charge</i> .....	69
III.2.3.1 Méthode de régression.....	69
III.2.3.2 Système expert .....	69
III.2.3.3 Réseau de neurones .....	69
III.2.3.4 Méthode ascendante ou «bottom-up» basée sur la connaissance des consommations.....	70
III.3 METHODE BASEE SUR LA TECHNIQUE DES RESEAUX DE NEURONES .....	70
III.3.1 <i>Méthode des réseaux de neurones, pourquoi?</i> .....	70
III.3.2 <i>Théorie des réseaux de neurones</i> .....	71
III.3.2.1 Modèle des réseaux de neurones artificiels (RNA).....	71
III.3.2.2 Apprentissage .....	74
III.3.2.3 Réseau rétro-propagation.....	74
III.3.3 <i>Cas d'application</i> .....	76
III.3.3.1 Base des données.....	76
III.3.3.2 Caractéristiques de la base de données .....	76
III.3.3.3 Développement du programme de prévision de charge .....	79
III.3.3.4 Entraînement du réseau et validation par simulation .....	81
III.3.3.5 Résultats de calcul .....	82
III.4 METHODE ASCENDANTE OU « BOTTOM UP » BASEE SUR LA CONNAISSANCE DU COMPORTEMENTS DES CHARGES .....	87
III.4.1 <i>Introduction</i> .....	87
III.4.2 <i>Présentation de la méthode ascendante</i> .....	88
III.4.2.1 Formulation mathématique.....	88
III.4.2.2 Mise en �oeuvre du modèle.....	92
III.4.2.3 Algorithme de programmation .....	93
III.4.3 <i>Cas d'application</i> .....	94
III.4.3.1 Classification des charges.....	94
III.4.3.2 Validation par simulation .....	95
III.5 CONCLUSION .....	96

### **III.1 Introduction**

La prédiction des consommations joue un rôle très important dans la détermination des stratégies d'exploitation optimale, de planification des réseaux électriques et de gestion des charges dans le secteur résidentiel. Dans le contexte de la libération du marché de l'énergie, la prédiction de la consommation et en particulier dans le domaine résidentiel, joue un rôle essentiel dans la gestion optimale des consommations, suivant différents objectifs (minimiser la facture, réduire les pics de consommation, contribuer aux services système...).

Aujourd'hui, plusieurs techniques peuvent être implantées dans les modèles hybrides pour améliorer la performance, l'efficacité et la précision de la prédiction

L'objectif de ce chapitre est de proposer des méthodes de prédiction de la consommation à court-terme afin de reproduire les courbes de charge des bâtiments résidentiels ou multi-bâtiments (quartier, ou région) pour chaque heure de la journée du lendemain, en tenant compte de différents facteurs comme la consommation historique et les facteurs sociologiques et météorologiques.

Nous présenterons en premier lieu une méthode de prédiction de charge qui utilise les réseaux de neurones. Nous rappellerons d'abord le fonctionnement d'un réseau de neurones. Nous présenterons ensuite un programme développé sous Matlab qui permet de réaliser la prédiction de consommation pour un groupe des bâtiments (ou région). Par suite du problème de confidentialité rencontré en France sur les données réelles de la consommation, le programme sera testé par un jeu de données réelles de consommation relevées pendant 9 ans dans un quartier de Hanoi au Vietnam.

Ensuite, nous aborderons la méthode ascendante souvent baptisée « bottom-up » qui est basée sur la connaissance de l'usage final. Cette méthode permet de déterminer la consommation d'un ensemble des appareils ou de la totalité d'une maison comme la combinaison des consommations des appareils individuels et de leur taux d'utilisation. Cette méthode est bien adaptée pour le secteur résidentiel.

### **III.2 Prédiction de charge électrique**

#### ***III.2.1 Types de prédiction de charge***

Afin d'établir un modèle de prédiction de charge, il est nécessaire d'identifier les besoins auxquels on souhaite répondre. Selon l'horizon de prédiction on distingue les types de prédiction :

- ❖ Prédiction à long terme :

L'horizon de prédiction est compris dans une période entre un an et dix ans. Ce temps est nécessaire pour planifier, construire des centrales, des lignes de transport et de distribution de l'électricité.

- ❖ Prédiction à moyen terme :

L'horizon de prévision à moyen terme est une période entre un mois et une année. Ce type de prévision est utilisée pour déterminer les équipements des centrales et les ouvrages des réseaux qui faut installer ou pour établir les contrats du marché électrique.

❖ Prédiction à court terme

La prévision à court terme peut être divisée en prévision à très court terme et prévision à court terme. La première comprend une période de 30 minutes en temps réel à partir du moment où on réalise la prévision de la consommation. Le but de ce type de prévision est de couvrir la distribution, de la manière la plus économique possible. On effectue un suivi de la charge à partir des prévisions faites précédemment dans un passé proche (24 heures avant).

La prévision à court terme est prévue entre une heure et une semaine dans le futur ; durant cette période, la compagnie d'électricité doit connaître le plan d'exploitation des centrales, le plan de maintenance ou les stratégies de gestion des charges pour minimiser les coûts... Les meilleures sources d'information pour la prévision sont l'historique de consommation et de la température des années précédentes.

Dans notre étude, nous nous intéressons à la prévision de charge à court-terme. C'est une fonction essentielle du système de gestion d'énergie (EMS) pour le dispatching, la planification, l'analyse du système de contrôle/commande des réseaux électriques ou des bâtiments. La prévision pour le jour ou les jours suivants est nécessaire pour demander d'adapter le plan de production ou les stratégies de gestion des charges afin de minimiser le coût d'exploitation en respectant les contraintes de fonctionnement et de fiabilité des réseaux électriques.

### ***III.2.2 Facteurs influencés sur la prédiction de charge***

La prévision de charge électrique dépend de différents facteurs :

- ❖ Le facteur historique
- ❖ Le calendrier
  - Variation saisonnière
  - Variation quotidienne
  - Cycle hebdomadaire
  - Vacances
- ❖ Les conditions économiques ou environnementales
- ❖ Les conditions météorologiques
  - Températures
  - Nébulosité, ensoleillement
  - Vitesse du vent
  - Humidité
  - Précipitation
- ❖ Les événements aléatoires imprévus (grève, jours de football...).

### ***III.2.3 Les Méthodes de prédiction de charge***

Dans la bibliographie, on peut trouver un large éventail de méthodes de prédiction de la consommation. La classification est basée sur certaines caractéristiques, comme par exemple le type de modèle de charge, le type de données à fournir au modèle, les temps requis de calcul informatique et l'algorithme de prédiction ainsi que la disponibilité de résultats expérimentaux.

Dans [GRO87], les auteurs proposent une typologie selon le type de modèle de charge utilisé. La répartition est essentiellement fondée sur deux modèles de base : le modèle de charge maximale et la forme de la courbe de charge. D'autres auteurs [PAP90] groupent les méthodes selon les modèles en séries chronologiques et les modèles de régression.

#### ***III.2.3.1 Méthode de régression***

Il s'agit de l'une des techniques statistiques qui reflètent le rapport entre la consommation électrique et d'autres facteurs tels que le temps, le jour et le type de consommation. La méthode de régression s'efforce de déterminer les valeurs prises par une variable en tenant compte de l'influence des autres variables. On dira alors qu'il y a une variable dépendante et plusieurs variables indépendantes entre lesquelles on recherche une corrélation. L'objectif de cette analyse est généralement de déterminer quelles sont les variables indépendantes qui ont le plus d'influence sur la variable dépendante.

#### ***III.2.3.2 Système expert***

Cette méthode incorpore des règles et des procédures employées par les experts. Les systèmes experts sont des modèles heuristiques, qui peuvent habituellement tenir compte des facteurs quantitatifs et qualitatifs.

On a proposé beaucoup de variantes de ce type depuis les années 80. Une approche typique est d'essayer d'imiter le raisonnement d'un opérateur humain. Une méthode possible pour qu'un expert humain crée la prédiction est de rechercher dans la base de données historique le jour qui correspond au mieux au jour cible en tenant compte des facteurs qui le caractérisent. Les valeurs de la charge enregistrées correspondant à ce jour sont alors prises comme base de la prédiction. Un système expert peut être une version automatisée de ce genre de processus de recherche.

D'autre part, le système expert peut affiner ses résultats en tenant compte plus explicitement des facteurs externes et des profils d'utilisation quotidiens.

#### ***III.2.3.3 Réseau de neurones***

Aujourd'hui, on utilise les méthodes courantes de prédiction de charge basées sur les techniques des réseaux de neurones. Cette méthode sera utilisée pour notre étude et sera présentée dans la partie III.3.

#### ***III.2.3.4 Méthode ascendante ou «bottom-up» basée sur la connaissance des consommations***

Cette méthode sera présentée dans la partie III.4.

Pour chaque méthode nous pouvons trouver de nombreuses possibilités de représentation de la consommation à partir des variables prises en compte, de l'information historique aussi bien de la consommation que du comportement météorologique de la région visée par l'étude. Cependant, chaque méthode présente aussi une variété d'inconvénients et désavantages qui vont affecter plus ou moins la qualité de la prédiction (à préciser dans la partie III.4).

### **III.3 Méthode basée sur la technique des réseaux de neurones**

#### ***III.3.1 Méthode des réseaux de neurones, pourquoi?***

Les méthodes statistiques classiques de prédiction de charge présentent l'avantage de leur simplicité. Elles peuvent, en outre, tenir compte de l'influence des différentes conditions météorologiques. Cependant, ces méthodes présentent quelques inconvénients :

- Il est difficile à tenir compte des non-linéarités entre les entrées et les sorties ainsi que des facteurs aléatoires
- Elles manquent de flexibilité pour les variations de charge rapides ...

La prédiction, en particulier des charges résidentielles est très compliquée. Le choix de la méthode des réseaux de neurones peut être utilisé lorsque :

- Il n'existe pas de modèle mathématique précis de la charge
- La charge est une fonction des différents facteurs (passé, calendrier, météo, autres...)
- La fonction de prédiction est complexe et inconnue, et la relation non linéaire
- Les méthodes conventionnelles classiques comme la méthode de régression ou d'interpolation, peuvent ne pas fournir dans ce cas une précision suffisante. En plus, ces méthodes complexes avec des moyens de calcul très lourds peuvent converger lentement et peuvent même diverger dans certains cas. Elles ne sont donc pas bien adaptées à applications en temps réel.

Depuis peu, les techniques de réseau de neurones (ANN) commencent à être utilisées dans les différents domaines d'étude de réseau électrique, en particulier, pour la prédiction de charge. L'utilisation de la méthode des réseaux de neurones permet d'éviter les inconvénients rencontrés par les méthodes classiques. Cette méthode est commode pour prendre en compte les différents facteurs non linéaires et aléatoires. Les réseaux de neurones fonctionnent comme une boîte noire dont le fonctionnement sera déterminé par la phase d'apprentissage, c'est pourquoi, le calcul est très rapide. Cette méthode peut en étant confronté à différents types de situations évoluer (grâce à l'auto apprentissage) vers un modèle adaptatif

### III.3.2 Théorie des réseaux de neurones

Aujourd'hui, l'étude des réseaux de neurones est une voie prometteuse de l'Intelligence Artificielle, qui a des applications dans de nombreux domaines :

- Industrie: contrôle qualité, diagnostic de panne, corrélations entre les données fournies par différents capteurs, analyse de signature ou d'écriture manuscrite...
- Finance: prévision et modélisation du marché (cours de monnaies...), sélection d'investissements, attribution de crédits
- Télécommunications et informatique: analyse du signal, élimination du bruit, reconnaissance de formes (bruits, images, paroles), compression de données...
- Environnement: évaluation des risques, analyse chimique, prévisions et modélisation météorologiques, gestion des ressources [CAP94].

#### III.3.2.1 Modèle des réseaux de neurones artificiels (RNA)

Les modèles de réseaux de neurones artificiels (RNA) sont, à l'origine, une imitation du fonctionnement du cerveau. Le cerveau d'humain contient environ 10 milliards de neurones et chacun est connecté à environ 10000 autres. De manière schématisée, un neurone peut être représenté par la Fig. III-1.

Il fait la somme de toutes les informations qu'il reçoit et émet un signal si cette somme est suffisamment élevée.

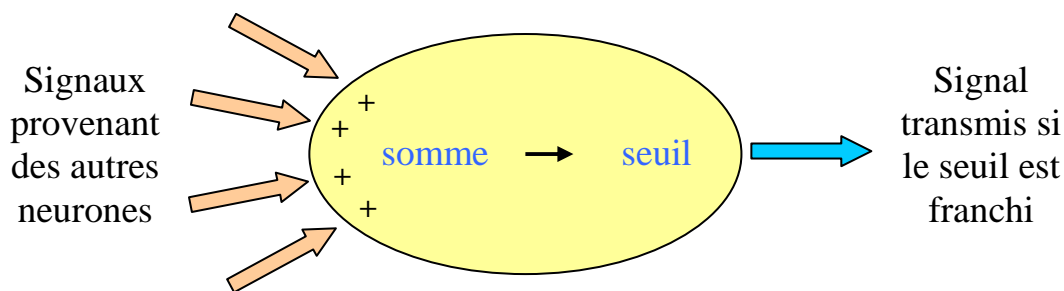


Fig. III-1: Schématisation d'un neurone biologique

Si l'on ramène la contribution d'un neurone au cerveau tout entier, on constate que chaque neurone effectue un travail très simple par rapport au résultat obtenu. En effet, les neurones réalisent des opérations basiques, et pourtant, lorsque l'on en fait fonctionner 10 milliards ensemble, on peut créer une entité intelligente.

Cependant, un cerveau ne sait rien faire s'il n'a pas fait un apprentissage. Il a besoin d'informations venant de l'extérieur. C'est pour cela qu'il est relié aux différents organes du corps. Par exemple, il reçoit des images, des sons, des douleurs.

Grâce à ces informations il est capable de faire son apprentissage. Par exemple, lorsqu'une action a provoqué une douleur, il doit changer l'organisation des neurones afin de ne pas répéter la même erreur.

L'objectif des réseaux de neurones artificiels est donc de modéliser le fonctionnement des neurones réels, mais aussi de permettre un apprentissage.



Un neurone formel peut être représenté comme dans la Fig. III-2.

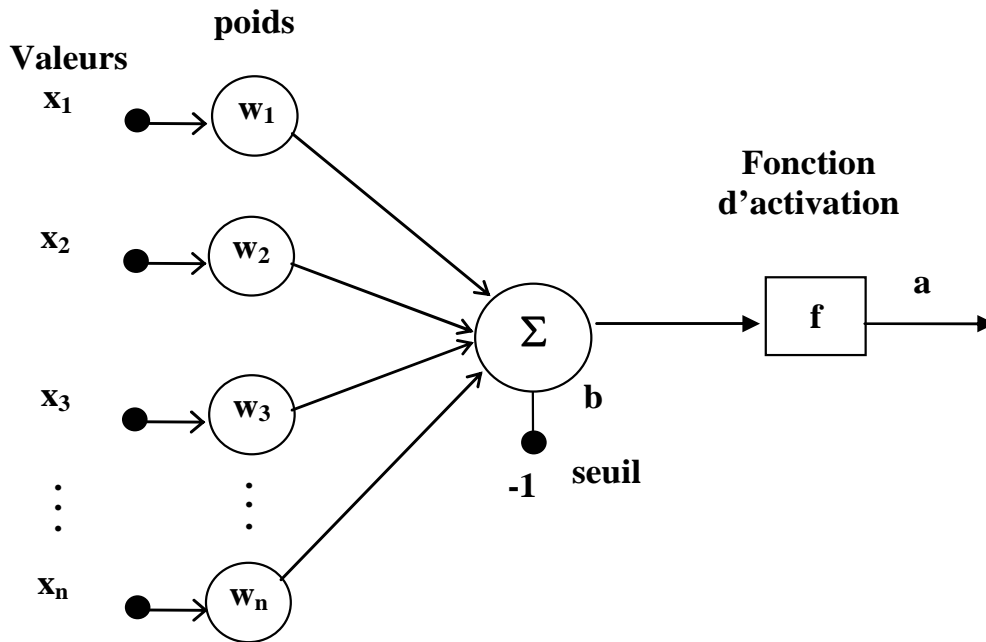


Fig. III-2: *Modèle d'un neurone artificiel*

Le neurone calcule la somme de ses entrées ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), pondérées par les poids synaptiques ( $w_1, w_2, \dots, w_n$ ), la compare à un seuil  $b$ . Ensuite cette valeur passe à travers la fonction d'activation  $f$  pour produire sa sortie. Le résultat après transfert est la sortie du neurone. La sortie peut être présentée par la formule suivante (III-1):

$$a = f\left(\sum_{j=1}^n w_j x_j - b_j\right) \quad (\text{III-1})$$

Dans un réseau de neurones artificiel, les neurones artificiels sont regroupés en couches. Habituellement, chaque neurone dans une couche est connecté à tous les neurones dans la couche précédente et de la couche suivante (excepté pour la couche d'entrée et celle de sortie du réseau). L'information donnée à un réseau de neurones est propagée couche par couche de la couche d'entrée à la couche de sortie en passant par soit aucune, une ou plusieurs couches intermédiaires (cachées). Le modèle d'une couche des neurones est présenté sur la Fig. III-3.

Un poids est associé à chacune des connexions. L'indice  $i$  (lignes) désigne toujours le numéro de neurone sur la couche, et l'indice  $j$  (colonnes) spécifie le numéro de l'entrée. Le terme  $w_{ij}$  désigne le poids de la connexion qui relie le neurone  $i$  à son entrée  $j$ . L'ensemble des poids d'une couche forme donc une matrice  $W$  de dimension  $n \times S$  ( $n$  entrées et  $S$  neurones).

$$W = \begin{pmatrix} w_{1,1} & \cdot & \cdot & w_{1,n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ w_{s,1} & \cdot & \cdot & w_{s,n} \end{pmatrix} \quad (\text{III-2})$$

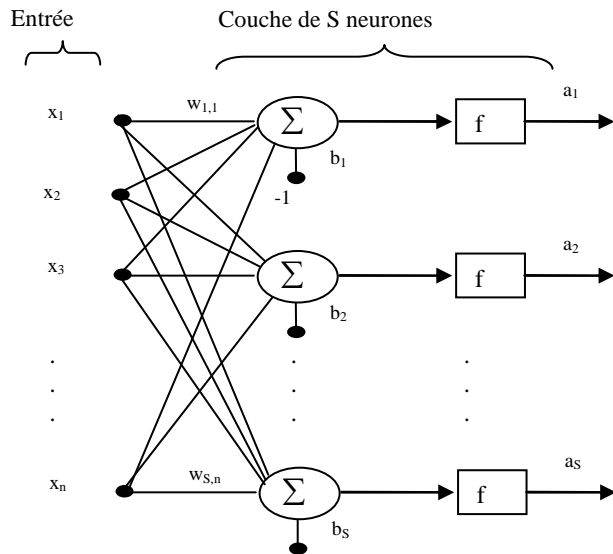


Fig. III-3: Modèle d'une couche de n neurones

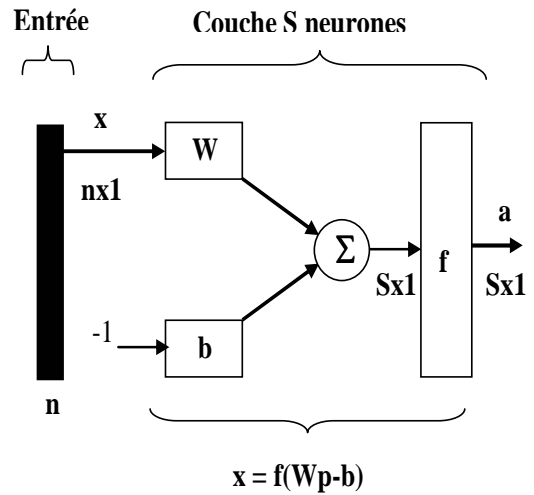


Fig. III-4: Représentation matricielle d'une couche de S neurones.

La fonction d'activation (ou fonction de seuil, ou encore fonction de transfert) (Tableau III-1) sert à introduire une non-linéarité dans le fonctionnement du neurone. Le résultat après transfert est la sortie du neurone. Cet enchaînement "non-linéaire" représente finalement les propriétés "physiques" du neurone.

Nom de la fonction	Relation d'entrée/sortie	Icône	Nom Matlab
seuil	$a = 0$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$		hardlim
seuil symétrique	$a = -1$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$		hardlims
linéaire	$a = n$		purelin
linéaire saturée	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $0 \leq n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$		satlin
linéaire saturée symétrique	$a = -1$ si $n < -1$ $a = n$ si $-1 \leq n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$		satlins
linéaire positive	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $n \geq 0$		poslin
sigmoïde	$a = \frac{1}{1+\exp^{-n}}$		logsig
tangente hyperbolique	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$		tansig
compétitive	$a = 1$ si $n$ maximum $a = 0$ autrement		compet

Tableau III-1: Fonction de transfert

### ***III.3.2.2 Apprentissage***

La notion d'apprentissage est claire et intuitive pour les humains ou les animaux: c'est une procédure cognitive qui doit faire en sorte que l'individu réalise, de manière autonome, une tâche donnée.

Pour un RNA, l'apprentissage peut être considéré comme le problème de la mise à jour des poids des connexions au sein du réseau, afin de réussir la tâche qui lui est demandée. L'apprentissage est la caractéristique principale des RNA et il peut se faire de différentes manières et selon différentes règles [LAD03] Les procédures d'apprentissage peuvent se subdiviser en deux types:

**Apprentissage supervisé :** Dans ce type d'apprentissage, le réseau s'adapte par comparaison entre le résultat qu'il a calculé, en fonction des entrées fournies, et la réponse attendue en sortie. Ainsi, le réseau va se modifier jusqu'à ce qu'il trouve la bonne sortie, c'est-à-dire celle attendue, correspondant à une entrée donnée.

**Apprentissage non supervisé :** Dans ce type, l'apprentissage est basé sur des probabilités. Le réseau va se modifier en fonction des régularités statistiques de l'entrée et établir des catégories, en attribuant et en optimisant une valeur de qualité, aux catégories reconnues.

Les méthodes d'apprentissage supervisé sont largement utilisées. Cependant d'autres types de réseaux de neurones peuvent être obtenus par des techniques d'apprentissage non supervisé. Des réseaux non supervisés peuvent être utilisés, parfois, pour identifier certaines caractéristiques dans un groupe de données.

Il existe diverses structures de réseau de neurones qui sont plus ou moins performantes selon l'application à laquelle ils sont destinés. La classification plus reconnue fait la différence entre les Réseaux "FEED-FORWARD" (ce sont des réseaux dans lesquels l'information se propage de couche en couche sans retour en arrière possible) et les réseaux "FEED-BACK" appelés aussi "réseaux récurrents" (ce sont des réseaux dans lesquels il y a un retour en arrière de l'information).

Dans notre étude nous utiliserons un modèle largement répandu appelé le multicouche (MLP Multi Layer Perceptron). Dans ce modèle, dans une couche, chaque neurone est connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante (excepté pour les couches d'entrée et de sortie) et il n'y a pas de connexions entre les neurones d'une même couche. Les fonctions d'activation utilisées dans ce type de réseaux sont principalement les fonctions à seuil ou sigmoïdes.

### ***III.3.2.3 Réseau rétro-propagation***

Le réseau rétro-propagation est conçu pour qu'il fonctionne comme réseau multicouche, avec propagation vers l'avant, en utilisant la fonction d'apprentissage supervisée. Cette méthode est caractérisée par le processus d'apprentissage. Ce processus est effectué par un entraînement contrôlé par un agent externe qui détermine la sortie du réseau devant une entrée déterminée.

Les réseaux de propagation en arrière possèdent la capacité d'auto-adapter les poids des neurones des couches intermédiaires pour appréhender la relation qui existe entre un ensemble de patrons d'entrée et ses sorties correspondantes. Une fois en fonctionnement, ils ont la capacité de généralisation (fournir des sorties satisfaisantes à des entrées que le système n'a jamais vues dans sa phase d'entraînement).

Une architecture simple de la structure d'un réseau multicouche du type rétro-propagation est présentée dans la figure (Fig. III-5) ci-dessous.

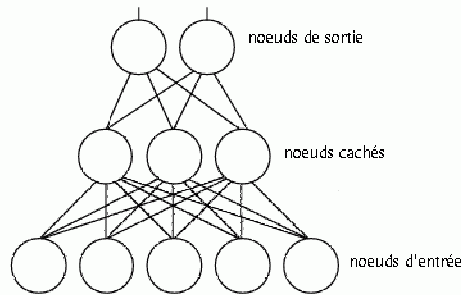


Fig. III-5: Architecture d'un réseau rétro-propagation

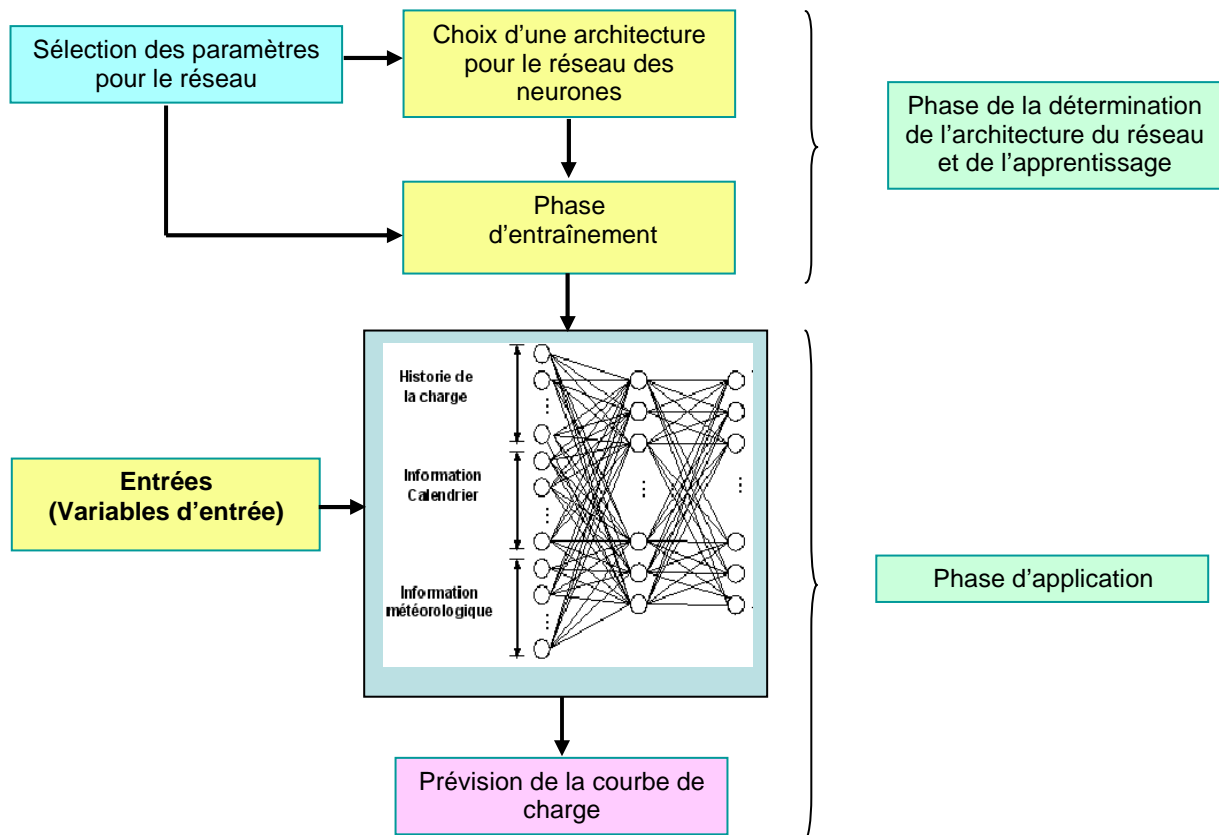


Fig. III-6: Détermination et application d'un réseau rétro-propagation

Pour résoudre un problème spécifique, il existe 3 étapes à suivre, dans la procédure d'entraînement des réseaux d'apprentissage supervisé du type rétro-propagation (Fig. III-6) :

- Sélection des données d'entrée pour le réseau
- Choix de l'architecture du réseau
- Entraînement du réseau

Simulation du réseau à fin d'obtenir la réponse à des nouvelles entrées. Dans ce contexte, nous allons proposer une méthode pour la prédiction de charge à partir des réseaux de neurones, en implémentant notre architecture dans le Neural Networks Toolbox de Matlab.

### III.3.3 Cas d'application

Dans cette partie, nous allons présenter le programme de prédiction de charge en utilisant la technique des réseaux de neurones. Le programme développé sera appliqué pour la prédiction de la consommation électrique d'une région de multi bâtiments du réseau de distribution de Hanoi, Vietnam.

#### III.3.3.1 Base des données

Nous utilisons les données qui contiennent l'information de la consommation électrique de chaque heure pendant 9 ans (1997-2005) pour un quartier de la ville de Hanoi au Vietnam. On a également obtenu l'information de température moyenne pour chaque jour ainsi que les données de températures pour des diverses heures d'une même journée au cours de cette période.

Par une recherche sur le calendrier du Vietnam, nous avons obtenu l'information sur les jours fériés. Cela nous a permis de renforcer notre analyse en soulignant les modifications de la consommation pour ce type de jour particulier.

#### III.3.3.2 Caractéristiques de la base de données

##### III.3.3.2.1 Comportement de la courbe de charge

Il est possible d'analyser le comportement de la charge au cours de cette période (de 1997 à 2005), en tenant compte de certains facteurs très importants.

Les figures Fig. III-7 à Fig. III-10 représentent la courbe de charge d'un jour ouvrable (ex : lundi), deux jours en weekend (samedi et dimanche) en hiver et en été, la courbe de charge hebdomadaire, et la courbe de charge des jours identiques dans la semaine (tous les lundis en mars de 1997 à 2005).

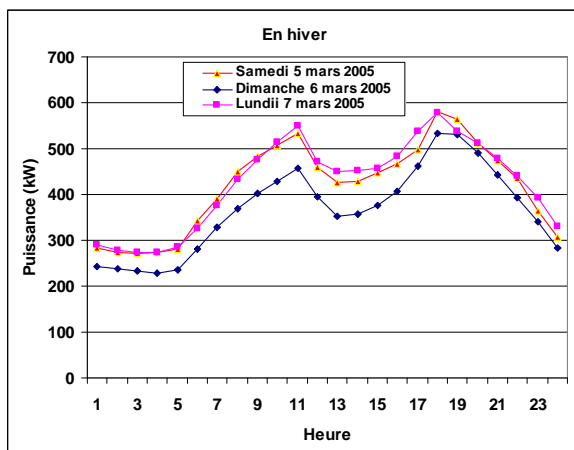


Fig. III-7: Courbe de charge d'un jour ouvrable et deux jours en weekend (en hiver)

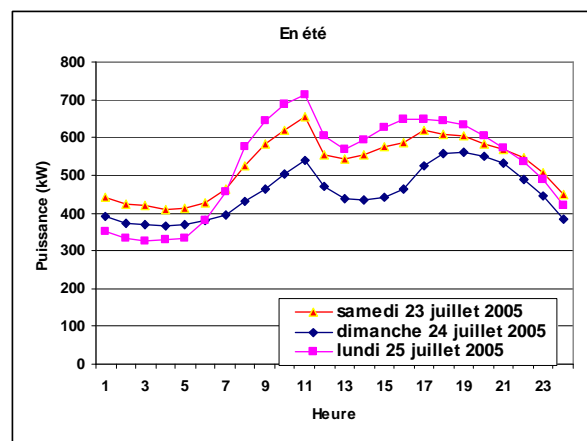


Fig. III-8: Courbe de charge d'un jour ouvrable et deux jours en weekend (en été)

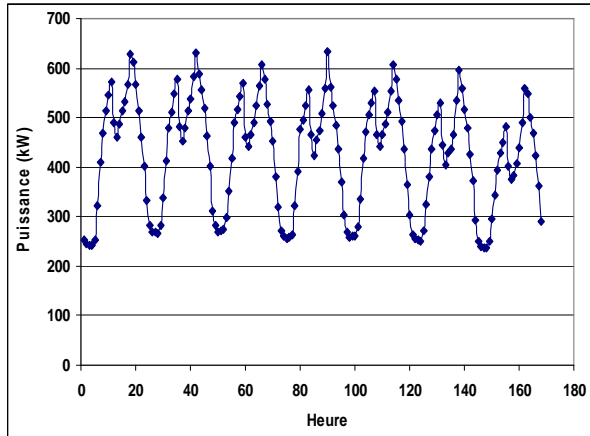


Fig. III-9: Courbe de charge hebdomadaire (du lundi 21 au dimanche 27 mars 2005)

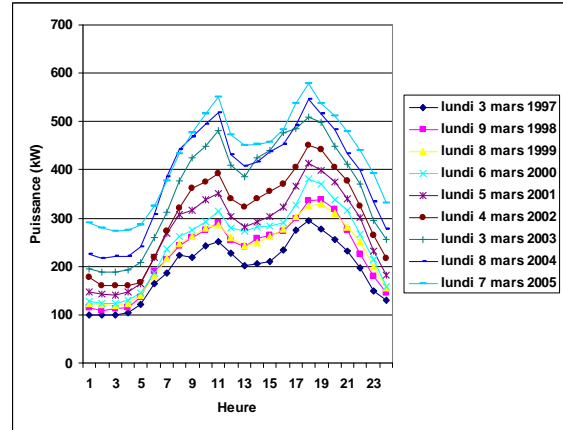


Fig. III-10: Courbe de charge des jours identiques (les lundis)

A travers ces courbes de charge, nous pouvons observer des comportements typiques de charge suivants :

- ❖ La consommation décroît pendant le week-end
- ❖ L'existence de deux points de charge pendant la journée : premier à midi et deuxième entre 18h et 19h
- ❖ En été, la consommation maximale est autour de 11h à cause de température très élevée et de l'utilisation des climatisations et des ventilateurs (Fig. III-8)
- ❖ Il n'existe pas de corrélation parmi les courbes des jours fériés
- ❖ La ressemblance dans le comportement de la courbe des jours semblables
- ❖ La consommation croît de 1997 à 2005 (Fig. III-10)

A partir de ces remarques, on peut constater que la courbe de charge a un comportement horaire, journalier, hebdomadaire, saisonnière et aléatoire, liée aussi aux jours de fêtes de l'année. Il faut prendre en compte dans toutes les analyses ces types variations qui vont affecter plus ou moins le profil caractérisant la consommation.

### III.3.3.2.2 Interrelation entre les variables de température et de consommations

Selon la base de donnée des températures pour l'année 1997, une présentation graphique de températures distribuées au cours de l'année (Fig. III-11), nous permettra d'établir un comportement typique météorologique de la région.

Il existe une consommation moyenne similaire pendant les mois de janvier, février, mars, octobre novembre et décembre (Fig. III-12). Cela correspond à la saison d'hiver. D'ailleurs, on peut aussi remarquer le semblance des mois correspondent à la saison d'été, tels que avril, mai, juin, juillet, août et septembre.

On peut constater que la consommation électrique est étroitement liée aux changements climatiques.

Le Tableau III-2 indique, pendant le mois d'été, il y a une élévation dans le niveau de la consommation électrique, par l'utilisation des ventilateurs et des climatisations.

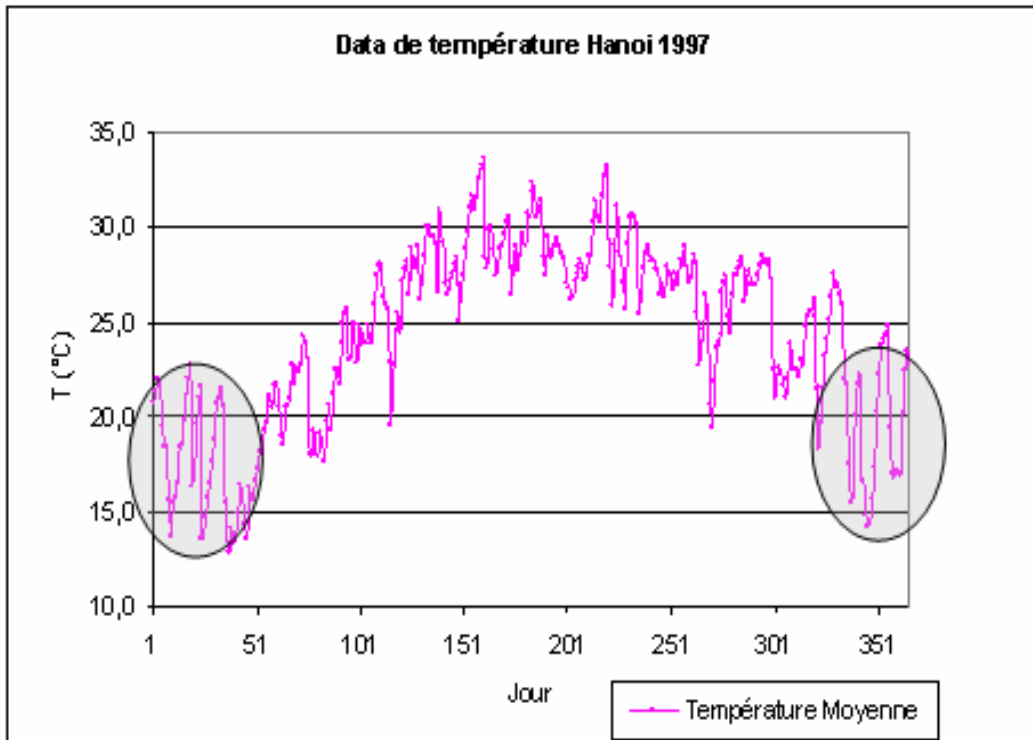


Fig. III-11: Courbe de température de l'année 1997

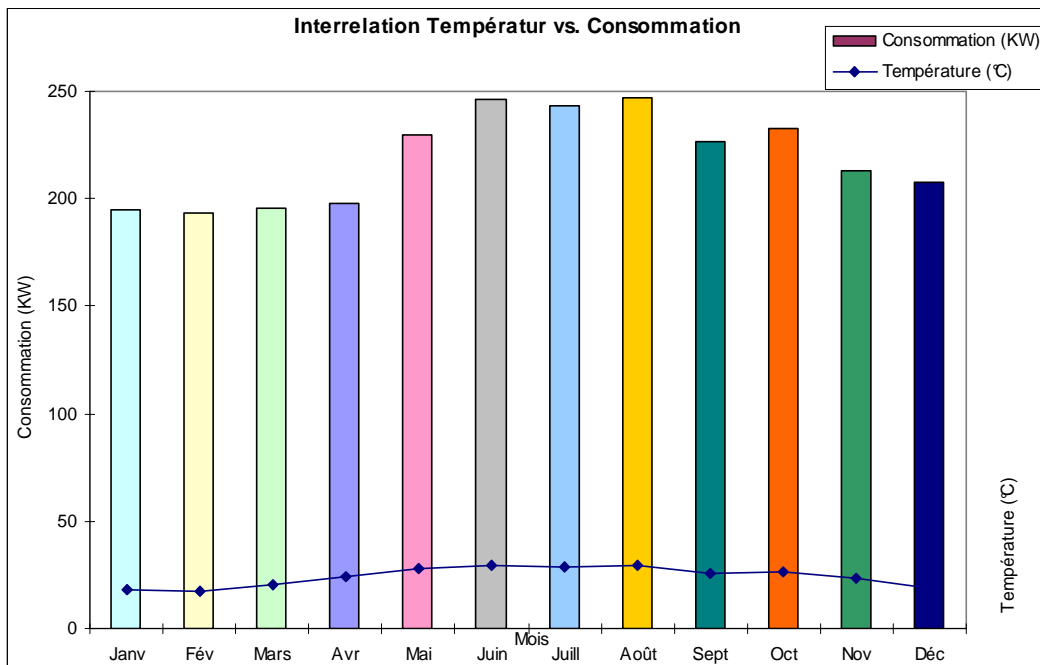


Fig. III-12: Consommation mensuelle moyenne

Pour les mois d'hiver, la température la plus basse est en février avec une valeur moyenne de 12,8°C. Pour cette période, la consommation électrique moyenne baisse.

Analyse de la consommation électrique mensuelle (kW)					
Mois	Par heure		Moyenne Totale du mois	Par jour (moyenne)	
	Min	Max		Min	Max
Janvier	87,3	335	194,94	173,65	210,20
Février	97,8	317,7	193,15	166,35	211,42
Mars	96,3	328,1	195,43	175,63	205,60
Avril	93,9	316,9	198,02	172,05	223,99
Mai	106,3	333	229,68	177,84	261,68
Juin	117	352,4	246,25	195,11	286,08
Juillet	123,7	344,5	243,18	203,32	277,77
Août	112,9	361,2	246,86	182,15	293,36
Septembre	101,4	346,5	226,65	181,32	259,33
Octobre	114,7	383,7	232,43	193,22	263,50
Novembre	100,5	370,6	212,82	180,78	241,80
Décembre	97,1	360,3	207,98	174,94	221,30

Tableau III-2: Consommation électrique moyenne

D'ailleurs, en connaissant les conditions météorologiques nous pouvons également conclure que la consommation électrique maximale pendant les mois de : juin, juillet et août correspondant aux températures plus haut de l'année.

### III.3.3.3 Développement du programme de prédiction de charge

#### III.3.3.3.1 Architecture du réseau

Le modèle général pour la prédiction de charge est présenté ci-dessus. La différence avec des autres modèles dépend de la façon de sélectionner les données d'entrée (information de charge, météorologique et calendrier). Normalement la sortie sera la prédiction de la charge où chaque nœud représente la consommation pour une heure. Le réseau que nous proposons sera composé de trois couches : une couche d'entrée, une couche ou deux couches cachées et une couche de sortie (Fig. III-13).

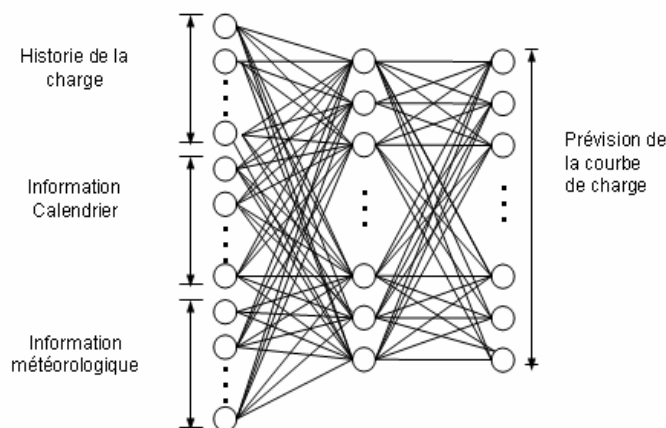


Fig. III-13: Schéma général de l'architecture

Notre but sera alors de fournir au réseau, dans la couche cachée, un nombre de neurones adéquat qui nous permettra de faire l'approche, la plus efficace.



Dans notre méthode, la définition du nombre convenable de neurones dans la couche cachée a été réalisée à travers des divers tests d'essai. Le nombre de neurones des couches cachées est ajusté pour que l'erreur soit minimale.

### III.3.3.3.2 Données d'entrée

Suivant l'analyse de la base de données et des variables qui interviennent dans le comportement de la charge électrique, nous allons définir les variables à fournir à notre réseau de neurones, selon la disponibilité de données pour l'étude comme il est indiqué dans le Tableau III-3.

Catégorie	Variable	Unités	Type
Météorologiques	Température	°C	Numérique Représentée par sa valeur actuelle
Calendrier	Heure du Jour		Numérique Représentée par sa valeur actuelle Etendue 0-23
	Jour de la semaine		Catégorie Codée Lundi=0, Mardi=1, ...Dimanche=6
	Week-end		Catégorie Codée Week-end ou jour férié=0 Jour ouvrable=1
	Mois		Catégorie Codée Janvier=0, février=1, ...Décembre=11
Consommation	Taux de croissance	%	Numérique Représentée par sa valeur actuelle
	Puissance de charge électrique	kW	

Tableau III-3: Données d'entrée pour le réseau de neurones

Le taux de croissance est un facteur qui représente la croissance de la consommation en fonction du temps.

### III.3.3.3.3 Description de la série des données de consommation

La série de données de consommation (puissance) est utilisée pendant la période de neuf ans (1997-2005) du 1er Janvier au 31 décembre.

Pour faciliter le travail, nous utilisons les données des mois semblables (ex : janvier, février, mars,..., décembre) et de quelques mois précédents pour la phase d'apprentissage. En ce qui concerne la température, nous avons aussi trouvé une relation forte entre les mois de mars et juillet, ce qui correspond à la saison d'hiver et la saison d'été à Hanoi, Vietnam.

### III.3.3.3.4 Préparation des données d'entrée : classification, codage et normalisation

Un des aspects, le plus important pour le succès d'une méthode de prédiction ainsi que pour l'entraînement d'un réseau de neurones, c'est la manière d'utiliser les données. Il est nécessaire alors de réaliser un pré-traitement de ces données afin d'obtenir les meilleures performances du réseau. Le pré-traitement consiste donc à :

- ❖ Classification: chercher les mois semblables dans la base des données et les classer
- ❖ Codage: Le codage de données d'entrée est fait comme nous expliquons dans le *Tableau III-3*.
- ❖ Normalisation: à partir de la forme originale des données d'entrée (*Tableau III-3*), toutes les variables considérées dans le modèle seront normalisées entre 0 et 1. On modifie alors ces valeurs par rapport à la valeur minimale et maximale. On aura ainsi des séries de données homogènes qui varient entre 0 et 1.

### III.3.3.4 Entraînement du réseau et validation par simulation

#### III.3.3.4.1 Outils informatiques

Le Neural Network Toolbox de Matlab, comporte un ensemble d'utilitaires qui permet l'utilisation des réseaux de neurones avec une grande facilité de compréhension et une simplicité importante pour entrer des données alliées à une grande puissance de calcul.

Le Neural Network Toolbox permet de modifier les paramètres d'entraînement tels que le critère de convergence, l'erreur maximale admise, le nombre maximum d'itérations, les fonctions d'activation, etc. Le critère d'arrêt est basé sur la fonction descendante de l'erreur quadratique moyenne, ce qui évite la possibilité de faire un surentraînement du réseau.

#### III.3.3.4.2 Critère d'évaluation

L'évaluation de l'exactitude de la prédiction est faite selon l'équation d'erreur absolue suivante:

$$e = \frac{|Charg e \_ actuelle - Charg e \_ prévision|}{Charg e \_ actuelle} * 100 \quad (III-3)$$

On calculera l'erreur moyenne que nous choisirons comme un des critères possibles pour évaluer l'efficacité de notre méthode.

$$ME(e) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e \quad (III-4)$$

Un autre critère d'évaluation est utilisé par l'erreur quadratique (root mean square error) :

$$RMSE(e) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^2} \quad (III-5)$$

#### III.3.3.4.3 Résultats de l'entraînement

Pour la phase d'apprentissage, nous utilisons les données de huit premières années (1997-2004). Les données de consommation varient en fonction du mois. Par exemple, pour le mois de mars, les données d'entrée des puissances de consommation sont 5952 données (8 ans x 31 jours x 24 h). En plus, il faut avoir 744 données (31 jours x 24h) de type de jour ouvrable ou de weekend (Week-end ou jour férié=0, Jour ouvrable=1), 744 données (31 jours x 24h) de jour de la semaine (0, 1, ...6) et 744 données pour le taux de croissance de consommation.

Par la suite, nous effectuerons quelques modifications pour la mise en forme des données, qui sont toujours liées à l'architecture du système. Nous déterminons alors la meilleure architecture du réseau et le nombre convenable de neurones dans la couche cachée.

Une fois que le réseau a été entraîné, nous sommes prêt à réaliser notre prédiction. Les données en 2005 seront utilisées pour nous permettre de vérifier l'efficacité de notre architecture et finalement de valider notre proposition.

### ***III.3.3.5 Résultats de calcul***

#### **III.3.3.5.1 Architectures proposées**

Dans notre étude, nous proposons plusieurs architectures. Nous présentons ci-dessous quatre architectures principales pour effectuer la prévision de charge:

##### **❖ Première architecture (A1)**

Entrées: Type de jour, jour de la semaine, puissance historique

Sorties: Puissance de consommation estimée

##### **❖ Deuxième architecture (A2)**

Entrées: Type de jour, jour de la semaine, taux de croissance, puissance historique

Sorties: Puissance de consommation estimée

##### **❖ Troisième architecture (A3)**

Entrées: Type de jour, jour de la semaine, taux de croissance, puissance historique, Température moyenne du jour

Sorties: Puissance de consommation estimée

##### **❖ Quatrième architecture (A4)**

Entrées: Type de jour, jour de la semaine, taux de croissance, puissance historique, température moyenne du jour, 4 températures de la journée

Sorties: Puissance de consommation estimée

#### **III.3.3.5.2 Résultats**

A partir du programme développé, nous avons effectué les prévisions de charge pour tous les mois en 2005, puis nous les avons comparées avec les données réelles. Dans cette partie, nous présentons seulement les résultats obtenus pour les jours du mois de mars (hiver) et de juillet (été).

#### **Résultat pour le mois de mars en 2005 (hiver).**

La Fig. III-14 présente la courbe de consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de mars en 2005. La Fig. III-15 présente l'erreur absolue entre la consommation réelle et prévisionnelle. Le Tableau III-4 donne l'erreur absolue, l'erreur moyenne et l'erreur quadratique (erreur RMS) entre la consommation réelle et prévisionnelle. Les résultats

montrent que l'erreur absolue maximale de la prédiction ne dépasse pas 13%, tandis que l'erreur moyenne est inférieure à 5% et l'erreur quadratique ne dépasse pas 6%. La Fig. III-16 présente la courbe de consommation réelle et prévisionnelle pour le vendredi 25 mars 2005. Pour ce jour l'erreur maximale, l'erreur moyenne et l'erreur quadratique sont respectivement égales à 3.8 %, 1.8%et 2.1%. Ces chiffres démontrent l'efficacité de la méthode proposée.

Les résultats indiqués sont obtenus par l'architecture 2 et deux couches de neurones cachés. Afin d'améliorer encore la précision, une autre version sera développée pour tenir compte de la température.

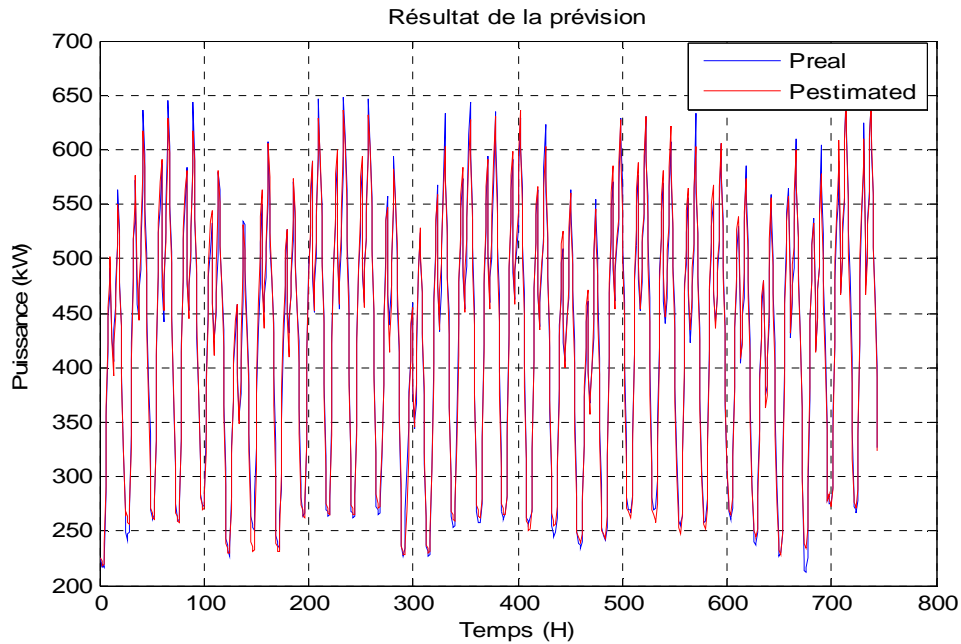


Fig. III-14: Consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de mars en 2005 (hiver)

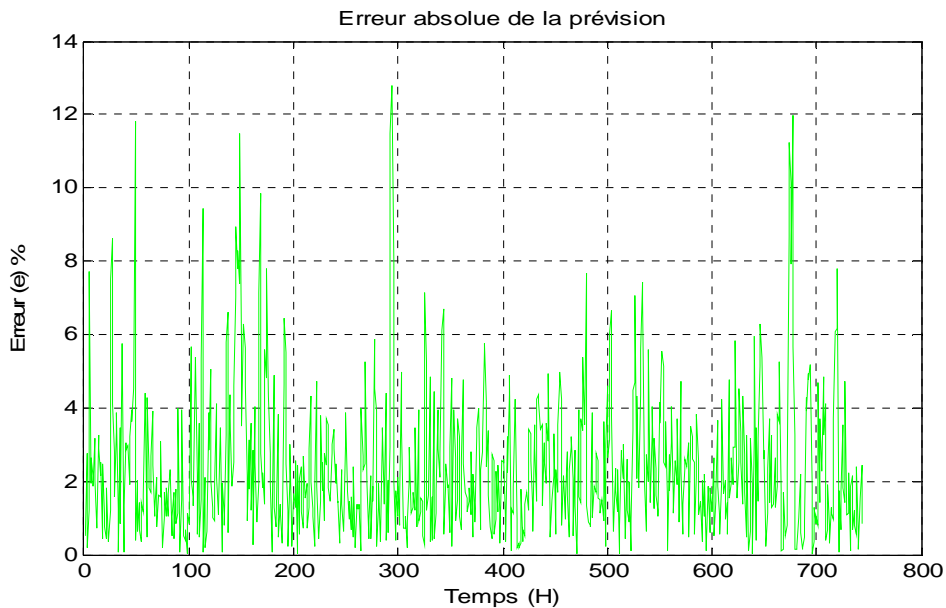


Fig. III-15: Erreur absolue entre la consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de mars en 2005 (hiver)

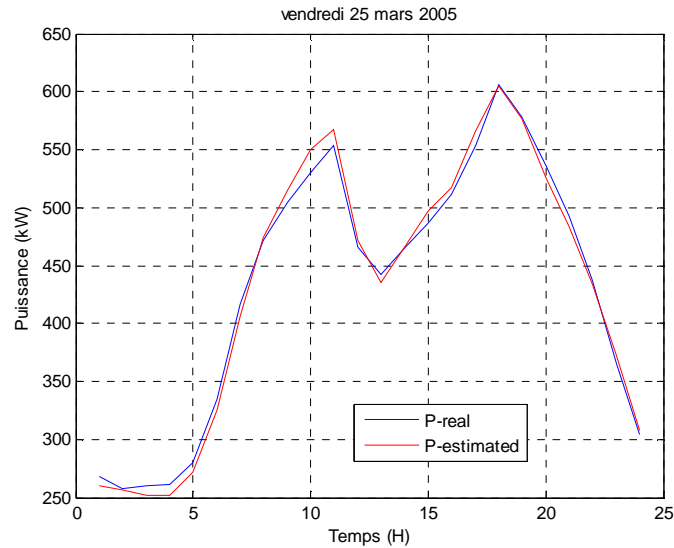


Fig. III-16: Consommation réelle et prévisionnelle pour le vendredi 25 mars 2005 (hiver)

Jour	Erreur absolue (%)	Erreur moyenne (%)	Erreur RMS (%)
mardi 1 mars 2005	7.7	1.9	2.5
mercredi 2 mars 2005	11.8	3.6	4.4
jeudi 3 mars 2005	4.4	1.8	2.1
vendredi 4 mars 2005	4.0	1.4	1.7
samedi 5 mars 2005	9.4	2.4	3.3
dimanche 6 mars 2005	7.0	2.6	3.3
lundi 7 mars 2005	11.5	4.7	5.6
mardi 8 mars 2005	7.8	2.8	3.6
mercredi 9 mars 2005	4.3	1.7	2.0
jeudi 10 mars 2005	4.7	2.2	2.5
vendredi 11 mars 2005	3.9	1.4	1.7
samedi 12 mars 2005	5.9	2.4	2.9
dimanche 13 mars 2005	12.8	2.7	4.3
lundi 14 mars 2005	7.1	2.0	2.7
mardi 15 mars 2005	6.7	2.5	3.0
mercredi 16 mars 2005	5.7	2.5	2.9
jeudi 17 mars 2005	4.9	1.9	2.3
vendredi 18 mars 2005	4.2	1.5	1.9
samedi 19 mars 2005	5.0	3.0	3.2
dimanche 20 mars 2005	7.7	2.5	3.0
lundi 21 mars 2005	6.6	2.3	2.8
mardi 22 mars 2005	7.1	2.2	2.7
mercredi 23 mars 2005	7.4	3.3	3.8
jeudi 24 mars 2005	5.1	2.3	2.6
vendredi 25 mars 2005	3.8	1.8	2.1
samedi 26 mars 2005	5.8	2.2	2.5
dimanche 27 mars 2005	6.3	2.8	3.3
lundi 28 mars 2005	5.2	1.9	2.3
mardi 29 mars 2005	12.0	3.7	5.3
mercredi 30 mars 2005	7.8	2.5	3.3
jeudi 31 mars 2005	4.7	1.5	1.8

Tableau III-4: Erreur absolue, erreur moyenne et l'erreur quadratique (RMS) entre la consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de mars en 2005 (hiver)

Résultat pour le mois de juillet en 2005 (été)

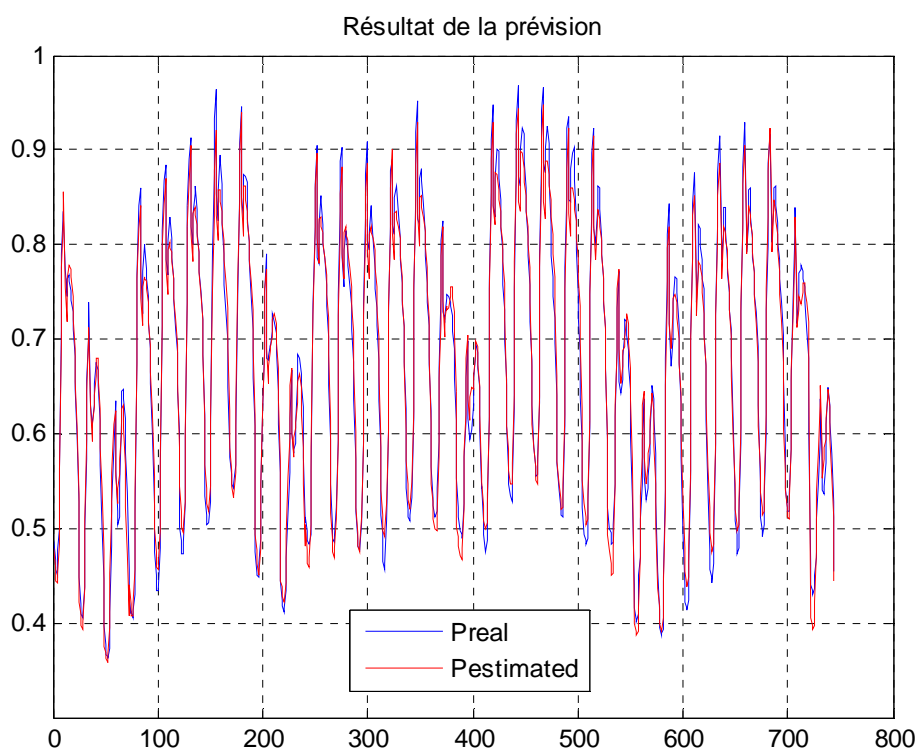


Fig. III-17: Consommation réelle et de prévision pour le mois de juillet en 2005 (été)

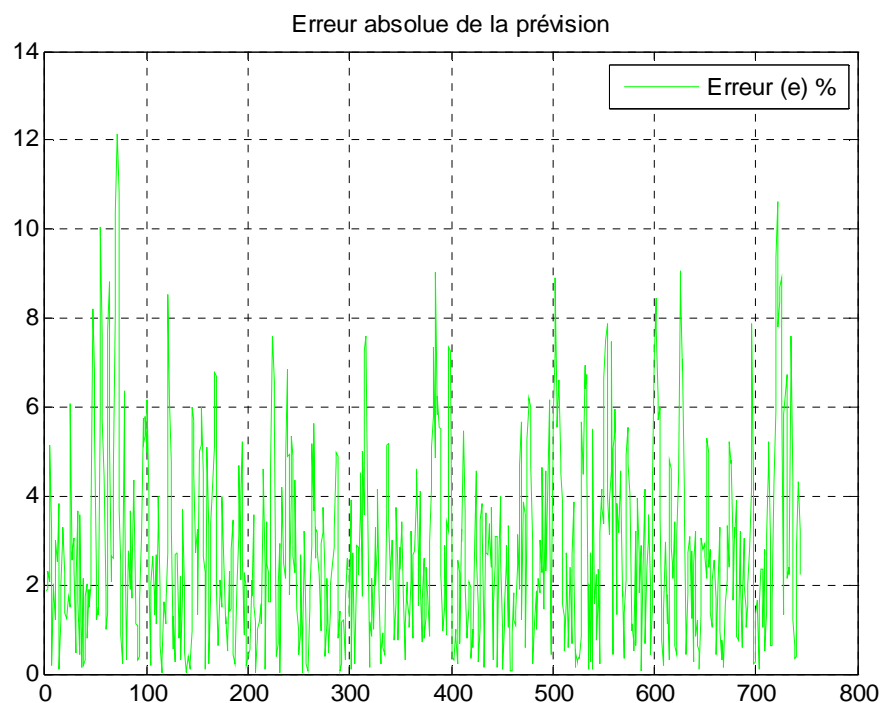


Fig. III-18: Erreur absolue entre la consommation réelle et de prévision pour le mois de juillet en 2005 (été)

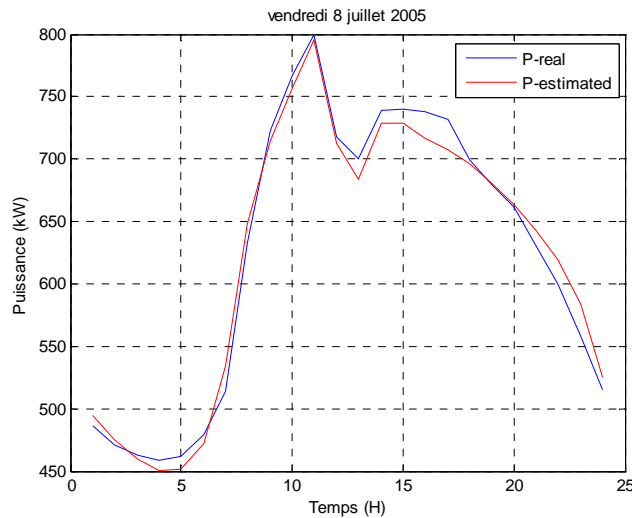


Fig. III-19: Consommation réelle et de prévision pour le vendredi 25 juillet 2005 (été)

Jour	Erreur absolue (%)	Erreur moyenne (%)	Erreur RMS (%)
vendredi 1 juillet 2005	5.1	2.1	2.4
samedi 2 juillet 2005	8.2	2.5	3.2
dimanche 3 juillet 2005	12.1	5.2	6.2
lundi 4 juillet 2005	6.4	2.3	2.9
mardi 5 juillet 2005	6.2	2.6	3.2
mercredi 6 juillet 2005	8.6	2.1	3.1
jeudi 7 juillet 2005	6.8	3.9	4.3
vendredi 8 juillet 2005	4.7	1.8	2.1
samedi 9 juillet 2005	5.2	1.9	2.4
dimanche 10 juillet 2005	7.6	3.2	3.8
lundi 11 juillet 2005	5.3	2.3	2.8
mardi 12 juillet 2005	5.6	2.7	3.0
mercredi 13 juillet 2005	4.5	1.9	2.2
jeudi 14 juillet 2005	7.6	2.6	3.5
vendredi 15 juillet 2005	5.2	2.3	2.6
samedi 16 juillet 2005	7.3	2.9	3.4
dimanche 17 juillet 2005	9.0	3.1	4.0
lundi 18 juillet 2005	5.5	2.2	2.6
mardi 19 juillet 2005	4.0	2.2	2.5
mercredi 20 juillet 2005	6.2	3.0	3.6
jeudi 21 juillet 2005	8.9	3.3	4.0
vendredi 22 juillet 2005	6.6	2.1	2.8
samedi 23 juillet 2005	7.5	3.5	4.2
dimanche 24 juillet 2005	7.9	3.8	4.3
lundi 25 juillet 2005	7.1	2.3	2.8
mardi 26 juillet 2005	8.4	3.2	3.9
mercredi 27 juillet 2005	9.1	2.9	3.8
jeudi 28 juillet 2005	5.3	2.0	2.4
vendredi 29 juillet 2005	7.9	2.8	3.3
samedi 30 juillet 2005	9.3	2.5	3.3
dimanche 31 juillet 2005	10.6	4.6	5.6

Tableau III-5: Erreur absolue, erreur moyenne et erreur quadratique (RMS) entre la consommation réelle et de prévision pour le mois de juillet en 2005 (hiver)

La Fig. III-17 présente la courbe de consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de juillet en 2005. La Fig. III-18 présente l'erreur absolue entre la consommation réelle et prévisionnelle. Tableau III-5 donne l'erreur absolue, l'erreur moyenne et l'erreur quadratique entre la consommation réelle et prévisionnelle. Les résultats montrent que l'erreur absolue maximale de la prévision ne dépasse pas 12.2%, tandis que l'erreur moyenne est inférieure à 5.2% et l'erreur quadratique ne dépasse pas 6.3%. La Fig. III-19 présente la courbe de consommation réelle et prévisionnelle pour le vendredi 8 juillet 2005. Pour ce jour l'erreur maximale, l'erreur moyenne et l'erreur quadratique sont respectivement égales à 4.7%, 1.8% et 2.1%. Ces chiffres démontrent à nouveau l'efficacité de la méthode proposée.

Les résultats indiqués sont obtenus par l'architecture 2 et deux couches de neurones cachés. Le comportement des consommations en été est très compliqué à cause de la température très élevée et de l'utilisation des climatisations et des ventilateurs. Nous avons développé une autre version qui tient compte de la température. Les résultats en tenant compte de température sont présentés dans l'annexe 3. On constate que, en ajoutant de la température, la précision est faiblement améliorée.

Pour chaque architecture nous allons déterminer les caractéristiques qu'il convient de maîtriser pour caractériser performance d'un réseau (Tableau III-6), tels que :

- Nombre d'itérations
- Nombre de neurones dans la couche cachée

Valeurs des paramètres d'entraînement	
Itérations	300-400
Neurones cachées	5-15 (selon Nombre de couches cachées entre 1-2)

Tableau III-6: *Les meilleurs paramètres du réseau*

L'exactitude de la prévision peut être améliorée encore par d'autres recherches sur les paramètres essentiels qui influencent le profil de charge du système de puissance, la corrélation entre les paramètres d'entrée, l'architecture optimale du réseau neurone...

### **III.4 Méthode ascendante ou « bottom up » basée sur la connaissance du comportements des charges**

#### **III.4.1 Introduction**

L'utilisation d'énergie dans le domaine résidentiel est liée aux facteurs psychologiques et au style de vie. Ces facteurs ne sont pas faciles à définir avec précision. C'est pour cela que la prédiction de la forme de charge pour des utilisateurs résidentiels par un processus de synthèse est une activité très complexe. Ni la définition du comportement standard des divers types de client par des corrélations statistiques, ni l'estimation de probabilité d'usage de chaque appareil ne peuvent résoudre totalement le problème car elles ne considèrent pas la variabilité aléatoire de la demande.



Dans la bibliographie, les méthodes proposées pour la prédiction de la consommation d'électricité du secteur résidentielle utilisent la connaissance de l'usage final. Ces méthodes sont basées sur la méthodologie proposée par [CAP94]. Il s'ensuit une approche de type « Bottom-Up » qui permet de construire une courbe de charge du secteur, en connaissant le comportement socioéconomique, les caractéristiques démographiques et le profil de charge de chaque appareil de maison.

### III.4.2 Présentation de la méthode ascendante

#### III.4.2.1 Formulation mathématique

En principe par des considérations techniques on pourrait déterminer la courbe de charge de la consommation si le profil de consommation de chaque appareil était connu. Toutefois, la demande, le profil de l'usage individuel (appareil) ou de la clientèle est très aléatoire et très imprévisible. En effet, il existe une très grande diversité des modes d'utilisation de chaque appareil. C'est pourquoi, il est impossible de prédire le profil de charge du système en extrapolant les estimations individuelles des habitudes d'utilisation. La consommation du système est influencée par un certain nombre de facteurs. Nous pouvons énumérer ces facteurs selon les catégories suivantes:

**Facteur social:** C'est un facteur aléatoire du modèle social et du comportement social d'un groupe résidentiel. Le facteur social tient compte des facteurs tels que la démographie, le niveau économique des quartiers, l'évolution du climat et, plus généralement, les tendances économiques qui ont une incidence importante sur la tendance de la courbe de charge

**Facteur de temps:** Les effets temporels : cycle hebdomadaire, quotidien, les jours fériés et fêtes légales et religieuses, les jours ouvrables et les jours week-ends jouent un rôle important en influençant les courbes de charge. La Fig. III-20 représente la puissance journalière du secteur résidentiel aux jours typiques. On voit que la consommation pendant des jours ouvrables est en général inférieure à celle des week-ends

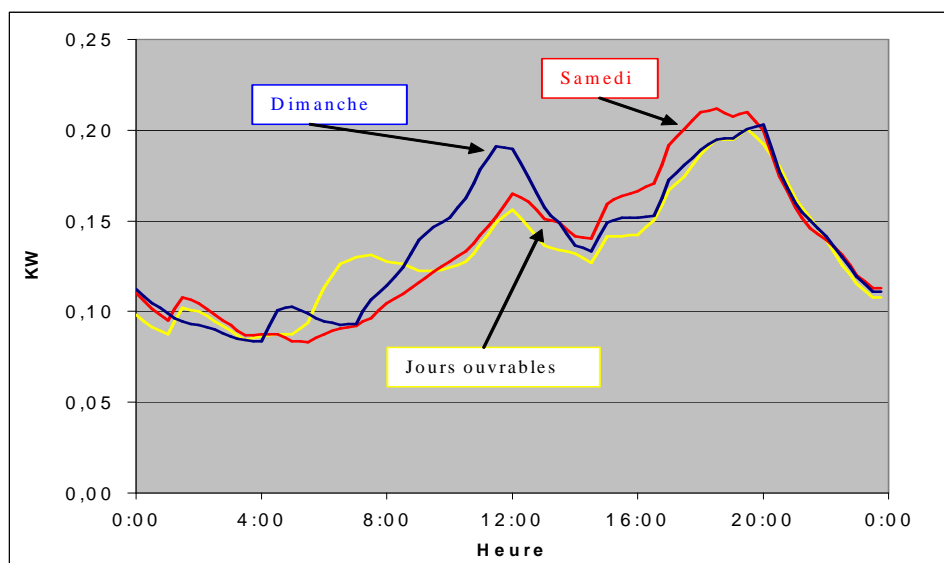


Fig. III-20: La puissance journalière du secteur résidentiel pour trois jours typiques

**Facteurs saisonnier :** En effets saisonniers, la consommation quotidienne à un niveau annuel dépend souvent des variables externes telles que la température extérieure moyenne et du nombre quotidien des heures de jour. La consommation moyenne journalière d'hiver est plus forte que celle d'été à cause de croissance d'utilisation de chauffage dû aux changements de température. En plus, les changements dans la structure des heures de jour et de nuit ou de la demande saisonnière, début de l'année scolaire, et des réductions importantes des activités pendant les périodes de congés (ex : Noël - Nouvel An), contribuent aussi au changement du facteur saisonnier. La Fig. III-21 représente le facteur saisonnier en fonction des jours de l'année

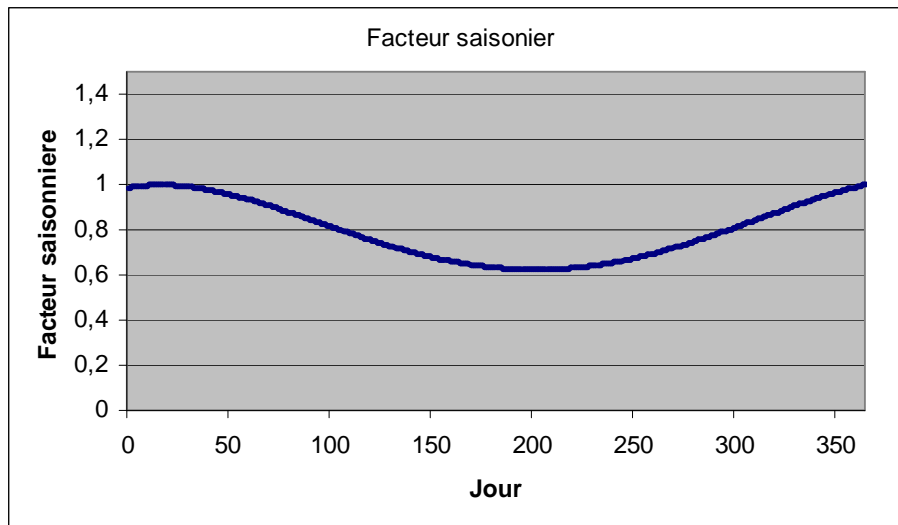


Fig. III-21: *Facteur saisonnier*

### **Le démarrage et le cycle du fonctionnement d'un appareil :**

A partir des facteurs aléatoires discutés précédemment on constate que la contribution du profil charge de chaque appareil à celui du système, est déterminée par deux caractéristiques de l'appareil : **le profil du fonctionnement** et **l'instant de démarrage** de l'appareil.

**a) Le profil du fonctionnement :** Le profil de fonctionnement représente les consommations d'électricité d'un appareil basée sur le cycle du fonctionnement. Après le démarrage, les appareils pourraient fonctionner avec cycles ou sans cycle. Par exemple, le Tableau III-7 représente les profils de fonctionnement du lave-vaisselle et de la télévision :

- Le fonctionnement du lave-vaisselle (Fig. III-22) comprend trois cycles :
  - Chauffage : la puissance  $P_1=1600W$ , la durée= 18 mn
  - Lavage : la puissance  $P_2=80W$  (très faible), la durée = 54mn
  - Séchage : la puissance  $P_3=1600W$ , la durée =6mn
- Le fonctionnement de la télévision n'a pas de cycle : la puissance est constante et égale à  $P=75$  de même que la durée =60mn.

L'annexe [A4] représente en détail la caractéristique des quelques appareils et la consommation de chaque cycle de appareil. Le profil du fonctionnement représente également la consommation en veille.

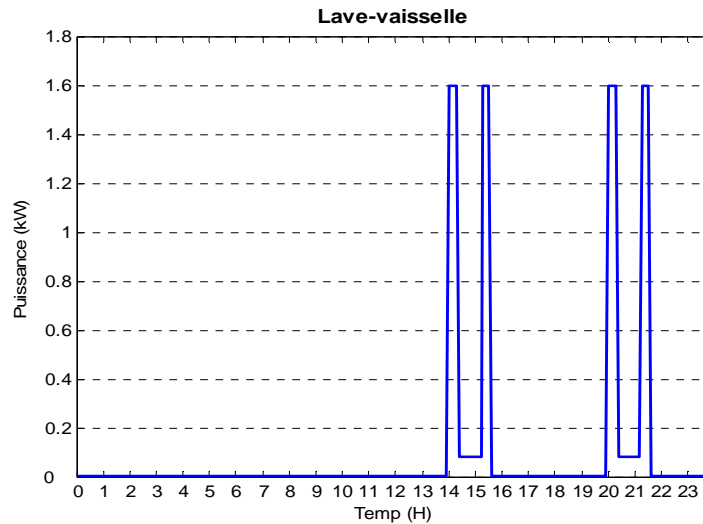


Fig. III-22: Fonctionnement du lave-vaisselle (2 utilisations par jour)

Appareils et groupes	Puissance (W) et la durée du cycle de fonctionnement (min)						Vieille (W)	Fréquence journalière	
	P1	T1	P2	T2	P3	T3		Jour ouvrable	Week-end
Lave-vaisselle	1600	18	80	54	1600	18	0	1,16	1,26
Télévision	75	60					8	1,95	2,12

Tableau III-7: Cycle et fréquence du fonctionnement du lave-vaisselle et de la télévision

**b) L'instant de démarrage :** indique quand un appareil commence à fonctionner. C'est un facteur aléatoire qui est fonction des facteurs abordés au-dessus. Ce moment dépend des éléments suivants :

- l'heure de la journée,
- le type du jour (jour ouvrable ou week-end),
- le jour de la saison de l'année, la distribution du facteur social et même l'appareil.

Ce moment est caractérisé par le facteur  $p^{start}$  qui est exprimé par l'équation suivante [PAA06]:

$$p^{start}(A, \Delta t^{comp}, \sigma^{flat}, h, j) = p^{saison}(j, A) p^{heure}(A, h, j) f(h, j) p^{pas}(\Delta t^{comp}) p^{social}(\sigma^{flat}) \quad (III-6)$$

Où :

$p^{start}$  : Facteur de probabilité de démarrage de l'appareil A ou du groupe des appareils A au moment de calcul. Il est déterminé pour chaque pas de temps de calcul  $\Delta t^{comp}$ . L'appareil A commence à démarrer quand  $p_{start}$  est supérieur à un nombre aléatoire dont la valeur est comprise entre 0 et 1.

$f$  : Fréquence d'utilisation journalière de l'appareil. Cette fréquence dépend du type du jour. Le Tableau III-7 présente les valeurs de la fréquence du lave-vaisselle et de la télévision ou le tableau Tab.A 3 dans l'annexe [A4] présente les valeurs de la fréquence des nombres appareils

$A$  : L'appareil ou groupe d'appareils

$h$  : L'heure du jour

$j$  : Le jour

$\sigma^{flat}$  : L'écart type pour  $p^{social}$

$p^{social}$  Facteur aléatoire du modèle social du comportement social d'un groupe résidentiel.

On peut considérer sa distribution comme une distribution normale.

$p^{saison}$  : Facteur saisonnier : Il indique la probabilité du démarrage de l'appareil à chaque jour de l'année. La Fig. III-21 présente la courbe de facteur saisonnier

$\Delta t^{comp}$  Le pas de temps de calcul (en minute ou seconde)

$p^{pas}$  Facteur du taille du pas de calcul. Il dépend du pas du calcul  $\Delta t^{comp}$ . On peut exprimer la formule du coefficient comme suivant:

Si  $N^{pas}$  est le nombre du pas de calcul pendant une heure et  $\Delta t^{comp}$  en minute, on a :

$$N^{pas} = \frac{60mn}{\Delta t^{comp}} \text{ et } N^{pas} p^{pas} = 1 \text{ donc } p^{pas} = \frac{\Delta t^{comp}}{60mn}$$

$$\text{et } \sum_1^{24} p^{heure} = 1$$

$p^{heure}$  Facteur horaire : Il indique la probabilité du démarrage de l'appareil à chaque heure de la journée. Ce facteur dépend aussi du type du jour (ouvrable ou week-end). C'est un modèle du niveau d'activité pendant la journée. Par exemple, pour la cuisinière (Fig. III-23 et Tableau III-8), la valeur de la probabilité de démarrage à 19h est plus grande que celle à 2h du matin. Le tableau Tab.A 4 dans l'annexe [A4] présente les valeurs du facteur horaire de nombreux appareils dans le secteur résidentiel.

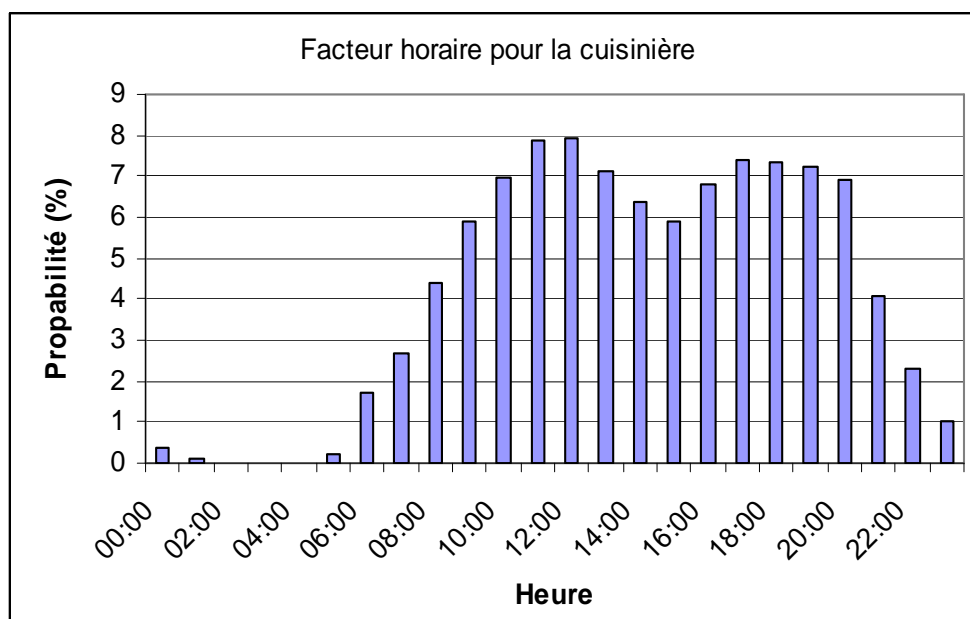


Fig. III-23: Facteur horaire pour la cuisine pour les jours ouvrables

Probabilité Horaire d'usage pour les jours ouvrables																								
Heure	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Cuisinière	04	01	0	0	0	02	17	27	44	59	697	786	792	715	639	589	678	741	732	723	693	409	23	102

Tableau III-8: Facteur horaire (probabilité horaire) de la cuisinière pour les jours ouvrables

### III.4.2.2 Mise en œuvre du modèle

Pour mettre en œuvre un tel modèle qui tient en compte des facteurs de variabilité, on a adopté une approche basée sur deux niveaux que l'on expliquera ci-dessous :

**Niveau 1.** Somme de la consommation de chaque appareil individuel pour produire un profil de consommation domestique

**Niveau 2.** Somme de la courbe de charge d'une quantité donnée de maisons pour prédire par synthèse le profil de charge du secteur d'usage final.

A partir de ces niveaux, on présente d'une façon simple (Fig. III-24) les caractéristiques du modèle dans notre étude et évoqué par [PAA06].

Le modèle suit une approche ascendante ou « bottom up ». Il comprend deux parties :

Dans **première partie** du modèle des fluctuations de consommation journalière sont définies. Celui-ci est conclu par les valeurs journalières du facteur social aléatoire  $p^{social}$ . La meilleure fonction de densité de probabilité et l'écart type pour  $p^{social}$  sont définies à partir d'un échantillon de données qui caractérise la population étudiée. La valeur du facteur aléatoire social est identique pour toutes les unités résidentielles modélisées.

On répète alors ce processus pour tous les appareils électroménagers disponibles dans chacune des unités résidentielles. L'ensemble des appareils électroménagers utilisés est défini par des processus statistiques (Tableau III-9).

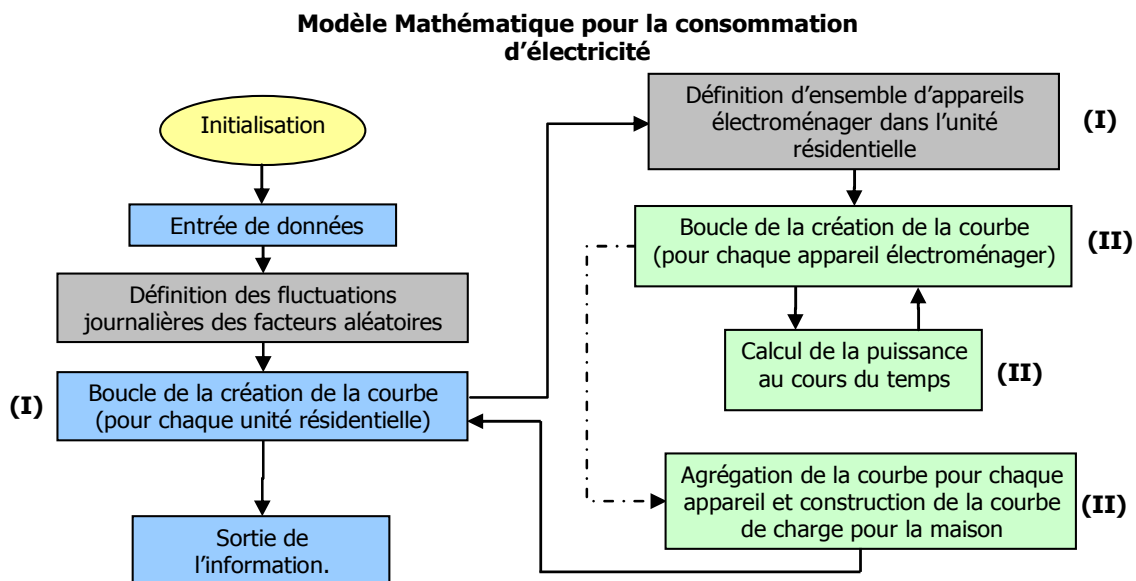


Fig. III-24: Schéma du modèle de prévision à partir de la connaissance de consommation de chaque appareil

La **deuxième partie** du modèle permet de simuler la courbe de consommation temporelle individuelle de chaque appareil dans chacune des unités résidentielles. La consommation d'électricité d'un appareil est basée sur ses caractéristiques : le profil de fonctionnement et l'instant de démarrage ( $p^{start}$ ).

Les entrées pour la deuxième partie du modèle comprennent deux types de paramètres:

- Premièrement, le facteur de probabilité saisonnier  $p^{saison}$  ainsi que le facteur de probabilité horaire  $p^{heure}$  pour les jours ouvrables et pour le week-end sont les facteurs de probabilité qui existent dans le modèle
- Deuxièmement, la consommation en veille et l'information du cycle de consommation avec les fréquences moyennes de démarrage pour chaque appareil sont les paramètres constants du modèle.

### III.4.2.3 Algorithme de programmation

Dans cette partie, nous développons un programme qui permet de créer la courbe de charge d'une maison, y compris les appareils électroménagers et les chauffages.

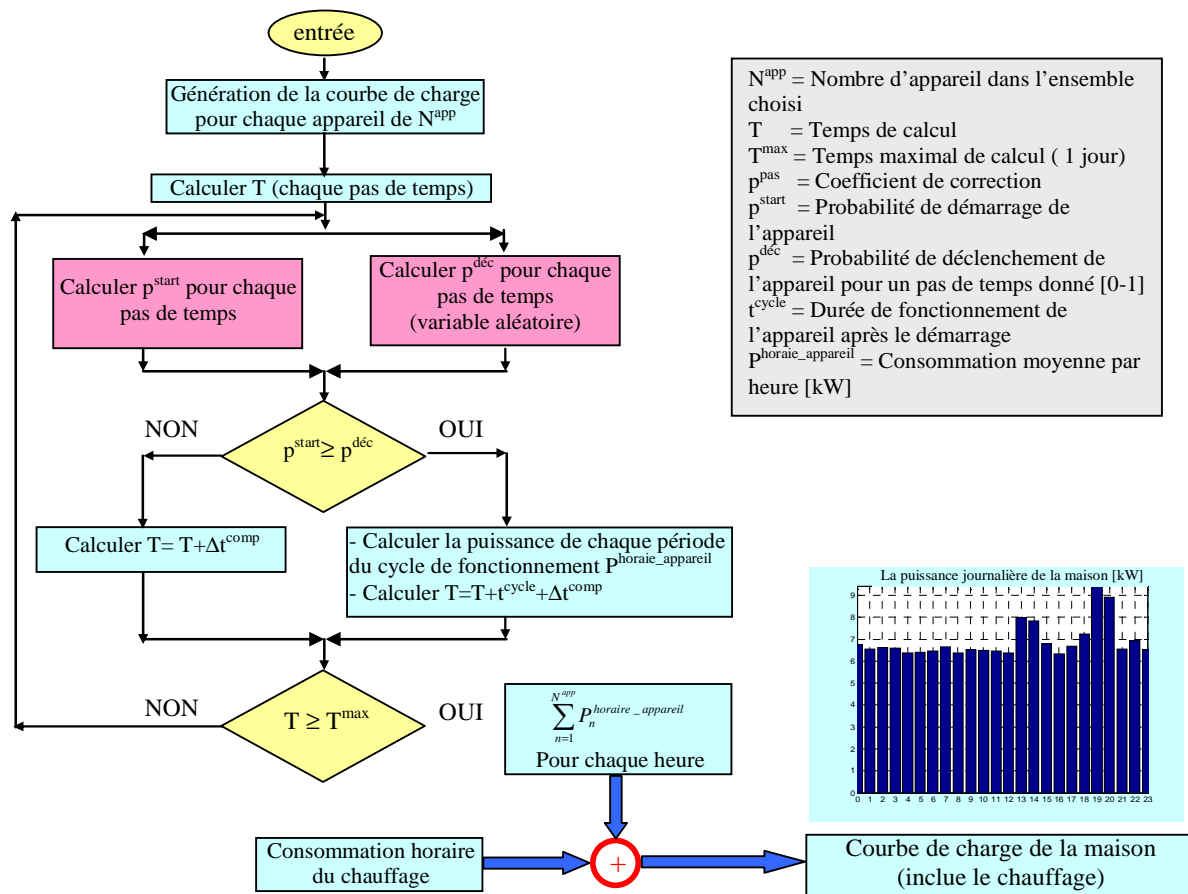


Fig. III-25: Algorithme de programmation

Le principe de programmation est évoqué pour mettre en œuvre le modèle de [PAA06] et les modifications par notre proposition.

La consommation du système de chauffage est créée par le modèle de chauffage avec la régulation thermique.

L'information sur la probabilité d'usage de chaque appareil  $p^{heure}$ , les cycles de fonctionnement et la puissance appelée et les fréquences de fonctionnement  $f$  pour le type de jour sont trouvés dans l'annexe [A4].

### **III.4.3 Cas d'application**

La quantité d'énergie consommée dans une maison peut varier selon les différentes époques de l'année. Mais on peut faire un calcul approximatif pour estimer combien elle consomme de manière à s'adapter au contrat le plus avantageux.

En France, dans une maison quelconque, pour une utilisation de base des appareils électroménagers, la puissance sera proche de trois kilowatts. Cette consommation sera celle correspondant à la lumière, le réfrigérateur et les petits appareils électroménagers d'utilisation quotidienne, comme le séchoir, la radiocassette ou l'aspirateur. Par contre pour une maison qui a un lave-vaisselle, un lave-linge et une cuisine ou un four électrique, la puissance moyenne augmentera jusqu'à six kilowatts. Si l'on utilise la cuisine et le four électrique à la fois, il faudra au moins neuf kilowatts. La puissance maximale provient de l'utilisation du chauffage électrique, l'accroissement que l'on remarque, surtout, pendant l'hiver. Dans ce cas, il faudra entre 9 à 15 kilowatts.

#### **III.4.3.1 Classification des charges**

A partir de la classification faite en [ASH01] et [LE.K06], nous allons diviser les charges du secteur résidentiel en trois groupes :

- ❖ Charges pilotables (directes) : dans cette catégorie, on peut trouver certains types d'appareils tels que : climatiseur, chauffage, chauffe-eau, cuisinière, ventilateur.
- ❖ Charges non pilotables : four, réfrigérateur, loisirs, lampes, prises, ordinateurs
- ❖ Charges déplaçables : on place dans cette catégorie les charges dont le fonctionnement peut être programmé pour une certaine heure de la journée : lave-vaisselle, lave-linge.

Grâce aux résultats et aux conclusions obtenus lors de la campagne *Ecodrôme* (projet qui s'est déroulé dans la Drôme pour 20 logements pendant 2 ans) présenté en [SID02] et sur la base de classification de charges selon le type de fonctionnement (cyclique ou non-cyclique), nous avons choisi un ensemble d'appareils qui permet de mieux répondre aux caractéristiques électriques d'une maison (Tableau III-9).

En revanche, l'avantage de ce travail est que les principaux appareils de la maison ont été instrumentés couvrant ainsi environ 80 % de la consommation globale, le solde étant mobilisé essentiellement par l'éclairage sur PC, les moyens audiovisuels autres que TV (magnétoscopes, Canal +, parabole, HiFi, etc.), et les électroménagers mineurs (fer à repasser, sèche-cheveux..).

Toutes les analyses qui suivent ne s'appliquent donc rigoureusement qu'aux usages spécifiques du secteur résidentiel, et pour un logement muni d'un chauffage individuel.

Item	Appareil	Puissance appelée (W)	Fonctionnement cyclique
1	Cuisinière	1000	Oui
2	Micro-onde et Cafetière	800	Non
3	Réfrigérateur	140	Oui
4	Lave-vaisselle	1600	Oui
5	Lave-linge et Sèche-linge	2400	Oui
6	Télévision et DVD	75	Non
7	Radio/Player	30	Non
8	Ordinateur personnel et Imprimante	125	Non
9	Eclairage	120	Non
10	Autres charges d'occasion	350	Non

Tableau III-9: Ensemble d'appareils électroménager pour le modèle

### III.4.3.2 Validation par simulation

L'algorithme ascendant utilise les résultats obtenus à partir de notre campagne de mesure présentée dans un rapport précédent [LE.K06].

On verra les cas d'application dans les chapitres suivants que la consommation électrique d'une maison équipée d'un système de chauffage est de l'ordre de 13 kW (abonnement 15 kVA) sans gestion de la charge ou 8.5 kW (abonnement 9 kVA= P souscrite) avec gestion de la charge. Ces valeurs dépendent du type de la maison ou du mode de chauffage utilisé

Pour notre modèle en particulier, nous avons fixé les caractéristiques de la maison de la façon suivante (Modèle étudié pour la gestion de charges) :

- Cette maison (F3) se compose de deux chambres, d'une salle de séjour, d'une cuisine et d'une salle de bain
- L'ensemble d'appareils choisis dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau III-9
- Les 4 chauffages sont installés dans les pièces suivantes :
  - 2 chauffages de 1.5 kW pour les deux chambres
  - 1 chauffage de 1.5 kW pour la salle de bain
  - 1 chauffage de 3 kW pour la salle de séjour

On a modélisé le fonctionnement de ces chauffages à partir d'un système de délestage cyclique de toutes les six minutes.

On présente ci-dessous la courbe de charge de chaque appareil électrique (*Fig. III-26* pour le Réfrigérateur, et *Fig. III-27* pour la Cuisinière ...) (voir les figures Fig.A 11 - Fig.A 23 dans l'annexe [A.5]).

La puissance moyenne est de l'ordre de 235W. Les *Fig. III-28* et *Fig. III-29* présentent l'agrégation des courbes de charge des appareils de la maison en été (sans chauffage) et en hiver (avec les chauffages).



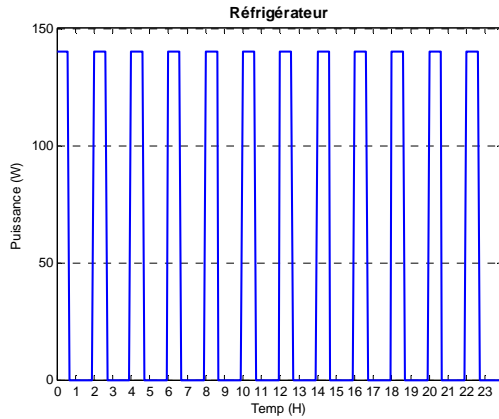


Fig. III-26: Courbe de charge du réfrigérateur

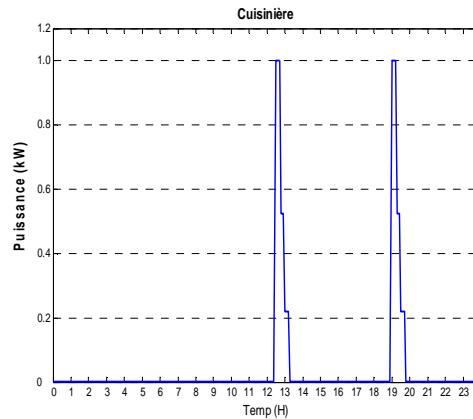


Fig. III-27: Courbe de charge de la cuisinière

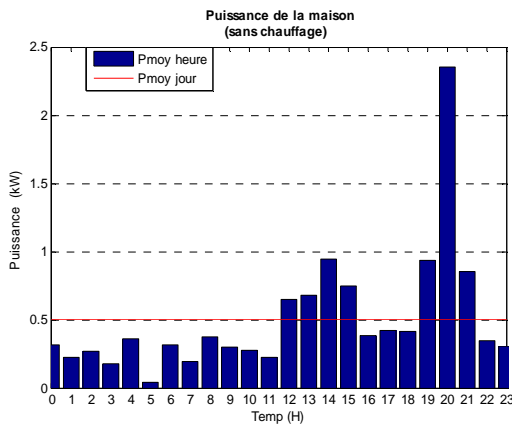


Fig. III-28: Agrégation des courbes de charge des appareils de la maison en été (sans chauffage)

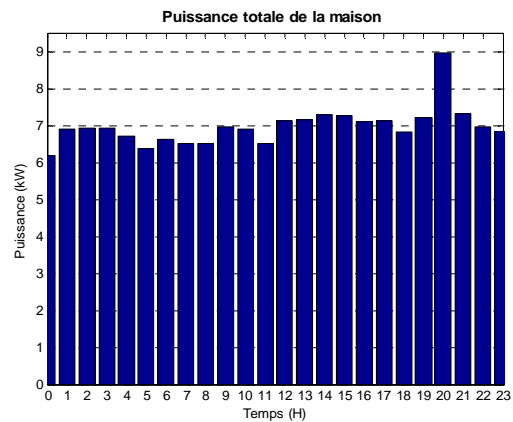


Fig. III-29: Courbe de charge de la maison en hiver (avec les chauffages)

### III.5 Conclusion

Aujourd'hui, plusieurs techniques peuvent être implantées dans les modèles hybrides pour améliorer la performance, l'efficacité et la précision de la prédiction. Dans le contexte de la libération du marché d'énergies, afin de gérer de manière optimale des charges, pour les différents objectifs (minimiser la facture, contribuer aux services système...), la prédiction de charge, en particulier, la charge résidentielle, joue un rôle essentiel.

La plupart des méthodes mettent en œuvre les techniques de séries temporelles pour prévoir la forme de la courbe de charge, mais ces techniques ne sont pas suffisamment exactes pour garantir l'approche de la prédiction.

Le modèle de réseau de neurones et l'architecture proposés ont été capables de prédire l'évolution de la courbe de charge horaire de la consommation électrique, par exemple pour l'année 2005 à Hanoi avec une exactitude proche de 97%. Les réseaux de neurones artificiels peuvent donc être utilisés comme des modèles non-paramétriques de prédiction économique.

On constate également l'influence des variables tels que la température, le calendrier et les effets saisonniers sur l'évolution de la courbe de charge électrique. Il n'est pas possible de

décrire mathématiquement la relation qui existe entre ces variables, néanmoins, les réseaux de neurones constituent un outil très puissant pour nous rapprocher du profil caractéristique..

Comme nous l'avons remarqu e au cours de notre étude, il n'existe aucune procédure bien concrète pour définir l'architecture exacte du réseau et des autres paramètres qui permettent de définir le modèle (nombre de neurones cach es, taux d'apprentissage, etc.), on pourrait donc optimiser ces processus en recourant éventuellement aux algorithmes génétiques.

L'étude montre que dans le modèle impliqu e la complexité est d'autant plus grande que la précision recherchée dans la prévision de la consommation est plus élevée.

Pour construire une courbe de charge dans le secteur résidentiel, à partir d'une technique du type ascendant, nous avons propos e un modèle qui tient compte de la connaissance des caractéristiques de consommation pour un ensemble d'appareils apportant un pourcentage très significatif de la consommation dans une maison. Nous avons confirm e qu'il y a une forte corrélation entre les variables m eteorologiques, le calendrier et les facteurs sociaux associ es au style de vie des consommateurs.

Les résultats d'utilisation de la méthode basée sur le modèle ascendant montrent que cette méthode est intéressante pour prédire avec une bonne précision les courbes de charges dans le secteur résidentiel.



## **Chapitre IV : Développement des stratégies de gestion optimale des charges**

<b>IV. CHAPITRE IV : DEVELOPPEMENT DES STRATEGIES DE GESTION OPTIMALE DES CHARGES .....</b>	<b>99</b>
IV.1 INTRODUCTION .....	101
IV.2 METHODES D'OPTIMISATION.....	103
IV.2.1 Méthodes d'optimisation pour la gestion des charges.....	103
IV.2.2 Programmation non-linéaire.....	105
IV.2.3 Méthode de « branch and bound » (procédure par évaluation et séparation progressive).....	105
IV.3 STRATEGIES PROPOSEES DE GESTION DES CHAUFFAGES.....	108
IV.3.1 Développement des modèles.....	108
IV.3.2 Minimisation des pics de consommation.....	109
IV.3.2.1 Formulation du problème.....	109
IV.3.2.2 Algorithme proposé.....	110
IV.3.2.3 Résultats.....	112
IV.3.3 Optimisation du confort.....	118
IV.3.3.1 Fonction objectif.....	118
IV.3.3.2 Les contraintes.....	118
IV.3.3.3 Résultats.....	118
IV.3.4 Minimisation des coûts.....	121
IV.3.4.1 Formulation du coût de l'énergie électrique.....	121
IV.3.4.2 Fonction objectif.....	122
IV.3.4.3 Les contraintes.....	123
IV.3.4.4 Résultats.....	123
IV.4 STRATEGIES PROPOSEES DE GESTION DES CLIMATISATIONS .....	124
IV.4.1 Développement des modèles.....	124
IV.4.2 Minimisation des pics de consommation.....	126
IV.4.2.1 Formulation du problème (fonction objectif).....	126
IV.4.2.2 Résultat.....	127
IV.4.2.3 Hypothèses.....	127
IV.5 CONCLUSION .....	131

## IV.1 Introduction

Comme nous l'avons indiqué au chapitre II les systèmes de traitement de l'air et du chauffage, à savoir les ventilateurs, les systèmes de climatisation, et les radiateurs, représentent entre 30 et 50% de la consommation d'énergie dans les logements résidentiels et les bâtiments de service (tertiaire). En France, le chauffage représente 87% de la consommation d'énergie globale dans les logements anciens et seulement 30% dans les logements les plus performants (Fig. IV-1). Avec les effets du réchauffement de la planète et des canicules, l'utilisation de la climatisation a considérablement augmenté les dernières années. C'est pourquoi les charges thermiques de type des radiateurs (en hiver) et climatiseur (en été) seront étudiées dans ce chapitre.

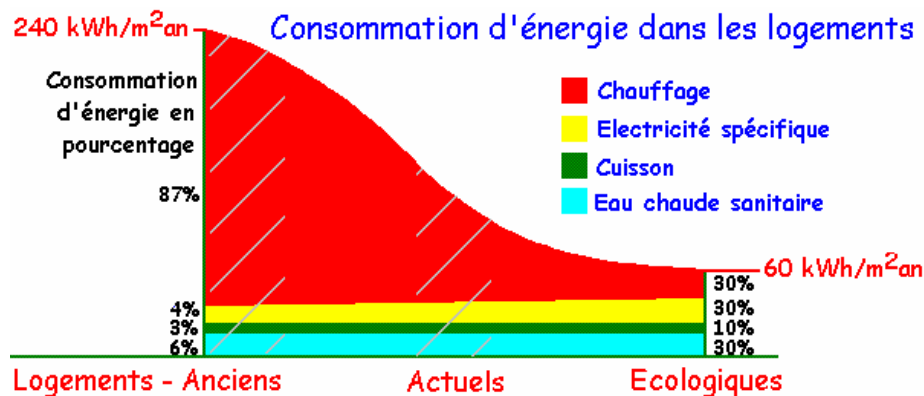


Fig. IV-1: Consommation d'énergie dans les logements

Dans ce secteur, le facteur 4 (réduction par 4 des émissions de CO<sub>2</sub> des pays développés) signifie qu'à partir d'une consommation moyenne plus de 200 kWh/m<sup>2</sup>/an actuellement, il faut parvenir à une consommation moyenne de 50 kWh/m<sup>2</sup>/an d'ici 2050 pour l'ensemble du parc dont le chauffage et l'eau chaude sanitaire (ECS) représentent une partie très importante. Pour réussir ce pari, une des meilleures solutions est d'effectuer la gestion rationnelle de la consommation, en particulier dans le secteur résidentiel et tertiaire.

Deux orientations de la gestion de la consommation sont possibles :

- La première est de ne répondre qu'aux besoins internes du bâtiment et de son utilisateur. Il s'agit ici de réduire sa facture énergétique (notamment en diminuant ses consommations ou ses abonnements) et/ou le coût d'investissement de son installation
- La seconde consiste à apporter à un opérateur externe (revendeur d'énergie, gestionnaire de réseau,...) la possibilité d'agir pour son propre compte sur la consommation du bâtiment, sans en modifier le confort:
  - écrêtage des pics de consommation (ex : gestion de congestion), à l'échelle nationale ou d'une zone géographique plus restreinte, pour limiter l'achat d'une énergie chère
  - Optimisation des flux d'énergie par rapport aux dimensionnements d'un réseau
  - Etc.

L'objectif de la deuxième phase présenté dans ce chapitre est de déterminer les stratégies de gestion prédictive des systèmes de chauffage ou de climatisation. Les méthodes d'optimisation proposées sont qualifiées de prédictives, car, à partir de la prévision des consommations déterminée par la première phase, présentée dans le chapitre précédent, il faut mettre en œuvre les stratégies de fonctionnement optimal des charges (chauffage et climatisation) en respectant la valeur de puissance maximale autorisée et le confort thermique (Fig. IV-2).

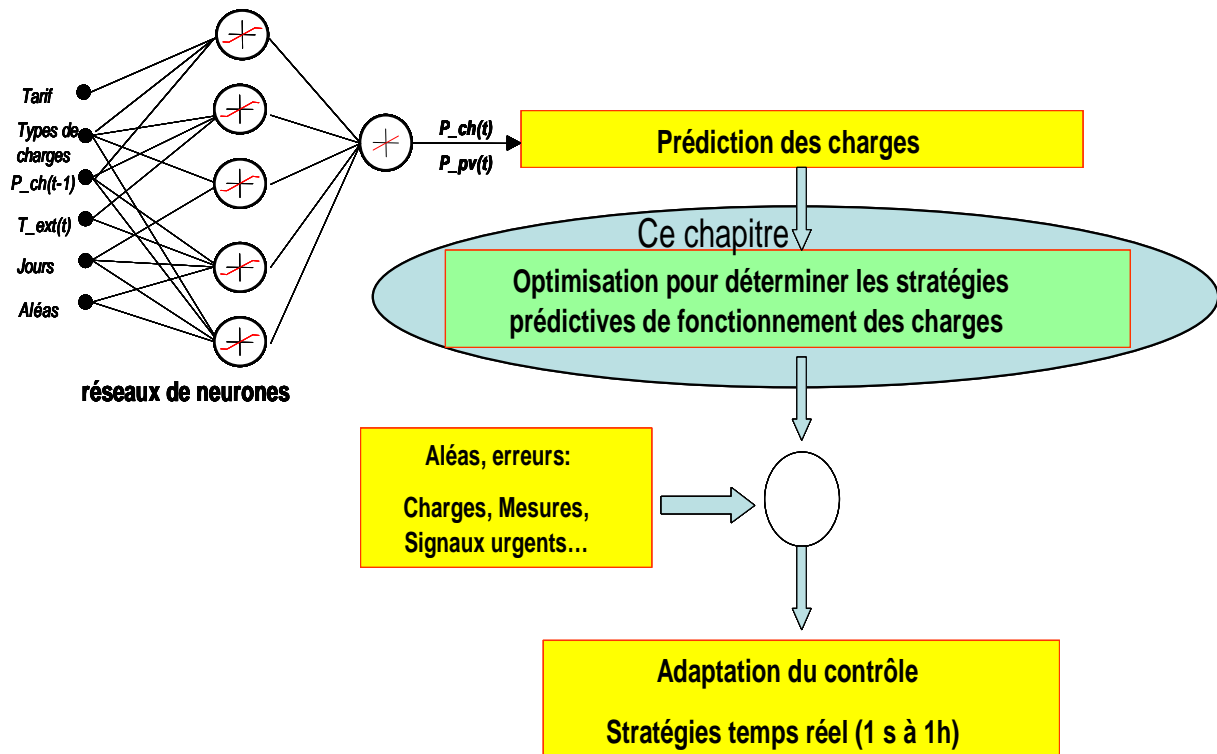


Fig. IV-2: Phases de la gestion prédictive dans le système proposé de gestion des charges

Dans ce chapitre, nous proposons trois nouvelles méthodes de gestion optimale du chauffage et de la climatisation:

- La première méthode de gestion du chauffage ou de la climatisation qui repose sur la minimisation des pics de consommation
- La deuxième méthode de gestion du chauffage est basée sur le maintien du confort de la température intérieure
- La troisième méthode de gestion du chauffage repose sur la minimisation des coûts de consommation.

Ces trois méthodes sont validées par la simulation sur une maison (consommation résidentielle), étendues ensuite à plusieurs bâtiments et même à un hôtel dans le cas d'un usage tertiaire. Ces méthodes sont valables pour une durée de quelques minutes à quelques heures. Ces méthodes peuvent être utilisées pour déterminer les stratégies prédictives de fonctionnement des systèmes thermiques pour l'heure suivante (one hour ahead) ou la journée

du lendemain (one day ahead). Les informations obtenues dans cette phase (ex : puissance de consommation maximale autorisée) seront utilisées par le pilotage en temps réel de la consommation du bâtiment (chapitre suivant).

Nous allons aborder cette partie par une revue des méthodes d'optimisation pour déboucher par la suite de l'étude sur des méthodes d'optimisation non linéaire couplées avec la méthode « branch and bound ».

Nous présenterons ensuite, trois méthodes différentes pour la gestion du chauffage et enfin de la climatisation.

## **IV.2 Méthodes d'optimisation**

Les méthodes d'optimisation constituent une partie de la Recherche Opérationnelle qui consiste en l'application des méthodes scientifiques pour résoudre les problèmes complexes rencontrés dans la direction de la gestion, de l'optimisation, etc.

Une série de méthodes d'optimisation a été appliquées pour la gestion de la charge dans les bâtiments comme la programmation linéaire ou la programmation non linéaire (LP et NLP), la programmation dynamique (DP), la commande optimale linéaire-quadratique (LQ), et la méthode génétique (GA). Nous avons, dans la bibliographie, analysé deux groupes des méthodes ont été couramment utilisés pour la gestion optimale des charges que nous présentons ci-dessous.

### ***IV.2.1 Méthodes d'optimisation pour la gestion des charges***

Ce paragraphe analyse les principales références bibliographiques sur les méthodes d'optimisation appliquées à la gestion de charge.

Le premier groupe [KEE96] de gestion optimale des charges dans un bâtiment comprend les méthodes de minimisation du coût. Ce coût est la combinaison du coût d'électricité et du confort humain exprimé sous forme de pénalité. Le principe de ces méthodes est d'identifier les stratégies importantes de délestage et d'émettre des préconisations pour que les opérateurs du bâtiment en délestent convenablement la charge.

Le deuxième groupe consiste en la réalisation de simulations étendues avec différentes combinaisons de paramètres; la comparaison entre ces simulations désigne le point optimal, qui constitue une solution sub-optimale. Par exemple, [HEN97] a développé un environnement de simulation pour étudier un éventail de paramètres principaux qui influencent les coûts d'exploitation du système. La stratégie de commande optimale qui consiste à réduire au minimum tous les coûts d'électricité a été validée par les simulations.

- *Application des méthodes génétiques : Une approche multi-objective pour la gestion directe des charges en utilisant l'algorithme génétique [GOM07]*

Cet article décrit l'utilisation d'un algorithme génétique pour l'identification et le choix des actions de commande directe de charge dans des réseaux de distribution électrique. Cette



méthode est appliquée pour déterminer les stratégies de délestage/relestage (on/off) d'un groupe des bâtiments sur un réseau de distribution afin de minimiser les pics de consommation.

- *Application de la programmation dynamique : Gestion directe des climatiseurs par la programmation dynamique [WEI95]*

Cet article présente la gestion directe de charge de climatiseur en utilisant la programmation dynamique. L'objectif est de programmer la commande de la climatisation afin de réduire le pic de consommation sur le réseau taïwanais (18 500 MW).

- *Application de la programmation linéaire : Gestion directe des charges en utilisant la programmation linéaire [KAH98]*

Cet article donne une application de la programmation linéaire pour la gestion des charges afin de minimiser les coûts de consommation. Un cas test sur un réseau de 1200MW a été abordé.

- *Application de la programmation non-linéaire : Elimination des surcharges sur les lignes en utilisant la programmation non-linéaire [KAH98]*

Cet article propose une stratégie de délestage des charges en utilisant de la programmation non-linéaire afin d'éliminer les surcharges sur les lignes. Une application sur le réseau de transport a été traitée.

Sur les méthodes précédentes relevées dans la littérature, nous pouvons faire les remarques suivantes :

- La plupart des méthodes proposées sont appliquées sur les grands réseaux. Il n'y a pas beaucoup des publications sur la gestion des charges au niveau des maisons et des bâtiments
- L'échelle de temps de la simulation de ces méthodes est de l'ordre d'une heure. Cela n'est pas valable pour les variations de charge réelle dans les bâtiments. Par exemple, le fonctionnement d'une cuisinière est parfois quelques minutes.
- Les charges sont modélisées par l'agrégation des charges et la courbe de charge moyenne
- La plupart des méthodes n'ont pas pris en compte la notion de confort dans les bâtiments...

C'est pourquoi, il est très difficile d'appliquer les méthodes ainsi proposées pour la gestion des charges des bâtiments.

De ce fait, nous avons au cours de notre travail développé l'utilisation de deux méthodes que nous avons couplées : la programmation non-linéaire et la méthode par séparation et évaluation appelée « branch and bound ». Nous avons étudié leur performance et la possibilité de leur application aux problèmes de gestion de la charge.

### IV.2.2 Programmation non-linéaire

La programmation non-linéaire (NLP) permet de résoudre un grand nombre d'équations et d'inéquations - on parle de « contraintes » - sous la forme d'une fonction à maximiser ou à minimiser en fonction d'un ensemble de paramètres. Cette fonction ou l'ensemble de ses paramètres sont souvent non-linéaires.

Dans l'outil Matlab, la fonction `Fmincon` est souvent utilisée pour réaliser l'optimisation des problèmes non linéaires. Cette fonction est basée sur les méthodes lagrangiennes, avec contraintes linéaires ou non-linéaires. Des options peuvent être ajoutées afin d'affiner la recherche. Le problème dans Matlab est alors défini par la formulation suivante:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Fonction objectif :} & \min f(x) \\
 & \left. \begin{array}{l} c(x) \leq 0 \\ Ceq(x) = 0 \end{array} \right\} \text{Contraintes non-linéaires} \\
 \text{Soumise à des contraintes} & \left. \begin{array}{l} A.x \leq b \\ Aeq.x \leq beq \end{array} \right\} \text{Contraintes linéaires} \\
 & \left. \begin{array}{l} lb \leq x \leq ub \end{array} \right\} \text{Limitations}
 \end{array}$$

Où  $x, b, beq, lb, ub$  sont des vecteurs ;  
 $A, Aeq$  sont des matrices ;  
 $f(x), c(x)$  et  $Ceq(x)$  peuvent être des fonctions non-linéaires.

La fonction `Fmincon` sera utilisée pour notre étude dans la partie suivante.

### IV.2.3 Méthode de « branch and bound » (procédure par évaluation et séparation progressive)

La méthode par séparation et évaluation (branch and bound) s'applique à la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire avec un grand nombre de solutions envisageables. Elle consiste à séparer le problème initial en plusieurs sous-problèmes et à éliminer certains sous-problèmes à l'aide d'un système de majorants et minorants [ALR05].

Prenons un programme linéaire en nombres binaires (PNB) défini par les formules suivantes :

$$\begin{array}{ll}
 \text{Fonction objectif :} & \text{Min } z = Cx \\
 \text{Contraintes :} & Ax \leq b \\
 & x_j = 0 \text{ ou } 1 \text{ (j=1...n)} \\
 & A \text{ est une matrice } m \times n \text{ avec } a_{ij} \text{ entier} \\
 & C \text{ est un vecteur de longueur n avec } c_j \text{ entier} \\
 & b \text{ est un vecteur de longueur m avec } b_i \text{ entier}
 \end{array}$$

Ce problème a un nombre fini de  $n$  vecteurs de solutions (car  $x$  ne peut de toutes façons prendre que  $2^n$  valeurs possibles). Tout le problème est en fait de trouver parmi ces solutions possibles la solution optimale. Mais l'énumération est trop grande, dès que  $n > 50$  cela prend des siècles.

La méthode par évaluation et séparation consiste à énumérer ces solutions d'une manière intelligente. Cette méthode permet de trouver la solution optimale parmi toutes ses solutions sans avoir à les examiner toutes et d'éviter l'énumération de larges classes de mauvaises solutions. Dans un bon algorithme par séparation et évaluation, seules les solutions potentiellement bonnes sont donc énumérées.

1) **Le principe de séparation :**

Le principe de séparation est simple :

- Soit S l'ensemble des n vecteurs dont les composants ont pour valeur 0 ou 1. On va construire un arbre (appelée *arbre de recherche* ou *arbre de décision*) des sous-ensembles de S qui forment une partition de S
- A chaque itération de la construction de l'arbre, nous choisissons une des composantes  $x_i$  du vecteur. Une branche correspondra au sous-ensemble de vecteurs avec  $x_i=1$  ou  $x_i=0$ .

Pour expliquer l'algorithme de Branch and Bound, nous avons choisi l'exemple suivant avec trois variables en nombres entiers (n=3).

Min  $f = -4x_1 + x_2 - 2x_3$   
 Avec  $0 \leq x_i \leq 1 ; i=1, 2, 3$

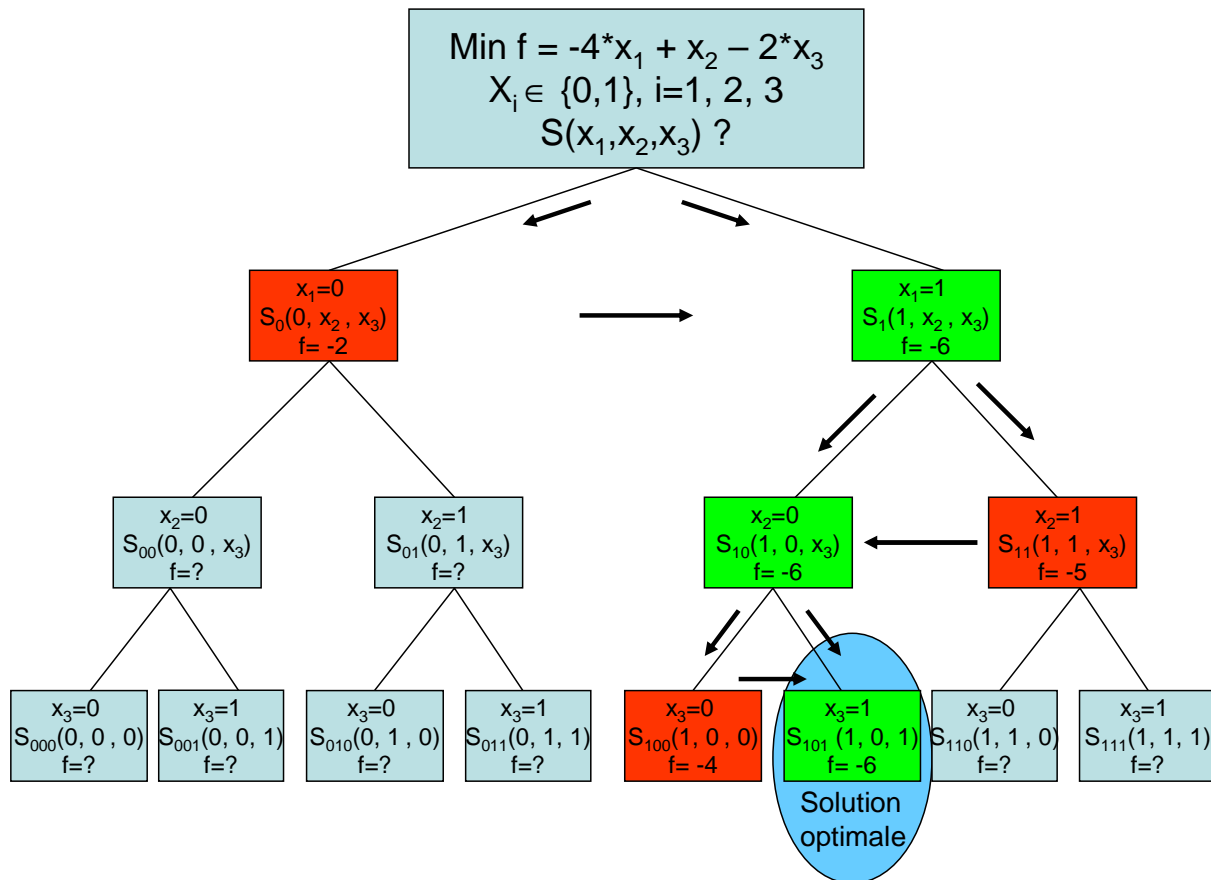


Fig. IV-3: Principe de séparation et d'évaluation

Dans ce cas, le principe de séparation comporte trois couches (Fig. IV-3):

- Pour la première couche, l'ensemble S est séparé en deux sous-ensembles  $S_0(0, x_2, x_3)$  avec  $x_1=0$  et  $S_1(1, x_2, x_3)$  avec  $x_1=1$  ( $S = S_0 \cup S_1$ )
- Pour la deuxième couche, le sous-ensemble  $S_0(0, x_2, x_3)$  est séparé encore en deux sous-ensembles  $S_{00}(0, 0, x_3)$  avec  $x_2=0$  et  $S_{01}(0, 1, x_3)$  avec  $x_2=1$  ( $S_0 = S_{00} \cup S_{01}$ ). C'est la même chose pour le sous-ensemble  $S_1$  ( $S_1 = S_{10} \cup S_{11}$ )
- Pour la troisième couche, le sous ensemble  $S_{00}(0, x_2, x_3)$  est séparé encore en deux sous-ensembles  $S_{000}(0, 0, 0)$  avec  $x_3=0$  et  $S_{001}(0, 0, 1)$  avec  $x_3=1$  ( $S_{00} = S_{000} \cup S_{001}$ ). C'est la même chose pour les sous-ensembles  $S_{01}$  ( $S_{01} = S_{010} \cup S_{011}$ ),  $S_{10}$  ( $S_{10} = S_{100} \cup S_{101}$ ),  $S_{11}$  ( $S_{11} = S_{110} \cup S_{111}$ ).

Finalement, on a 8 ( $2^3$ ) sous-ensembles (ou combinaisons).

Nota : Lorsqu'un nœud avec une mauvaise solution (non-optimale) est identifié dans l'arbre de recherche (voir la partie d'évaluation), il est inutile d'effectuer la séparation de son espace de solutions.

## 2) Le principe d'évaluation

L'évaluation d'un nœud de l'arbre de recherche a pour but de déterminer l'optimum de l'ensemble des solutions réalisables associé au nœud en question ou, au contraire, de prouver mathématiquement que cet ensemble ne contient pas de solution intéressante pour la résolution du problème.

Pour l'exemple donné, dans la phase d'évaluation, on suppose que la programmation non-linéaire Fmincon est utilisée pour évaluer la fonction objectif f.

- Pour la première couche, il faut effectuer deux évaluations par Fmincon. La valeur de la fonction f évaluée par Fmincon donne  $f = -2$  pour  $x_1=0$ ,  $S_0(0, x_2, x_3)$  et  $f = -6$  pour  $x_1=1$ ,  $S_1(1, x_2, x_3)$ , respectivement. Le sous-ensemble  $S_1(1, x_2, x_3)$  sera gardé pour continuer l'évaluation. Par contre le sous ensemble  $S_0(1, x_2, x_3)$  et le chemin à partir de ce sous-ensemble seront éliminés

- Pour la deuxième couche, la valeurs de la fonction f évaluée par Fmincon donne  $f = -6$  pour  $x_2=0$ ,  $S_{10}(1, 0, x_3)$  et  $f = -5$  pour  $x_2=1$ ,  $S_{11}(1, 1, x_3)$ , respectivement. Le sous-ensemble  $S_{10}(1, 0, x_3)$  sera gardé pour continuer l'évaluation. Par contre le sous ensemble  $S_{11}(1, 1, x_3)$  et le chemin à partir de ce sous-ensemble seront éliminés

- La méthode poursuit de manière heuristique pour la couche suivante. Finalement la solution optimale correspond à sous-ensemble  $S_{101}(1, 0, 1)$  avec  $x_1=1$ ,  $x_2=0$ ,  $x_3=1$  et  $f = -6$  (Fig. IV-3).

Finalement, pour  $n=3$  une procédure de 6 évaluations ( $2 \times 3$ ) doit être effectuée au lieu de 8 ( $2^3$ ) (Pour  $n=10$ , nous aurions environ 20 évaluations au lieu de  $1024=2^{10}$ ).

Cette méthode couplée avec la méthode de programmation non-linéaire (Fmincon) sera utilisée pour notre étude dans la partie IV.3.

Dans la partie suivante nous présentons les stratégies de gestion des charges (chauffage et

climatisation) pour une maison (charge résidentielle) et pour un hôtel (charge tertiaire), en tenant compte du comportement des charges réelles et de l'influence des conditions météorologiques.

### IV.3 Stratégies proposées de gestion des chauffages

#### IV.3.1 Développement des modèles

Dans cette partie, nous présentons les modèles thermiques utilisés pour la mise en œuvre des méthodes d'optimisation. Le modèle présenté pour un quartier comporte plusieurs maisons (ex : maison k), dont chacune est équipée d'un chauffage équivalent (chauffage k). Pour simplifier, nous présentons ici le modèle pour une maison comportant plusieurs zones (ou chambres ou salle, ex : salle k) dont chaque salle a un chauffage individuel (chauffage k).

A partir du modèle thermodynamique d'une salle équipée de moyens de chauffage abordé à la partie (II.4.2.1) au chapitre II, les sources thermiques des autres équipements et des personnes sont négligées. La charge exigée des chauffages de zone k (salle k) pour maintenir une température intérieure indiquée de zone k est estimée par l'équation différentielle ( II-7) suivante :

$$\rho_c c_o V_k^c \frac{dT_k^{int}}{dt} = Q_k + \frac{1}{R_k^{eq}} (T_k^{ext} - T_k^{int})$$

Pour la zone k (salle k) au moment i, la température intérieure au moment i ( $T_{i,k}^{int}$ ) est une fonction de la température intérieure au moment précédent ( $T_{i-1,k}^{int}$ ). La température intérieure  $T_{i,k}^{int}$  pour chaque salle k au moment i est déterminée par la résolution de l'équation différentielle (II.6):

$$T_{i,k}^{int} = C_{i,k} e^{-\frac{\Delta\tau}{K_k \cdot R_k^{eq}}} + T_{i,k}^{ext} + R_k^{eq} Q_{i,k} \quad (IV-1)$$

Où :

- $C_{i,k} = T_{i-1,k}^{int} - T_{i,k}^{ext} - R_k^{eq} \cdot Q_{i,k}$
- $\Delta\tau$  pas de temps de calcul (s)
- $K_k = \rho_c c_o V_k^c$  coefficient équivalent
- $T_{i,k}^{int}$  température intérieure de la salle k au moment i (°C)
- $T_{i-1,k}^{int}$  température intérieure de la salle k au moment (i-1) (°C)
- $T_{i,k}^{ext}$  température extérieure de la salle k au moment i (°C)
- $Q_{i,k}$  chaleur produite par le radiateur k au moment i (W)
  - $Q_{i,k} = u_{i,k} p_k$
  - $p_k = P_k \eta_k$  puissance thermique du radiateur de la salle k (W)
  - $\eta_k$  efficacité de conversion d'énergie du radiateur de la salle k
  - $P_k$  puissance électrique nominale du radiateur de la salle k ( $P_k = p_k$ )

- si  $\eta_k = 100\%$ )
- $u_{i,k}$  état de fonctionnement du radiateur k dans au moment i (0 ou 1)
    - $u_{i,k} = 1$  : radiateur en marche
    - $u_{i,k} = 0$  : radiateur en arrêt

L'équation ( IV-1) devient :

$$T_{i,k}^{int} = C_{i,k}(u_{i,k}) e^{\frac{\Delta\tau}{K_k \cdot R_k^{eq}}} + T_{i,k}^{ext} + R_k^{eq} p_k u_{i,k} \quad (IV-2)$$

### IV.3.2 Minimisation des pics de consommation

#### IV.3.2.1 Formulation du problème

L'objectif du problème est de minimiser les pics de consommation d'une maison composant des n salles dont chaque salle est installée un radiateur. La fonction objectif est déterminé par:

$$\underset{u_{i,k} \in (0,1)}{\text{Min}} [P] = \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^n [P_k u_{i,k}] \quad i=1 \dots D ; k=1 \dots n \quad (IV-3)$$

Avec

- $P_k$  puissance du radiateur k (W)
- $\Delta\tau$  pas de temps de calcul (s)
- $u_{i,k}$  état de fonctionnement du radiateur k au moment i (0 ou 1)
- n : nombre de radiateurs dans la maison
- D : Durée de simulation

Avec les contraintes suivantes

❖ *Contrainte du confort thermique*

$$T_k^{\min} \leq T_{i,k}^{int} \leq T_k^{\max} \quad i=1 \dots D ; k=1 \dots n \quad (IV-4)$$

$$\text{Ou } T_k^{\min} \leq C_{i,k}(u_{i,k}) e^{\frac{\Delta\tau}{K_k \cdot R_k^{eq}}} + T_{i,k}^{ext} + R_k^{eq} p_k u_{i,k} \leq T_k^{\max} \quad i=1 \dots D ; k=1 \dots n \quad (IV-5)$$

❖ *Contrainte de la puissance permisible (autorisée)*

$$\sum_{k=1}^n p_k u_{i,k} \leq P_{perm} \quad i=1 \dots D ; k=1 \dots n \quad (IV-6)$$

où

- $T_k^{\min}$  température minimale de la salle k
- $T_k^{\max}$  température maximale de la salle k

$T_k^{\min}$  et  $T_k^{\max}$  sont déterminées par :

$$T_k^{\min} = T_k^{\text{cons}} - \Delta T_k \quad \text{et} \quad T_k^{\max} = T_k^{\text{cons}} + \Delta T_k$$

- $T_k^{\text{cons}}$  température de consigne de la salle k (ex :  $T_k^{\text{cons}} = 20^\circ\text{C}$ )
- $\Delta T_k$  variation de température (ex :  $\Delta T_k = \pm 1^\circ\text{C}$ )

- $P_{perm}$  puissance permissible (ou puissance souscrite)

Pour la contrainte de confort thermique, la température intérieure de chaque salle (k) doit être maintenue autour de la température de consigne. La température intérieure du moment est une fonction qui est caractérisée par la dynamique thermique de la salle (volume, masse, mur, fenêtre, porte...) et par la température intérieure déterminée au pas de calcul précédent...

Pour la seconde contrainte, la puissance totale de consommation du chauffage doit être toujours inférieure à la puissance souscrite ou la puissance maximale admissible.

#### IV.3.2.2 Algorithme proposé

Pour ce problème, l'objectif est de déterminer les stratégies de fonctionnement de chaque radiateur afin d'optimiser la fonction objectif en respectant les contraintes de confort et de puissance permissible.

$$F = \underset{u_{i,k} \in (0,1)}{\text{Min}} [P] = \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^n [P_k u_{i,k}] \quad i=1 \dots D ; k=1 \dots n$$

Les contraintes

$$T_k^{\min} \leq C_{i,k}(u_{i,k}) e^{-\frac{\Delta \tau}{K_k \cdot R_k^{eq}}} + T_{i,k}^{\text{ext}} + R_k^{eq} p_k u_{i,k} \leq T_k^{\max} \quad (\text{IV-7})$$

$$\sum_{k=1}^n p_k u_{i,k} \leq P_{perm}$$

Où  $u_{i,k} \in N \quad i=1 \dots D ; k=1 \dots n$

Un variable  $u_{i,k}$  est utilisée pour indiquer l'état du fonctionnement d'un radiateur : en marche (on = 1) ou en arrêt (off = 0). Au moment i, chaque radiateur k peut avoir seulement l'un de deux états de fonctionnement : marche ( $u_{i,k}=1$ ) ou arrêt ( $u_{i,k}=0$ ). Dans un système avec n unités avec le pas de temps de calcul d'une minute et le temps de simulation de 24h, il y a de  $2^{(n \cdot 24 \cdot 60)}$  combinaisons. Pour un nombre de n très grand, les combinaisons deviennent très importantes et le calcul devient impossible. Exemple, si  $n=7$  unités, la simulation pendant une heure, on a  $2^{(7 \cdot 60)} = 2.7077e+126$  combinaisons.

De plus, les contraintes de température sont les fonctions non linéaires de l'état  $u_{i,k}$  donc ce problème est une programmation non linéaire en nombres binaire. C'est pourquoi nous avons développé une méthode mixte pour résoudre ces problèmes.

Pour notre problème, avec les variables entières et les contraintes non-linéaires, nous proposons un algorithme mixte en utilisant la méthode « Branche and Bound » (Séparation et évaluation) et la méthode d'optimisation non-linaire désignée par Fmincon dans Matlab :

- Utiliser le programme Fmincon comme la fonction d'évaluation pour déterminer le minorant de chaque sommet
- Choisir  $u_{i,k}$  qui est la plus proche de 0.5 (au milieu de 0 et 1) pour construire l'arbre.

La fonction objectif proposée est de déterminer la stratégie optimale de fonctionnement  $u_{i,k}$

de n radiateurs (n salles).

Au moment i, cet algorithme est mis en oeuvre selon les étapes suivantes décrites sur la Fig. IV-4.

**Etap 1** : Utiliser le programme Fmincon pour résoudre le problème ( IV-7) en éliminant la restriction de nombre entier en ajoutant la contrainte de nombre en réel  $0 \leq u_{i,k} \leq 1$ . On a une solution se composant de variables réelles :  $S = (u_{1,k}, u_{2,k} \dots u_{n,k})$   $0 \leq u_{i,k} \leq 1$

**Etap 2 - Séparation** : nous sélectionnons une variable  $u_{j,k}$  parmi les variables réelles de S pour effectuer la séparation. Nous choisissons la variable  $u_{j,k}$  qui est la plus proche de 0.5. La variable la plus proche de 0.5 représente un doute la plus grand entre les deux extrémités 0 et 1. Puis nous divisons le problème en deux sous-problèmes selon cette variable ( $u_{j,k} = 1$  et  $u_{j,k} = 0$ ).

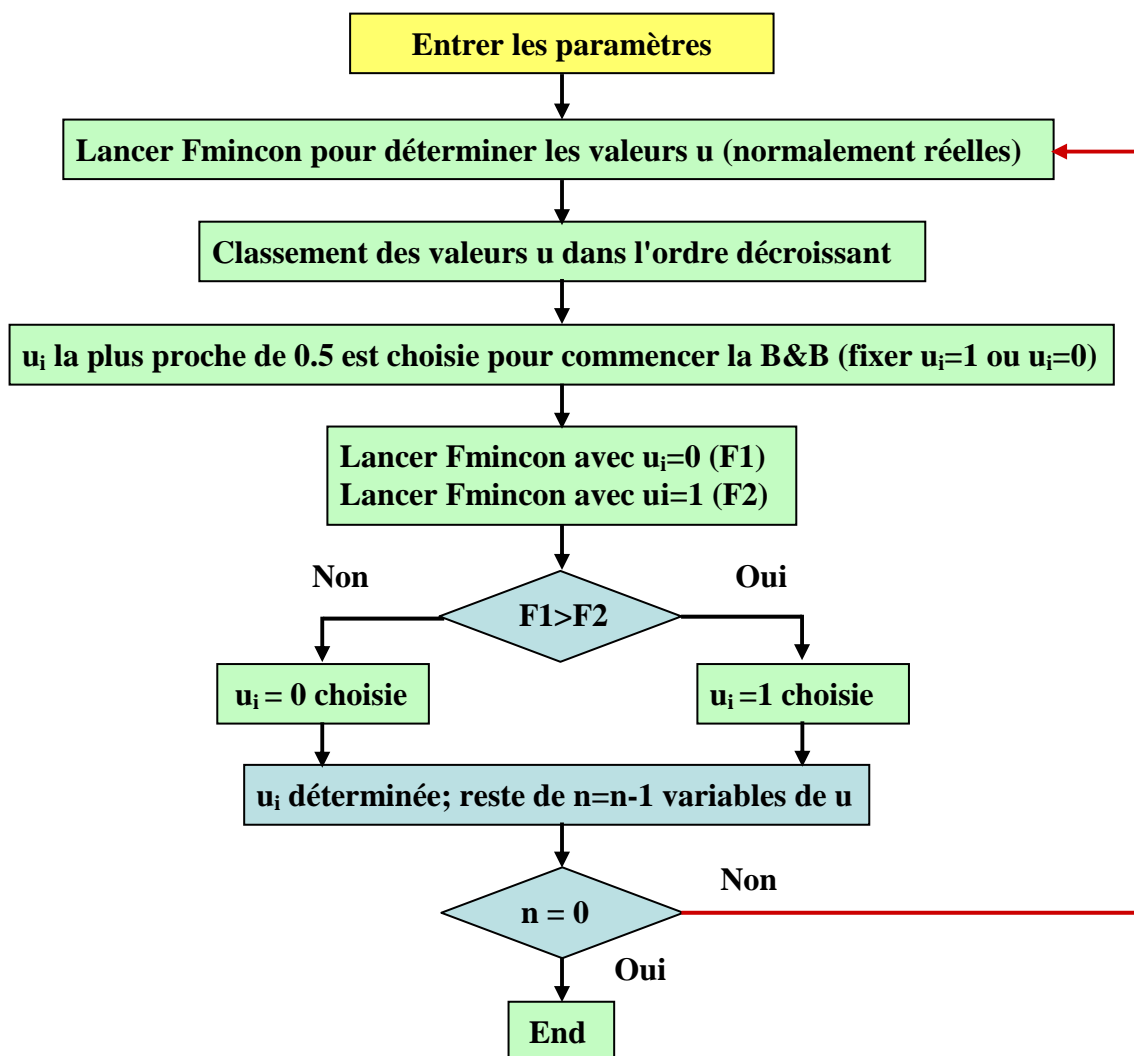


Fig. IV-4: Organigramme de l'algorithme de la méthode proposée

**Etape 3 - Evaluation** : lancer Fmincon pour résoudre le problème ( IV-7) afin de déterminer la valeur F1 (avec  $u_{j,k} = 0$ ) et F2 (avec  $u_{j,k} = 1$  )

Comparer entre les deux valeurs :



+ Si  $F1 > F2$  : fixer  $u_{j,k} = 1$

+ Si  $F1 > F2$  : fixer  $u_{j,k} = 0$

**Etape 4 - Itération :**

Attribuer le nombre de variable réelle  $n = n-1$

- Si  $n > 0$  retourner l'étape I

- Si  $n = 0$  arrêter la résolution.

**IV.3.2.3 Résultats**

Pour valider la stratégie de gestion de charge proposée, une maison avec les usages électriques est utilisée. Cette maison se compose des 4 salles à coucher, d'une salle de séjour, d'une cuisine et d'une salle de bain.

Le plan de la maison et ses caractéristiques thermiques sont présentés sur la Fig. IV-5 et le Tableau IV-1.

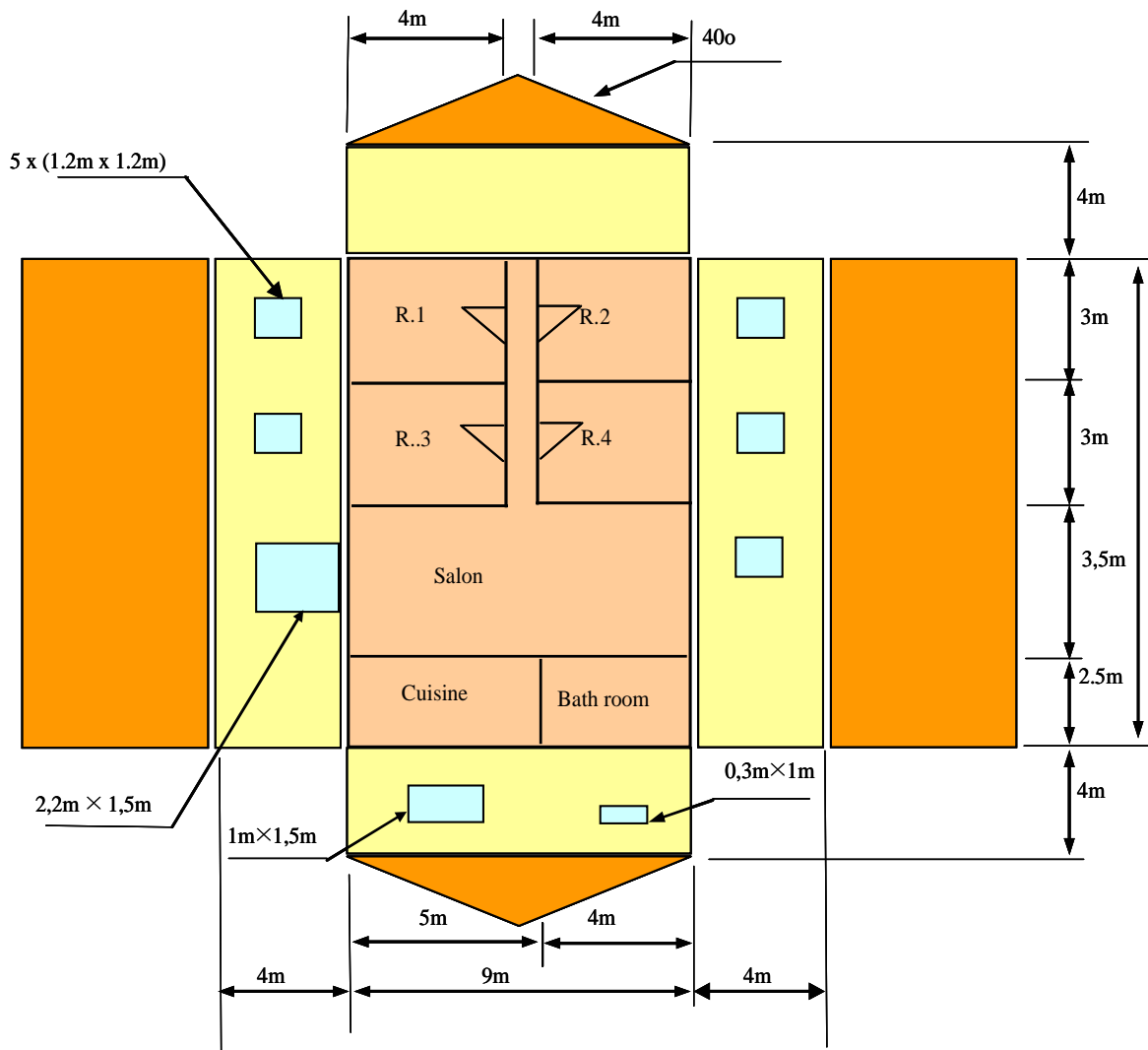


Fig. IV-5: Plan de la maison

	Type de matériaux	Conductibilité thermique ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) à 20 °C	Epaisseur (m)
Les murs	Brique	0.038	0.2
Fenêtre et porte	Verre-bois	0.078	0.01

Tableau IV-1: Dimensions et propriétés thermiques des murs et des portes

Type de salle	$R^{f-p}$ (K/W)	$R^m$ (K/W)	$R^{eq}$ (K/W)	V ( $m^3$ )	M (kG)
Salle à coucher 1,2	0.0890	0.1982	0.0614	48	58.8
Salle à coucher 3,4	0.0890	0.4984	0.0755	48	58.8
Salle de séjour	0.0270	0.2263	0.0242	126	154.35
Salle de bain	0.4273	0.2048	0.1384	40	49
Cuisine	0.0854	0.1847	0.0584	50	61.25
<b><math>C_o =</math> Chaleur spécifique d'air (1005.4 J/kG-K)</b>					

Tableau IV-2: Paramètres thermiques de la maison

A partir du modèle thermique de chaque salle abordé à la partie précédente, les paramètres thermiques de cette maison calculés sont présentés dans le Tableau IV-2.

#### IV.3.2.3.1 Hypothèses

On suppose que la température extérieure pendant une journée varie selon une fonction sinusoïdale avec la valeur moyenne de 0°C et une amplitude de 5°C (Fig. IV-6).

Les caractéristiques du fonctionnement des radiateurs et des appareils électriques dans cette maison sont présentées par Tableau IV-3 et par les figures Fig. IV-7-Fig. IV-13.

Nom de usage	Puissance (W)	Fonctionnement
4 Radiateurs électriques N° 1,2,3,4	4*1500	Pour les chambres N°1,2,3,4
1 Radiateur électrique	1500	Pour la cuisine
1 Radiateur électrique	1500	Pour la salle de bain (SDB)
1 Radiateur électrique	2000	Pour la salle de séjour (SDS)
1 Cuisinière électrique1	1500	Marche à 18h10, arrêt à 19h30
1 Cuisinière électrique2	2000	Marche à 18h02, arrêt à 19h15
1 Réfrigérateur	150	Cyclique
1 Congélateur	125	Cyclique
1 Lave vaisselle	1600	Déplaçable
1 Lave linge	2400	Déplaçable
1 Autres (lumières, télé...)	100-300	Variable entre 100 et 300 W
<b>Puissance totale</b>	<b>22075</b>	

Tableau IV-3: Usages électriques dans la maison

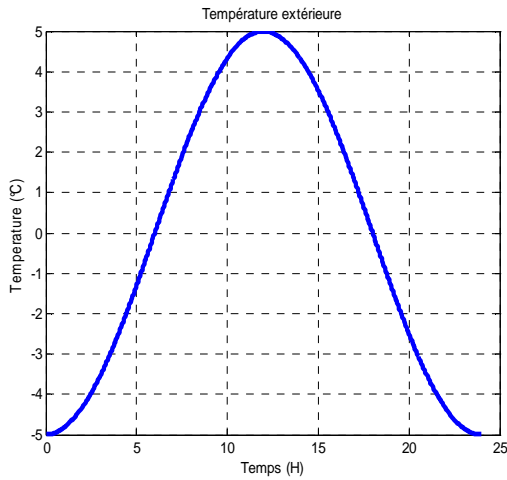


Fig. IV-6: *Température extérieure*

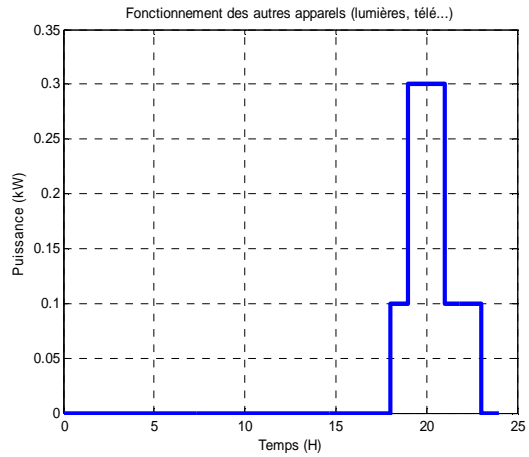


Fig. IV-7: *Fonctionnement des autres charges de la maison (lumières, télé...)*

Pour réduire le dépassement de puissance à l'heure de pointe, la stratégie de déplacement de la consommation est effectuée. Dans ce cas, on suppose que le lave-vaisselle est mis en marche à 22h30 et arrêté à 23h15. Le lave-linge est mis en marche à 3h30 et arrêté à 5h10.

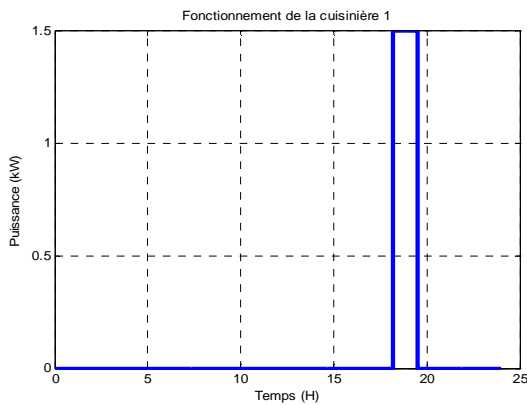


Fig. IV-8: *Fonctionnement de la cuisinière No. 1 (Marche à 18h10, arrêt à 19h30)*

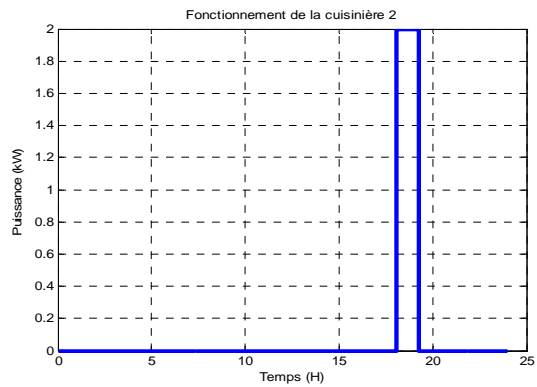


Fig. IV-9: *Fonctionnement de la cuisinière No. 2 (Marche à 18h02, arrêt à 19h15)*

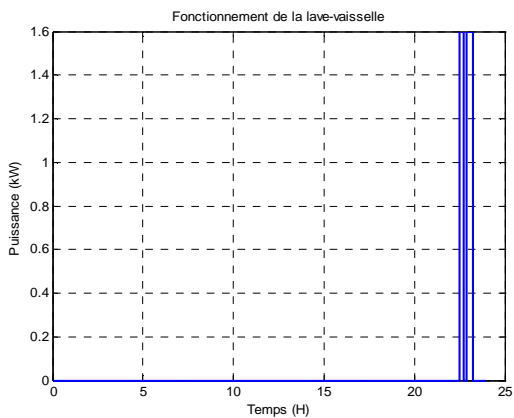


Fig. IV-10: *Fonctionnement du lave vaisselle (Marche à 22h30, arrêt à 23h15)*

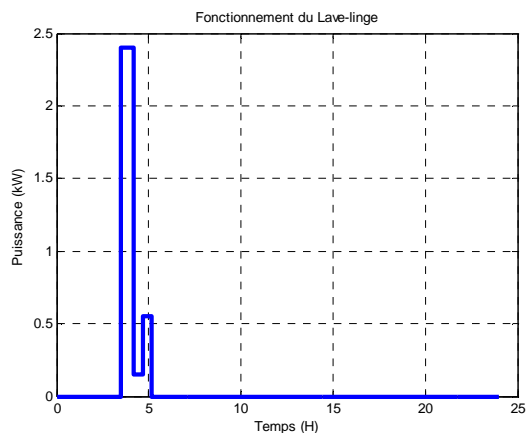


Fig. IV-11: *Fonctionnement du lave linge (Marche à 3h30, arrêt à 5h10)*

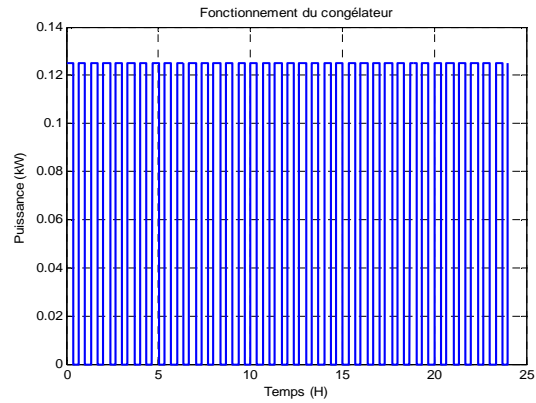
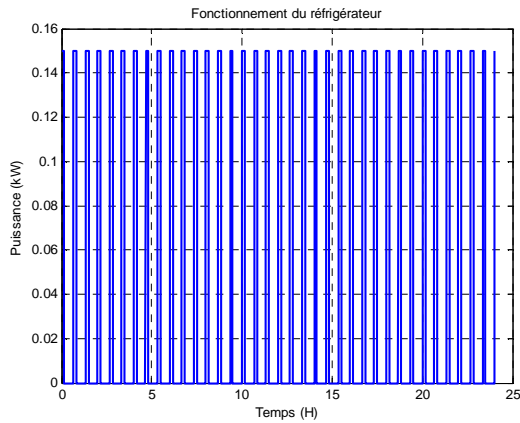


Fig. IV-12: *Fonctionnement du réfrigérateur* Fig. IV-13: *Fonctionnement du congélateur*

#### IV.3.2.3.2 Cas initial sans gestion de charge

La représentation de la consommation sans gestion de charge suppose que le lave-linge est mis en marche à 18h30, arrêté à 20h10 et le lave vaisselle est mis en marche à 20h00 et arrêté à 20h45. Le fonctionnement des autres charges est présenté sur les figures Fig. IV-7 à Fig. IV-13.

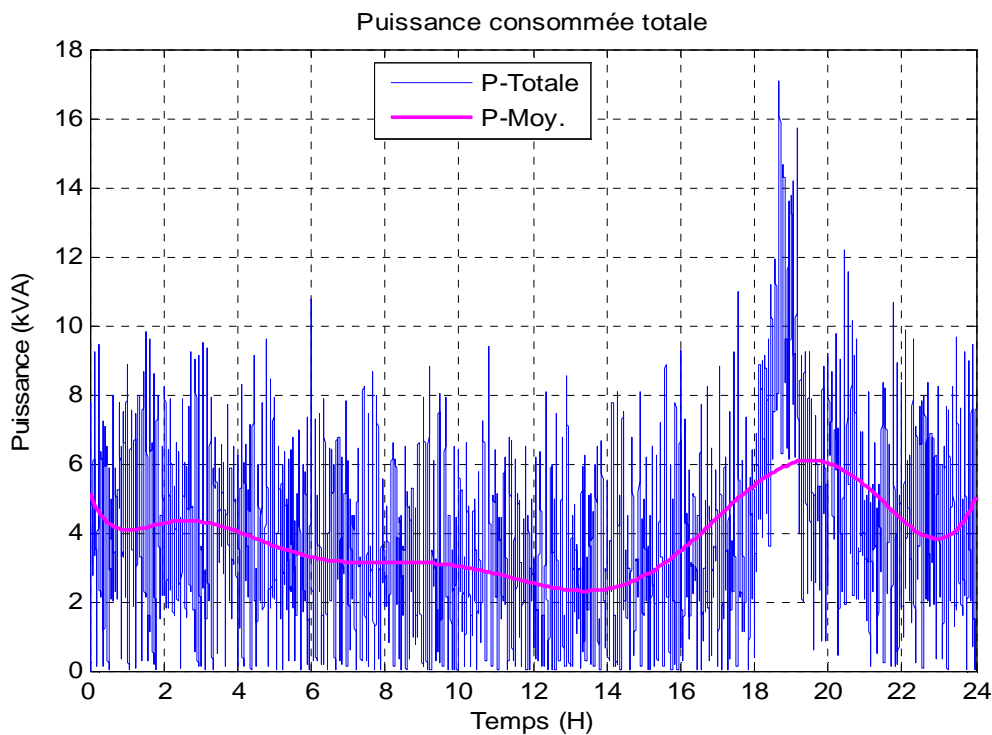


Fig. IV-14: *Puissance totale de consommation de la maison*

Les résultats montrent que, sans gestion de charge, la puissance maximale peut atteindre 17.27 kVA (Fig. IV-14). Dans ce cas, le confort est assuré (Fig. IV-15 et Fig. IV-16) mais la consommation totale est de 92.386 kWh/jour. Le fonctionnement du radiateur No.1 est présenté sur les figures Fig. IV-17 et Fig. IV-18.

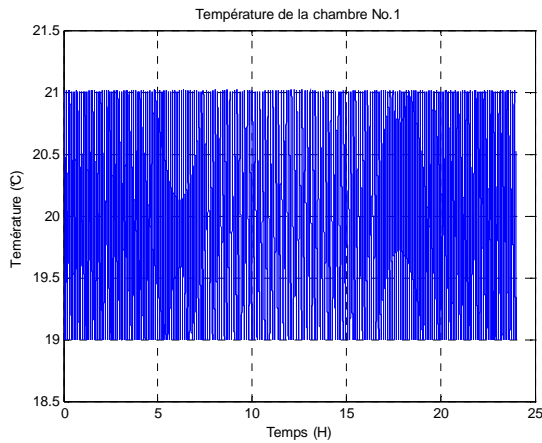


Fig. IV-15: Température de la chambre No. 1

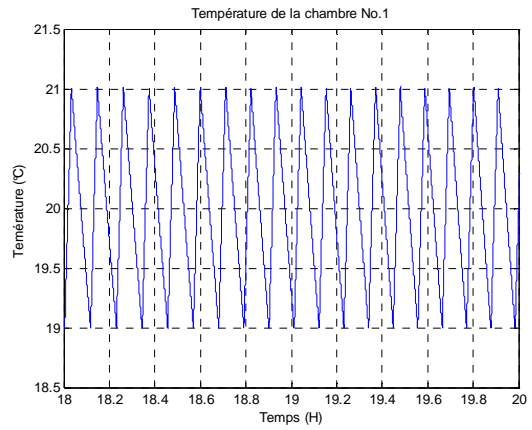


Fig. IV-16: Température de la chambre No. 1 (Zoom)

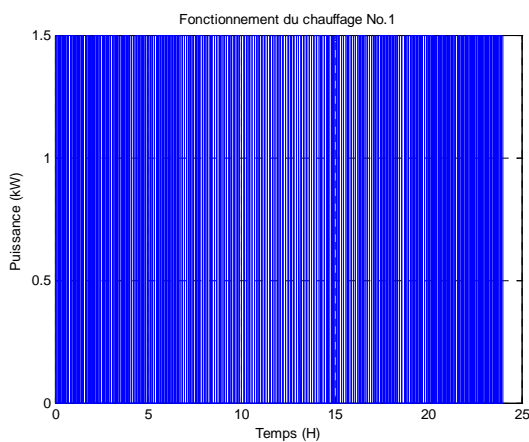


Fig. IV-17: Fonctionnement du chauffage No. 1

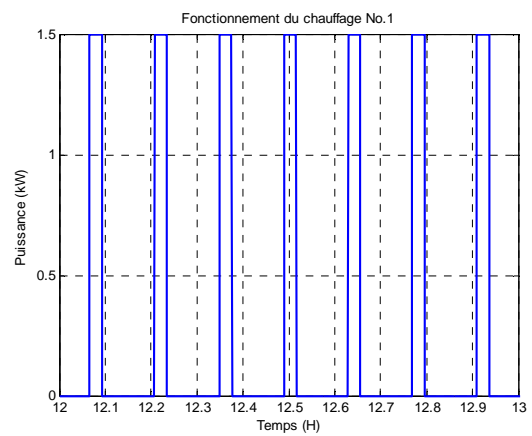


Fig. IV-18: Fonctionnement du chauffage No. 1 (Zoom)

#### IV.3.2.3.3 Consommation avec la gestion optimale

Pour réduire le dépassement de puissance à l'heure de pointe, la stratégie de déplacement de consommation est mise en oeuvre. La puissance permissible est fixée à 9kVA.

Dans ce cas, la puissance totale de la maison ne dépasse jamais de 9kVA (Fig. IV-19) et le confort est assuré (Fig. IV-20 et Fig. IV-21). Les figures Fig. IV-22 et Fig. IV-23 présentent le fonctionnement du climatiseur No. 1. La consommation totale est de 92.388 kWh par jour.

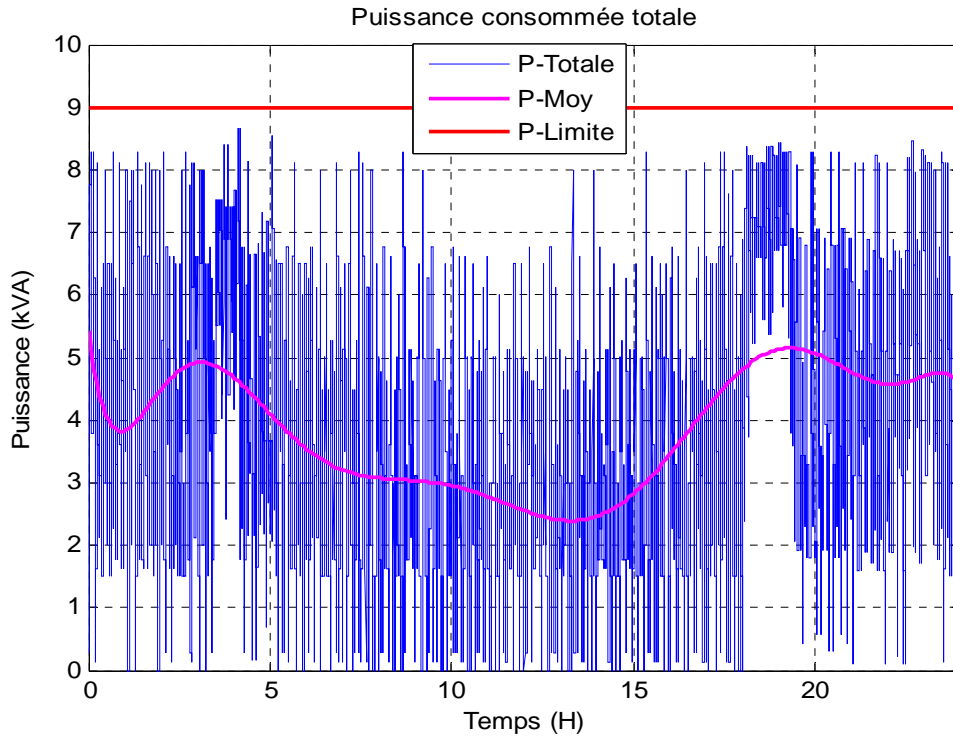


Fig. IV-19: Puissance totale de consommation de la maison

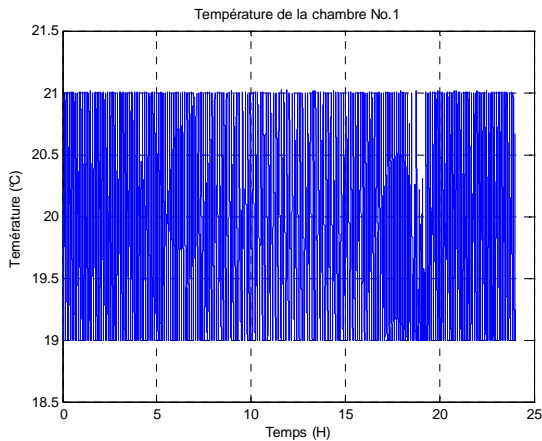


Fig. IV-20: Température de la chambre No. 1

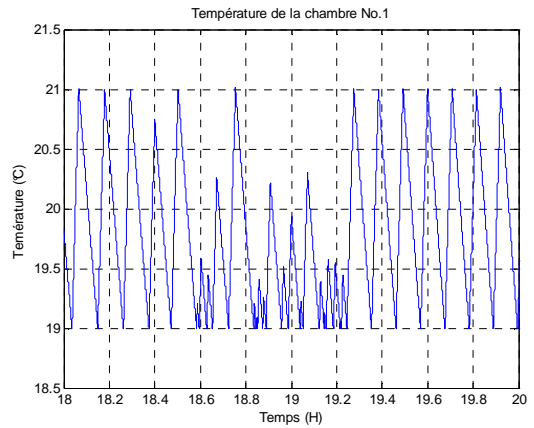


Fig. IV-21: Température de la chambre No. 1 (zoom)

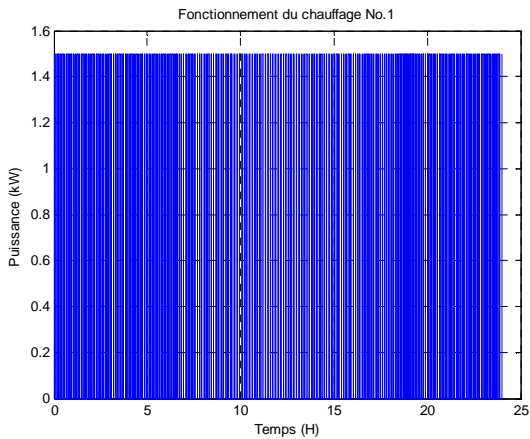


Fig. IV-22: Fonctionnement du chauffage No. 1

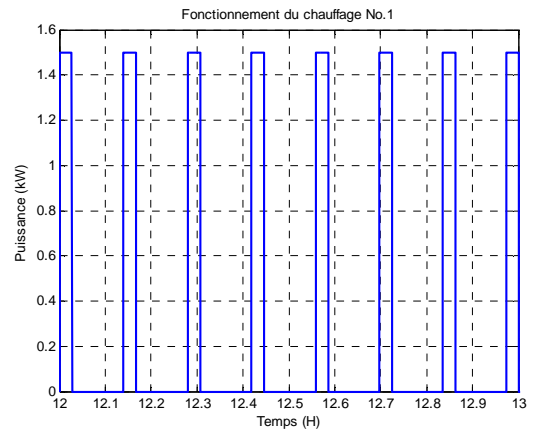


Fig. IV-23: Fonctionnement du chauffage No. 1 (Zoom)

### IV.3.3 Optimisation du confort

#### IV.3.3.1 Fonction objectif

L'objectif du problème est de maintenir la température intérieure instantanée de la salle k dans chaque intervalle i le plus proche la température de consigne.

$$\text{Min}_{u_{i,k}} [T] = \sum_{k=1}^n [T_{i,k}^{\text{int}}(u_{i,k}) - T_{i,k}^{\text{cons}}]^2 \quad (\text{IV-8})$$

De l'équation (IV-2) de la température intérieure la fonction objectif peut s'exprimer mathématiquement par :

$$\text{Min}_{u_{i,k} \in (0,1)} [F(u_{i,k})] = \sum_{k=1}^n \left[ C_{i,k} e^{-\frac{\Delta\tau}{K_k R_k^{\text{eq}}}} + T_k^{\text{ext}} + R_k^{\text{eq}} p_k u_{i,k} - T_k^{\text{cons}} \right]^2 \quad (\text{IV-9})$$

- $k = 1, 2, \dots, n$
- $n$  : nombre de radiateurs dans la maison
- $T_k^{\text{cons}}$  : la température de consigne de la salle k
- $T_k^{\text{int}}$  : la température intérieure de la salle k au moment i
- $u_{i,k}$  : l'état de fonctionnement du chauffage k dans l'intervalle i (0 ou 1).

#### IV.3.3.2 Les contraintes

L'optimisation de confort thermique devra prendre en compte les contraintes comme celles présentées à la partie précédente.

❖ *Contrainte du confort thermique*

$$T_k^{\text{min}} \leq C_{i,k}(u_{i,k}) e^{-\frac{\Delta\tau}{K_k R_k^{\text{eq}}}} + T_{i,k}^{\text{ext}} + R_k^{\text{eq}} p_k u_{i,k} \leq T_k^{\text{max}} \quad (\text{IV-10})$$

❖ *Contrainte de la puissance permmissible (autorisée)*

La puissance totale est toujours inférieure à la puissance souscrite

$$\sum_{k=1}^n p_k u_{i,k} \leq P_{\text{perm}} \quad (\text{IV-11})$$

$P_{\text{perm}}$  puissance permmissible (ou puissance souscrite).

#### IV.3.3.3 Résultats

a) Sans pénalisation de démarrage

En appliquant le principe proposé, si on fixe la température de consigne de 19.5 °C et la température extérieure varie entre 0±5°C. On constate que :

Pour minimiser la fonction objectif (confort), la température est régulée autour de la valeur de consigne avec un minimum de variation de température.

La fréquence de commutation est très élevée et cela peut se poser des problèmes de commutation mécanique des chauffages.

Pour éviter ce problème, une stratégie de pénalisation des chauffages pour les arrêts (voir la partie b).

Les Fig. IV-24 à Fig. IV-27 présentent la température de la chambre No.1 et le fonctionnement du chauffage No. 1. On constate que les confort thermiques sont bien maintenus.

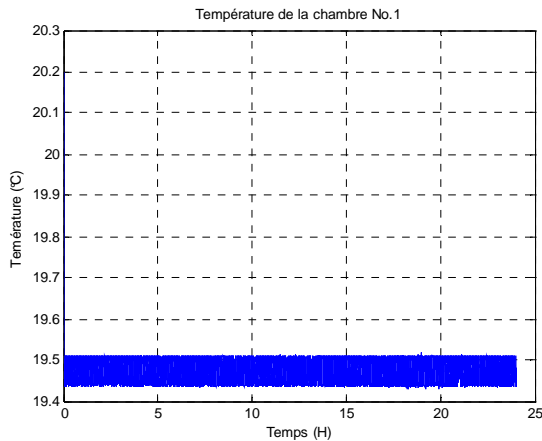


Fig. IV-24: Température de la chambre No. 1

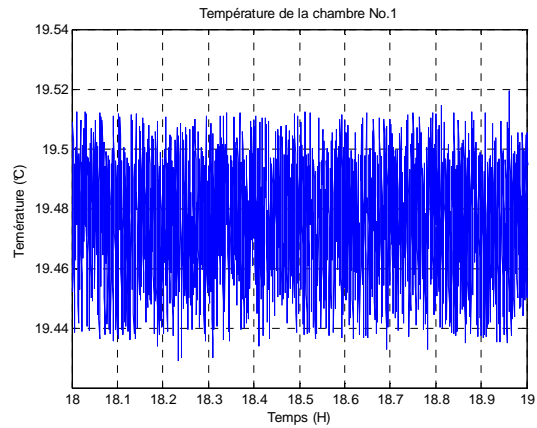


Fig. IV-25: Température de la chambre No. 1 (zoom)

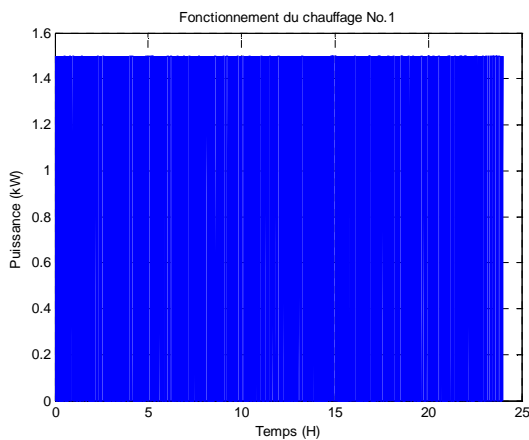


Fig. IV-26: Fonctionnement du chauffage No. 1

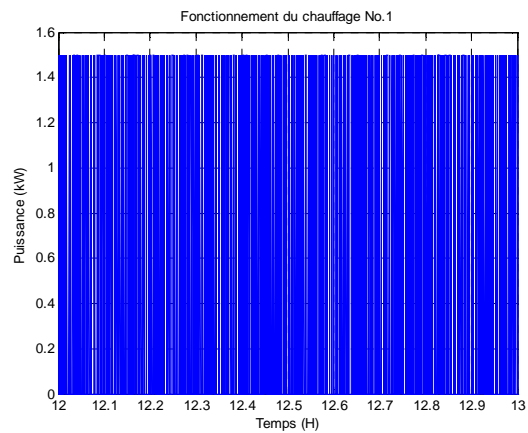


Fig. IV-27: Fonctionnement du chauffage No. 1 (Zoom)

b) Avec pénalisation de démarrage

Pour éviter les problèmes mécaniques à cause de fréquence élevée de commutation des chauffages. Une stratégie de pénalisation est proposée pour la fonction objectif, afin que les chauffages ne soient pas arrêtés trop fréquemment. Avec la stratégie proposée, le confort est respecté. La Fig. IV-28 présente la puissance totale de consommation. La puissance maximale ne dépasse jamais 9kVA. Les figures Fig. IV-29 à Fig. IV-32 présentent la température de la chambre No. 1 et le fonctionnement du chauffage No. 1.



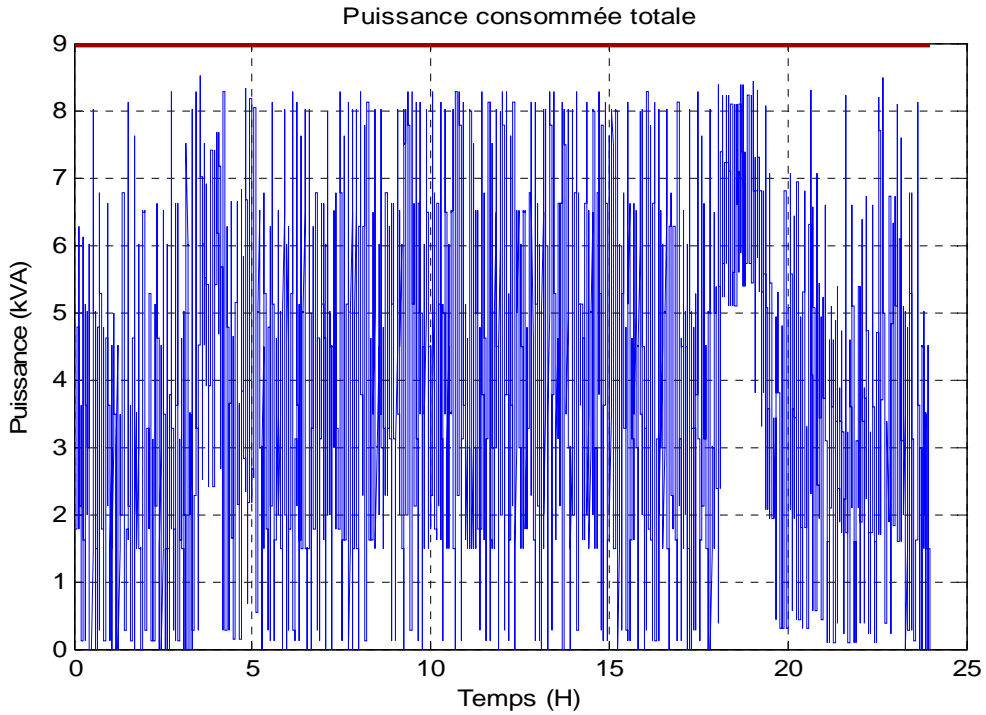


Fig. IV-28: Puissance totale de consommation de la maison

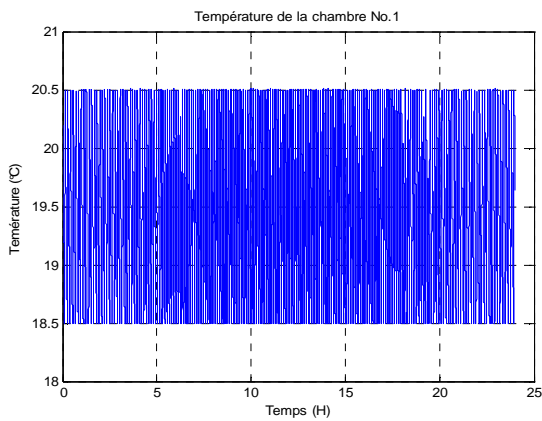


Fig. IV-29: Température de la chambre No.1

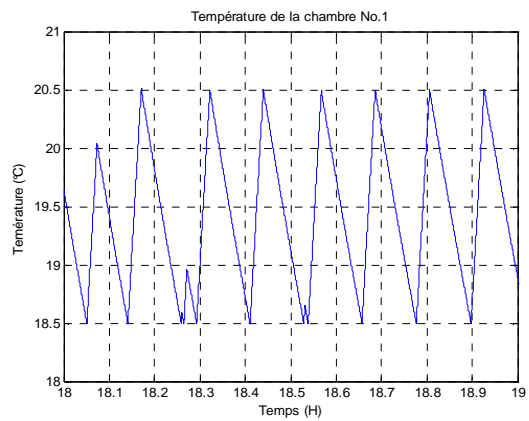


Fig. IV-30: Température de la chambre No.1 (zoom)

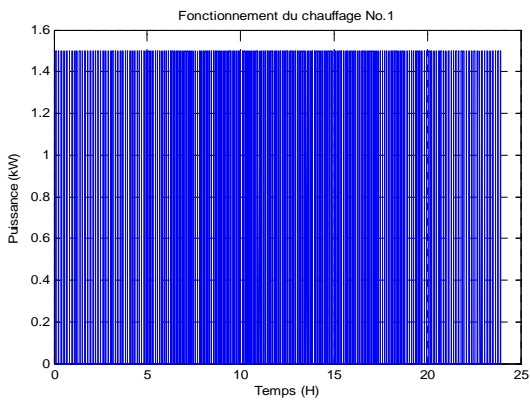


Fig. IV-31: Fonctionnement du chauffage No 1

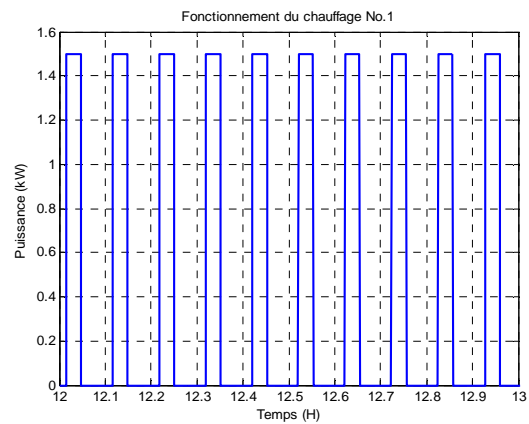


Fig. IV-32: Fonctionnement du chauffage No.1 (Zoom)

### IV.3.4 Minimisation des coûts

#### IV.3.4.1 Formulation du coût de l'énergie électrique

En France pour inciter les usagers à réduire leur consommation lors des pointes, Electricité de France propose différents tarifs avec de nombreuses options visant à dissuader les usagers de consommer de l'électricité lorsque la demande est la plus forte.

Il y a trois tarifs sont actuellement en vigueur :

- 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.

On s'intéresse au tarif bleu étant appliqué aux clients domestiques et agricoles. Ce tarif a deux éléments de tarification :

- Le prix fixe basé sur un abonnement annuel qui est fonction de la puissance souscrite
- Le prix des kWh consommés

#### option base

les prix Métropole\* (au 16/08/2007)  
DOM et Corse exclus.

puissance souscrite (kVA)	réglage disjoncteur (A)	abonnement annuel TTC (euros)	prix du kWh TTC (euros)
3	15	24,28	0,1325
6	30	61,75	0,1085
9	45	121,83	0,1085
12	60	174,69	0,1085
15	75	227,56	0,1085
18	90	280,42	0,1085
24	40	468,57	0,1085
30	50	656,72	0,1085
36	60	844,87	0,1085

Fig. IV-33: Option de base de tarif bleu de EDF

#### option Heure Pleines / Heures Creuses

les prix Métropole\* (au 16/08/2007)  
DOM et Corse exclus.

puissance souscrite (kVA)	réglage disjoncteur (A)	abonnement annuel TTC (euros)	Heures Pleines TTC pour 1 kWh (euros)	Heures Creuses TTC pour 1 kWh (euros)
6	30	106,98	0,1085	0,0661
9	45	191,90	0,1085	0,0661
12	60	276,81	0,1085	0,0661
15	75	361,73	0,1085	0,0661
18	90	446,65	0,1085	0,0661
24	40	748,02	0,1085	0,0661
30	50	1049,39	0,1085	0,0661
36	60	1350,77	0,1085	0,0661

Fig. IV-34: Option Heure Pleines/Heures Creuse de tarif bleu de EDF

Il y a deux options du prix présentés par (Fig. IV-33 et Fig. IV-34) :

- Option Base : le même prix à tout moment. Cette option conviendra aux clients qui possèdent peu d'appareils électriques et souhaitent consommer à toute heure sans se soucier de la période, du jour ou de l'année.
- Options Heures Pleines / Heures Creuses : des prix avantageux à certains moments de la journée. Cette option se conviendra aux clients qui souhaitent profiter des variations de prix du kWh aux moments les plus avantageux de la journée (soit 8 heures creuses quotidiennes de 22h à 6h lendemain).

A partir des éléments du tarif de l'électricité, la formulation du coût de l'électricité consommée pendant une période  $\Delta\tau_i$  peut être exprimée par l'équation suivante :

$$A_{i,k} = [p_i a_{i,k}^{elect} + Ab_k^{elect}] \Delta\tau_i \quad (IV-12)$$

Où :

- $A_{i,k}$  = coût d'électricité consommé de client k pendant une période  $\Delta\tau_i$  (Euro)
- $i$  = l'heure du jour (1, 2 .....24)
- $p_i$  = puissance active au moment  $i$  (W)
- $a_{i,k}^{elect}$  = prix d'électricité de client k au moment  $i$ .  $a_{i,k}^{elect}$  en fonction de l'option du tarif et de l'heure du jour (Euro/W.s)

Par exemple : l'option Heures Pleines / Heures Creuses, à 18h (l'heure pleine) :

$$a_{18h}^{elec} = \frac{0.1085}{10^3 \times 3600} = 3.01 \times 10^{-8} \text{ (Euro / Ws)}$$

- $Ab_k^{elect}$  = prix de l'abonnement du client k pour chaque seconde. On considère que  $Ab_k^{elect}$  est le rapport entre le prix de l'abonnement annuel et  $(365 \times 24 \times 3600)$  le nombre de secondes d'un an. Ce prix  $Ab_k^{elect}$  est fonction de l'option du tarif et de puissance souscrite (Euro/sec).

Par exemple : la puissance souscrite de 9kVA et l'option Base :

$$Ab_k^{elect} = \frac{\text{le prix abonnement annuel}}{365 \times 24 \times 3600} = \frac{121.83}{31536000} = 3.86 \times 10^{-6} \text{ (Euro / s)}$$

- $\Delta\tau_i$  = durée de période calculée (s)

#### IV.3.4.2 Fonction objectif

A partir de la formulation du coût de l'électricité consommée ( IV-12) on peut donner la formulation du coût de l'électricité consommée pendant une période  $\Delta\tau$  au moment  $i$  pour le radiateur k

$$A_{i,k} = [p_k u_{i,k} a_{i,k}^{elect} + Ab_k^{elect}] \Delta\tau \quad (\text{IV-13})$$

Donc, la fonction objectif à minimiser est le coût de la consommation dans la maison à chaque instant :

$$\underset{u_{i,k} \in (0,1)}{\text{Min}} [A_{i,k}] = \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^n [p_k u_{i,k} a_{i,k}^{elect} + Ab_k^{elect}] \Delta\tau \quad (\text{IV-14})$$

Avec

- $i = 0, 1, 2 \dots D$
- $\Delta\tau$  = pas de temps de calcul (sec)
- $A_i$  = coût d'électricité consommé pendant une période  $\Delta\tau$  au moment  $i$  (Euro)
- $p_i$  = puissance active au intervalle moment  $i$  (W)
- $a_{i,k}^{elect}$  = prix d'électricité pour le tarif choisi au moment  $i$  (Euro/Wsec)
- $Ab_k^{elect}$  = prix de l'abonnement pour chaque seconde
- $\Delta\tau_i$  = pas de temps de calcul (sec)
- $u_{i,k}$  : l'état de fonctionnement du chauffage k dans l'intervalle  $i$  (0 ou 1)

- $n$  : nombre de radiateurs dans la maison
- $D$  : Durée de simulation

En utilisant l'inertie thermique, on tient compte à chaque seconde de l'équation de la thermodynamique pour calculer la température interne de chaque salle.

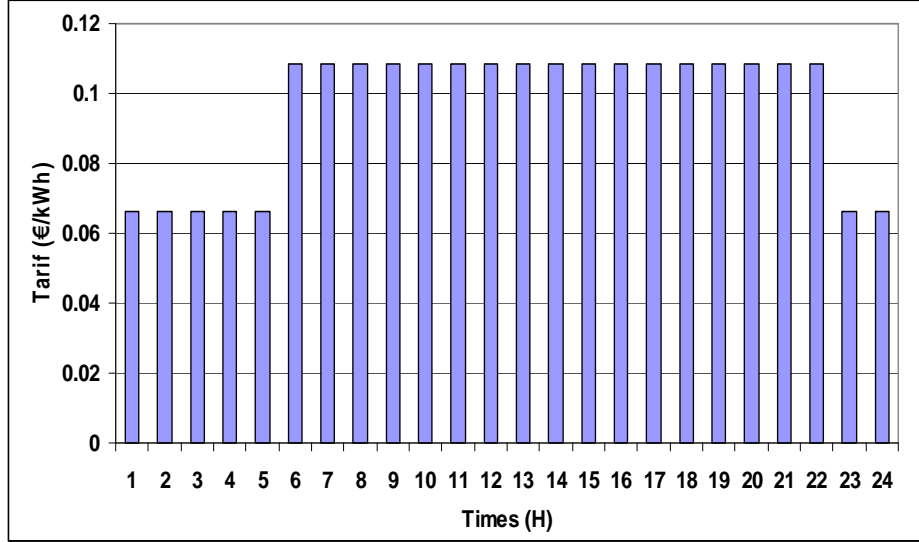


Fig. IV-35: Tarif Heure Pleines/Heures Creuse utilisé pour la simulation

Dans cette partie, le système des deux tarifs avec l'option heures pleines/heures creuses est appliquée (Fig. IV-35). Les stratégies de déplacement des charges dont la mise en route est déplaçables dans le temps (lave vaisselle, lave linge) sont utilisées comme dans la partie précédente.

#### IV.3.4.3 Les contraintes

Les contraintes sont les mêmes que dans la partie précédente.

##### ❖ Contrainte du confort thermique

$$T_k^{\min} \leq C_{i,k}(u_{i,k}) e^{\frac{\Delta\tau}{K_k \cdot R_k^{eq}}} + T_{i,k}^{\text{ext}} + R_k^{eq} p_k u_{i,k} \leq T_k^{\max} \quad (\text{IV-15})$$

##### ❖ Contrainte de la puissance maximale autorisée (ou puissance souscrite)

$$\sum_{k=1}^n p_k u_{i,k} \leq P_{perm} \quad (\text{IV-16})$$

#### IV.3.4.4 Résultats

Les mêmes scénarios que dans la partie précédente sont utilisés pour la simulation (déplacement des charges déplaçables,  $T_{\text{cons}} = 20^\circ\text{C}$  et  $T_{\text{ext}} = 0 \pm 5^\circ\text{C}$ ). Dans cette partie nous utilisons un système basé sur les deux tarifs (Fig. IV-35).

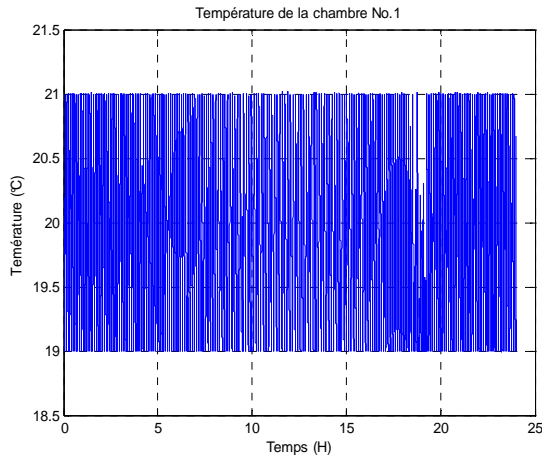


Fig. IV-36: Température de la chambre No. 1

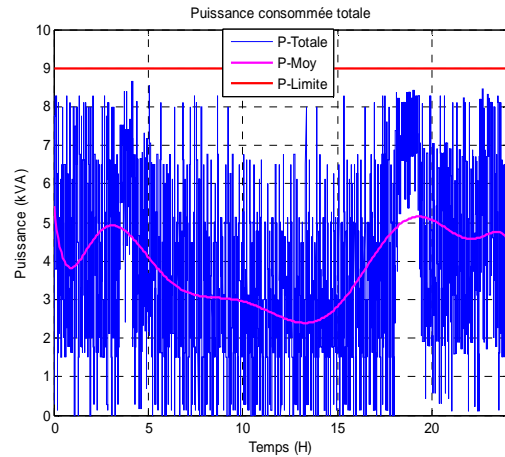


Fig. IV-37: Puissance totale de consommation de la maison

Dans ce cas, le confort est bien respecté et la puissance maximale ne dépasse jamais la valeur fixée de 9 kVA. Le Tableau IV-4 présente une comparaison des coûts par jour pour une consommation en l’absence de gestion et avec gestion.

	P_souscrite (kVA)	Cons. (kWh/j)	Coût de cons (€/j)	Abonnement (€/j)	Coût total (€/j)	Economie (%)
Sans gestion	18	92.476	8.627	1.224	<b>9.851</b>	-
Avec gestion	9	92.324	8.492	0.526	<b>9.017</b>	8.5

Tableau IV-4: Comparaison des coûts pour le cas sans gestion et avec gestion optimale

Le résultat montre que, en l’absence de gestion, avec un abonnement de 18kVA, le coût total est de 9.951 € par jour. Par contre, avec une stratégie de gestion, avec un abonnement 9kVA, le coût total est de 9.017 € par jour. Ce résultat indique que lorsque les stratégies d’optimisation sont utilisées le client gagne 0.834 € par jour (soit un gain d’environ 8.5%).

## IV.4 Stratégies proposées de gestion des climatisations

### IV.4.1 Développement des modèles

Le modèle thermodynamique d’une salle conditionnée abordé dans la partie (II.4.3.2) du chapitre II, est basé sur le principe physique du fonctionnement du climatiseur et sur le modèle électrique avec quelques hypothèses simplificatrices. Pour assurer une précision acceptable du modèle les variables importantes devront comme la température, la radiation solaire devront être prises en compte, par contre l’infiltration, la source de chaleur interne les sources thermiques des autres équipements et des gens sont négligées. La charge exigée des climatiseurs de zone k (salle k) pour maintenir une température intérieure indiquée de zone k est décrite par le système d’équations différentielles suivant:

$$\frac{dT_k^m}{dt} = \frac{I_k^s}{C_k^m} + \frac{T_k^{\text{int}}}{R_k^m C_k^m} + \frac{T_k^{\text{ext}}}{R_k^m C_k^m} - \frac{2T_k^m}{R_k^m C_k^m} \quad (\text{IV-17})$$

$$\frac{dT_k^{\text{int}}}{dt} = -\frac{I_k^{\text{ac}} u(t)}{C_k^o} + \frac{T_k^{\text{ext}}}{R_k^f C_k^o} + \frac{T_k^m}{R_k^m C_k^o} - \frac{T_k^{\text{int}}}{C_k^o} \left( \frac{1}{R_k^m} + \frac{1}{R_k^f} \right) \quad (\text{IV-18})$$

Avec  $T_k^m$  et  $T_k^{\text{int}}$  sont les variables inconnues.

où :

- $R_k^m$  la résistance thermique de conduction de la salle k (mur, base et toit) ( $^{\circ}\text{K}/\text{W}$ )
- $C_k^m$  la capacité thermique de la salle k (mur, base et toit) ( $\text{J}/^{\circ}\text{K}$ )
- $R_k^f$  la résistance thermique de conduction de l'infiltration moyen d'air de la salle k (fenêtre, vitre...) ( $^{\circ}\text{K}/\text{W}$ )
- $C_o$  la capacité thermique de l'air à l'intérieur de la salle k ( $\text{J}/^{\circ}\text{K}$ )
- $T_k^{\text{int}}$  la température intérieure de la salle k ( $^{\circ}\text{K}$ )
- $T^{\text{ext}}$  la température extérieure k ( $^{\circ}\text{K}$ )
- $I_k^s$  la source de courant de rayonnement solaire de la salle k (W)
- $I_k^{\text{inst}}$  la source de courant de chaleur produite par des équipements, des gens et du système de d'éclairage ... (W)
- $I_k^{\text{ac}}$  la source de courant de la chaleur produite par le climatiseur (W)
- $u_k(t)$  La fonction de commutation (=1 quand le compresseur est mis en marche et =0 quand le compresseur est arrêté).

Pour la zone k (salle k) au moment i, la température intérieure est déterminée par la résolution du système d'équations différentielles ( IV-17) et ( IV-18):

$$T_{i,k}^{\text{int}} = f(C_k^m, C_k^o, R_k^m, R_k^f, T_i^{\text{ext}}, I_i^s, T_{i-1,k}^m, T_{i-1,k}^{\text{int}}, I_k^{\text{ac}} u_{i,k}) \quad (\text{IV-19})$$

- $T_{i,k}^{\text{int}}$  la température intérieure de la salle k au moment i ( $^{\circ}\text{K}$ )
- $T_{i-1,k}^{\text{int}}$  la température intérieure de la salle k au moment (i-1) ( $^{\circ}\text{K}$ )
- $T_{i-1,k}^m$  la température intérieure du mur de la salle k au moment (i-1) ( $^{\circ}\text{K}$ )
- $T_i^{\text{ext}}$  la température extérieure k au moment i ( $^{\circ}\text{K}$ )
- $I_i^s$  la source de courant de rayonnement solaire de la salle k au moment i (W)

Si l'on considère que  $T_i^{\text{ext}}$  et  $I_i^s$  ne varient pas pendant la période d'un pas de temps du

calcul  $\Delta\tau$ , la température intérieure  $T_{i,k}^{\text{int}}$  est alors une fonction de  $(I_{i,k}^{\text{ac}} u_{i,k})$  :

$$T_{i,k}^{\text{int}} = f(I_k^{\text{ac}} u_{i,k}) \quad (\text{IV-20})$$

#### IV.4.2 Minimisation des pics de consommation

##### IV.4.2.1 Formulation du problème (fonction objectif)

L'objectif du problème est de minimiser les pics de consommation d'un hôtel composé de n salles où un climatiseur est installé dans chacune d'entre elles. La minimisation de la fonction objectif à chaque moment i est déterminée par:

$$\underset{u_{i,k} \in (0,1)}{\text{Min}} [P] = \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^n [P_k u_{i,k}] \quad i=1,2,..,D ; \quad k=1,2,\dots,n \quad (\text{IV-21})$$

Avec

- $P_k$  puissance du climatiseur k (W)
- $\Delta\tau$  pas de temps de calcul (s)
- $u_{i,k}$  état de fonctionnement du climatiseur k au moment i (0 ou 1)
- n : nombre de climatiseurs dans l'hôtel

Avec les contraintes suivantes

❖ *Contrainte du confort thermique*

$$T_k^{\text{min}} \leq T_{i,k}^{\text{int}} = f(I_k^{\text{ac}} u_{i,k}) \leq T_k^{\text{max}} \quad (\text{IV-22})$$

❖ *Contrainte de la puissance permmissible (autorisée)*

$$\sum_k^n I_k^{\text{ac}} u_{i,k} \leq P_{\text{perm}} \quad (\text{IV-23})$$

Où

- $T_k^{\text{min}}$  température minimale de la salle k
- $T_k^{\text{max}}$  température maximale de la salle k

$T_k^{\text{min}}$  et  $T_k^{\text{max}}$  sont déterminées par :

$$T_k^{\text{min}} = T_k^{\text{cons}} - \Delta T_k \quad \text{et} \quad T_k^{\text{max}} = T_k^{\text{cons}} + \Delta T_k$$

- $T_k^{\text{cons}}$  température de consigne de la salle k (ex :  $T_k^{\text{cons}} = 21^\circ\text{C}$ )
- $\Delta T_k$  variation de température (ex :  $\Delta T_k = \pm 1^\circ\text{C}$ )
- $P_{\text{perm}}$  puissance permmissible (ou puissance souscrite)

En ce qui concerne la contrainte de confort thermique, la température intérieure de chaque salle (k) doit être maintenue autour de la température de consigne. La température intérieure

au moment  $i$  est une fonction qui est caractérisée par des dynamiques thermiques de la salle (volume, masse, mur, fenêtre, porte...) et par la température intérieure connue déterminée au pas de calcul précédent...

Pour la seconde contrainte, la puissance totale de consommation des climatiseurs doit être toujours inférieure à la puissance souscrite ou la puissance maximale admissible.

#### IV.4.2.2 Résultat

La méthode proposée est appliquée pour un hôtel comportant 50 chambres. Dans chaque chambre une climatisation de 5kW est installée (Fig. IV-38)

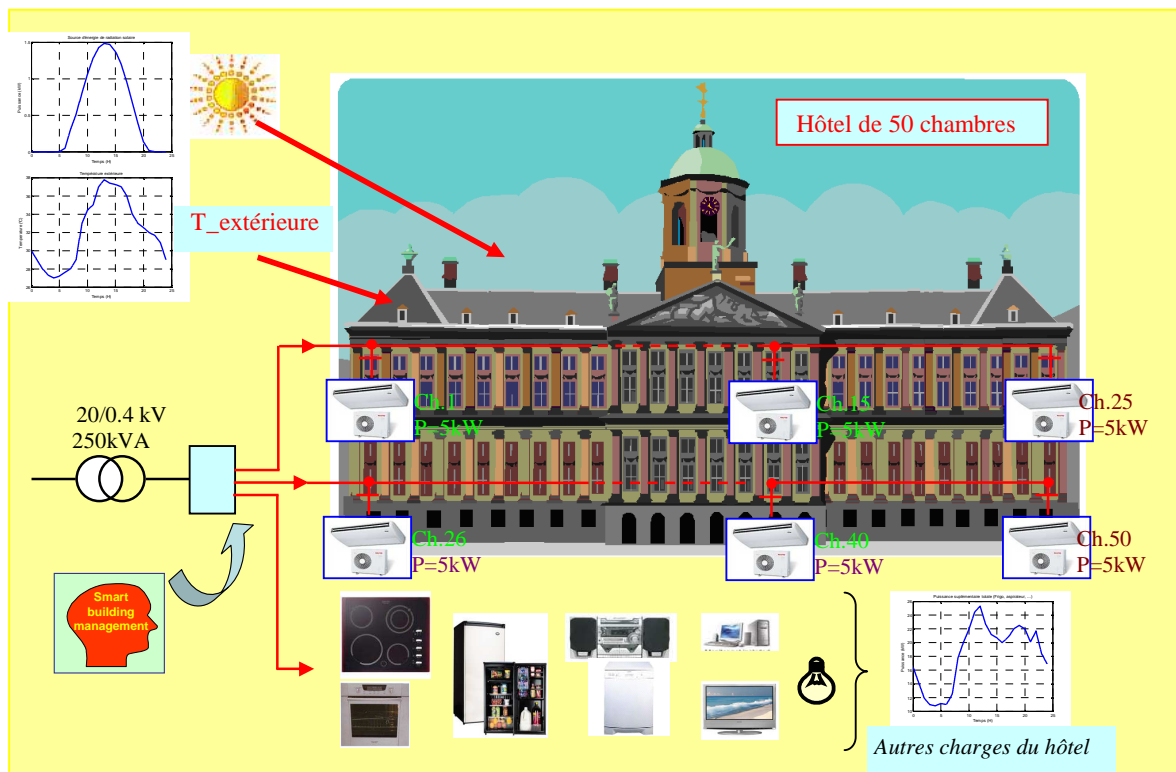


Fig. IV-38: Gestion optimale de climatisation d'un hôtel

#### IV.4.2.3 Hypothèses

On suppose que la température extérieure varie entre 27 et 38°C pendant une journée (Fig. IV-39). Les autres charges de l'hôtel (lumières, télévision, réfrigérateur, four ...) sont présentées sur la Fig. IV-40. Une source de l'énergie provient du rayonnement solaire est présentée sur la Fig. IV-41.

Nom de usage	Puissance (kW)	Fonctionnement
50 Climatisations	50*5 kW	Pour les chambres
Autres charges	10-30 kW	Pour les autres charges (télé, frigo, four, cuisinière, lampes...)
<b>Puissance totale</b>	<b>280 kW</b>	

Tableau IV-5: Usages électriques dans la maison



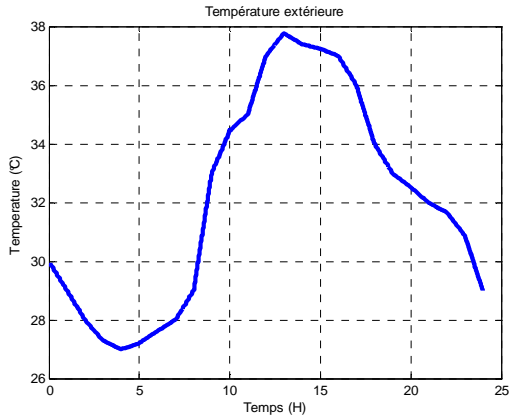


Fig. IV-39: *Température extérieure*

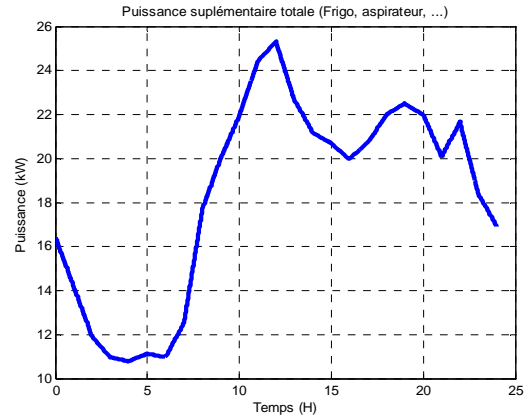


Fig. IV-40: *Fonctionnement des autres charges du hôtel (lumière, télé, frigo, ...)*

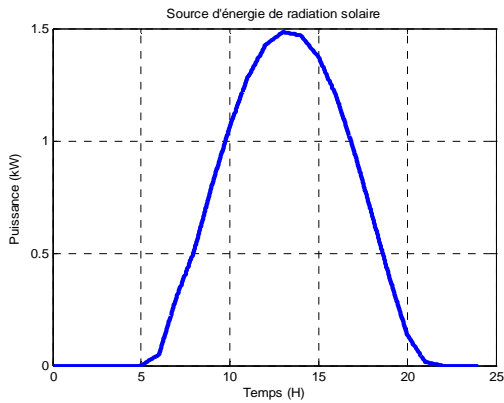


Fig. IV-41: *Source d'énergie de radiation solaire*

#### IV.4.2.3.1 Sans gestion des climatiseurs

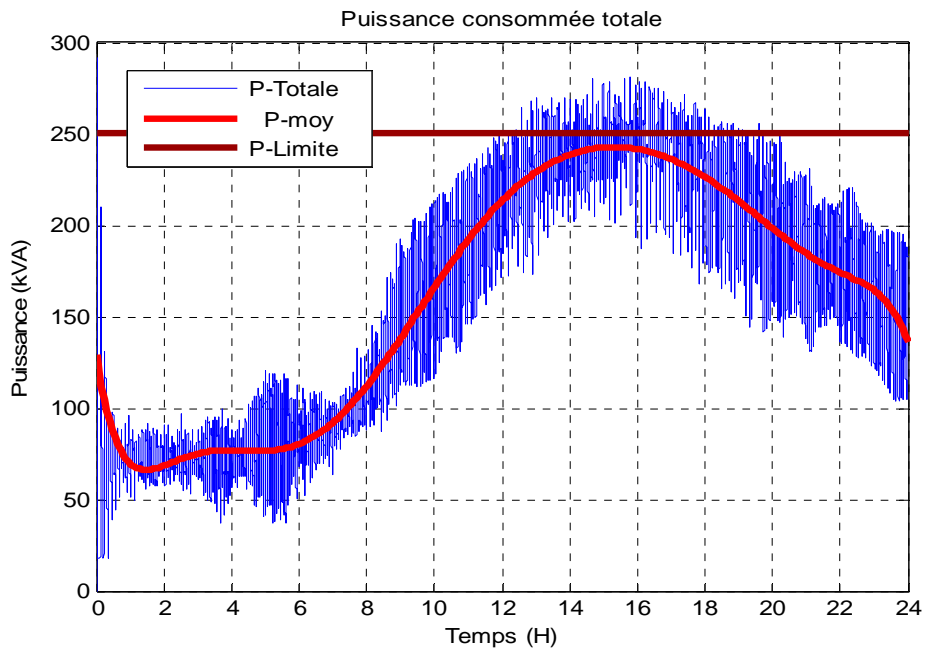


Fig. IV-42: *Puissance totale de l'hôtel*

Les résultats obtenus montrent que en l'absence de gestion des climatiseurs, la puissance totale peut atteindre 280 kVA pendant plus d'une heure comme le montre la Fig. IV-42. Bien entendu, le confort est assuré pour ce cas (Fig. IV-43 et Fig. IV-44). Le fonctionnement du climatiseur No.1 est présenté sur les figures Fig. IV-45 et. La consommation totale de l'hôtel est de 3441.9 kWh par jour.

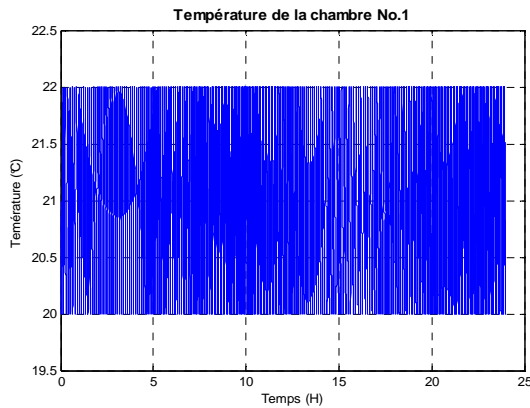


Fig. IV-43: *Température intérieure de la chambre No. 1*

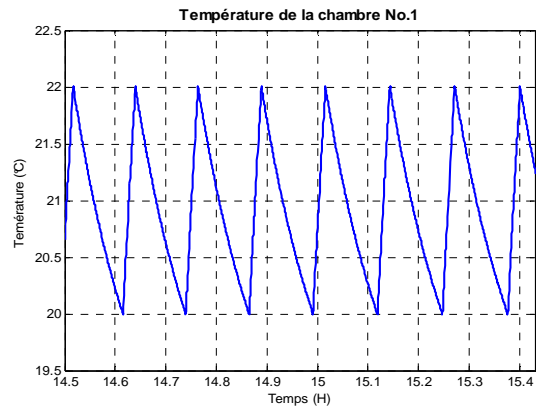


Fig. IV-44: *Température intérieure de la chambre No. 1 (zoom)*

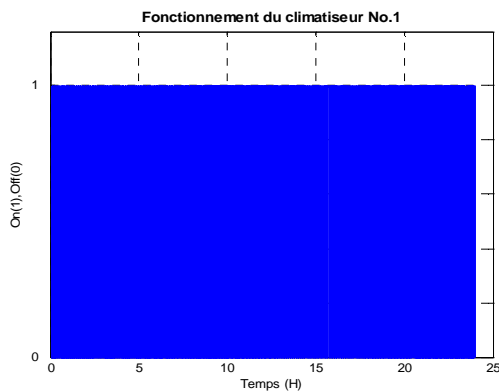


Fig. IV-45: *Fonctionnement du climatiseur No. 1*

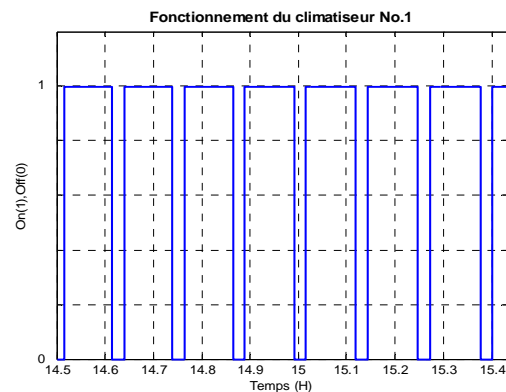


Fig. IV-46: *Fonctionnement du climatiseur No. 1 (Zoom)*

#### IV.4.2.3.2 Avec gestion optimale des climatiseurs

##### Cas 1 : Puissance autorisée = 250 kVA

Les Fig. IV-47 et Fig. IV-48 présentent la puissance consommée totale de l'hôtel sans gestion et avec gestion pendant la période de point (de 14h30 à 15h30). Les Fig. IV-49 et Fig. IV-50 présentent le fonctionnement du climatiseur No. 1 et la température de la chambre No. 1. Les résultats obtenus par la méthode proposée montrent que en présence d'une gestion optimale la puissance totale consommée est toujours inférieure à la puissance autorisée de 250kVA.

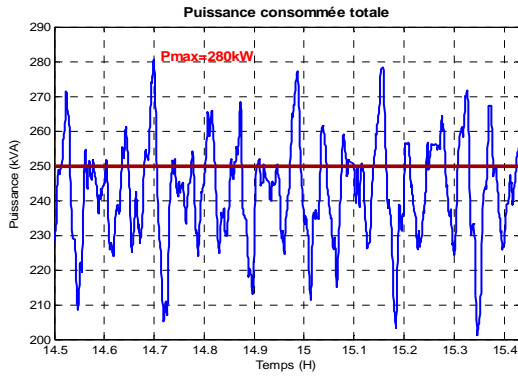


Fig. IV-47: Puissance totale de l'hôtel sans gestion (Zoom)

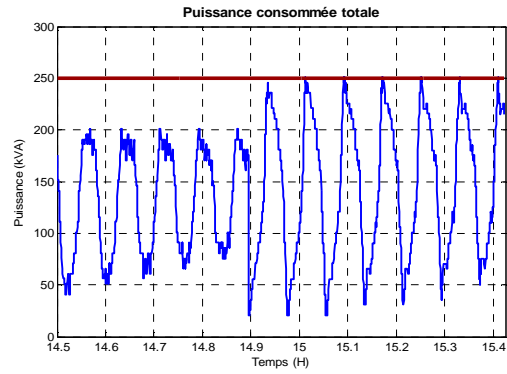


Fig. IV-48: Puissance totale de l'hôtel avec gestion optimale (Zoom)

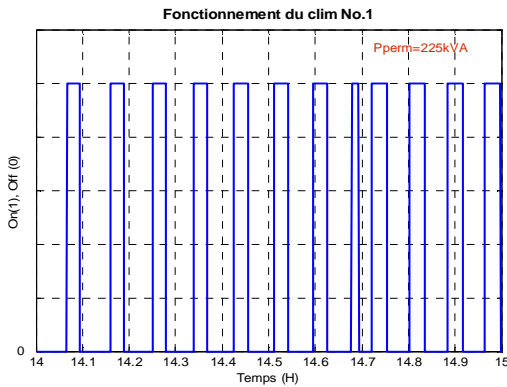


Fig. IV-49: Fonctionnement du climatiseur No.1 avec gestion optimale (Zoom)

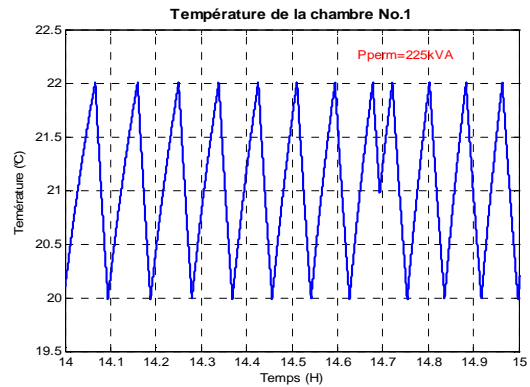


Fig. IV-50: Fonctionnement du climatiseur No.1 avec gestion optimale (Zoom)

Cas 2 : Puissance autorisée = 225 kVA

Les Fig. IV-51 et Fig. IV-52 présentent la puissance consommée totale de l'hôtel en l'absence de gestion et en présence de gestion pendant la période de point (de 14h30 à 15h30). Les Fig. IV-53 et Fig. IV-54 présentent le fonctionnement du climatiseur No.1 et la température de la chambre No.1. Les résultats obtenus par la méthode proposée montrent que, en présence d'une gestion optimale la puissance consommée totale est toujours inférieure à la puissance autorisée de 225kVA.

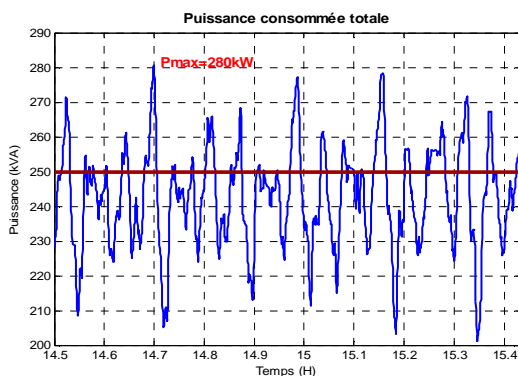


Fig. IV-51: Puissance totale de l'hôtel sans gestion (Zoom)

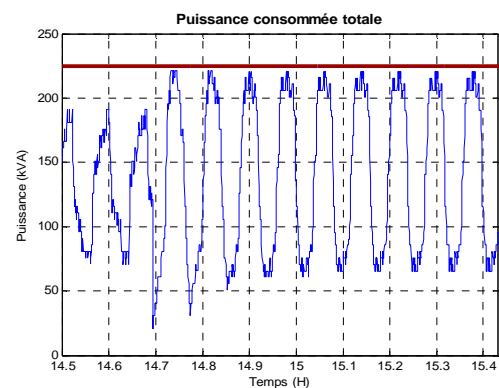


Fig. IV-52: Puissance totale de l'hôtel avec gestion optimale (Zoom)

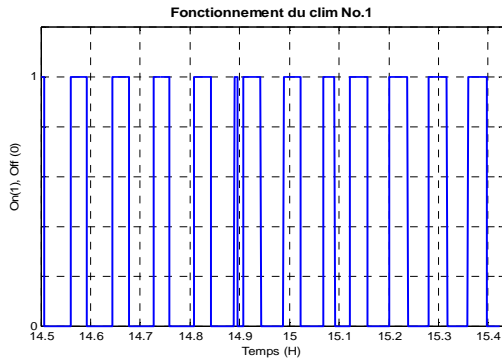


Fig. IV-53: *Fonctionnement du climatiseur No.1 avec gestion optimale (Zoom)*

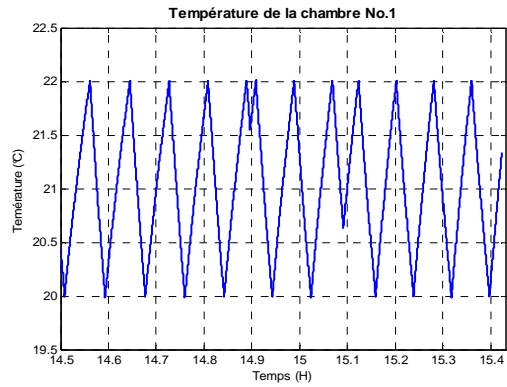


Fig. IV-54: *Fonctionnement du climatiseur No.1 avec gestion optimale (Zoom)*

## IV.5 Conclusion

Ce chapitre présente les différentes stratégies proposées pour la gestion optimale du chauffage et de la climatisation. Le point important des méthodes proposées est la prise en compte du fonctionnement réel des charges raccordées au réseau et du changement des conditions météorologiques. L'application de l'algorithme proposé permet de réduire le temps de simulation par rapport à la méthode combinatoire.

La consommation globale des charges résidentielles (maison) et tertiaires (hôtel) a été testée avec des résultats significatifs.

Les avantages de la méthode proposée sont:

- Pour les clients, la réduction du coût d'abonnement et de la facture globale de consommation tout en maintenant le confort
- Pour le gestionnaire de réseau, l'application de ces méthodes permet de réduire les pics de consommation pour éviter les congestions sur le réseau
- Les méthodes proposées prennent en compte des conditions réelles dans les bâtiments comme les comportements des charges (ex: frigo, lave-linge...) et les conditions météorologiques
- Le confort, pris comme une contrainte à respecter est assuré.

Ces méthodes de gestion optimale peuvent être généralisées pour un quartier ou un réseau. La méthode de gestion en minimisant le coût de consommation peut être appliquée pour le système de tarif dynamique. La gestion optimale donne des informations pour la gestion en temps-réel (dans le chapitre suivant) qui sera basée sur des simulations plus fines.



## **Chapitre V : Développement des stratégies de gestion des charges en temps réel**

<b>V. CHAPITRE V : DEVELOPPEMENT DES STRATEGIES DE GESTION DES CHARGES EN TEMPS REEL.....</b>	<b>133</b>
V.1 INTRODUCTION .....	135
V.2 METHODE BASEE SUR LA REGULATION ADAPTATIVE DE TEMPERATURE .....	136
V.2.1 <i>Principe de la méthode proposée</i> .....	136
V.2.2 <i>Applications de la méthode proposée pour la gestion des radiateurs</i> .....	139
V.2.2.1 Modèle complet de la maison développé sous Matlab/Simulink.....	139
V.2.2.2 Hypothèses .....	142
V.2.2.3 Résultats .....	142
V.2.3 <i>Application de la méthode proposée pour la gestion des climatisations</i> .....	150
V.2.3.1 Modèle d'une salle conditionnée .....	150
V.2.3.2 Hypothèses .....	151
V.2.3.3 Résultats .....	152
V.3 METHODE BASEE SUR LE DELESTAGE EN FONCTION DE LA COURBE DE PROTECTION .....	157
V.3.1 <i>Principe de la méthode</i> .....	157
V.3.2 <i>Application</i> .....	161
V.3.2.1 Hypothèses .....	161
V.3.2.2 Résultats .....	162
V.4 CONCLUSION .....	164

## V.1 Introduction

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre précédent, la part du chauffage devient, pendant l'hiver, prépondérante en France dans la consommation totale. Dans l'avenir en France ou dans les pays tropicaux, la consommation par les climatisations qui va prendre une part très importante en particulier en été. C'est pourquoi, dans ce chapitre, nous allons aborder les méthodes de gestion du chauffage et de la climatisation. Parmi les consommations, une autre charge importante est celle qui est liée à la cuisson, c'est-à-dire la cuisinière. Nous l'intégrerons dans nos méthodes.

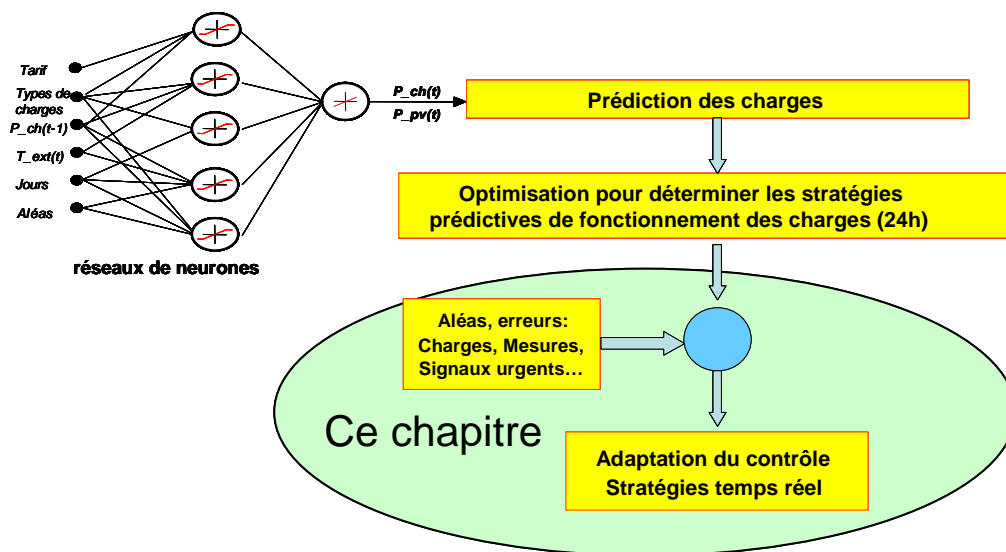


Fig. V-1: Phase de gestion en temps réel dans le système de gestion de charge proposé

L'objectif de la troisième phase présentée dans ce chapitre est de déterminer les stratégies de gestion en temps réel des systèmes thermiques comme le chauffage, la climatisation et la cuisinière. Les méthodes de régulation auto-adaptative seront proposées. Il s'agit d'une gestion en temps réel car, à partir de la gestion prédictive des consommations présentée dans le chapitre précédent, il faut régler le fonctionnement des charges (chauffage et climatisation), l'adapter aux conditions réelles (Fig. V-1) en tenant compte des aléas (ex : des variations rapides des charges) et des erreurs commises lors de la phase prédictive.

Dans le cadre du travail, nous avons proposé deux nouvelles méthodes de gestion en temps réel de la consommation:

- La première méthode est basée sur un système de régulation adaptative des chauffages et des climatisations
- La deuxième méthode sera appliquée à un système intelligent de délestage en douceur des cuisinières.

Ces méthodes sont valables pour une durée de quelques secondes à quelques heures. Le



dispositif proposé au niveau local doit assurer le confort des occupants et tout en respectant une contrainte de puissance maximale autorisée qui peut se présenter sous la forme d'un signal tarifaire envoyé par le commercialisateur ou d'une consigne envoyée par le gestionnaire des réseaux (comme par exemple un signal de délestage pour éviter une congestion, un blackout ou pour améliorer la stabilité du réseau)

Dans cette partie nous présentons tout d'abord une nouvelle méthode de gestion des chauffages par la variation adaptative de la consigne de température des moyens de chauffage. Cette méthode est ensuite appliquée à une maison tout entière (résidentiel) et à la gestion des climatisations d'un hôtel (secteur tertiaire) par la variation adaptative de consigne de température en fonction de puissance admissible.

Une deuxième méthode originale est proposée pour la gestion des moyens de chauffage classiques (sans fil pilote), les cuisinières ou encore l'eau chaude sanitaire. Cette méthode est basée sur le délestage en fonction de la courbe de protection ou la courbe de puissance autorisée.

## **V.2 Méthode basée sur la régulation adaptative de température**

Cette méthode proposée peut être appliquée pour les dispositifs de chauffages et les climatiseurs. Dans ce chapitre nous ne présenterons que le principe et le fonctionnement du régulateur proposé pour les radiateurs. L'application de la méthode proposée est la même pour les climatiseurs mais le fonctionnement de la climatisation doit être inversé par rapport à celui du chauffage. Par la suite la méthode est appliquée pour:

- Gestion des radiateurs d'une maison
- Gestion des climatiseurs d'une maison ou d'un hôtel.

### ***V.2.1 Principe de la méthode proposée***

L'objectif de la méthode proposée est de:

- Piloter les radiateurs pour que le confort thermique soit assuré
- Réduire la puissance appelée en limitant le pic de consommation à un niveau prédéfini.

La méthode proposée tient compte en temps réels des signaux tarifaires de commercialisateurs, des signaux envoyés par le gestionnaire de réseau, du comportement réel des charges et des conditions météorologiques. Cette méthode est appliquée pour les radiateurs pilotés par fil pilote ou par un système sans fil avec consigne variable numérique ou analogique.

La Fig. V-2 présente le principe de régulation proposé pour les radiateurs qui ont un système de régulation de température. Le système de régulation proposé comporte deux modules : un module de régulation classique et un module adaptatif.

- **Module classique de régulation (R0)**

Le régulateur classique fonctionne en fonction la température ambiante selon le principe de

la boucle fermée suivant:

- Mesure de la température ambiante intérieure
- Comparaison de la température mesurée avec la valeur de consigne
- Etablissement de la correction en fonction de l'écart
- Action sur le fonctionnement du radiateur.

Avec le régulateur classique le confort thermique peut être assuré mais il ne peut pas éviter les dépassements de la puissance admissible. Par cette méthode classique, il n'y a pas d'interaction entre le fonctionnement des radiateurs et les signaux du gestionnaire de réseau ou du commercialisateur d'énergie.

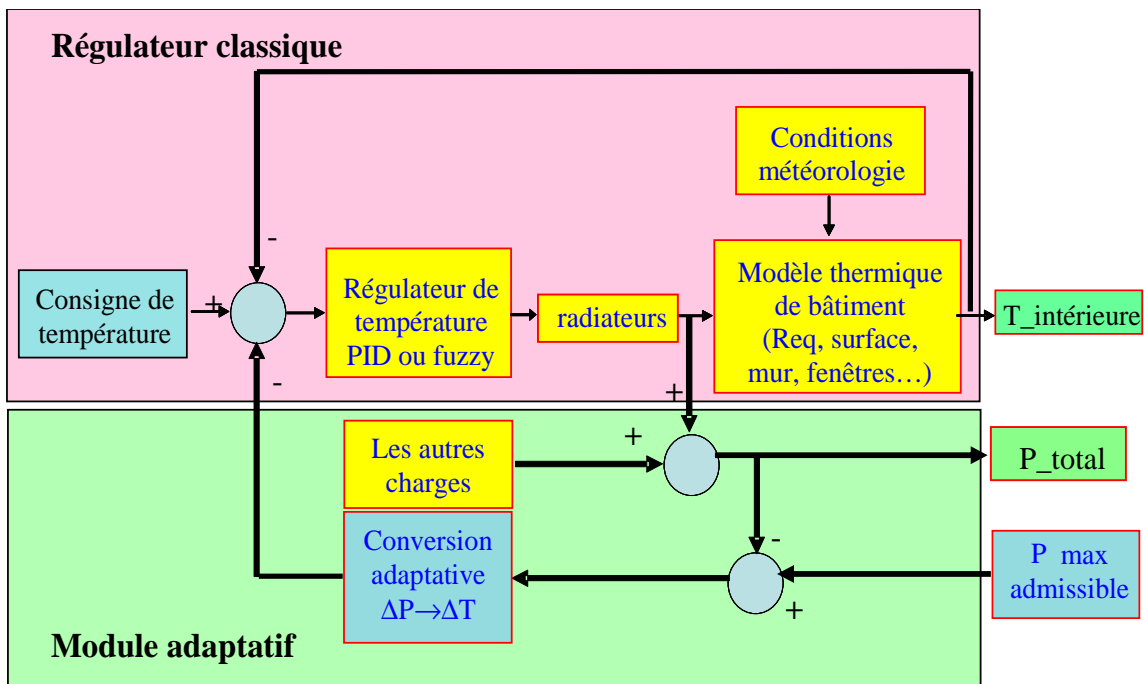


Fig. V-2: Principe du régulateur développé (M1)

- **Module de régulation adaptative proposé (R1)**

Le module adaptatif agit en fonction de l'écart entre la puissance appelée totale et la puissance admissible (ou puissance autorisée) selon le principe de la boucle fermée suivant:

- Mesure de la puissance appelée totale
- Comparaison de la puissance mesurée avec la valeur de la puissance admissible
- Conversion adaptative de l'écart de puissance vers l'écart de température
- Correction de la valeur de consigne en fonction de cet écart
- Action sur le fonctionnement du radiateur.

Ce type de régulation permet, lorsque cela est possible, d'assurer le confort thermique tout en limitant le pic de la consommation totale à un niveau prédéfini.

- **Fonctionnement de la régulation proposée**

Pour simplifier l'explication, nous supposons qu'il n'y a que deux radiateurs.

Le fonctionnement de régulation classique est présenté sur la Fig. V-3:

- Les radiateurs sont régulés pour assurer le confort thermique:

$$\text{Ex : } T^{\min} \leq T^{\text{int}} \leq T^{\max}$$

Où :

$$T^{\min} = T^{\text{cons}} - \Delta T$$

$$T^{\max} = T^{\text{cons}} + \Delta T$$

$T^{\text{cons}}$  = La température de consigne, dans ce cas elle est constante

- La puissance peut être supérieure à la puissance souscrite (ou puissance autorisée):

$$P^{\max} = P_1 + P_2 > P^{\text{souscrite}}$$

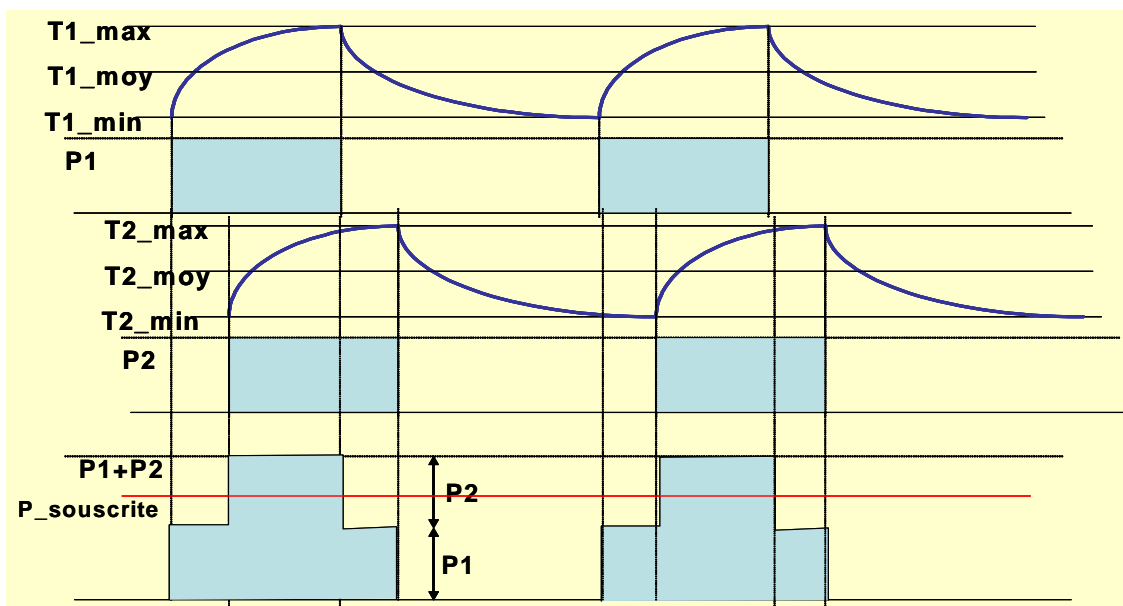


Fig. V-3: Régulation des chauffages en cas sans gestion

Le fonctionnement de la régulation proposée est présenté par la Fig. V-4:

- En cas de fonctionnement normal (sans dépassement de la puissance souscrite): le régulateur fonctionne comme un régulateur de température normal pour assurer le confort thermique :

$$T^{\min} \leq T^{\text{int}} \leq T^{\max} \text{ et } T^{\text{cons}} \text{ constante}$$

- Lorsque l'on détecte une possibilité de dépassement de la puissance souscrite, le régulateur bascule en mode de régulateur adaptatif à consigne variable afin de limiter le pic de consommation au niveau prédéfini.

La température maximale est abaissée selon une consigne variable qui dépend du niveau de dépassement détecté.

$$T^{\text{int}} \leq T^{\max} = T^{\text{cons}} + \Delta T ; \text{ où } T^{\text{cons}} \text{ devient variable ;}$$

La température intérieure est maintenue supérieure à la température minimale:

$T^{\text{int}} \geq T^{\text{min}}$  qui est constante, c'est-à-dire le confort thermique est assuré.

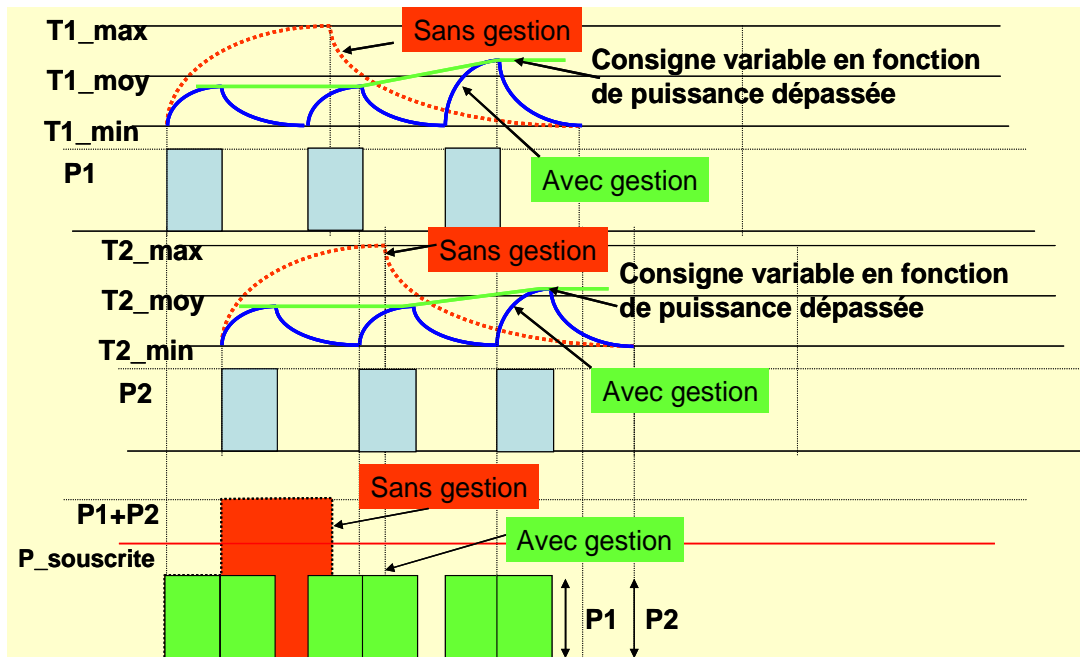


Fig. V-4: Régulation des chauffages en cas avec gestion

Sur la Fig. V-4, la puissance totale ne dépasse plus la puissance souscrite grâce à la synchronisation des radiateurs. Dans ce cas, on a :

$$P^{\text{max}} = P1 = P2 < P^{\text{souscrite}}$$

Les systèmes de gestion du confort thermique actuellement sur le marché ne tiennent pas compte de la puissance maximale consommée ni d'une limite définie par la puissance souscrite.

## V.2.2 Applications de la méthode proposée pour la gestion des radiateurs

La méthode proposée est validée pour la maison qui est présentée à la partie (IV.3.2.3) du chapitre IV. Cette maison se compose des 4 chambres à coucher, d'une salle de séjour, d'une cuisine et d'une salle de bain.

Le plan de la maison et ses caractéristiques thermiques sont présentés sur la Fig. IV-5 et dans le Tableau IV-1 et Tableau IV-2.

### V.2.2.1 Modèle complet de la maison développé sous Matlab/Simulink

A partir de l'équation de thermodynamique d'une salle de chauffage abordée à la partie (II.4.2.2) au chapitre II, le modèle thermique d'une salle sous Simulink/Matlab est représenté sur la Fig. II-9.

La Fig. V-5 présente le modèle du système des radiateurs sous Simulink.

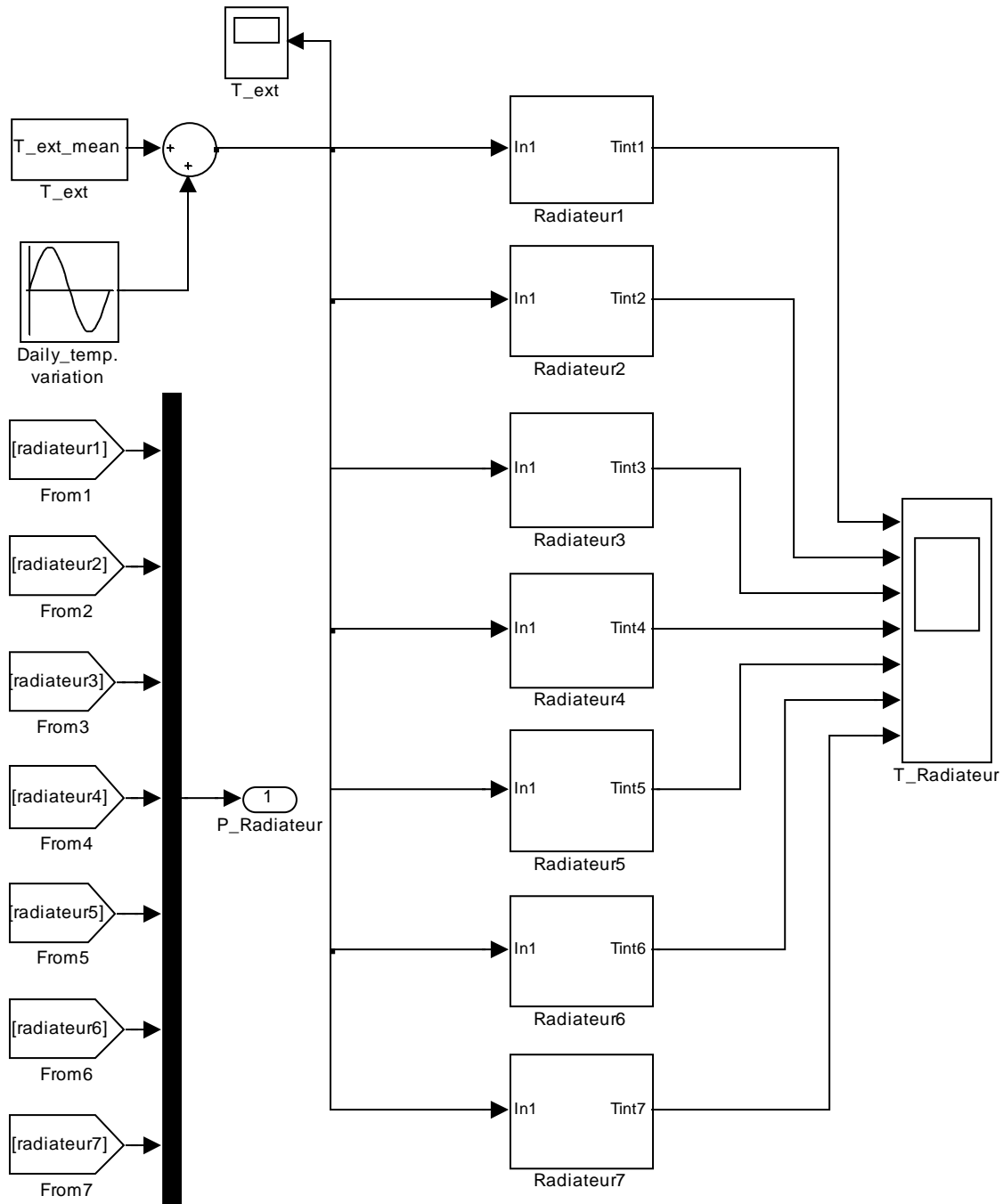


Fig. V-5: *Modèle du système des radiateurs*

Le modèle comprend les blocs principaux suivants :

- Trois blocs définis sous Matlab/Simulink pour déterminer la variation de température extérieure
- Chaque bloc du modèle du radiateur comporte 1 entrées (la température extérieure  $T^{ext}$ ) et une sortie ( $T^{int}$  : la température intérieure)
- Les bloc « From » transmettent les signaux de puissance des radiateurs au « bus selector »

Le modèle complet de la maison sous Simulink, y compris tous les usages électriques, est présenté par la Fig. V-6.

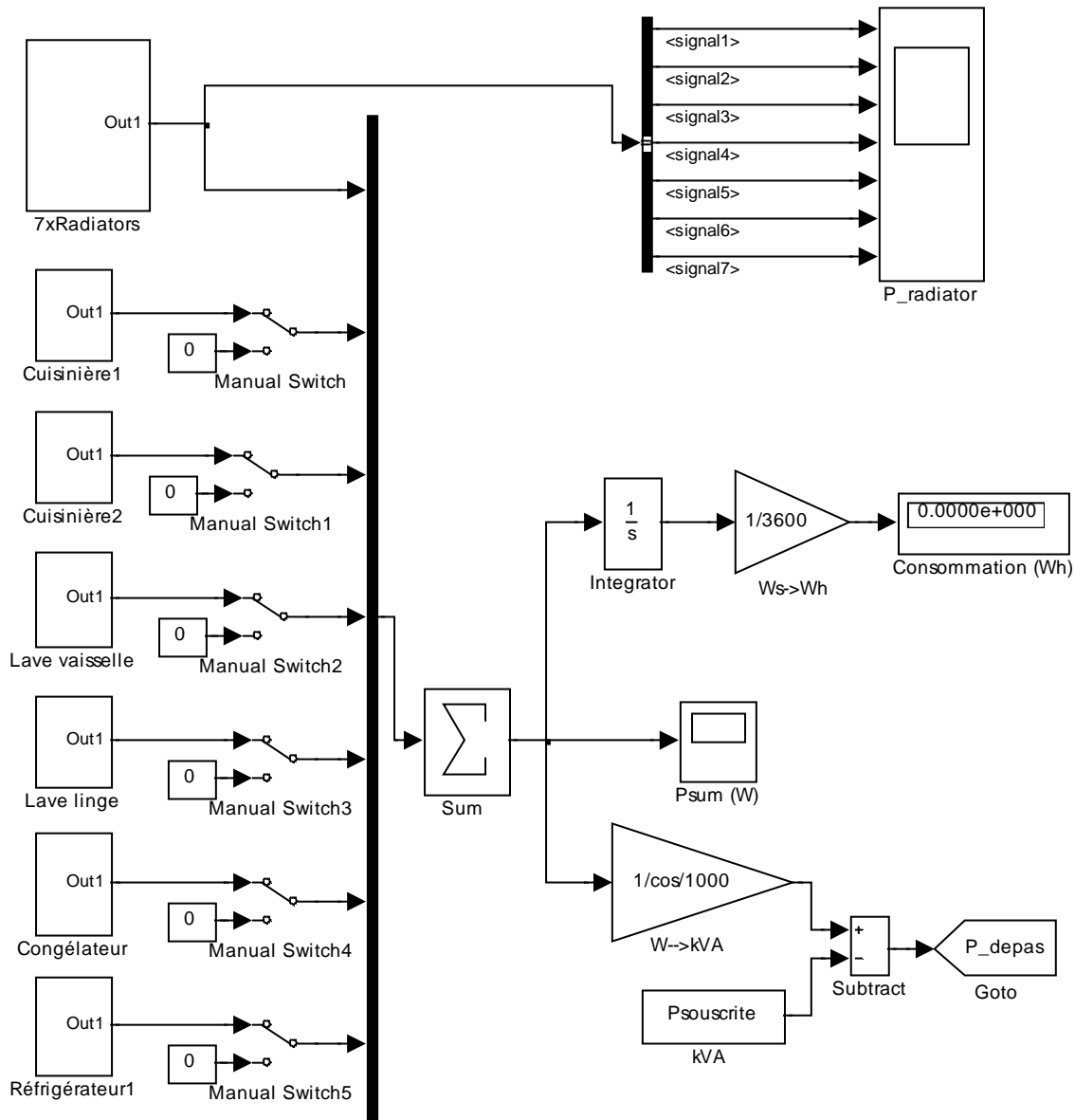


Fig. V-6: *Modèle complet de la maison*

Le modèle comprend les blocs principaux suivants :

- Les blocs du modèle des usages (7 radiateurs, 2 cuisinières, lave vaisselle, lave linge, congélateur et réfrigérateur). Chaque bloc comporte une sortie de sa puissance
- Le bloc « sum » calcule la puissance totale en W
- Les blocs (« intergrator » et « Ws→Wh ») calculent la consommation totale en Wh
- Les blocs (« W→kVA », « Psouscrite » et « Subtract ») calculent l'écart de la puissance totale et la puissance admissible
- Le bloc « Goto » transmette le signal de l'écart de la puissance aux radiateurs.

### V.2.2.2 Hypothèses

Nous supposons que la température extérieure varie pendant une journée selon une fonction sinusoïdale avec la valeur moyenne de  $-10^{\circ}\text{C}$  et une amplitude de  $5^{\circ}\text{C}$  ( $-10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ).

Les caractéristiques du fonctionnement des radiateurs et des appareils électriques dans cette maison sont identiques à ceux présentées par Tableau IV-3 et par les figures IV-7 et IV-14.

### V.2.2.3 Résultats

Dans cette partie, les résultats de simulation suivants seront présentés :

- Gestion des chauffages (avec le régulateur classique)
- Gestion des chauffages par le régulateur proposé:
  - + Sans déplacement des charges déplaçables (Lave-linge, lave vaisselle)
  - + Avec déplacement des charges déplaçables (Lave-linge, lave vaisselle)
  - + Avec un mode de confort réduit.

Puis nous présentons l'influence des différents facteurs sur le fonctionnement des chauffages

Cas initial sans gestion de charge

Dans un fonctionnement sans gestion de charge, nous supposons que le lave-vaisselle est mis en marche à 20h00 et arrêté à 20h45 et que le lave-linge est mis en marche à 18h30, arrêté à 20h10. Ces fonctionnements sont présentés sur les Fig. V-8 et Fig. V-9.

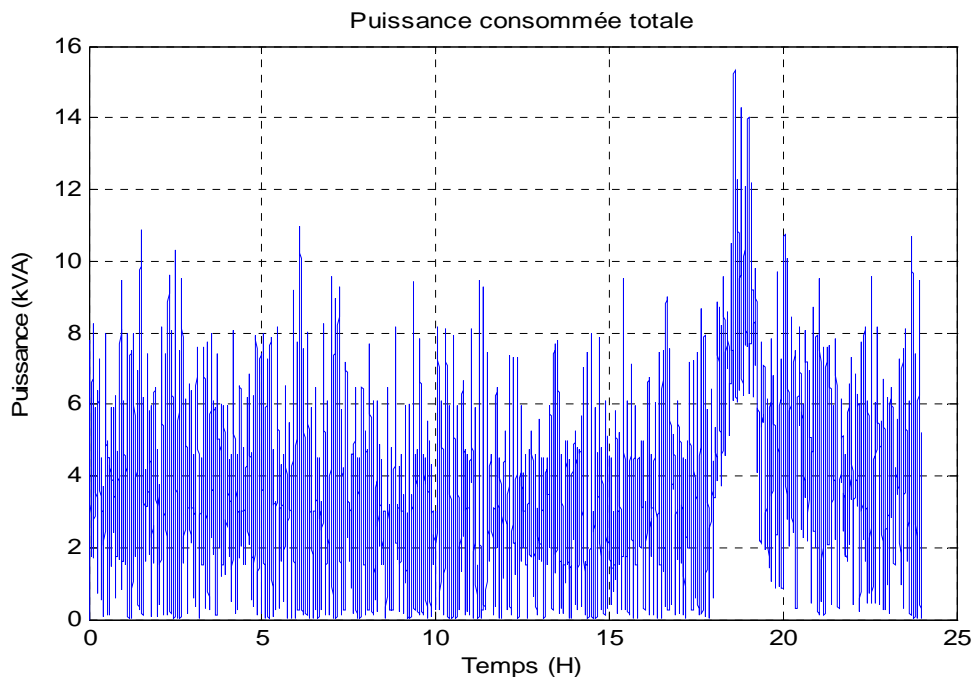


Fig. V-7: Puissance totale de consommation de la maison

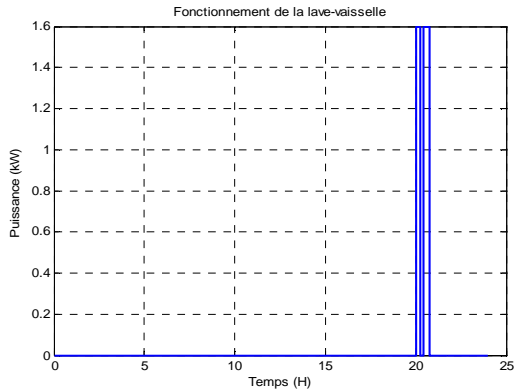


Fig. V-8: Fonctionnement de la lave vaisselle (Marche à 20h00, arrêt à 20h45)

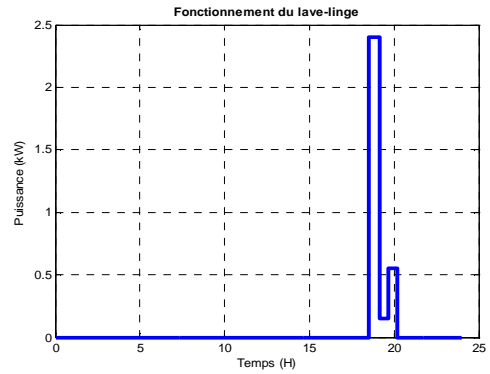


Fig. V-9: Fonctionnement du lave linge (Marche à 18h30, arrêt à 20h10)

Les résultats montrent que en l'absence de gestion de charge, la puissance maximale peut atteindre 15 kVA (Fig. V-7). Dans ce cas, le confort est assuré sans doute (Fig. V-10 et Fig. V-11). La consommation totale est de 86.607 kWh par jour. Le fonctionnement du radiateur No.1 est présenté sur les figures Fig. V-12 et Fig. V-13

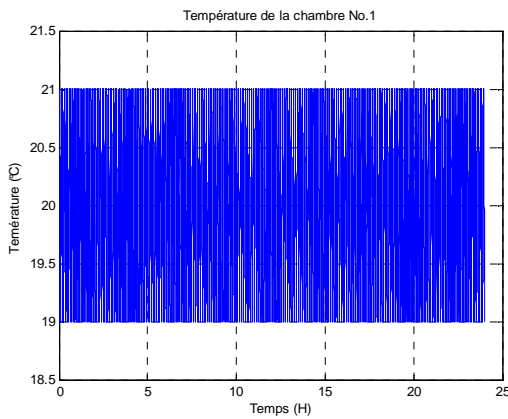


Fig. V-10: Température de la chambre No. 1

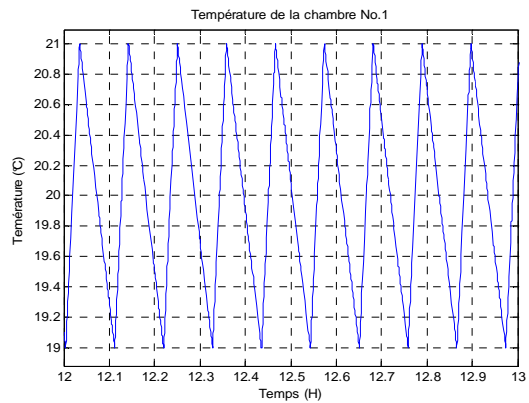


Fig. V-11: Température de la chambre No. 1 (Zoom)

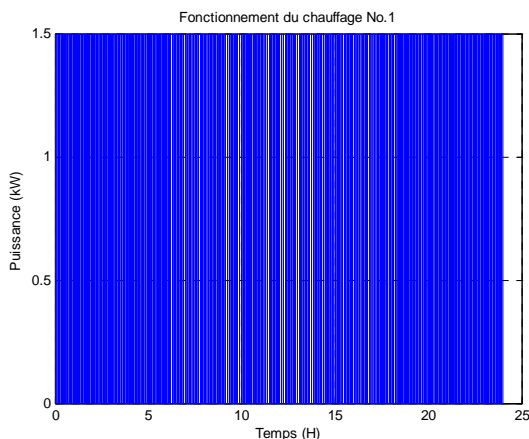


Fig. V-12: Fonctionnement du chauffage No. 1

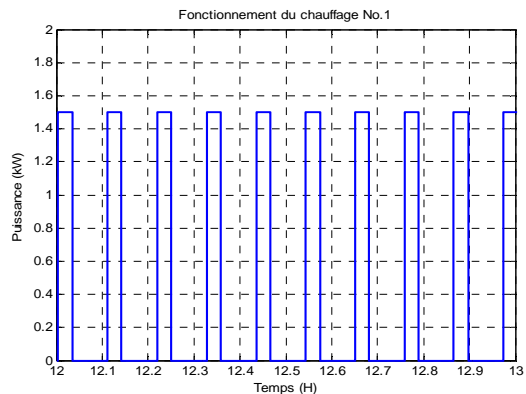


Fig. V-13: Fonctionnement du chauffage No. 1 (Zoom)

### V.2.2.3.1 Gestion des chauffage par le régulateur adaptatif proposé

#### a) Gestion sans déplacement de consommation



Dans ce cas, nous supposons que le lave vaisselle et le lave ligne sont fonctionnent comme dans le cas précédent. La puissance admissible est fixée de 9 kVA.

Avec la méthode de gestion des chauffages proposée, la puissance maximale totale de la maison ne dépasse jamais de 9 kVA (Fig. V-14). Mais dans ce cas, le confort n'est pas assuré (Fig. V-15 et Fig. V-16). La température minimale est inférieure à 19°C pendant 50 minutes et elle peut atteint à 15°C pendant quelques minutes. La consommation totale est de 86.320 kWh par jour.

Pour améliorer cette situation, la stratégie de gestion des charges par la méthode proposée est couplée avec un déplacement des charges.

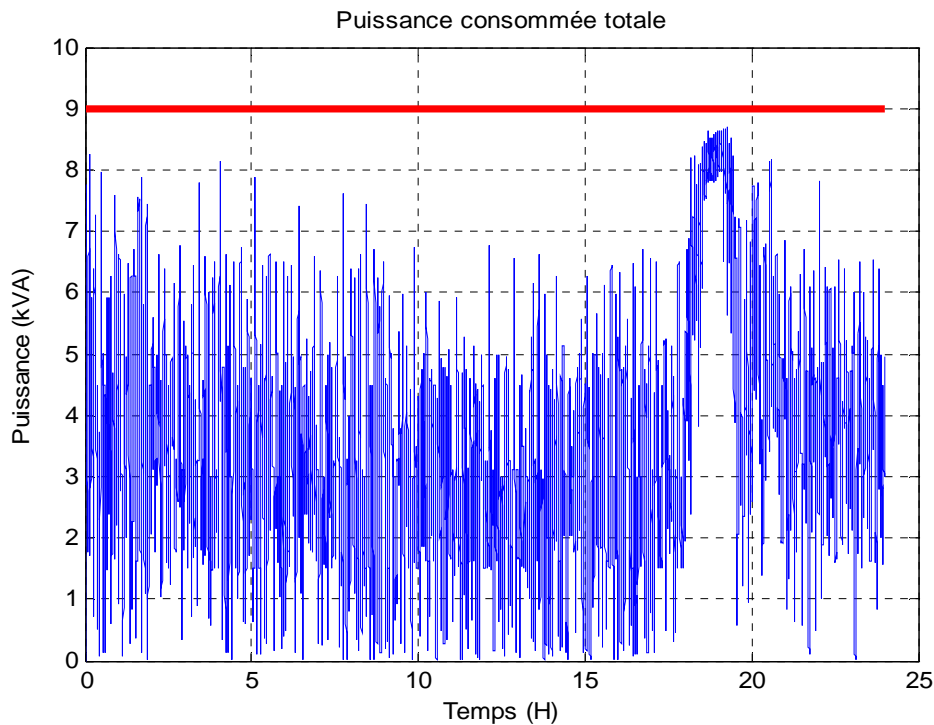


Fig. V-14: Puissance totale de consommation de la maison

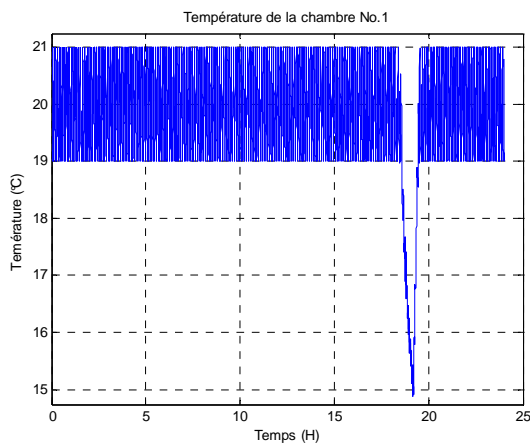


Fig. V-15: Température de la chambre No. 1

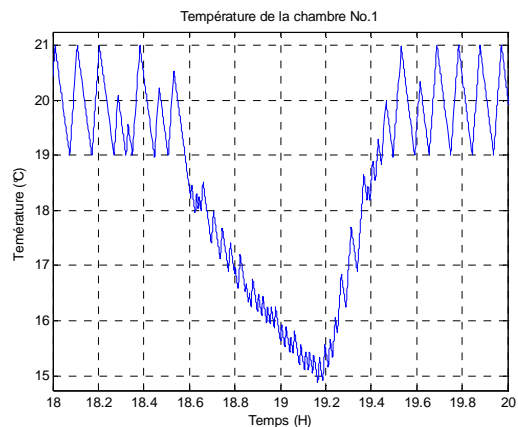


Fig. V-16: Température de la chambre 1 (zoom)

b) Avec la stratégie de déplacement de la consommation vers les heures creuses

Pour réduire le dépassement de puissance à l'heure de pointe, nous présentons une stratégie de déplacement de la consommation vers les heures creuses. Dans ce cas, nous supposons que le lave-vaisselle est mis en marche à 22h30 et arrêté à 23h15. Le lave-linge est mis en marche à 3h30 et arrêté à 5h10. La puissance admissible est fixée à 9kVA.

Dans ce cas, la puissance totale de la maison ne dépasse jamais de 9kVA (Fig. V-17) mais le confort est assuré (Fig. V-18 et Fig. V-19). La consommation totale est de 86.578 kWh par jour.

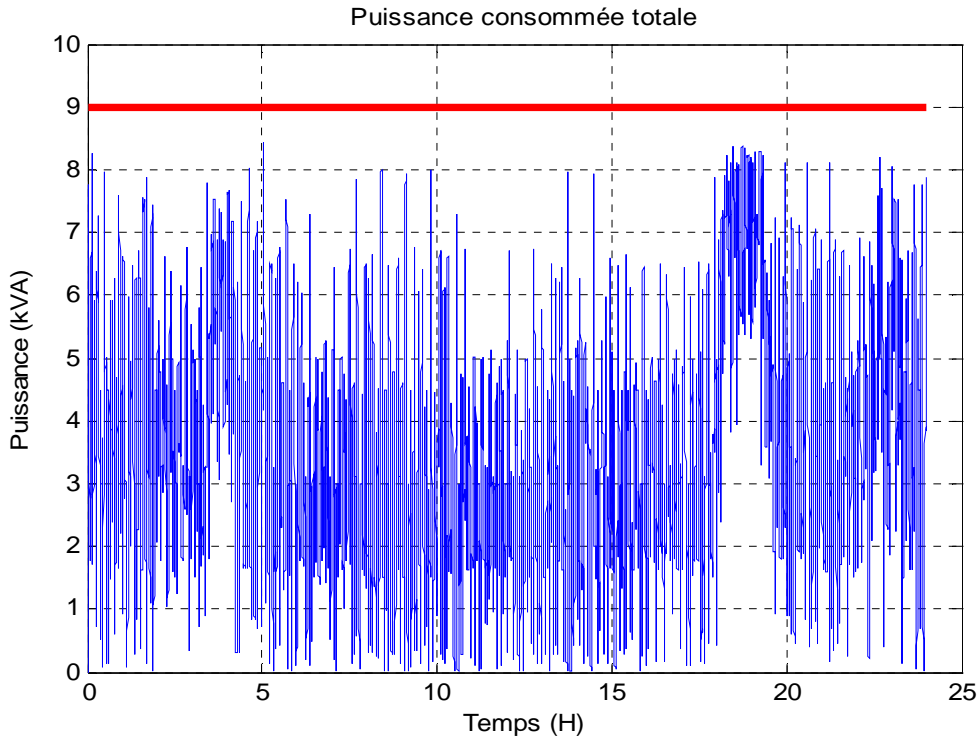


Fig. V-17: Puissance totale de consommation de la maison

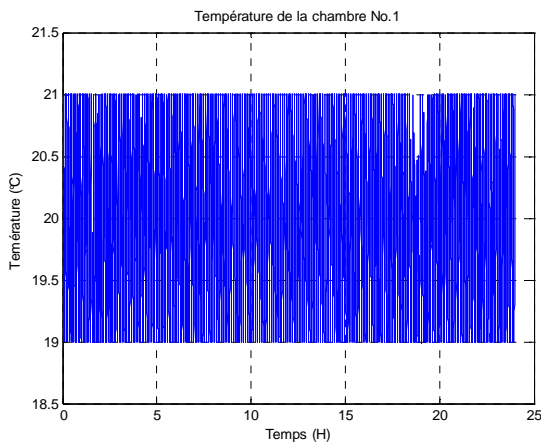


Fig. V-18: Température de la chambre No. 1

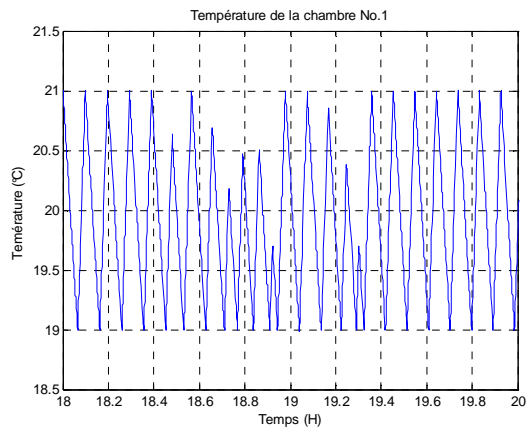


Fig. V-19: Température de la chambre No. 1 (zoom)

c) Avec application du mode de confort réduit

Pour réduire la consommation, nous appliquons une stratégie de confort réduit. En France, le confort réduit est appliqué en laissant, en cas d'absence des personnes dans les

maisons (ex: de 9h00 à 17h00), diminuer la température de 3°C en dessous de la température de consigne. Dans notre cas, si la température normale est fixée à 20°C, la température du mode de confort réduit est de 17°C. La simulation relative à ce cas de fonctionnement sera effectuée avec les données du paragraphe b ci-dessus.

Avec la méthode proposée pour la gestion des chauffages, la puissance maximale totale de la maison ne dépasse jamais de 9 kVA (Fig. V-20). Le confort réduit est assuré (Fig.V-21). La Fig. V-22 présente le fonctionnement du radiateur No. 1. La consommation totale est de 84.097 kWh par jour.

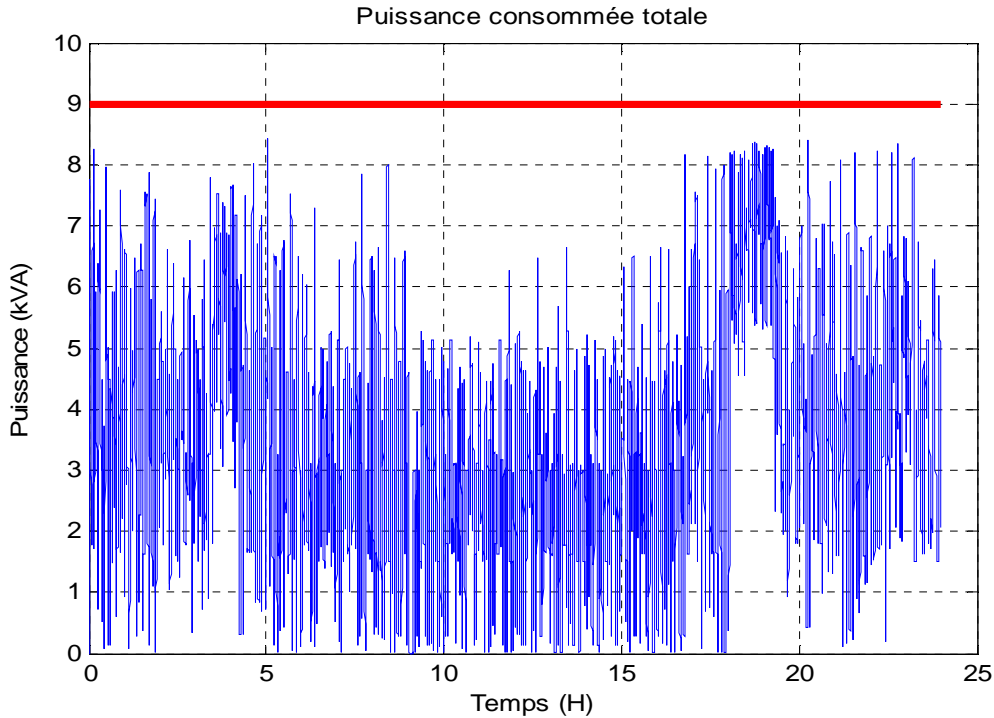


Fig. V-20: Puissance totale de consommation de la maison

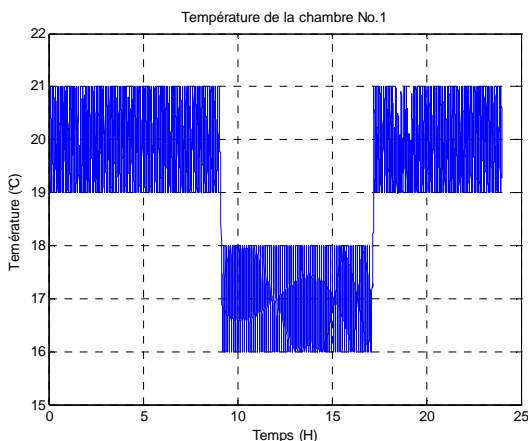


Fig.V-21: Température de la chambre No. 1

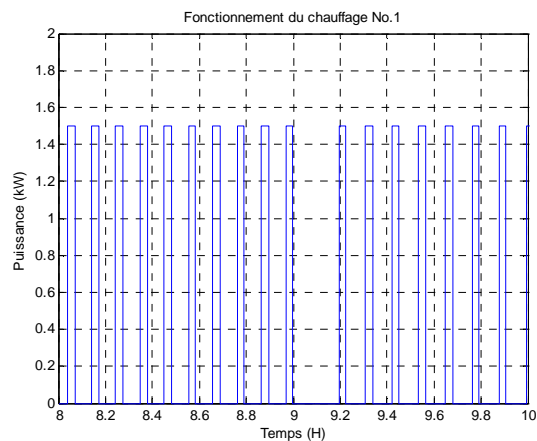


Fig. V-22: Fonctionnement du chauffage No.1 (zoom)

La comparaison des différentes stratégies de gestion des charges est présentée dans le Tableau V-1.

Méthode Gestion	Tempé. Ext. (°C)	Puissance admissible (kVA)	Déplacement	Confort réduit	Energie (kWh)	Economie (%)	Condition Confort
Sans Gestion (R0)	-10±5	15	Non	Non	86.607	0.00%	Oui
Gestion (R1)	-10±5	9	Non	Non	86.320		Non
Gestion (R1)	-10±5	9	Oui	Non	86.578	0.10%	Oui
Gestion (R1)	-10±5	9	Oui	Oui	84.097	-2.81%	Oui

Tableau V-1: Comparaison des différents cas de gestion

On constate que en utilisant la méthode de régulation adaptative couplée avec le déplacement de charge, la puissance maximale totale peut être réduite jusqu'à 9 kVA au lieu de 15 kVA avec le confort assuré. Pour réduire la consommation, il faut effectuer une stratégie supplémentaire en utilisant le mode de confort réduit. Dans cette situation ce cas, il est possible de réduire la consommation journalière de 2.8%.

#### V.2.2.3.2 Facteurs d'influence

Dans cette partie nous allons aborder, l'influence de la puissance admissible et de la température extérieure sur le confort.

##### a) Influence de la puissance admissible

Nous allons utiliser, la stratégie de déplacement de consommation avec le confort réduit présentée dans la partie précédente pour analyser l'influence de la puissance admissible (**P<sub>adm</sub>**) autorisée sur le confort.

##### Sans gestion de chauffage (chauffage avec le régulateur classique)

Nous obtenons les courbes ci-dessous (Fig. V-23 et V-24)

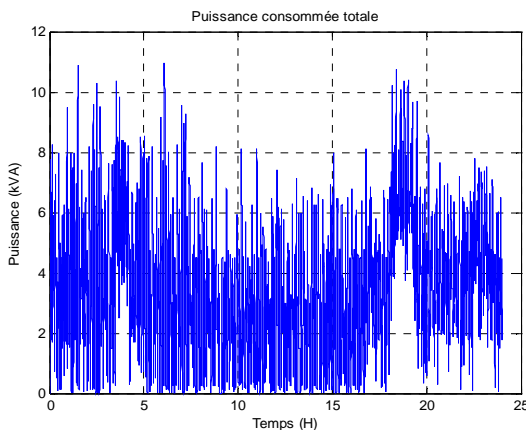


Fig. V-23: Puissance totale de la maison

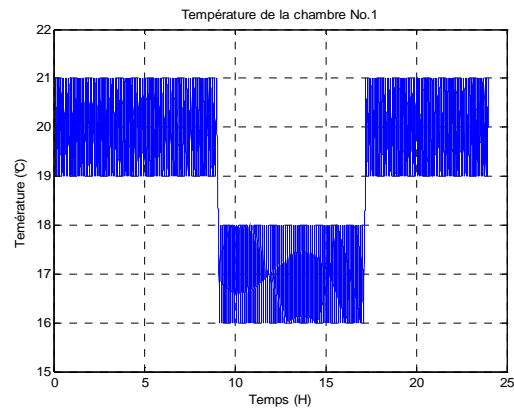


Fig. V-24: Température de la chambre No. 1

##### Gestion par le régulateur adaptatif (P<sub>adm</sub>=9kVA,Text=-10±5°C)

Les résultats indiqués sur les Fig. V-23 à Fig. V-30 montrent les comparaisons des différents niveaux de puissance admissible. On constate que la puissance peut être réduite jusqu'à 8 kVA avec le confort maintenu. Si la puissance admissible est inférieure à 8 kVA, le confort n'est plus assuré (Fig. V-30).

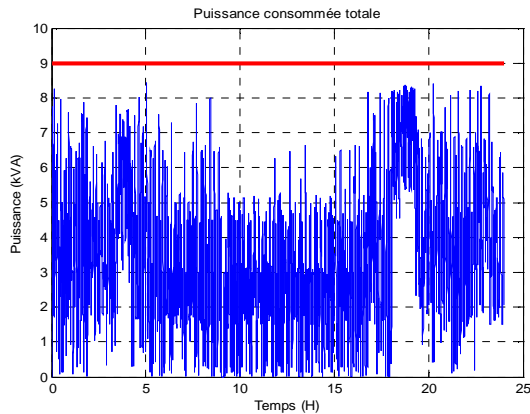


Fig. V-25: Puissance totale de la maison

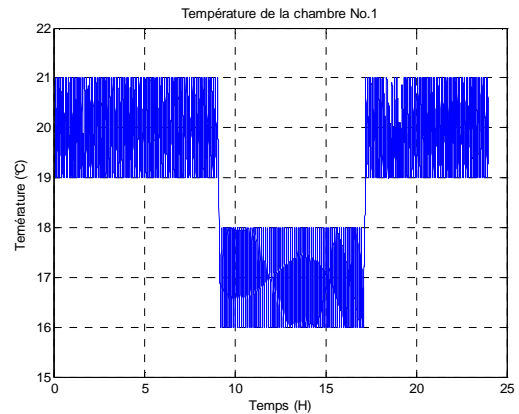


Fig. V-26: Température de la chambre No. 1

**Gestion par le régulateur adaptatif ( $P_{adm} = 8 \text{ kVA}$ ,  $T_{ext} = -10 \pm 5^\circ\text{C}$ )**

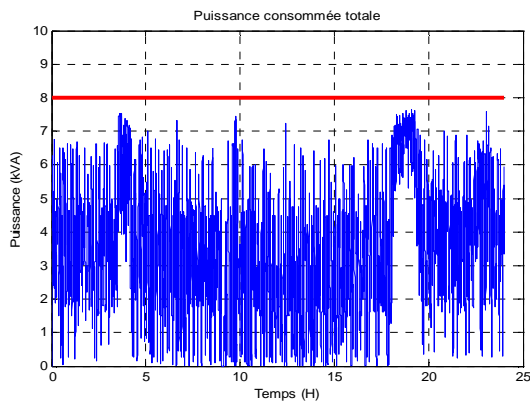


Fig. V-27: Puissance totale de la maison

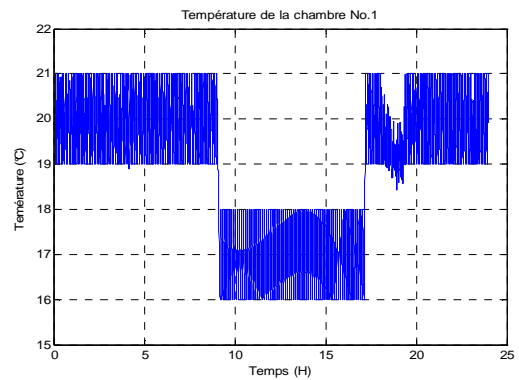


Fig. V-28: Température de la chambre No. 1

**Gestion par le régulateur adaptatif ( $P_{adm} = 7 \text{ kVA}$ ,  $T_{ext} = -10 \pm 5^\circ\text{C}$ )**

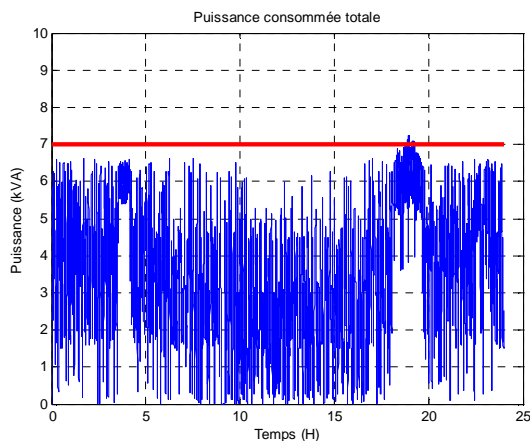


Fig. V-29: Puissance totale de la maison

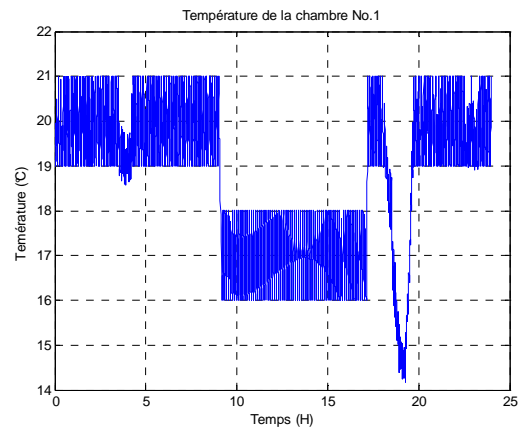


Fig. V-30: Température de la chambre No. 1

b) Influence de la température extérieure

Les Fig. V-31 à Fig. V-36 montrent les comparaisons de différents niveaux de température extérieure sur le fonctionnement des chauffages. On constate que dans tous les cas indiqués, le confort est assuré. La consommation totale est diminuée considérablement quand la

température extérieure augmente.

**Gestion par le régulateur adaptatif ( $P_{adm} = 8 \text{ kVA}$ ,  $Text = -10 \pm 5^\circ\text{C}$ )**

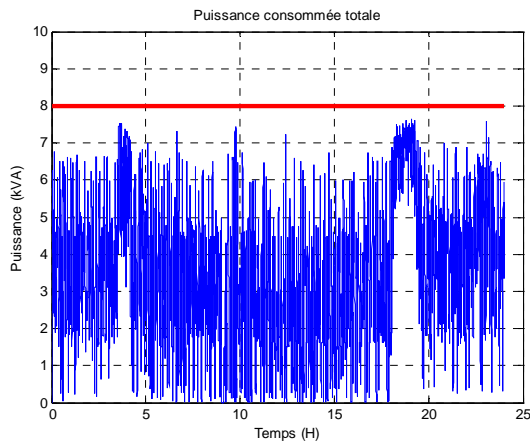


Fig. V-31: Puissance totale de la maison

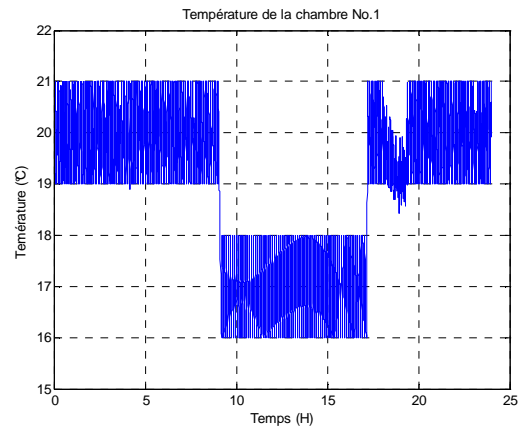


Fig. V-32: Température de la chambre No. 1

La consommation totale de la maison est de 84.004 kWh par jour.

**Gestion par le régulateur adaptatif ( $P_{adm} = 8 \text{ kVA}$ ,  $Text = -5 \pm 5^\circ\text{C}$ )**

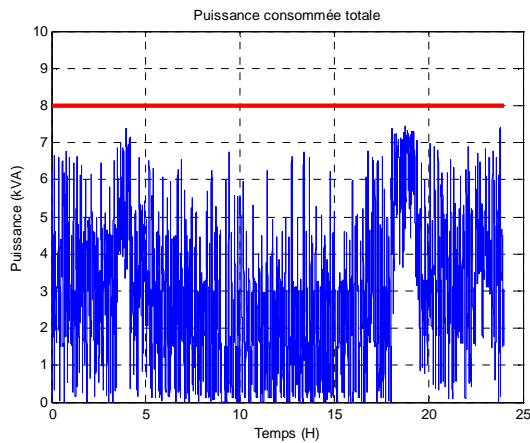


Fig. V-33: Puissance totale de la maison

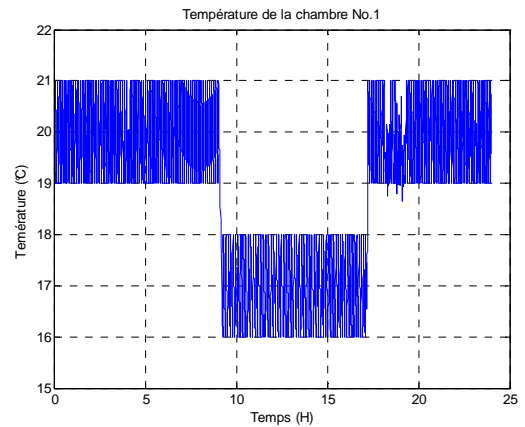


Fig. V-34: Température de la chambre No. 1

La consommation totale de la maison est de 71.388 kWh par jour.

**Gestion par le régulateur adaptatif ( $P_{adm} = 8 \text{ kVA}$ ,  $Text = 0 \pm 5^\circ\text{C}$ )**

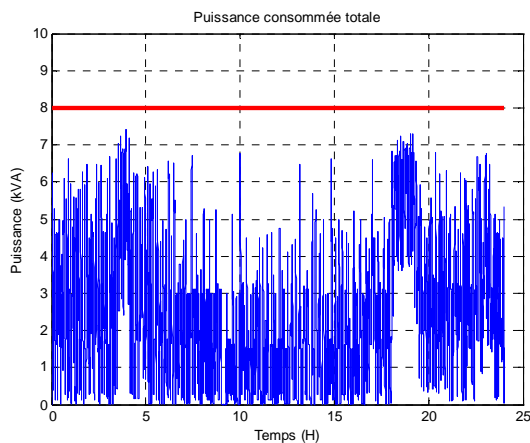


Fig. V-35: Puissance totale de la maison

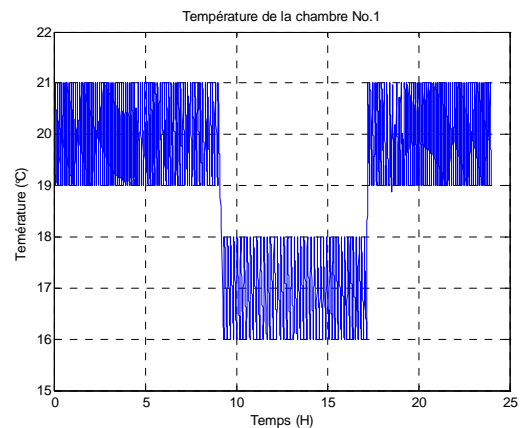


Fig. V-36: Température de la chambre No. 1

La consommation de la maison est de 58.797 kWh par jour.

La comparaison de l'influence des différentes conditions (puissance autorisée et température extérieure) sur le confort est synthétisée dans le Tableau V-2. On constate que avec la méthode proposée de gestion des chauffages:

- La puissance maximale autorisée peut être réduite jusqu'à 8 kVA tout en assurant le confort
- La consommation dépend fortement de la température extérieure. Quand la température extérieure varie autour de 0°C, la consommation peut être réduite à 30% par rapport celle à -10°C.

Méthode Gestion	Tempé. Ext. (°C)	Puissance admissible (kVA)	Puissance admissible (%)	Energie (kWh)	Facteur de réduction (%)	Condition Confort
Sans gestion (Ro)	-10±5	11.5	100,00%	84.162	0,00%	Oui
Gestion (R1)	-10±5	9	78,26%	84.097	-0,08%	Oui
Gestion (R1)	-10±5	8	69,57%	84.004	-0,19%	Oui
Gestion (R1)	-10±5	7	60,87%	83.360	-0,95%	Non
Gestion (R1)	-5±5	8	69,57%	71.388	-15,18%	Oui
Gestion (R1)	0±5	8	69,57%	58.797	-30,14%	Oui

Tableau V-2: Comparaison de l'influence des différentes conditions (Puissance admissible et Température extérieure) sur le confort

### V.2.3 Application de la méthode proposée pour la gestion des climatisations

La méthode proposée est appliquée pour la gestion des climatiseurs d'un hôtel (charge tertiaire) comportant 50 chambres identiques à celui présenté dans le chapitre précédent.

#### V.2.3.1 Modèle d'une salle conditionnée

A partir du modèle thermodynamique d'une salle conditionnée abordé à la partie (II.4.3.2) au chapitre II, le modèle thermique de cette salle est représenté sur la Fig. II-12.

Avec  $T^m$  et  $T^{int}$  sont les variables inconnues.

La méthode proposée est appliquée pour un hôtel de 50 chambres présenté au chapitre précédent. Une climatisation de 5kW est installée dans chaque chambre.

Le modèle complet de l'hôtel est développé sous Simulink et présenté sur la Fig. V-37.

Le modèle comprend les blocs principaux suivants :

- Trois blocs (« outside Air temperature  $T_o$  », « Solar radiation  $I_s$  » et « Other loads ») définis sous Matlab/Simulink pour présenter la variation de température extérieure, la variation du rayonnement solaire et la variation des autres charges de l'hôtel
- Chaque bloc du modèle de salle climatisée comporte 2 entrées (la température extérieure  $T^{ext}$ , le rayonnement solaire  $I_s$ ) et une sortie ( $I^{ac}$  : la puissance du climatiseur)
- Le bloc « sum » calcule la puissance totale de l'hôtel en W
- Les blocs (« intergrator » et « Ws→Wh ») calculent la consommation totale en Wh

- Les blocs («W→kVA », « Psouscrite » et « subtract ») calculent l'écart de la puissance totale et la puissance admissible
- Le bloc « Goto » transmette le signal de l'écart aux climatiseurs,
- Le commutateur manuel est utilisé pour choisir le régulateur classique ou le régulateur adaptatif.

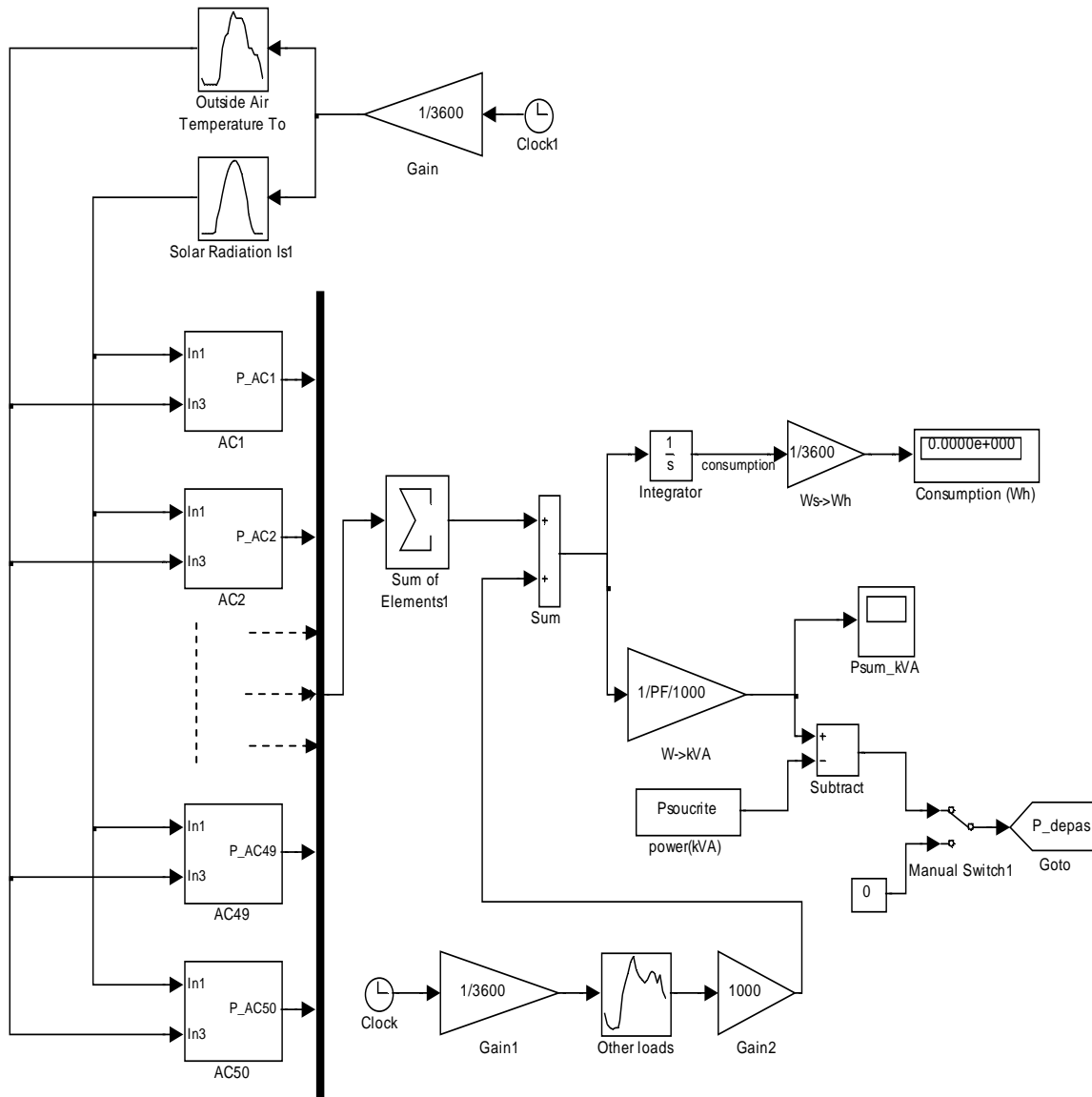


Fig. V-37: Modèle complet de l'hôtel développé sous Simulink

### V.2.3.2 Hypothèses

Nom de usage	Puissance (kW)	
50 Climatisations	50*5 kW	Pour les chambres
Autres charges	10-30 kW	Pour les autres charges (télé, frigo, four, cuisinière, lampes...)
<b>Puissance totale</b>	<b>280 kW</b>	

Tableau V-3: Usages électriques dans la maison



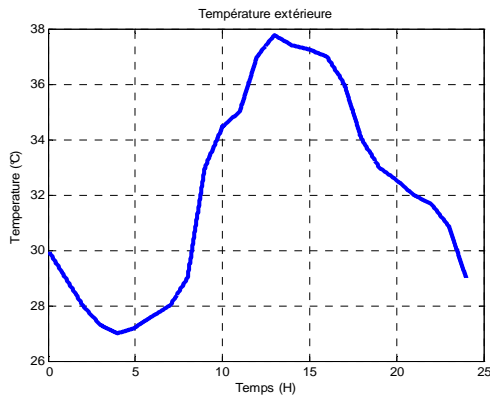


Fig. V-38: *Température extérieure*

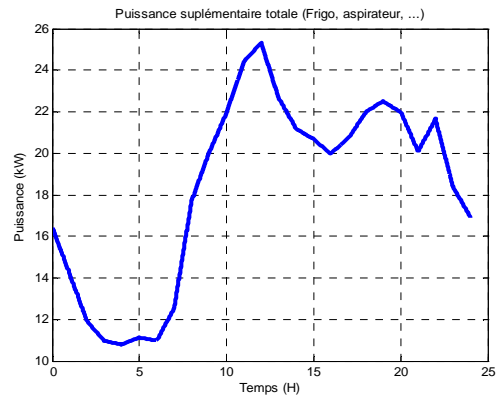


Fig. V-39: *Fonctionnement des autres charges du hôtel (lumières, cuisinière, frigo, ...)*

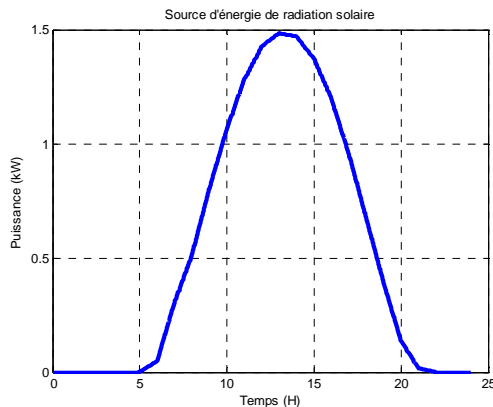


Fig. V-40: *Source d'énergie de radiation solaire*

La simulation est effectuée pour un jour en été où la température varie entre 27 et 38°C pendant la journée (Fig. IV-39). Les autres charges de l'hôtel (cuisinières, lumières, télévision, réfrigérateur, four, aspirateurs, lave linge ...) sont présentées sur la Fig. IV-40. Une source d'énergie provenant du rayonnement solaire est représentée sur la Fig. IV-41. On suppose que l'hôtel est alimenté par un transformateur d'alimentation (HTA/BT) de 250 kVA. Le facteur de puissance est de 0.9.

### V.2.3.3 Résultats

#### V.2.3.3.1 Sans gestion des climatiseurs (R0)

Les résultats obtenus montrent que en l'absence de gestion des climatiseurs, il y a une surcharge du transformateur d'alimentation, la puissance totale maximale atteint 280 kVA pendant plus d'une heure comme l'indique la Fig. V-41. La puissance totale peut dépasser la puissance du transformateur de poste source (250 kVA) pendant plus de cinq heures (de 13h00 à 18h00). Bien entendu, dans ce cas le confort est assuré. Avec la valeur de consigne de 20.1°C pour la chambre No. 1, la température varie entre 20.1±1°C (Fig. V-42 et Fig. V-43). Le fonctionnement du climatiseur No. 1 est présenté sur les Fig. V-44 et Fig. V-45. La consommation totale de l'hôtel est de 3441.9 kWh par jour.

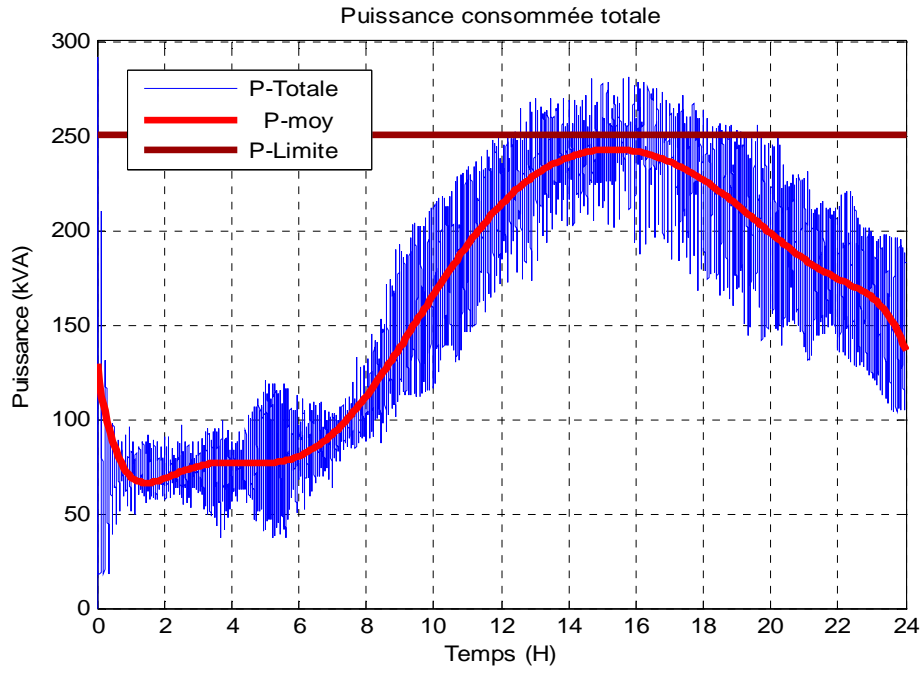


Fig. V-41: Puissance totale de l'hôtel

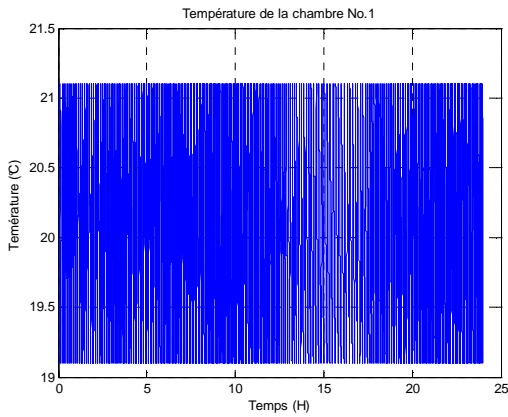


Fig. V-42: Température intérieure de la chambre No. 1

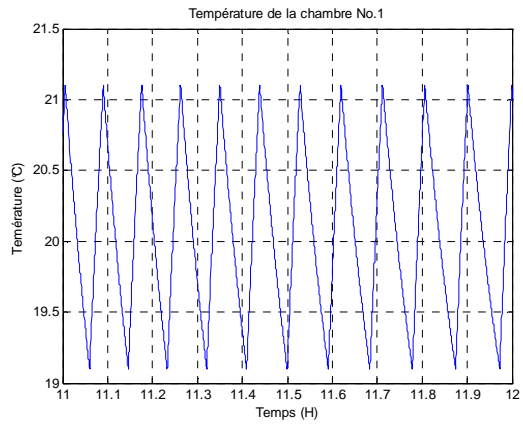


Fig. V-43: Température intérieure de la chambre No. 1 (zoom)

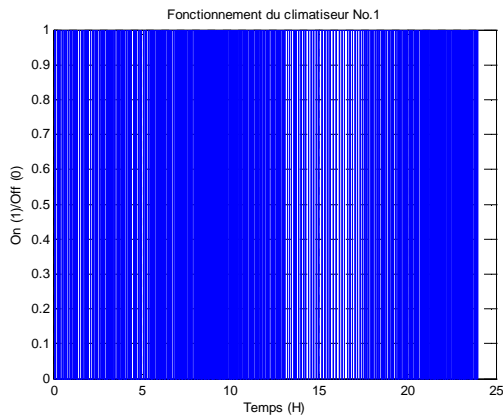


Fig. V-44: Fonctionnement du climatiseur No. 1

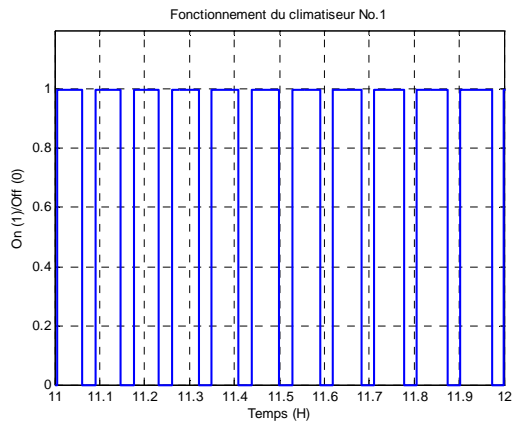


Fig. V-45: Fonctionnement du climatiseur No. 1 (Zoom)

V.2.3.3.2 Avec la gestion adaptative des climatiseurs

Avec la gestion des climatiseurs par la méthode proposée (régulation adaptative R1) la puissance totale de l'hôtel ne dépasse jamais de 250kVA (Fig. V-46). Le confort est assuré (Fig. V-47 et Fig. V-49). Les Fig. V-49 et Fig. V-50 présentent le fonctionnement du climatiseur No.1. La consommation totale de l'hôtel est de 3348.1 kWh par jour.

Dans la partie suivante, nous allons examiner l'influence de la puissance maximale autorisée et de la température extérieure sur le confort.

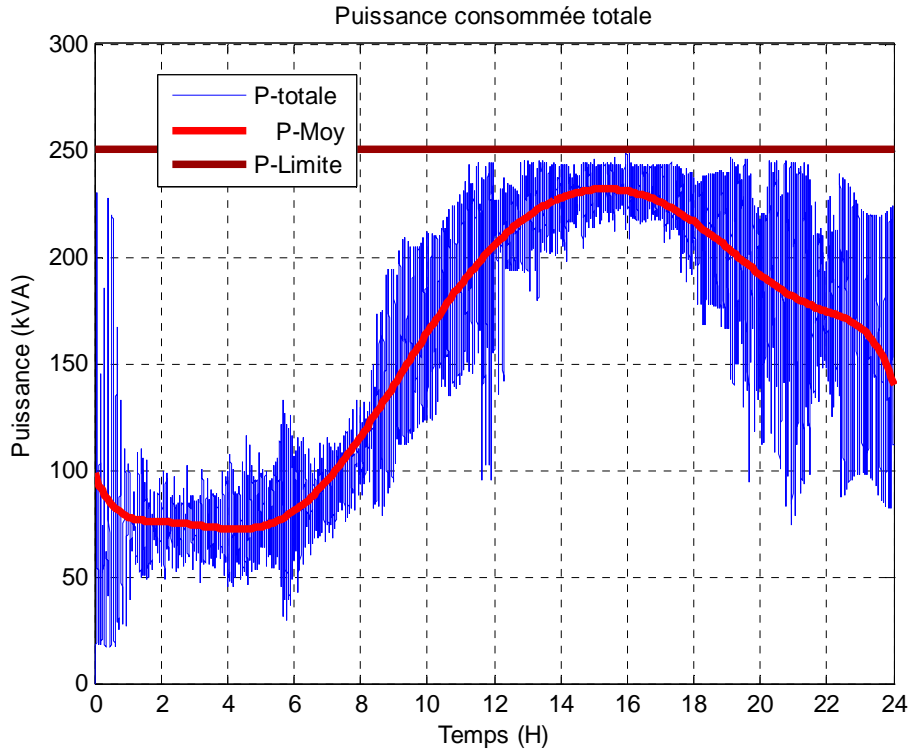


Fig. V-46: Puissance totale consommée par l'hôtel

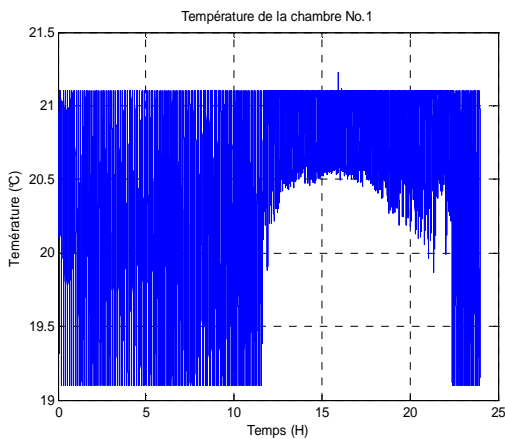


Fig. V-47: Température intérieure de la chambre No. 1

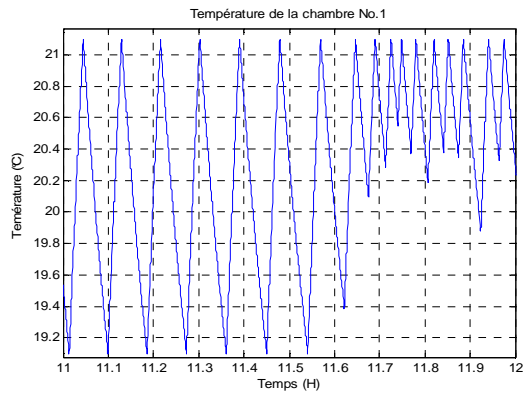


Fig. V-48: Température intérieure de la chambre No. 1 (zoom)

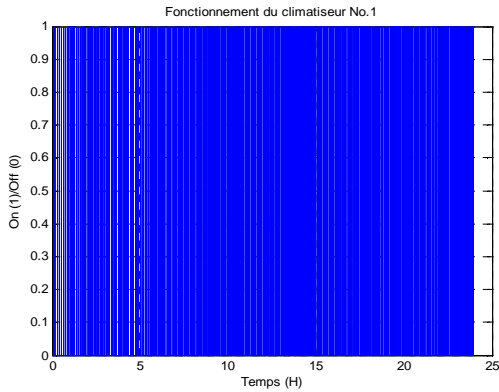


Fig. V-49: *Fonctionnement du climatiseur No. 1*

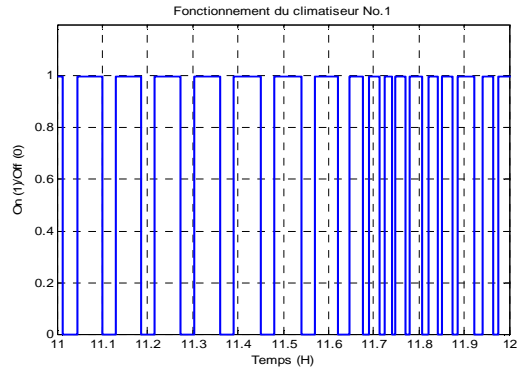


Fig. V-50: *Fonctionnement du climatiseur No. 1 (Zoom)*

V.2.3.3 Influence des différents facteurs

a) Influence de la puissance admissible

**Sans gestion des climatiseurs (R0)**

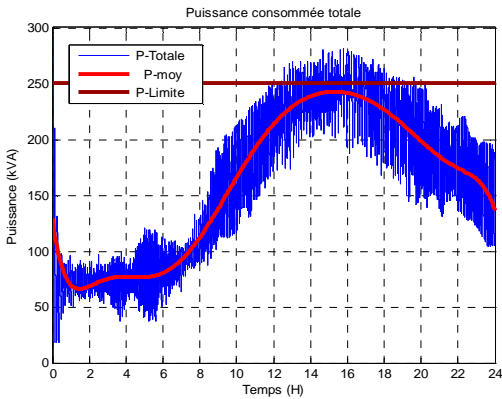


Fig. V-51: *Puissance totale consommée par l'hôtel*

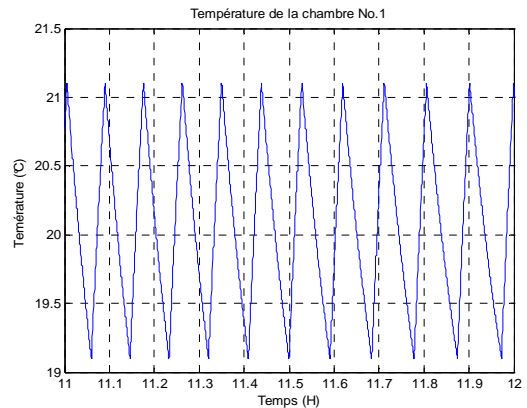


Fig. V-52: *Température intérieure de la chambre No. 1 (zoom)*

**Avec gestion des climatiseurs P adm=240 kVA (R1)**

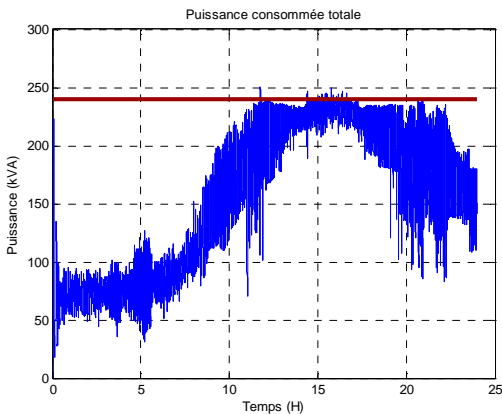


Fig. V-53: *Puissance totale consommée par l'hôtel*

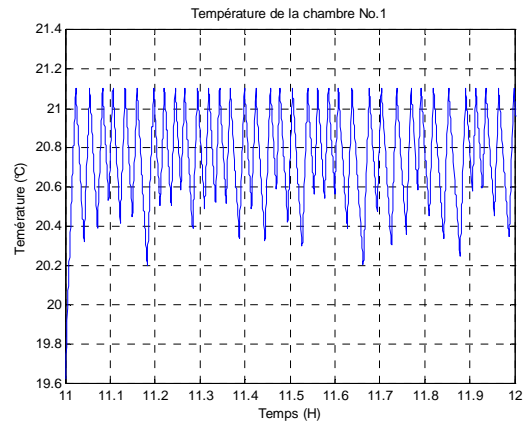


Fig. V-54: *Température intérieure de la chambre No.1 (zoom)*

Dans ce cas, on suppose que la puissance autorisée est de 240kVA, Les Fig. V-53 et Fig. V-54 présentent la puissance totale consommée par l'hôtel et la température intérieure de la

chambre No.1. Le confort est assuré. La consommation totale de l'hôtel est de 3335.9 kWh par jour.

**Avec gestion des climatiseurs P adm=230 kVA**

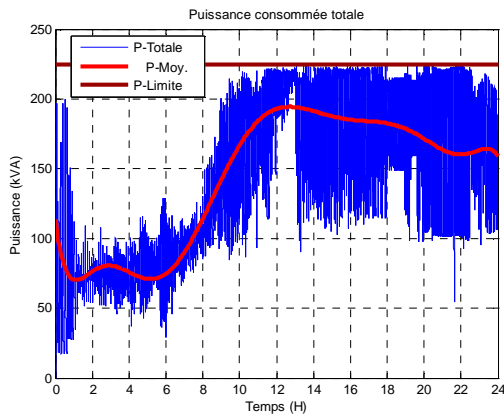


Fig. V-55: Puissance totale consommée par l'hôtel

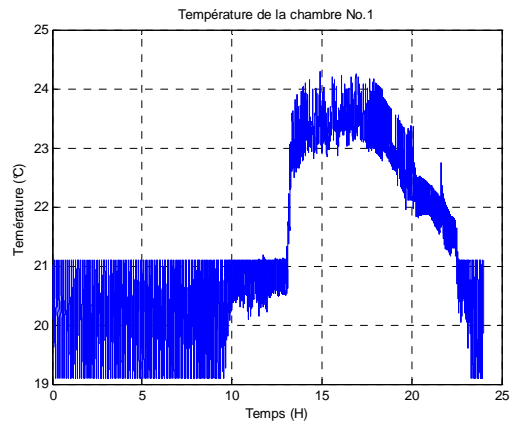


Fig. V-56: Température intérieure de la chambre No. 1

Les Fig. V-55 et Fig. V-56 présentent la puissance totale de l'hôtel et de la température intérieure de la chambre No. 1. Avec la puissance autorisée de 225 kVA, le confort n'est pas assuré. Ce cas peut être appliqué à la demande en urgence du gestionnaire du réseau. La consommation totale de l'hôtel est de 3068.3 kWh par jour.

b) Influence de température extérieure

**Avec gestion des climatiseur P adm=250 kVA, Text comprise entre 27 °et 38°C**

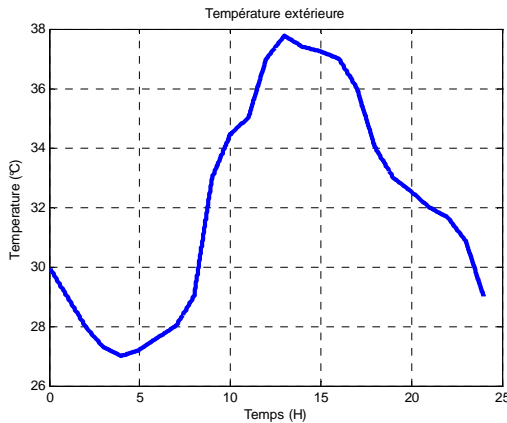


Fig. V-57: Température extérieure

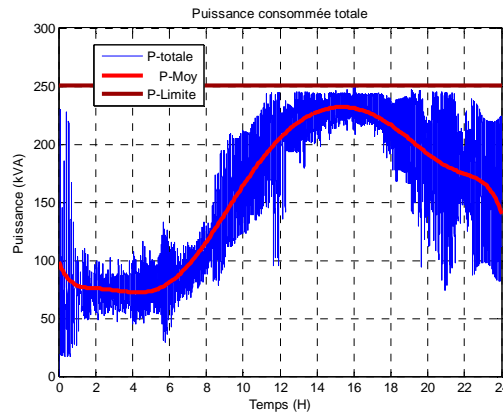


Fig.V-58: Puissance totale consommée par l'hôtel

Les Fig. V-57 et Fig.V-58 présentent la variation de la température extérieure et la puissance totale de l'hôtel. Comme le cas déjà présenté, le confort est assuré.

**Avec gestion des climatiseur (P adm=250 kVA, Text comprise entre 22° et 33°C**

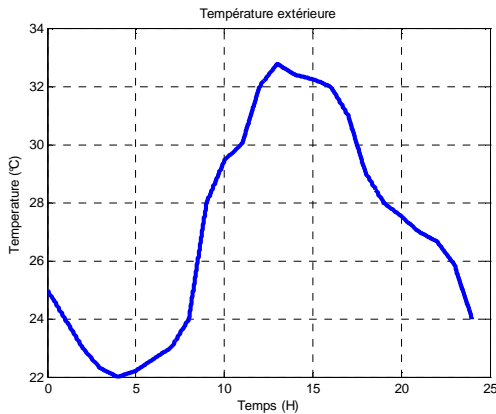


Fig. V-59: Température extérieure

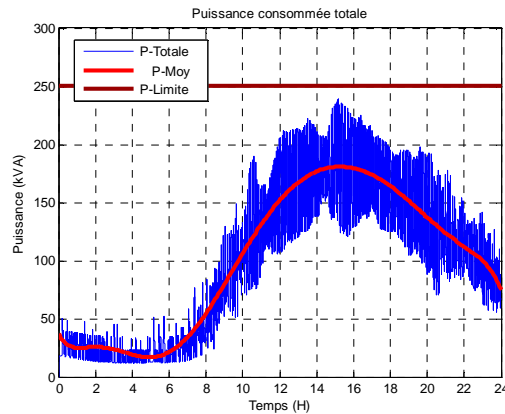


Fig. V-60: Puissance totale consommée par l'hôtel

Les Fig. V-59 et Fig. V-60 présentent la variation de la température extérieure et la puissance totale de l'hôtel. La consommation totale de l'hôtel est de 2149.5 kWh par jour. Pour ce cas, la puissance totale ne dépasse jamais de 250 kVA et le confort est assuré. On constate que quand la température baisse de  $-5^{\circ}\text{C}$  en moyenne, la consommation baisse considérablement.

Le Tableau V-4 présente une comparaison de l'influence des différentes conditions (Puissance admissible et Température extérieure) sur le confort et la consommation. On constate que :

- Dans une condition extrême (température extérieure très élevée) la puissance autorisée peut être réduite jusqu'à 240 kVA en assurant le confort
- Quand la température extérieure baisse, la consommation diminue considérablement.

Méthode Gestion	Tempé. Ext. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Puissance admissible (kVA)	Puissance admissible (%)	Energie (kWh)	Facteur de réduction (%)	Condition Confort
Sans gestion (Ro)	27→38	280	100.00%	3441.9	0.00%	Oui
Gestion (R1)	27→38	250	89.29%	3348.1	-2.73%	Oui
Gestion (R1)	27→38	240	85.71%	3335.9	-3.08%	Oui
Gestion (R1)	27→38	225	80.36%	3068.3	-10.85%	Non
Gestion (R1)	22→33	250	89.29%	2149.5	-37.55%	Oui

Tableau V-4: Comparaison des différentes conditions: Puissance admissible et Température

### V.3 Méthode basée sur le délestage en fonction de la courbe de protection

#### V.3.1 Principe de la méthode

- **Les appareils concernés:**

Cette méthode est appliquée pour les cuisinières électriques, les chauffe-eau, les radiateurs électriques sans régulation ou ceux non dotés de fil pilote comme par exemple les convecteurs dont la régulation est assurée par un bilame.

- **Objectif de la méthode**

L'objectif de cette méthode est de :

- Délester l'appareil afin d'éviter l'ouverture du disjoncteur lorsque il y a un dépassement de la puissance admissible et le rebrancher ensuite
- Maintenir la puissance moyenne totale des appareils à la valeur la plus grande possible (ex : égale à la puissance du contrat) afin d'assurer le meilleur confort possible.

Nous utiliserons dans ce but le coefficient de fonctionnement  $\alpha$  de l'appareil qui sera déterminé automatiquement en fonction du dépassement de la puissance.

Le coefficient  $\alpha$  est le rapport entre la durée de fonctionnement du radiateur et le cycle étant la période qui s'écoule entre deux démarrages successifs ou deux arrêts successifs du radiateur. Le coefficient est défini :

- $\alpha = \Delta\tau / \tau$
- $\Delta\tau$ : Durée du fonctionnement du radiateur pendant un cycle
- $\tau$  : Durée d'un cycle

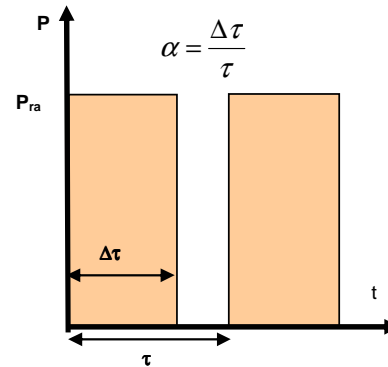


Fig. V-61: Coefficient de fonctionnement du radiateur

• **Principe de la méthode**

Un disjoncteur est un interrupteur capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans des conditions normales et anormales.

Il assure la protection du matériel et des personnes. Les disjoncteurs assurant la protection du matériel sont caractérisés par leur courbe de déclenchement Fig. V-62 :

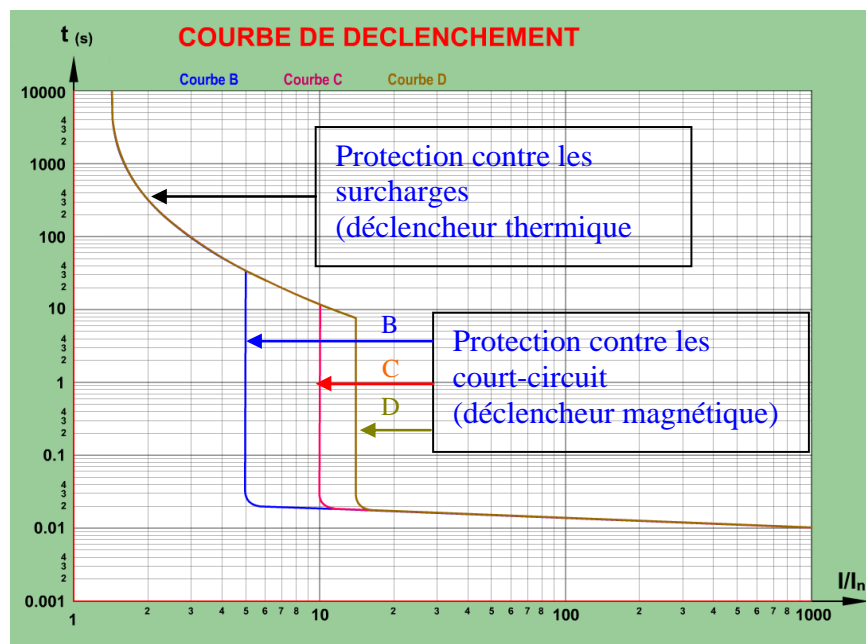


Fig. V-62: Courbe déclenchement du disjoncteur

- La protection contre les surcharges est assurée par un élément thermo-sensible, le bilame. En cas de surcharge, la déformation du bilame provoque le déclenchement du disjoncteur
- La protection contre les court-circuits est assurée par un circuit magnétique. En cas de court-circuit, le courant traversant le solénoïde crée un champ magnétique qui expulse le plongeur contre le contact mobile.

Les normes définissent 5 types de courbes de déclenchement : B, C, D, Z, et MA en fonction de la protection contre les court-circuits.

Nous nous intéressons à la protection de surcharge du disjoncteur. La courbe de déclenchement (ex : DB90 de Schneider Electric) Fig. V-65 montre qu'une consommation supérieure à 2 fois la puissance nominale nécessite de délester dans les 10 s pour éviter l'ouverture du disjoncteur. Par contre, une surconsommation de 5 ou 10 % peut être supportée pendant plusieurs minutes.

Le principe de la méthode du délestage en fonction de la courbe de protection est présenté sur les Fig. V-63 et Fig. V-64.

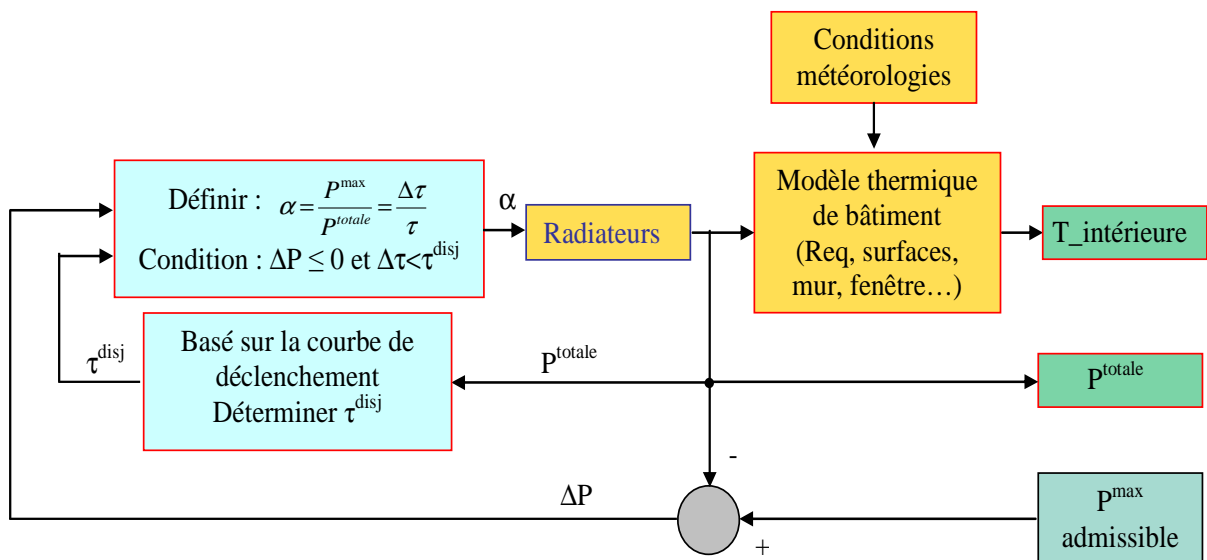


Fig. V-63: Principe de la méthode développée

Avec

- $\alpha = \frac{\Delta\tau}{\tau}$  : Coefficient de fonctionnement  $\alpha$  du radiateur (ou cuisinière)
- $\Delta\tau$  : Durée de l'opération du radiateur (ou cuisinière) pendant un cycle
- $\tau$  : Durée d'un cycle
- $\tau^{\text{disj}}$  : Temps de délestage du disjoncteur en fonction de la courbe de déclenchement et de la puissance totale  $P^{\text{totale}}$
- $\Delta P$  : Puissance de dépassement
- $P^{\text{max}}$  : Puissance maximale admissible
- $P^{\text{totale}}$  : Puissance totale des radiateurs (ou cuisinière...)

L'algorithme suit le principe suivant :



- Mesurer la puissance totale des radiateurs (ou cuisinière)
- Comparer la puissance totale mesurée avec la puissance maximale amissible
- déterminer  $\tau_{disj}$  et  $\Delta\tau$  en fonction de la puissance totale et de la courbe de déclenchement du disjoncteur
- Calculer le coefficient  $\alpha$  du radiateur (ou cuisinière)
- Actionner le fonctionnement de l'appareil.

La Fig. V-64 illustre le calcul du coefficient  $\alpha$ .

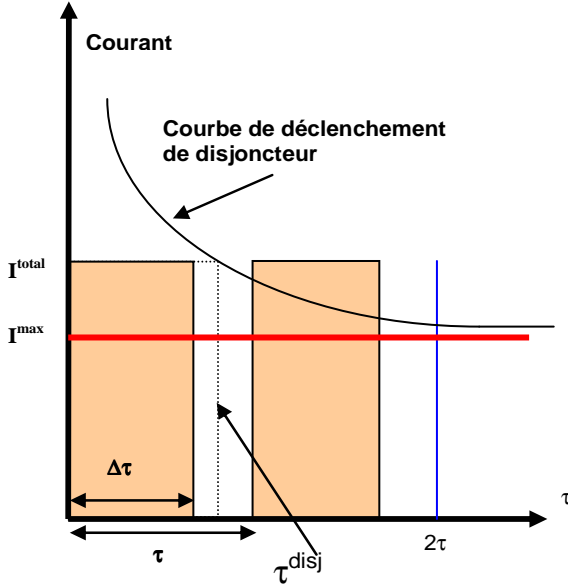


Fig. V-64: Principe de la méthode

DB90 bipolaire

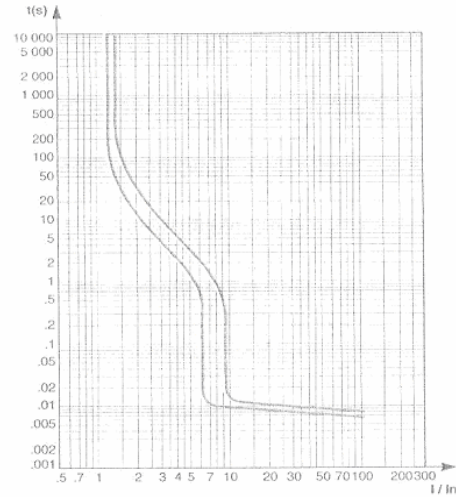


Fig. V-65: Courbe de déclenchement

Pour éviter l'ouverture du disjoncteur et assurer le meilleur confort, le coefficient  $\alpha$  est calculé tel que :

La puissance moyenne totale  $P^{moy}$  des radiateurs (ou de la cuisinière) soit égale à la puissance maximale admissible  $P^{max}$ . C'est à dire que la consommation totale (W) des radiateurs pendant  $\Delta\tau$  est égale à celle consommée par de la puissance maximale pendant l'intervalle de temps  $\tau$ .

A partir de  $P^{totale}$  et la courbe de déclenchement,  $\Delta\tau$  est choisi selon la condition :

$$\Delta\tau \leq \tau^{disj} \tag{V-1}$$

$\alpha$  est défini en respectant la condition ( $P^{moy} = P^{max}$ )

$$P^{moy} = \frac{W}{\tau} = P^{max} \tag{V-2}$$

$$W = P^{max} \times \tau = P^{totale} \times \Delta\tau \tag{V-3}$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{P^{max}}{P^{totale}} < 1 \tag{V-4}$$

On constate que :

$$\frac{I^{max}}{I^{total}} = \frac{P^{max}}{P^{totale}} = \frac{\Delta\tau}{\tau} = \alpha < 1 \tag{V-5}$$

Où :

- $W$  : Énergie consommée pendant une période  $\tau$
- $I^{\max}$  : Courant efficace correspondant à la puissance la puissance maximale admissible  $P^{\max}$
- $I^{\text{total}}$  : Courant efficace correspondant à la puissance appelée des radiateurs  $P^{\text{totale}}$

$\alpha = \frac{\Delta\tau}{\tau}$  : est déterminé automatiquement en fonction de la puissance dépassée et la

courbe de déclenchement de disjoncteur.

Le coefficient  $\alpha$  permet de maintenir la puissance moyenne totale de l'appareil à la valeur la plus grande possible pour assurer le meilleur confort et éviter l'ouverture du disjoncteur par dépassement de puissance.

La stratégie de délestage est basée sur une définition de priorité par l'utilisateur entre les différents départs de chauffage du tableau.

### V.3.2 Application

Pour valider cette méthode, nous avons choisi un cas d'application qui une «Cuisine intégrée». Cette «Cuisine intégrée» est présentée sur Fig. V-66 .

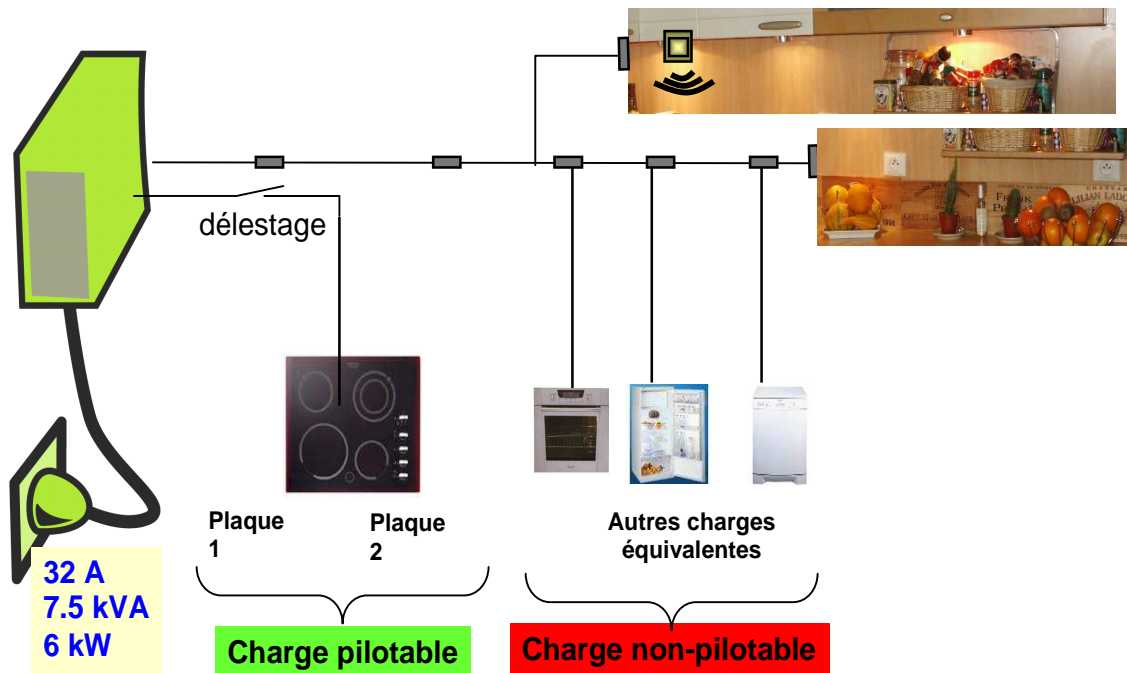


Fig. V-66: Schéma de la «Cuisine intégrée»

#### V.3.2.1 Hypothèses

On suppose que cette «Cuisine intégrée» comprend des charges pilotables (cuisinières) et non-pilotables (autres charges) dont la puissance et le fonctionnement sont présentés dans le Tableau V-5. Dans la «Cuisine intégrée», le courant est limité à 32A (équivalent à 6kW)

Scénarios :

- La simulation est effectuée pendant une durée de 16 min
- La puissance maximale admissible est de 6000 W
- Deux cuisinières (le fonctionnement de deux cuisinières est indiqué dans le Tableau V-5)
- Les autres charges sont considérées comme une charge de 3000 W constante pendant la période de simulation.

Nom de usage	Puissance (W)	Fonctionnement
1 Cuisinière électrique1	2500	Fonctionnement pendant 10 min (de 2 à 12min)
1 Cuisinière électrique2	1500	Fonctionnement pendant 10 min (de 5 à 15 min)
1 Réfrigérateur	3000	Constant
1 Congélateur		
1 Lave vaisselle		
1 Lave linge		
1 Autres (lumières, micro-onde...)		
<b>Puissance totale</b>	<b>7000</b>	

Tableau V-5: Usages électriques

### V.3.2.2 Résultats

Les résultats de simulation sont présentés sur les figures des Fig. V-67 à Fig. V-70.

#### 1. Cas sans gestion

Dans ce cas, le fonctionnement de deux cuisinières est présenté sur les figures Fig. V-68 à Fig. V-70

- La puissance totale maximale atteint 7kW (Fig. V-67), dont la puissance de dépassement est de  $\Delta P=1000W$ . Il y a un dépassement pendant une durée  $\Delta\tau = 7min$
- L'énergie consommée totale obtenue pendant la période de simulation (Fig. V-69):  $W_1=1466.7 Wh$
- On peut calculer la partie de l'énergie de dépassement :

$$\Delta W = \Delta P \frac{\Delta\tau}{3600} = 1000 \frac{7 \times 60}{3600} = 116.66 Wh$$

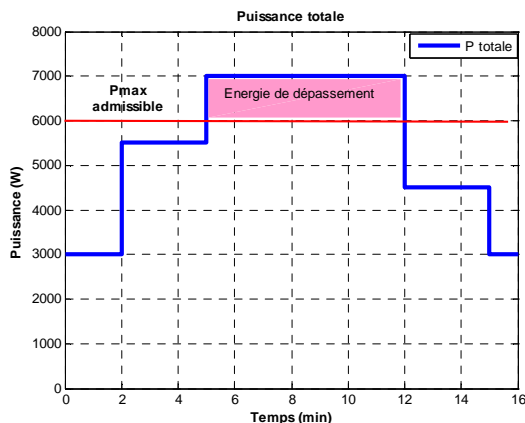


Fig. V-67: Puissance totale consommée par la «Cuisine intégrée» sans gestion

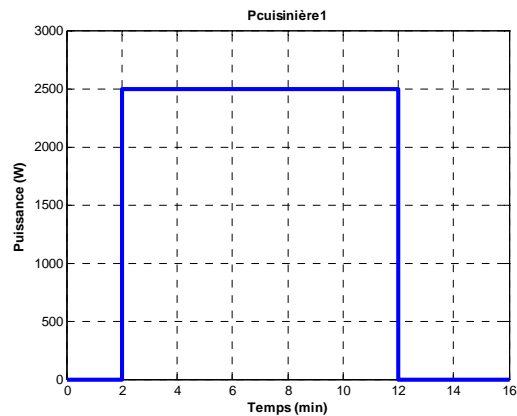


Fig. V-68: Puissance consommée par la cuisinière 1 sans gestion

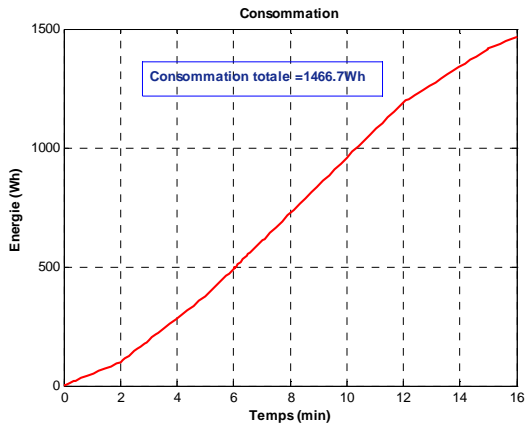


Fig. V-69: Consommation totale de la «Cuisine intégrée» sans gestion

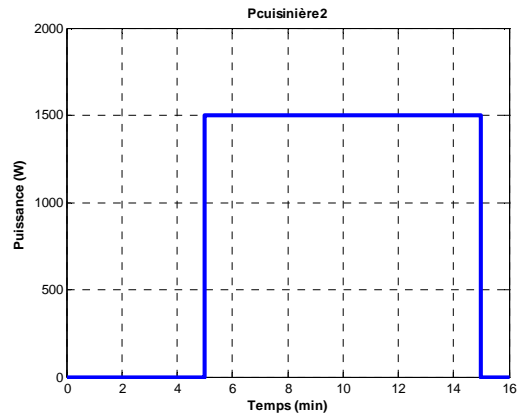


Fig. V-70: Puissance consommée par la cuisinière2 sans gestion

## 2. Cas avec gestion:

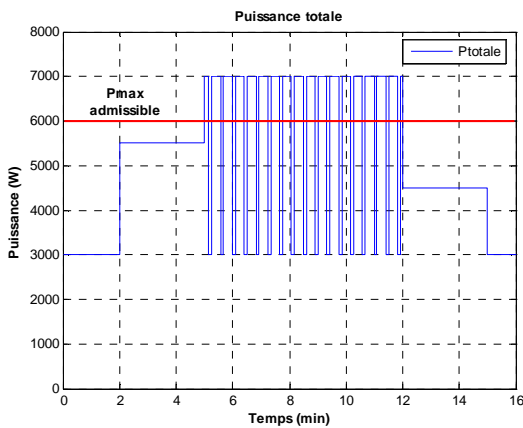


Fig. V-71: Puissance totale consommée par la «Cuisine intégrée» avec gestion

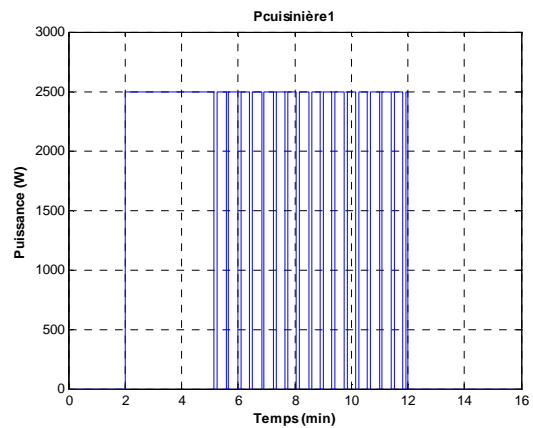


Fig. V-72: Puissance consommée par la cuisinière1 avec gestion

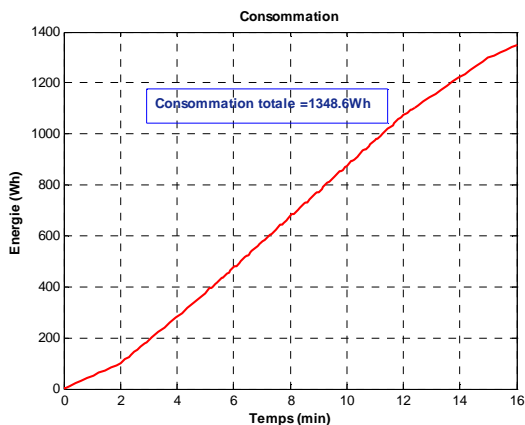


Fig. V-73: Consommation totale la «Cuisine intégrée» avec gestion

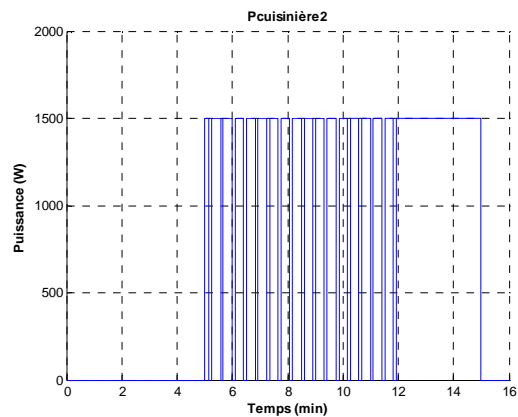


Fig. V-74: Puissance consommée par la cuisinière2 avec gestion

- La stratégie de délestage/relestage proposée est appliquée pour deux cuisinières pendant la période de dépassement afin d'éviter le déclenchement du disjoncteur ( $P^{max} = 6kW$ ). Le fonctionnement des deux cuisinières est présenté sur les figures Fig. V-72 et Fig. V-74

- La puissance totale est présentée sur la Fig. V-71. On voit que la puissance totale maximale est toujours de 7kW mais dans ce cas, la puissance moyenne totale est maintenue à 6 kW pendant la période de dépassement de la puissance grâce à l'action de la méthode de délestage/relestage proposée
- L'énergie consommée obtenue pendant la simulation (Fig. V-73) :  $W_2=1348.6\text{Wh}$
- On peut calculer l'écart de la consommation entre deux cas (sans et avec gestion):

$$\Delta W = W_1 - W_2 = 1466.7 - 1348.6 = 118.1 \text{ Wh}$$

On constate que cette valeur de l'écart  $\Delta W$  est égale à l'énergie de dépassement qui est calculée dans le cas précédent. Avec la stratégie proposée, on peut assurer le maximum possible de fonctionnement des cuisinières en respectant la limite de puissance autorisée (en évitant l'ouverture du disjoncteur).

Cette méthode peut être appliquée pour les chauffages sans fils de pilote ou pour piloter les autres charges comme le chauffe-eau de l'eau chaude sanitaire...

## V.4 Conclusion

Deux nouvelles méthodes de gestion de charge en temps réel ont été mises au point et développées sous Matlab/Simulink. Les algorithmes proposés présentent des avantages importants par rapport aux méthodes classiques (fonctionnement automatique avec respect du confort, meilleure gestion des pics de puissance ou congestions dans l'avenir). Les méthodes proposées permettent de gestion de charge sans effectuer de délestage violent de charge comme les méthodes classique.

Pour les clients, l'application de ces méthodes permet de réduire le coût d'abonnement ou réduire la facture globale de consommation.

Les méthodes proposées ont pris en compte le comportement réel des charges et les aléas. Les conditions météorologiques ont été prises en compte pour la première méthode.

Dans la méthode de délestage est basée sur la courbe de déclenchement de la protection.

Les méthodes proposées peuvent être utilisées par le gestionnaire du réseau afin de faire participer les clients au services système en utilisant la gestion intelligente de charge (« délestage en douceur ») pour le réglage de tension et de fréquence, la gestion des congestions, prévenir les blackouts ou améliorer la stabilité du réseau

Les méthodes proposées ont été appliquées pour les systèmes de gestion énergétique dans le secteur résidentiel (maison individuelle) et tertiaire (Hôtel, centre de commerce...) avec les résultats satisfaisants. Les principes proposés peuvent être appliqués pour un groupe de charge d'inter bâtiments ou un centre de consommation virtuelle.

## **Chapitre VI : Conclusions et perspectives**



Dans le nouveau contexte de changement majeur provoqué par l'ouverture du marché de l'énergie et l'évolution de la distribution électrique, toute modification sur la consommation peut être la source d'un progrès conséquent.

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.

Pour les consommateurs, c'est une solution efficace qui permet, à satisfaction égale, de diminuer le montant de la facture.

Pour le gestionnaire du réseau, la réduction de pic de consommation pourra en cas d'urgence, se révéler une solution très efficace et prometteuse afin d'éviter les problèmes techniques sur le réseau (blackout, congestion, contribution au service système...).

Pour les revendeurs d'énergie enfin, la gestion de charge permet de réduire les achats d'énergie dans les périodes où les prix sont élevés.

Dans le cadre de ce travail, nous avons présentés:

- Le développement des modèles de charges, validés par les mesures (Chapitre II) qui a été utilisé lors des travaux ultérieurs.
- La mise au point d'une *méthode de prévision de consommation à court-terme en utilisant les réseaux de neurones*. Cette méthode a été validée sur un jeu de données réelles sur consommation relevée pendant 9 ans dans un quartier de Hanoi au Vietnam. Nous l'avons complétée, pour les applications résidentielles, par *une méthode ascendante souvent baptisée « bottom-up »*, qui est basée sur la connaissance de l'usage final aussi (Chapitre III).
- Nous avons ensuite porté notre effort sur le problème de la gestion optimale du chauffage et de la climatisation sur trois axes complémentaires : *la minimisation des pics de consommation, le maintien du confort de la température intérieure, et la minimisation des coûts de consommation*. Sur chacun de ces aspects nous avons proposé une méthode originale validée par un programme de simulation pour une maison complète (consommation résidentielle) avant de l'étendre à plusieurs bâtiments et dans le cadre d'un bâtiment à usage tertiaire (un hôtel) – (Chapitre IV).
- Afin de réduire le temps de calcul, nous avons utilisé un algorithme basé sur la programmation non linéaire couplée avec la méthode « branch and bound » (Chapitre IV).
- Nous avons enfin, abordé le problème de la gestion des charges en temps réel. Nous avons dans ce but proposé deux méthodes originales
  - o *La première méthode est basée sur l'utilisation d'un système adaptatif de régulation des chauffages et des climatisations*. Cette méthode est ensuite appliquée à la gestion des chauffages d'une maison tout entière (dans l'application au secteur résidentiel) et à la gestion des climatisations d'un hôtel (secteur tertiaire).



- *La deuxième méthode est basée à un système « intelligent » de délestage en douceur en fonction de la courbe de prévision ou la courbe de puissance autorisée (Chapitre V),*

Ces deux méthodes trouvent son application dans la diminution des pics de consommation ou dans la réduction des coûts en diminuant la consommation dans les périodes où les prix de l'énergie sont le plus élevés

Nous pensons avoir contribué ainsi à montrer quelques voies de recherche dans le domaine de la maîtrise des consommations énergétiques, ces travaux peuvent ouvrir plusieurs axes de travail pour l'avenir:

- Le développement de modèles plus précis pour les charges des bâtiments (secteurs résidentiels et tertiaires) et la nécessité d'effectuer les campagnes de mesure pour valider les modèles développés.
- Le développement de méthodes avancées de prévision bien adaptées pour la gestion de charge des bâtiments. Une version avancée de la méthode « bottom up » en la couplant avec les réseaux de neurone est une piste prometteuse.
- Le développement des fonctions multi-objectif pour la gestion de charge. La réduction du temps de simulation et la robustesse de l'algorithme sont des critères importants.
- Les méthodes proposées pour la gestion en temps réels des charges sont très efficaces. Il est possible d'appliquer un groupe de « charge virtuelle », pour représenter une maison, un quartier, et de permettre au gestionnaire de réseau d'appliquer ces méthodes pour résoudre des problèmes techniques que rencontrera à l'avenir le réseau de distribution d'énergie.
- Enfin l'on peut envisager une étude approfondie des méthodes de gestion en temps réel proposées pour la gestion des charges des bâtiments (secteurs résidentiels et tertiaires), en tenant compte de l'architecture du système, de la communication, ...).

Nous pensons avoir par nos travaux, ouvert la voie à des méthodes efficaces de gestion optimale des consommations d'énergie dans le bâtiment et contribué ainsi à la mise en œuvre de la maîtrise de la demande énergétique dans les domaines résidentiel et tertiaires qui sont les plus grands consommateurs d'énergie électrique.

## Références



- [**ABR02**] Abrantes H. D.; Castro C. A. “A New Efficient Nonlinear Programming-Based Method for Branch Overload Elimination”, [Electric Power Components and Systems](#), Volume 30, Number 6, 1 June 2002
- [**ADE01**] ADEME, « Diagnostic électrique d'un supermarché de moyenne surface », 2001
- [**ALR05**] Alric Gradolatto, “La programmation linéaire en nombres entiers”, Polycopié du cours de MOD, 2005
- [**ASH01**] S. Ashok, Rangan Banerjee, “*An Optimization Mode for Industrial Load*”
- [**BRA89**] Braun, J. S. Klein, W. Beckman, and J. Mitchell, “Methodologies for optimal control of chilled water systems without storage,” *ASHRAE Transactions*, 652-662. 1989
- [**CAP94**] A. Cappaso, W. Grattierir, R. Lamedica, A. Prudenzi, “*A Bottom-Up Approach to Residential Load Modeling*”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 9, n. 2, May 1994.
- [**CAS95**] André CASTAGNONI « Applications électrodomestiques », 1995
- [**CER07**] CEREN, «La lettre du CEREN », 2007
- [**CHA81**] M.L. Chan, E.N. Marsh, J.Y. Yoon, G.B. Ackerman, N. Stoughton, “*Simulation-based load synthesis methodology for evaluating load-management programs*” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, n. 4, April 1981.
- [**COM01**] Commission Européenne « Améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments », 2001
- [**DGM05**] DGEMP, Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, 2005
- [**DGM06**] DGEMP, Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, 2006
- [**GOM07**] A. Gomes, C. H. Antunes, and A. G. Martins, “A Multiple Objective Approach to Direct Load Control Using an Interactive Evolutionary Algorithm”, *IEEE transaction on power systems*, Vol.22, No.3, August 2007
- [**GRO87**] G. Gross, F.D Galiana. “*Short-Term Load Forecasting*”, *Proceedings of IEEE*,
- [**HEN97**] Henze, G., R. Dodier and M. Krarti. “Development of a predictive optimal controller for thermal energy storage systems,” *Intl. J. of HVAC&R Research*, Vol.3, No.3, 233-264, 1997
- [**HSU91**] Hsu Y. and Su C., “Dispatch of direct load control using dynamic programming,” *IEEE Transactions on, Power System*, Vol.6, No.3, 1991
- [**HUD99**] Hudson G, Underwood CP "A simple building modelling procedure for matlab/simulink ", *Proceedings of Building Simulation '99*, vol. 2; 1999, p. 777–83
- [**KAH98**] Kah-Hoe Ng, G.B. Sheblé, “Direct load control – a profit-based load management using linear programming”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 2, May 1998.
- [**KEE96**] K. Keeney et J. Braun. 1996, “A simplified method for determining optimal cooling control strategies for thermal storage in building mass,” *Intl. J. of HVAC&R Research*. Vol.2, No.1, 59-78
- [**LAD03**] Rachid Ladjadj, “Les réseaux de neurones” 2002/2003 - Ingénieurs 2000 - Filière Informatique et Réseaux, Université de Marne-la-Vallée

- [**LAR04**] B.M. Larsen, R. Nesbakken, “*Household electricity end-use consumption: results from econometric and engineering models*”, *Energy Economics* 26 (2004) 179-200.  
[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [**LE.K06**] K. LE, Rapport interne sur les modèles de charge.
- [**LE.K07**] K. LE, T. TRAN-QUOC, JC SABONNADIÈRE, C. KIENY, N. HADJSAID, “**Peak load reduction by using heating regulators**”, *CIGRE/CIREN*, Vienna, AUSTRIA, May 2007
- [**LE.K08a**] K. LE, T. TRAN-QUOC, JC. SABONNADIÈRE, C. KIENY, N. HADJSAID, “**Peak load reduction by using air-conditioning regulators**”, *IEEE/MELECON*, Ajaccio, FRANCE, 5-7 May 2008
- [**LE.K08b**] K. LE, T. TRAN-QUOC, N. HADJSAID, NT NGUYEN, C. SURDU, JC. SABONNADIÈRE, C. KIENY, “**Load management by optimizing operations of the radiators**”, *Conference on Innovation for Sustainable Production 2008*, BRUGES, BELGIUM, 22 - 25 avril 2008.
- [**LEO-**] Leo Liberti, Ruslan Sadykov, "Introduction à la Programmation Linéaire en Nombres Entiers"
- [**MEN01**] Nathan Mendes, Gustavo H.C. Oliveira and Humberto X. de Araújo, "Building thermal performance analysis by using Matlab/Simulink", *Seventh International IBPSA Conference* 2001
- [**MER92**] Pierre MÉRIEUX et Bernard PLEYNET « Chauffage et rafraîchissement : systèmes de conduite et de gestion », 1992
- [**PAS97**] Pascal GIBIELLE , « Demande d’électricité et prévision à long terme », 1997
- [**ROL00**] Roland AUBER. « Electricité dans les bâtiments – application »,2000
- [**ROL01**] Roland AUBER, « Électricité dans le bâtiment–mis en œuvre »,2001
- [**SAG77**] Sage, A.P. and C.C.White III, *Optimum Systems Control*, Prentice-Hall, Inc., 1977.
- [**SON02**] Sonia TURKI, « La consommation d’énergie du tertiaire : une croissance partiellement maîtrisée », 2002
- [**SID-Guy**] Olivier SIDLER ,Campagne de mesures sur les usages électriques dans le secteur résidentiel en Guyane. Rapport final
- [**SID-Ciel**] Olivier SIDLER, « Maîtrise de la Demande Electrique », - Campagne de Mesures par usage dans le secteur domestique. Projet CIEL
- [**SID02**] Olivier SIDLER, « Connaissance et maîtrise des consommations des usages dans le secteur résidentiel », 2002
- [**SUR00**] Suresh Kumar. K.S. “Control Strategies for Energy Conservation in room air conditioning units – Matlab/Simulink simulation Study”, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology Calicut, Calicut-673601, Kerala State , India,
- [**PAA06**] J.V. Paatero, Lund P.D. “A model for generating household electricity load profil.”*Management*”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No. 4, November 2001.  
*International Journal of Energy Research* Vol 30:5, p 273-290. 2006.

- [PAP90]** A.D Papalexopoulos, T C. Hesterberg, “A Regression-Based Approach to Short-Term System Load Forecasting”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 4, November 1990
- [RUI07]** Lina Maria RUIZ GOMEZ, “Prévision de consommations”, Rapport de M2R, G2Elab, juillet 2007
- [SAB06]** S. Sabbagh, “A practical approach to electricity demand forecasting in Great Britain”, RTE-VT Workshop, Paris, May 29-30, 2006.
- [SID97]** Cabinet Olivier SIDLER Ingénierie énergétique, “Analyse et valorisation des campagnes de mesures sur les usages électriques dans le secteur résidentiel”, Mai 1997.
- [SID02]** Cabinet Olivier SIDLER, Ingénierie énergétique, “Campagne de mesures par usage dans 400 logements de la Communauté Européenne”, Evaluation des gisements d’économie d’électricité, Projet Eureco Janvier 2002.
- [SHA06]** P. E. McSharry, J. W. Taylor, “Evaluation off short-term forecasting methods for electricity demand in France”, RTE-VT Workshop, Paris, May 29-30, 2006
- [WAL85]** C.F. Walker, J.L. Pokoski, “Residential Load Shape Modeling Based on Customer Behavior”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104.n. 7, July 1985.
- [NGU06]** NGUYEN Nhat Tung, “Gestion optimale de charge dans un Consommateur Virtuel”, M2R, Soutenu en juillet 2006, G2Elab
- [ROS96]** Rossi T. and J. Braun, “Minimizing operating costs of vapor compression equipment with optimal service scheduling,” HVAC&R Research. Vol.2, No.1, 3-25, 1996.
- [SUR00]** Suresh Kumar. K.S. “Control Strategies for Energy Conservation in room air conditioning units – Matlab/Simulink simulation Study”, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology Calicut, Calicut-673601, Kerala State , India, .
- [TRA06]** T. TRAN-QUOC, L. LE THANH, C. ANDRIEU, N. HADJSAID, C. KIENY, JC SABONNADIÈRE, K. LE, O. DEVAUX, O. CHILLARD, "Stability analysis for the power distribution systems with distributed generation", *IEEE T&D*, Dallas, USA, May 2006
- [WRI01]** Wright J. and H. Loosemore, “The multi-criterion optimization of building thermal design and control,” Seventh International IBPSA Conference, 873-880, Brazil, 2001
- [WEI95]** D. Wei, N. Chen, “Air conditioner direct load control by multi-pass dynamic programming”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 1, February 1995



# ANNEXE





## ANNEXE 1. Cas de l'évaluation économique en cas de déplacement des charges pour une maison

Nous supposons que le fonctionnement normal des usages de cette maison est présenté dans le tableau

Type d'usage	Puissance maximale [W]	Fonctionnement
Réfrigérateur-américain	827	Non pilotable
Congélateur	230	Non pilotable
Lave-linge	2400	Marche à 18h
Lave-vaisselle	3000	Marche à 18h15
Cuissinière	3000	Non pilotable
Téléviseur	100	Non pilotable
Eclairage	200	Non pilotable
VMC	38	Non pilotable
Climatiseur-split	915	Non pilotable

### • En cas de l'absence de gestion de charge

La Fig.A 1 présente la puissance totale de la maison correspondant au cas normal. La puissance totale est de 8847W et alors la puissance d'abonnement choisie est de 12kVA

La facture correspondant au les options d'abonnement choisies différences est présentée dans le tableau

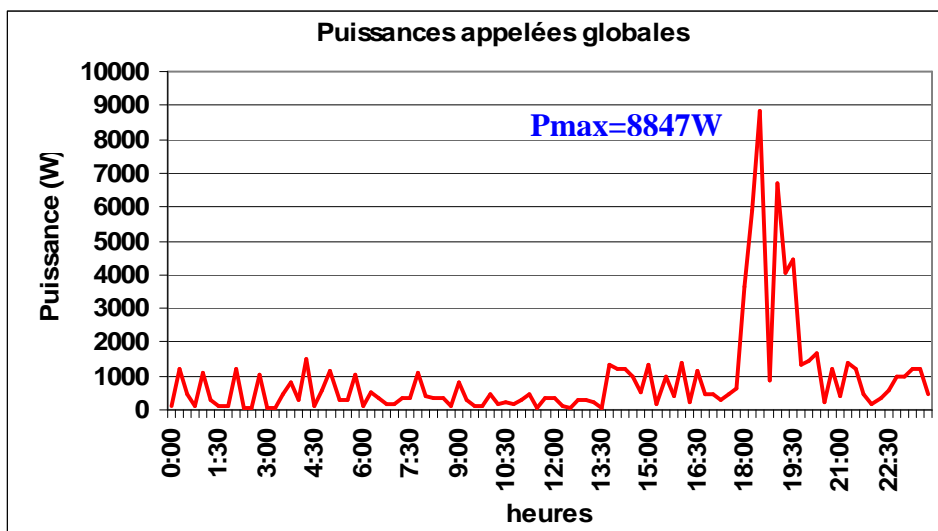


Fig.A 1: La puissance totale en cas normal

### • En cas de la présence de gestion de charge

Après les déplacements de lave linge et lave vaisselle vers les heures creuse :

- Avec le déplacement de Lave-linge vers 2h00
- Avec le déplacement de Lave vaisselle vers 23h15.

La Fig.A 2 présente la puissance totale de la maison correspondant au cas de la présence de gestion. La puissance totale est de 4425W et alors la puissance d'abonnement choisie est de

6kVA

La facture correspondant aux options d'abonnement choisies diffère est présentée dans le tableau

On voit que les avantages grâce au déplacement des charges :

- Economie de 97.4 ou 216.92 ou 109.55 €/an (ça dépend de type d'abonnement)
- La puissance maximale est réduite près de la moitié par rapport au cas de l'absence de gestion

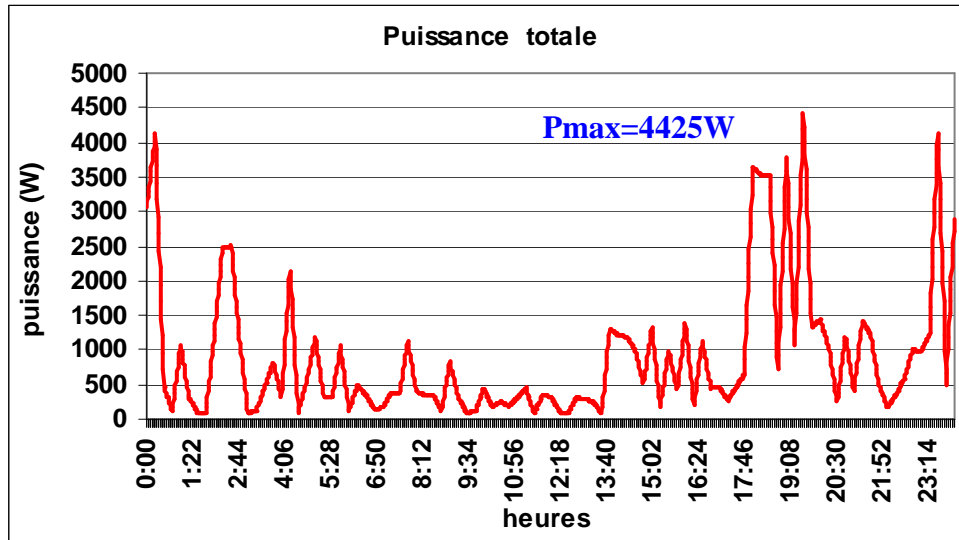


Fig.A 2: La puissance totale en cas de déplacement

Abonnement kVA	Option	Détail		Facture globale (€/jour)	Facture globale (€/an)	Gain/an (€)
12,00	Tarif Bleu Clients domestiques (option base)	Abonnement (€/an)	166,80	2,84	1038,28	
		consommation (€/jour)	2,39			
	Tarif Bleu Clients domestiques (option heures)	Abonnement (€/an)	264,72	2,91	1063,30	
		Consommation HP (€/jour)	1,89			
		Consommation HC(€/jour)	0,30			
	Tarif Bleu - Option Tempo	Abonnement (€/an)	215,90	1,77	873,92	
consommation (€/Jours Blancs)		1,18				
consommation (€/ Jours Bleus)		2,31				
consommation (€/Jours rouges)		9,27				
6,00	Tarif Bleu Clients domestiques (option base)	Abonnement (€/an)	58,92	2,54	928,73	109,55
		consommation (€/jour)	2,38			
	Tarif Bleu Clients domestiques (option heures)	Abonnement (€/an)	102,24	2,32	846,38	216,92
		Consommation HP (€/jour)	1,51			
		Consommation HC(€/jour)	0,53			
	Tarif Bleu - Option Tempo	Abonnement (€/an)	157,64	1,57	776,53	97,40
		consommation (€/Jours Blancs)	1,14			
		consommation (€/ Jours Bleus)	2,23			
		consommation (€/Jours rouges)	8,19			

Tab.A 1: Comparaison économique des cas

## ANNEXE 2. Evaluation économique d'utilisation de la lumière naturelle d'un centre de commerce

### • En cas de l'absence de gestion de charge

La Fig.A 3 présente la consommation totale (y compris la consommation de l'éclairage et les autres charges) d'un centre de commerce en cas de l'absence de la gestion de charge.

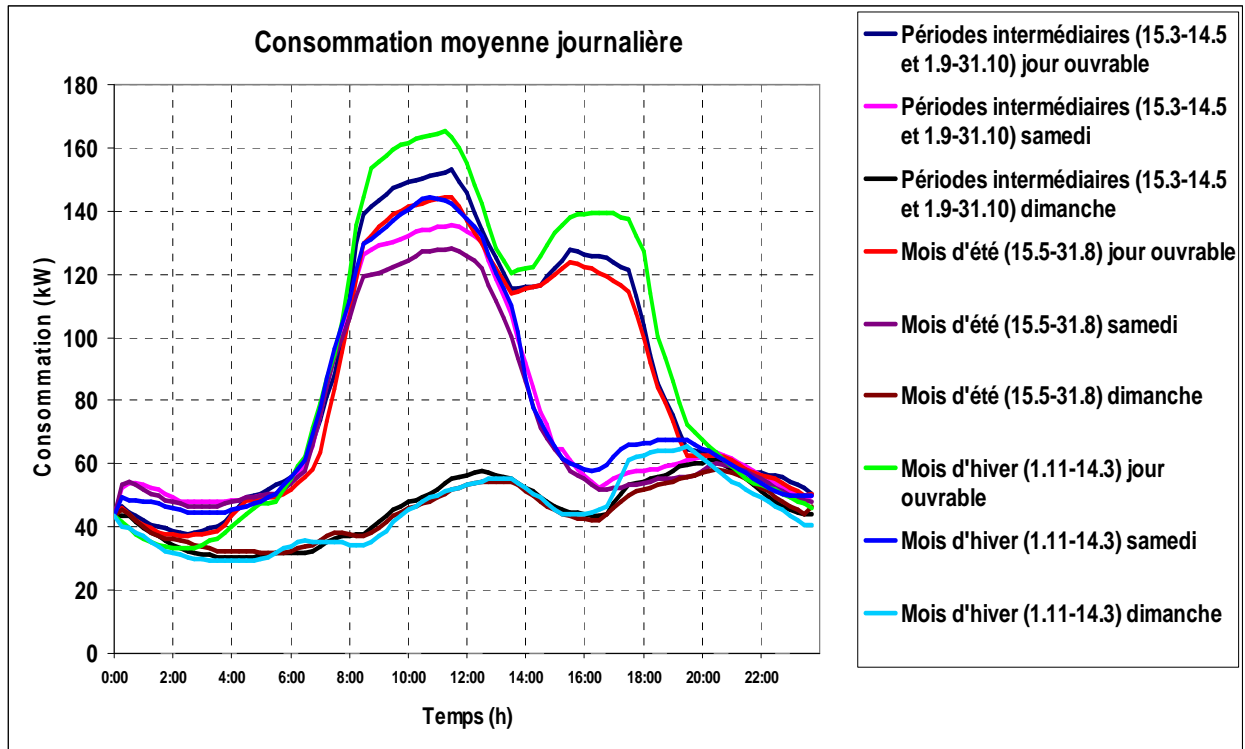


Fig.A 3: Courbe de charge journalière en 9 périodes typiques

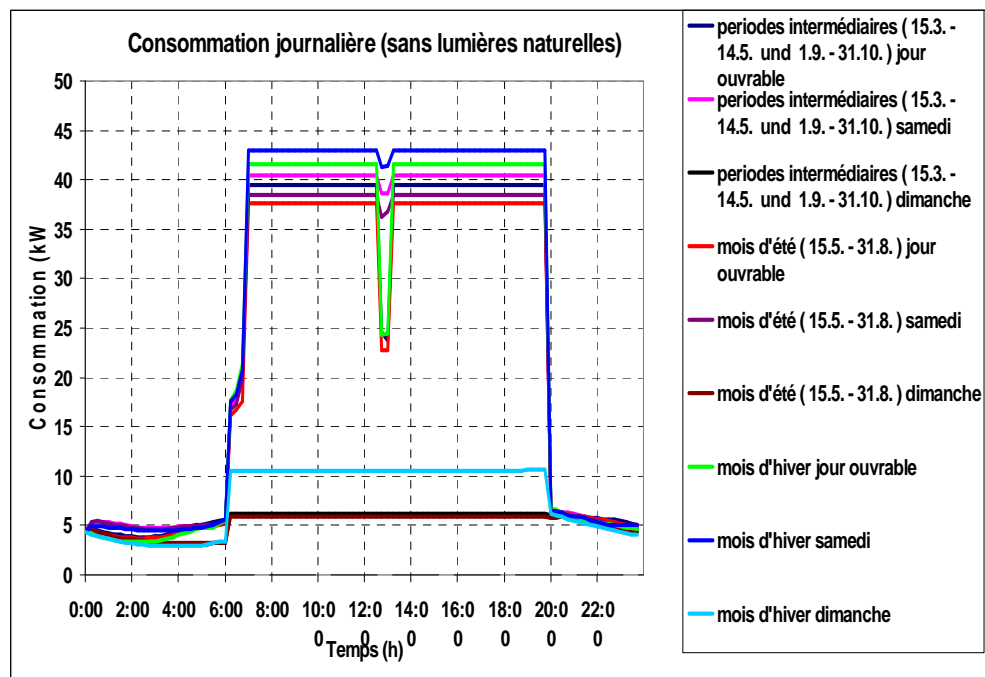


Fig.A 4: Consommation par lumières (Sans utilisation des photoélectriques)

La Fig.A 4 présente la consommation de l'éclairage électrique

La consommation totale est de 46800 kWh/mois ou 561603 kWh/an.

Si on choisit le type d'abonnement « tarif jaune utilisations longues » et la facture est alors de 27631.21 €/an.

- En cas de la présence de gestion de charge

L'utilisation de la lumière naturelle (solaire) pour la réduction de la consommation de la lumière d'un centre de commerce en utilisant des capteurs photoélectriques.

La consommation de l'éclairage électrique est diminuée en fonction de l'intensité lumineuse du soleil.

La Fig.A 5 présente l'intensité lumineuse du soleil

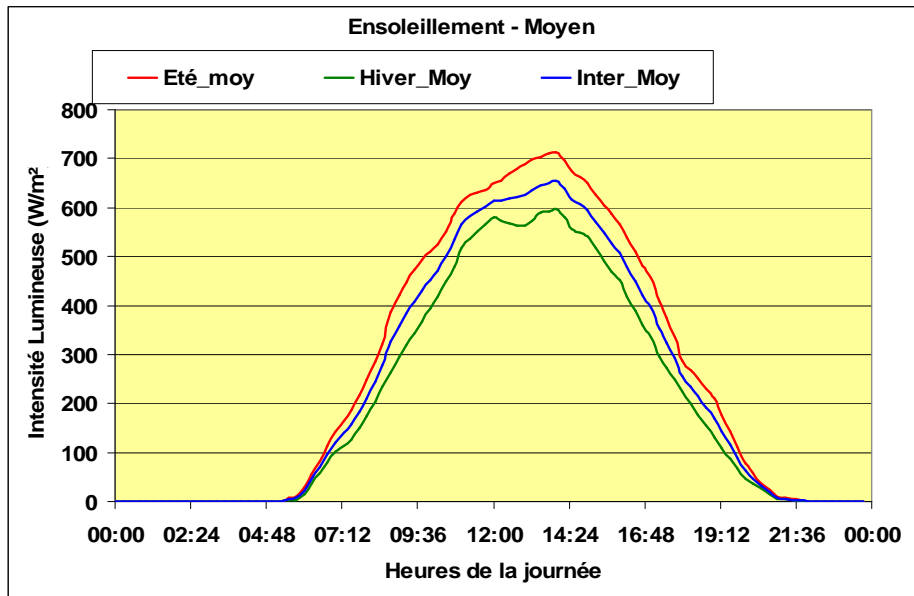


Fig.A 5: Courbe d'ensoleillement

La Fig.A 6 présente la consommation de l'éclairage électrique en cas de la présence d'utilisation des capteurs photoélectriques

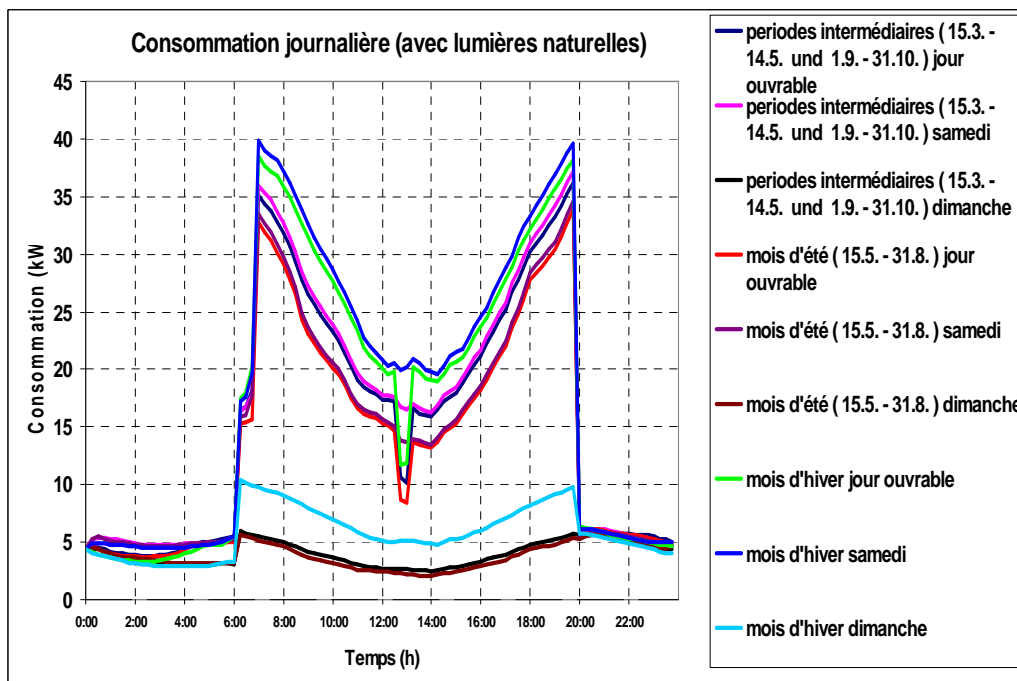


Fig.A 6: Consommation par lumières (Avec utilisation des photoélectriques)

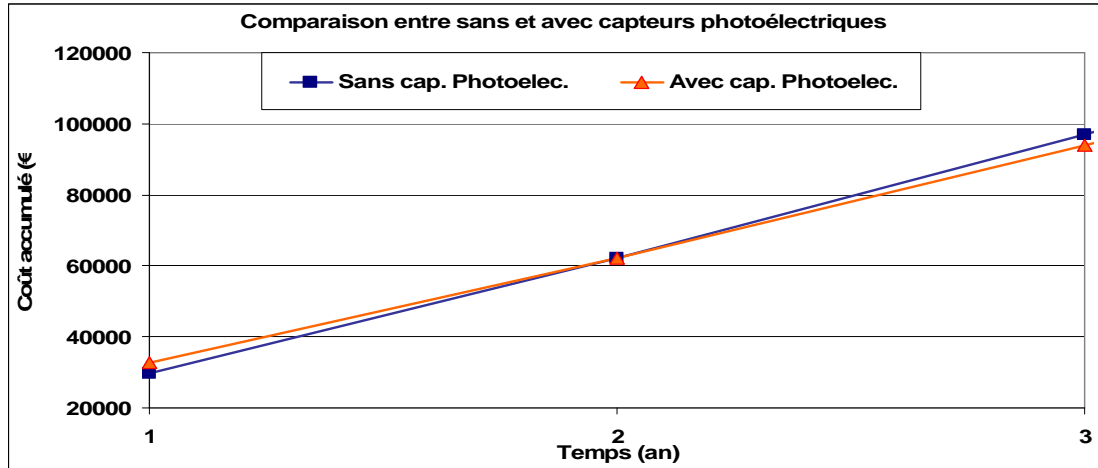


Fig.A 7: Calculer le temps de retour

Dans ce cas, la consommation totale est de 42623 kWh/mois ou 511481 kWh/an.

- Facture avec gestion énergétique: 25 206 €/an au lieu de 27 631 €/an

Soit : Taux d'actualisation: 8% et

Coût d'investissement: 5000 €

On peut calculer le temps de retour: 2 ans (Fig.A 7)

### ANNEXE 3. Sensibilité de la quantité des données d'entrée sur l'erreur de la prévision de charge en utilisant les réseaux des neurones

Ce tableau présente la sensibilité de la quantité (volume) des données d'entrée sur l'erreur de la prévision de charge en utilisant les réseaux des neurones. On constate que quand la quantité des données diminue les erreurs augmentent.

Base de donnée	Année de prévision	Erreur absolue maximale	Erreur moyenne maximale	RMSE maximale
<b>9ans(1997-2005)</b>	<b>2005</b>	<b>11.758</b>	<b>4.186</b>	<b>5.124</b>
8ans(1997-2004)	2004	15.516	4.639	5.606
7ans(1997-2003)	2003	17.191	5.532	7.313
6ans(1997-2002)	2002	18.621	6.423	7.634

### ANNEXE 3B. Résultats pour de la prévision de charge en utilisant les réseaux des neurones en tenant compte de la température

#### Résultat pour le mois de mars en 2005 (hiver).

La Fig.A 1 présente la courbe de consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de mars en 2005. La Fig.A 9 présente l'erreur absolue entre la consommation réelle et prévisionnelle. Le Tab.A 2 donne l'erreur absolue, l'erreur moyenne et l'erreur quadratique (erreur RMS) entre la consommation réelle et prévisionnelle. Les résultats montrent que l'erreur absolue maximale de la prévision ne dépasse pas 12%, tandis que l'erreur moyenne est inférieure à 5% et l'erreur quadratique ne dépasse pas 5%. La Fig.A 10 présente la courbe de consommation réelle et prévisionnelle pour le lundi 28 mars 2005. Pour ce jour l'erreur maximale, l'erreur moyenne et l'erreur quadratique sont respectivement égales à 4.39 %, 1.76% et 2.18%. Ces chiffres démontrent l'efficacité de la méthode proposée.

Les résultats sont obtenus par l'architecture 3 et deux couches de neurones cachés. Ces résultats indiquent que la précision sont améliorée par rapport de l'architecture en absence de la température.

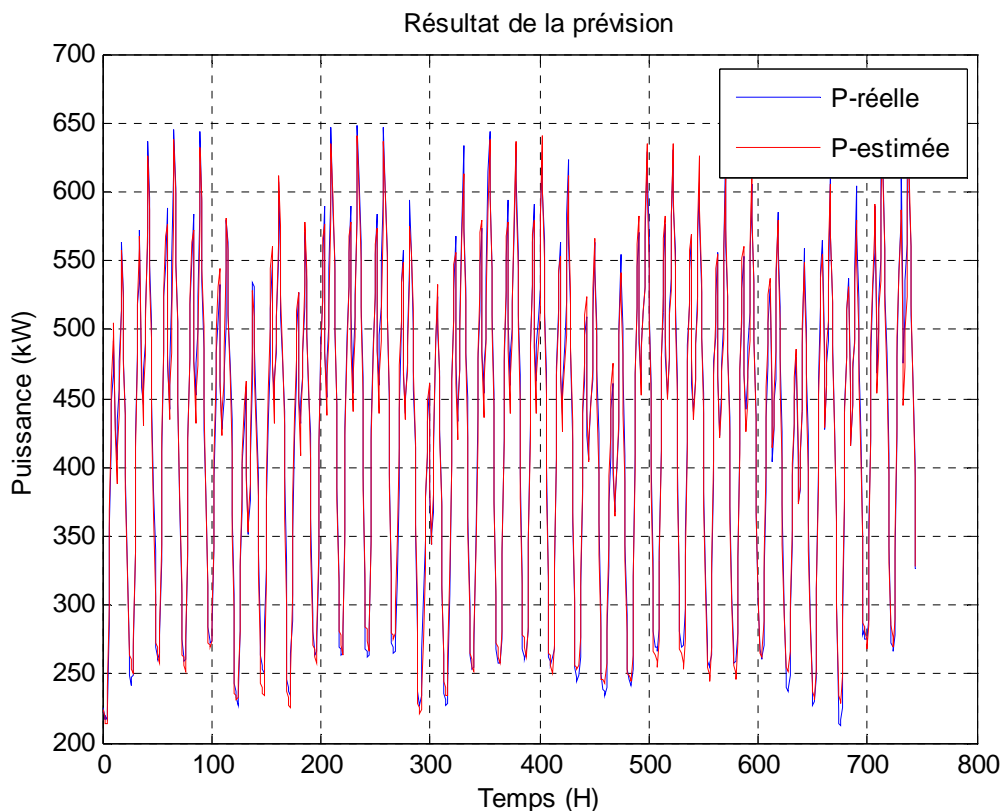


Fig.A 8: Consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de mars en 2005 (hiver)

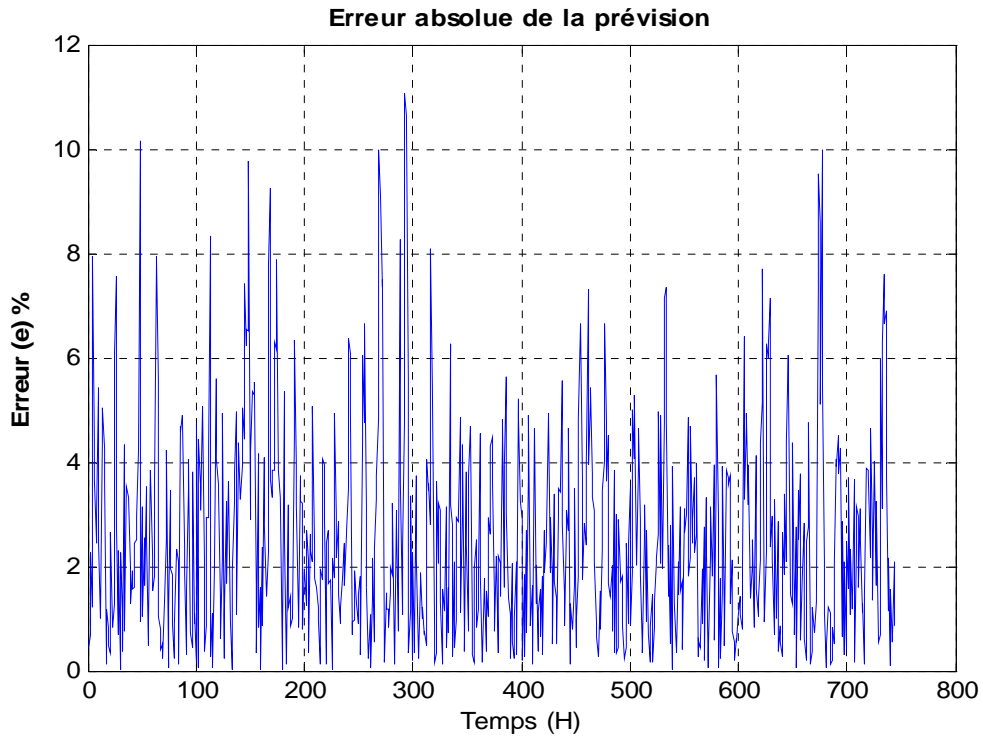


Fig.A 9: *Erreur absolue entre la consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de mars en 2005 (hiver)*

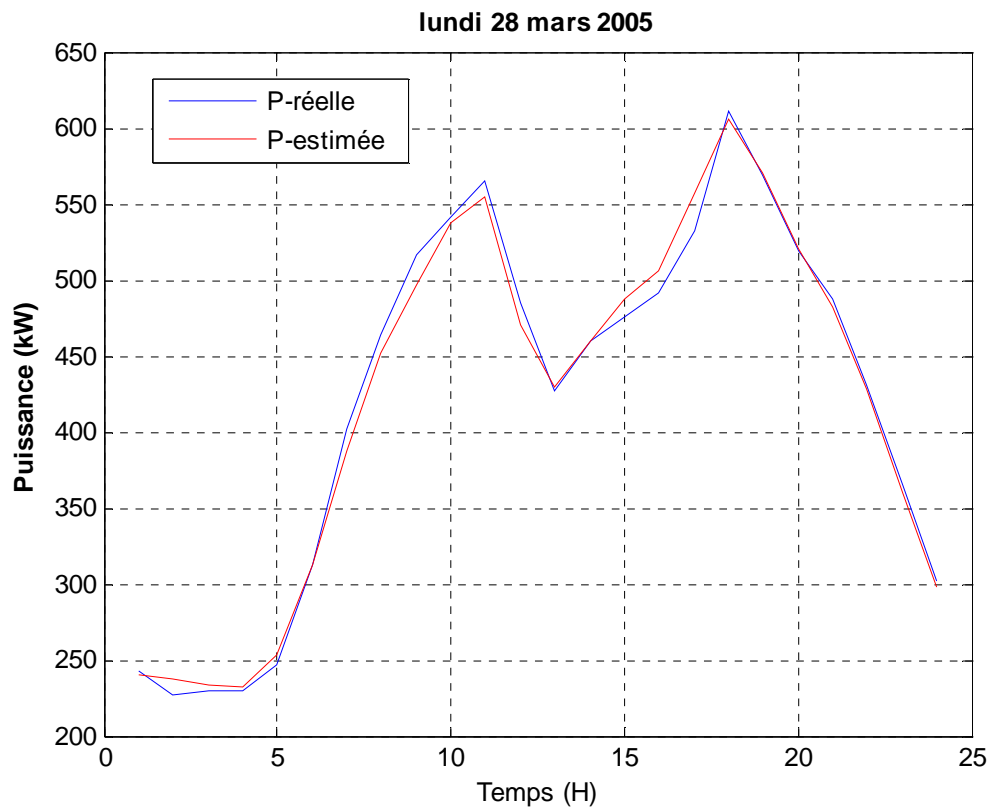


Fig.A 10: *Consommation réelle et prévisionnelle pour le lundi 28 mars 2005 (hiver)*



<b>Jour</b>	<b>Erreur absolue (%)</b>	<b>Erreur moyenne (%)</b>	<b>Erreur RMS (%)</b>
mardi 1 mars 2005	7,957	2,499	3,18
mercredi 2 mars 2005	10,151	2,874	3,674
jeudi 3 mars 2005	7,95	2,405	3,184
vendredi 4 mars 2005	4,895	2,214	2,751
samedi 5 mars 2005	8,323	2,715	3,425
dimanche 6 mars 2005	5,035	2,681	3,117
lundi 7 mars 2005	9,775	4,128	4,976
mardi 8 mars 2005	7,863	3,206	3,858
mercredi 9 mars 2005	5,081	2,004	2,302
jeudi 10 mars 2005	4,934	2,281	2,551
vendredi 11 mars 2005	6,647	2,488	3,287
samedi 12 mars 2005	9,998	3,289	4,388
dimanche 13 mars 2005	11,078	2,547	3,855
lundi 14 mars 2005	8,076	2,622	3,278
mardi 15 mars 2005	4,875	1,976	2,468
mercredi 16 mars 2005	4,841	2,241	2,641
jeudi 17 mars 2005	5,629	2,226	2,814
vendredi 18 mars 2005	4,93	1,946	2,368
samedi 19 mars 2005	6,665	2,775	3,337
dimanche 20 mars 2005	7,322	3,273	3,737
lundi 21 mars 2005	4,985	1,859	2,265
mardi 22 mars 2005	5,278	2,09	2,554
mercredi 23 mars 2005	7,347	2,626	3,285
jeudi 24 mars 2005	4,86	2,157	2,563
vendredi 25 mars 2005	5,658	1,997	2,556
samedi 26 mars 2005	7,71	2,842	3,41
dimanche 27 mars 2005	7,136	3,042	3,709
lundi 28 mars 2005	4,739	1,76	2,218
mardi 29 mars 2005	9,974	3,321	4,471
mercredi 30 mars 2005	3,869	2,085	2,412
jeudi 31 mars 2005	7,603	3,064	3,78

Tab.A 2: *Erreur absolue, erreur moyenne et l'erreur quadratique (RMS) entre la consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de mars en 2005 (hiver)*

### ANNEXE 4. COMPORTEMENT DES CHARGE

Appareils et groups	Puissance (W) et la durée du cycle de fonctionnement (min)								Vieille (W)	Fréquence journalière	
	P1	T1	P2	T2	P3	T3	P4	T4		Jour ouvrable	Week-end
Cuisinière	1000	12	525	18	220	12			0	0,56	0,61
	1100	12	550	6					0	0,7	0,76
	2100	24	700	6	1400	6	0	6	0	0,2	0,21
Micro-onde	800	6							3	0,98	1,06
Cafetière	640	6	105	18					0	0,98	1,06
Réfrigérateur	110	12	0	24					0	40,5	41,3
Congélateur	155	12	0	12					0	40,5	41,3
Deuxième congélateur	190	12	0	12					0	40,5	41,3
Lave-vaisselle	1600	18	80	54	1600	18			0	1,16	1,26
Lave-Linge	2400	18	80	48	450	18			0	0,31	0,33
	2150	18	210	24	450	6			0	0,11	0,12
Sèche-linge	2500	72							0	0,2	0,3
Télévision	75	60							8	1,95	2,12
Deuxième Télévision	75	60							4	0,28	0,3
Video Recorder									9		
Radio/player	30	60							5	4,18	4,54
Ordinateur personnel	125	60							3	0,7	0,76
Imprimante	30	60							4	0,14	0,15
Eclairage	120	30							0	18	19,5
Other occasional loads	1000	30							3	0,14	0,15

Tab.A 3: Cycles du fonctionnement et fréquences de l'ensemble d'appareil

Probabilité Horaire d'usage Jours ouvrables																								
Electromenager/Heure	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Cuisinière	0,4	0,1	0	0	0	0,2	1,7	2,7	4,4	5,9	6,97	7,86	7,92	7,15	6,39	5,89	6,78	7,41	7,32	7,23	6,93	4,09	2,3	1,02
Micro-onde et Cafetière	0,4	0,1	0	0	0	0,2	1,7	2,7	4,4	5,9	6,97	7,86	7,92	7,15	6,39	5,89	6,78	7,41	7,32	7,23	6,93	4,09	2,3	1,02
Réfrigérateur	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17
Lave-vaisselle	0,5	0	0	0	0	0	0	0,7	2	4,6	7,02	7,23	7,23	7,34	7,34	7,34	7,43	7,43	7,74	7,74	7,43	6,12	3,91	0,9
Lave-linge et Sèche-linge	0,5	0	0	0	0	0	0	0,7	2	4,6	7,02	7,23	7,23	7,34	7,34	7,34	7,43	7,43	7,74	7,74	7,43	6,12	3,91	0,9
Télévision et DVD	3,4	1,9	0,9	0,8	0,9	1	1	1,5	2,4	3,4	3,88	4,85	4,85	5,93	6,13	6,8	6,8	6,8	7,77	8,25	6,8	5,34	4,85	3,88
Radio/Player	3,4	1,9	0,9	0,8	0,9	1	1	1,5	2,4	3,4	3,88	4,85	4,85	5,93	6,13	6,8	6,8	6,8	7,77	8,25	6,8	5,34	4,85	3,88
Ordinateur personnel et Imprimante	3,4	1,9	0,9	0,8	0,9	1	1	1,5	2,4	3,4	3,88	4,85	4,85	5,93	6,13	6,8	6,8	6,8	7,77	8,25	6,8	5,34	4,85	3,88
Eclairage	2,6	1,3	1,2	1,2	1,3	1,5	2,1	4,1	5,1	5	4,27	3,82	3,57	4,27	4,97	5,5	6,02	6,69	7,34	7,56	6,64	6,17	4,49	3,22
Autres charges d'occasion	2,6	1,3	1,2	1,2	1,3	1,7	2,1	3,6	4,1	4	3,77	3,97	4,07	4,47	4,97	6	6,32	6,84	7,34	7,56	6,79	6,67	4,84	3,22

Probabilité Horaire d'usage Week-end																								
Electromenager/Heure	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Cuisinière	0,2	0,2	0,4	0,4	1,8	2,6	3,2	3,8	3,7	4,1	4,29	4,15	3,89	4,46	5,79	8,76	10	10,3	9,24	8,15	5,82	2,79	1,51	0,36
Micro-onde et Cafetière	0,2	0,2	0,4	0,4	1,8	2,6	3,2	3,8	3,7	4,1	4,29	4,15	3,89	4,46	5,79	8,76	10	10,3	9,24	8,15	5,82	2,79	1,51	0,36
Réfrigérateur	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17
Lave-vaisselle	1,7	1	0,4	0,4	0,4	1	1,7	2,9	3,8	4,6	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	6,11	6,83	7,16	7,8	8,6	8,16	7,01	5,05	2,03
Lave-linge et Sèche-linge	1,7	1	0,4	0,4	0,4	1	1,7	2,9	3,8	4,6	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	6,11	6,83	7,16	7,8	8,6	8,16	7,01	5,05	2,03
Télévision et DVD	2,4	1,2	0,7	0,6	0,7	1,3	2,1	2,5	3,4	3,2	3,2	3,84	3,84	4	4,8	6,39	7,99	7,99	7,99	9,59	7,99	6,39	4,8	3,2
Radio/Player	2,4	1,2	0,7	0,6	0,7	1,3	2,1	2,5	3,4	3,2	3,2	3,84	3,84	4	4,8	6,39	7,99	7,99	7,99	9,59	7,99	6,39	4,8	3,2
Ordinateur personnel et Imprimante	2,4	1,2	0,7	0,6	0,7	1,3	2,1	2,5	3,4	3,2	3,2	3,84	3,84	4	4,8	6,39	7,99	7,99	7,99	9,59	7,99	6,39	4,8	3,2
Eclairage	1	0,3	0,3	0,8	1,8	2,6	3,6	3,7	3,4	3	3,04	3,24	3,94	4,14	4,55	4,96	5,79	6,7	8,21	9,11	9,81	8,5	4,32	2,96
Autres charges d'occasion	1	0,3	0,3	0,8	1	2	3,1	3,2	3,4	3,5	3,64	3,74	3,94	4,14	4,55	4,96	5,79	6,7	7,71	8,51	9,01	8,1	5,67	3,66

Tab.A 4: Probabilité horaire des appareils

## ANNEXE 5: COURBES DE CHARGE DES APPAREILS OBTENUES PAR LA METHODE ASCENDANTE

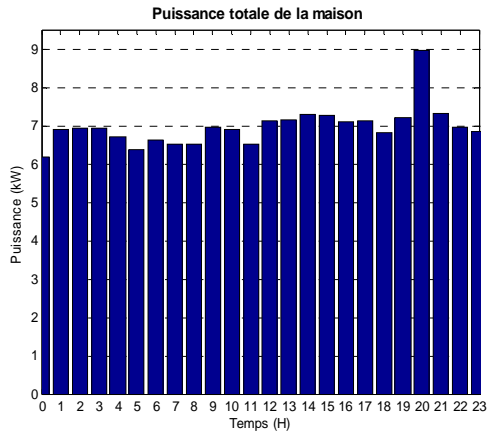


Fig.A 11: *Puissance totale de la maison*

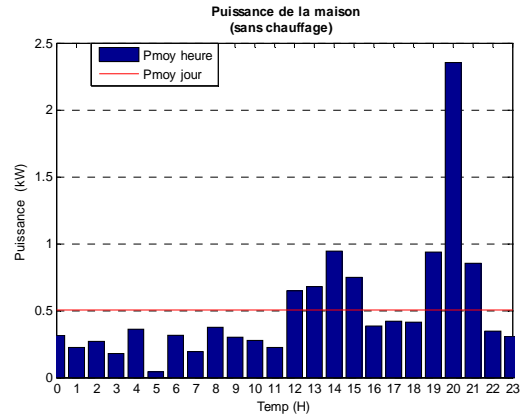


Fig.A 12: *Courbe de charge de l'ensemble des appareils*

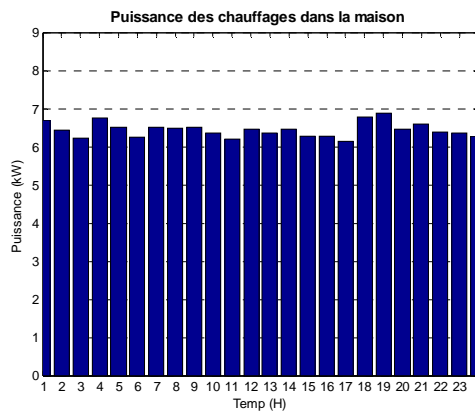


Fig.A 13: *Puissance de l'ensemble des chauffages*

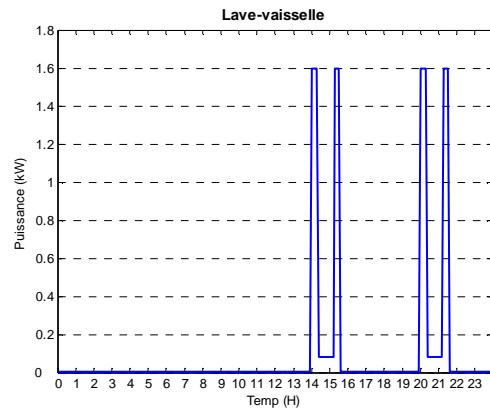


Fig.A 14: *Lave-vaisselle.*

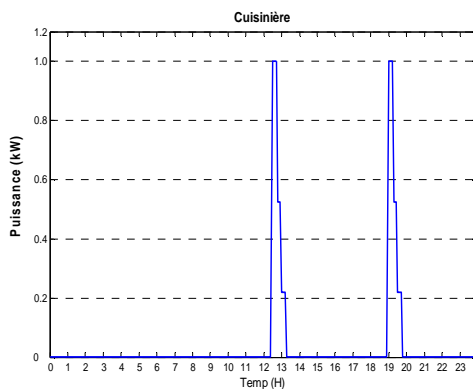


Fig.A 15: *Fonctionnement de cuisinière*

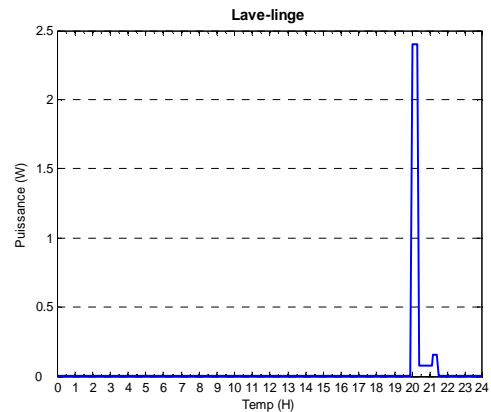


Fig.A 16: *Lave-linge/ Sèche Linge*

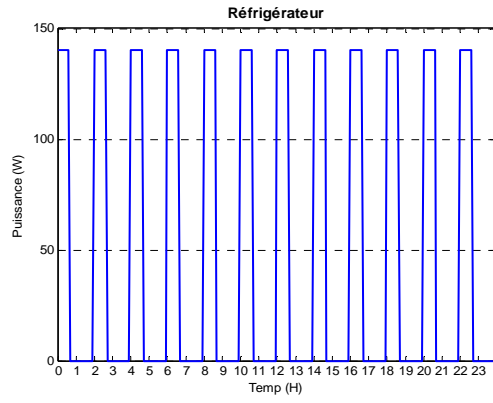


Fig.A 17: Fonctionnement de réfrigérateur

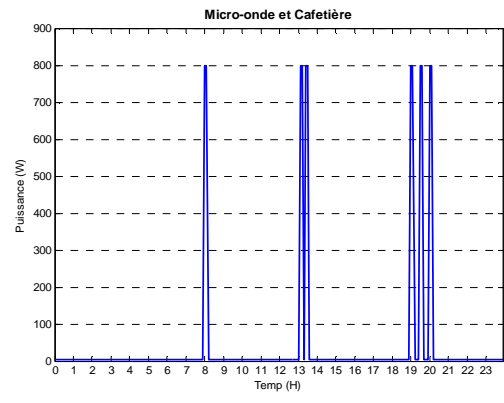


Fig.A 18: Micro-ondes -Cafetière

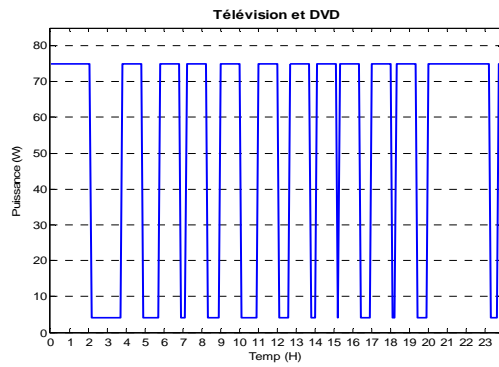


Fig.A 19: Téléviseur/DVD

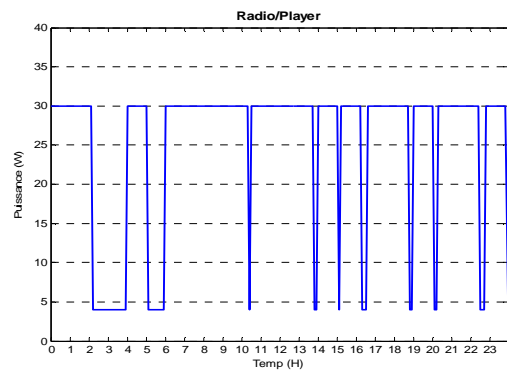


Fig.A 20: Radio Player

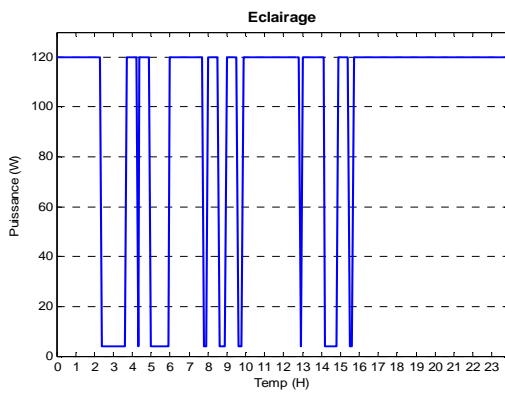


Fig.A 21: Eclairage

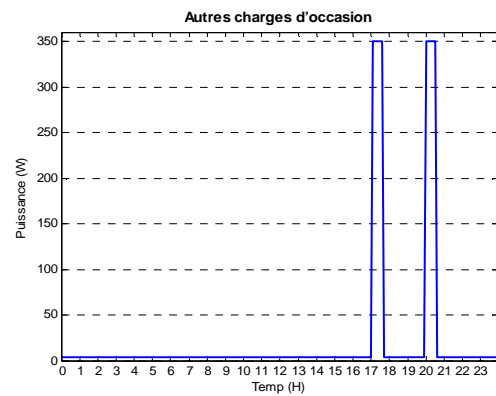


Fig.A 22: Autres Charges

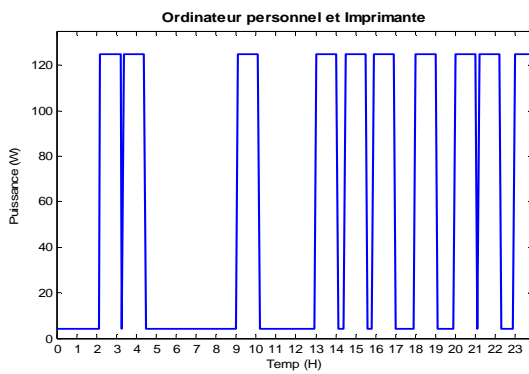


Fig.A 23: Ordinateur et imprimante

## TABLE DES FIGURES

Fig. I-1: <i>Changements majeur dans le domaine d'énergie</i> .....	13
Fig. I-2: <i>Consommation finale énergétique par secteur en France en 2005 (en Mtep)</i> .....	14
Fig. I-3: <i>Consommation d'électricité par secteur en France en 2005 (en TWh)</i> .....	15
Fig. I-4: <i>Solutions pour la gestion des charges dans les bâtiments</i> .....	18
Fig. I-5: <i>Gestion des charges après le compteur</i> .....	18
Fig. I-6: <i>Objectif global du travail</i> .....	19
Fig. I-7: <i>Organisation de thèse</i> .....	20
Fig. II-1: <i>Consommation finale d'électricité en 2005 : 424 TWh</i> .....	26
Fig. II-2: <i>Consommation des usages spécifiques et des autres usages dans le résidentiel</i> .....	27
Fig. II-3: <i>Répartition des consommations d'énergie électrique par usage dans les logements</i> .....	28
Fig. II-4: <i>Répartition des consommations annuelles d'un super marché de moyenne surface [ADE01]</i> .....	30
Fig. II-5: <i>Consommation énergétique dans les bâtiments tertiaires de l'UE</i> .....	31
Fig. II-6: <i>Les méthodes générales de gestion de charge</i> .....	35
Fig. II-7: <i>Délestage tournant et hiérarchisé</i> .....	39
Fig. II-8: <i>Transfert thermique dans une salle</i> .....	43
Fig. II-9: <i>Modèle thermique de la salle en simulink</i> .....	45
Fig. II-10: <i>Principe de fonctionnement de la climatisation</i> .....	46
Fig. II-11: <i>Modèle électrique pour une salle conditionnée</i> .....	48
Fig. II-12: <i>Modèle thermique en Simulink d'une salle conditionnée</i> .....	49
Fig. II-13: <i>Transfert thermique de la cuisinière électrique</i> .....	50
Fig. II-14: <i>Modèle de cuisinière électrique sous Simulink</i> .....	52
Fig. II-15: <i>Courbe de charge obtenue par Simulink</i> .....	52
Fig. II-16: <i>Courbe de charge mesurée de la cuisinière</i> .....	52
Fig. II-17: <i>Circuit frigorifique du réfrigérateur</i> .....	53
Fig. II-18: <i>Consommation d'un réfrigérateur mesurée par ADEME</i> .....	53
Fig. II-19: <i>Modèle du réfrigérateur</i> .....	54
Fig. II-20: <i>Puissance active obtenue par simulation de réfrigérateur (24h)</i> .....	55
Fig. II-21 : <i>Puissance active obtenue par simulation du réfrigérateur</i> .....	55
Fig. II-22 : <i>Puissance active mesuré du réfrigérateur</i> .....	55
Fig. II-23: <i>Consommation d'un congélateur mesurée par ADEME [SID-Guy]</i> .....	56
Fig. II-24: <i>Modèle de congélateur</i> .....	57
Fig. II-25: <i>Puissance active de congélateur (24h)</i> .....	57
Fig. II-26: <i>Courbe obtenue par la simulation</i> .....	57
Fig. II-27: <i>Courbe mesurée</i> .....	57
Fig. II-28: <i>Puissance appelée pour les températures différentes</i> .....	59
Fig. II-29: <i>Modèle de lave-linge</i> .....	60
Fig. II-30: <i>Puissance active de lave-linge</i> .....	60
Fig. II-31: <i>Puissance active mesurée d'un lave-linge</i> .....	60
Fig. II-32: <i>Modèle de lave-vaisselle</i> .....	62
Fig. II-33: <i>Puissance active de lave-vaisselle</i> .....	62
Fig. II-34 : <i>Courbe mesurée d'un lave-vaisselle</i> .....	63
Fig. III-1: <i>Schématisation d'un neurone biologique</i> .....	71
Fig. III-2: <i>Modèle d'un neurone artificiel</i> .....	72
Fig. III-3: <i>Modèle d'une couche de n neurones</i> .....	73
Fig. III-4: <i>Représentation matricielle d'une couche de S neurones</i> .....	73
Fig. III-5: <i>Architecture d'un réseau rétro-propagation</i> .....	75
Fig. III-6: <i>Détermination et application d'un réseau rétro-propagation</i> .....	75
Fig. III-7: <i>Courbe de charge d'un jour ouvrable et deux jours en weekend (en hiver)</i> .....	76
Fig. III-8: <i>Courbe de charge d'un jour ouvrable et deux jours en weekend (en été)</i> .....	76
Fig. III-9: <i>Courbe de charge hebdomadaire (du lundi 21 au dimanche 27 mars 2005)</i> .....	77
Fig. III-10: <i>Courbe de charge des jours identiques (les lundis)</i> .....	77
Fig. III-11: <i>Courbe de température de l'année 1997</i> .....	78
Fig. III-12: <i>Consommation mensuelle moyenne</i> .....	78
Fig. III-13: <i>Schéma général de l'architecture</i> .....	79
Fig. III-14: <i>Consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de mars en 2005 (hiver)</i> .....	83

Fig. III-15: Erreur absolue entre la consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de mars en 2005 (hiver)	83
Fig. III-16: Consommation réelle et prévisionnelle pour le vendredi 25 mars 2005 (hiver)	84
Fig. III-17: Consommation réelle et de prévision pour le mois de juillet en 2005 (été)	85
Fig. III-18: Erreur absolue entre la consommation réelle et de prévision pour le mois de juillet en 2005 (été)	85
Fig. III-19: Consommation réelle et de prévision pour le vendredi 25 juillet 2005 (été)	86
Fig. III-20: La puissance journalière du secteur résidentiel pour trois jours typiques	88
Fig. III-21: Facteur saisonnier	89
Fig. III-22: Fonctionnement du lave-vaisselle (2 utilisations par jour)	90
Fig. III-23: Facteur horaire pour la cuisine pour les jours ouvrables	91
Fig. III-24: Schéma du modèle de prévision à partir de la connaissance de consommation de chaque appareil	92
Fig. III-25: Algorithme de programmation	93
Fig. III-26: Courbe de charge du réfrigérateur	96
Fig. III-27: Courbe de charge de la cuisinière	96
Fig. III-28: Agrégation des courbes de charge des appareils de la maison en été (sans chauffage)	96
Fig. III-29: Courbe de charge de la maison en hiver (avec les chauffages)	96
Fig. IV-1: Consommation d'énergie dans les logements	101
Fig. IV-2: Phases de la gestion prédictive dans le système proposé de gestion des charges	102
Fig. IV-3: Principe de séparation et d'évaluation	106
Fig. IV-4: Organigramme de l'algorithme de la méthode proposée	111
Fig. IV-5: Plan de la maison	112
Fig. IV-6: Température extérieure	114
Fig. IV-7: Fonctionnement des autres charges de la maison (lumières, télé...)	114
Fig. IV-8: Fonctionnement de la cuisinière No. 1 (Marche à 18h10, arrêt à 19h30)	114
Fig. IV-9: Fonctionnement de la cuisinière No. 2 (Marche à 18h02, arrêt à 19h15)	114
Fig. IV-10: Fonctionnement du lave vaisselle (Marche à 22h30, arrêt à 23h15)	114
Fig. IV-11: Fonctionnement du lave linge (Marche à 3h30, arrêt à 5h10)	114
Fig. IV-12: Fonctionnement du réfrigérateur	115
Fig. IV-13: Fonctionnement du congélateur	115
Fig. IV-14: Puissance totale de consommation de la maison	115
Fig. IV-15: Température de la chambre No. 1	116
Fig. IV-16: Température de la chambre No. 1 (Zoom)	116
Fig. IV-17: Fonctionnement du chauffage No. 1	116
Fig. IV-18: Fonctionnement du chauffage No. 1 (Zoom)	116
Fig. IV-19: Puissance totale de consommation de la maison	117
Fig. IV-20: Température de la chambre No. 1	117
Fig. IV-21: Température de la chambre No. 1 (zoom)	117
Fig. IV-22: Fonctionnement du chauffage No. 1	117
Fig. IV-23: Fonctionnement du chauffage No. 1 (Zoom)	117
Fig. IV-24: Température de la chambre No. 1	119
Fig. IV-25: Température de la chambre No. 1 (zoom)	119
Fig. IV-26: Fonctionnement du chauffage No. 1	119
Fig. IV-27: Fonctionnement du chauffage No. 1 (Zoom)	119
Fig. IV-28: Puissance totale de consommation de la maison	120
Fig. IV-29: Température de la chambre No.1	120
Fig. IV-30: Température de la chambre No.1 (zoom)	120
Fig. IV-31: Fonctionnement du chauffage No 1	120
Fig. IV-32: Fonctionnement du chauffage No.1 (Zoom)	120
Fig. IV-33: Option de base de tarif bleu de EDF	121
Fig. IV-34: Option Heure Pleines/Heures Creuse de tarif bleu de EDF	121
Fig. IV-35: Tarif Heure Pleines/Heures Creuse utilisé pour la simulation	123
Fig. IV-36: Température de la chambre No. 1	124
Fig. IV-37: Puissance totale de consommation de la maison	124
Fig. IV-38: Gestion optimale de climatisation d'un hôtel	127
Fig. IV-39: Température extérieure	128
Fig. IV-40: Fonctionnement des autres charges du hôtel (lumières, télé, frigo, ...)	128
Fig. IV-41: Source d'énergie de radiation solaire	128
Fig. IV-42: Puissance totale de l'hôtel	128
Fig. IV-43: Température intérieure de la chambre No. 1	129
Fig. IV-44: Température intérieure de la chambre No. 1 (zoom)	129

Fig. IV-45: <i>Fonctionnement du climatiseur No. 1</i> .....	129
Fig. IV-46: <i>Fonctionnement du climatiseur No. 1 (Zoom)</i> .....	129
Fig. IV-47: <i>Puissance totale de l'hôtel sans gestion (Zoom)</i> .....	130
Fig. IV-48: <i>Puissance totale de l'hôtel avec gestion optimale (Zoom)</i> .....	130
Fig. IV-49: <i>Fonctionnement du climatiseur No.1 avec gestion optimale (Zoom)</i> .....	130
Fig. IV-50: <i>Fonctionnement du climatiseur No.1 avec gestion optimale (Zoom)</i> .....	130
Fig. IV-51: <i>Puissance totale de l'hôtel sans gestion (Zoom)</i> .....	130
Fig. IV-52: <i>Puissance totale de l'hôtel avec gestion optimale (Zoom)</i> .....	130
Fig. IV-53: <i>Fonctionnement du climatiseur No.1 avec gestion optimale (Zoom)</i> .....	131
Fig. IV-54: <i>Fonctionnement du climatiseur No.1 avec gestion optimale (Zoom)</i> .....	131
Fig. V-1: <i>Phase de gestion en temps réel dans le système de gestion de charge proposé</i> .....	135
Fig. V-2: <i>Principe du régulateur développé (M1)</i> .....	137
Fig. V-3: <i>Régulation des chauffages en cas sans gestion</i> .....	138
Fig. V-4: <i>Régulation des chauffages en cas avec gestion</i> .....	139
Fig. V-5: <i>Modèle du système des radiateurs</i> .....	140
Fig. V-6: <i>Modèle complet de la maison</i> .....	141
Fig. V-7: <i>Puissance totale de consommation de la maison</i> .....	142
Fig. V-8: <i>Fonctionnement du lave vaisselle (Marche à 20h00, arrêt à 20h45)</i> .....	143
Fig. V-9: <i>Fonctionnement du lave ligne (Marche à 18h30, arrêt à 20h10)</i> .....	143
Fig. V-10: <i>Température de la chambre No. 1</i> .....	143
Fig. V-11: <i>Température de la chambre No. 1 (Zoom)</i> .....	143
Fig. V-12: <i>Fonctionnement du chauffage No. 1</i> .....	143
Fig. V-13: <i>Fonctionnement du chauffage No. 1 (Zoom)</i> .....	143
Fig. V-14: <i>Puissance totale de consommation de la maison</i> .....	144
Fig. V-15: <i>Température de la chambre No. 1</i> .....	144
Fig. V-16: <i>Température de la chambre 1 (zoom)</i> .....	144
Fig. V-17: <i>Puissance totale de consommation de la maison</i> .....	145
Fig. V-18: <i>Température de la chambre No. 1</i> .....	145
Fig. V-19: <i>Température de la chambre No. 1 (zoom)</i> .....	145
Fig. V-20: <i>Puissance totale de consommation de la maison</i> .....	146
Fig. V-21: <i>Température de la chambre No. 1</i> .....	146
Fig. V-22: <i>Fonctionnement du chauffage No.1 (zoom)</i> .....	146
Fig. V-23: <i>Puissance totale de la maison</i> .....	147
Fig. V-24: <i>Température de la chambre No. 1</i> .....	147
Fig. V-25: <i>Puissance totale de la maison</i> .....	148
Fig. V-26: <i>Température de la chambre No. 1</i> .....	148
Fig. V-27: <i>Puissance totale de la maison</i> .....	148
Fig. V-28: <i>Température de la chambre No. 1</i> .....	148
Fig. V-29: <i>Puissance totale de la maison</i> .....	148
Fig. V-30: <i>Température de la chambre No. 1</i> .....	148
Fig. V-31: <i>Puissance totale de la maison</i> .....	149
Fig. V-32: <i>Température de la chambre No. 1</i> .....	149
Fig. V-33: <i>Puissance totale de la maison</i> .....	149
Fig. V-34: <i>Température de la chambre No. 1</i> .....	149
Fig. V-35: <i>Puissance totale de la maison</i> .....	149
Fig. V-36: <i>Température de la chambre No. 1</i> .....	149
Fig. V-37: <i>Modèle complet de l'hôtel développé sous Simulink</i> .....	151
Fig. V-38: <i>Température extérieure</i> .....	152
Fig. V-39: <i>Fonctionnement des autres charges du hôtel (lumières, cuisinière, frigo, ...)</i> .....	152
Fig. V-40: <i>Source d'énergie de radiation solaire</i> .....	152
Fig. V-41: <i>Puissance totale de l'hôtel</i> .....	153
Fig. V-42: <i>Température intérieure de la chambre No. 1</i> .....	153
Fig. V-43: <i>Température intérieure de la chambre No. 1 (zoom)</i> .....	153
Fig. V-44: <i>Fonctionnement du climatiseur No. 1</i> .....	153
Fig. V-45: <i>Fonctionnement du climatiseur No. 1 (Zoom)</i> .....	153
Fig. V-46: <i>Puissance totale consommée par l'hôtel</i> .....	154
Fig. V-47: <i>Température intérieure de la chambre No. 1</i> .....	154
Fig. V-48: <i>Température intérieure de la chambre No. 1 (zoom)</i> .....	154
Fig. V-49: <i>Fonctionnement du climatiseur No. 1</i> .....	155
Fig. V-50: <i>Fonctionnement du climatiseur No. 1 (Zoom)</i> .....	155



Fig. V-51: Puissance totale consommée par l'hôtel .....	155
Fig. V-52: Température intérieure de la chambre No. 1 (zoom) .....	155
Fig. V-53: Puissance totale consommée par l'hôtel .....	155
Fig. V-54: Température intérieure de la chambre No.1 (zoom) .....	155
Fig. V-55: Puissance totale consommée par l'hôtel .....	156
Fig. V-56: Température intérieure de la chambre No. 1 .....	156
Fig. V-57: Température extérieure .....	156
Fig.V-58: Puissance totale consommée par l'hôtel .....	156
Fig. V-59: Température extérieure .....	157
Fig. V-60: Puissance totale consommée par l'hôtel.....	157
Fig. V-61: Coefficient de fonctionnement du radiateur .....	158
Fig. V-62: Courbe déclenchement du disjoncteur.....	158
Fig. V-63: Principe de la méthode développée .....	159
Fig. V-64: Principe de la méthode .....	160
Fig. V-65: Courbe de déclenchement.....	160
Fig. V-66: Schéma de la «Cuisine intégrée».....	161
Fig. V-67: Puissance totale consommée par la «Cuisine intégrée» sans gestion .....	162
Fig. V-68: Puissance consommée par la cuisinière1 sans gestion.....	162
Fig. V-69: Consommation totale de la «Cuisine intégrée» sans gestion.....	163
Fig. V-70: Puissance consommée par la cuisinière2 sans gestion.....	163
Fig. V-71: Puissance totale consommée par la «Cuisine intégrée» avec gestion .....	163
Fig. V-72: Puissance consommée par la cuisinière1 avec gestion.....	163
Fig. V-73: Consommation totale la «Cuisine intégrée» avec gestion .....	163
Fig. V-74: Puissance consommée par la cuisinière2 avec gestion.....	163
Fig.A 1: La puissance totale en cas normal.....	177
Fig.A 2: La puissance totale en cas de déplacement.....	178
Fig.A 3: Courbe de charge journalière en 9 périodes typiques .....	179
Fig.A 4: Consommation par lumières (Sans utilisation des photoélectriques) .....	179
Fig.A 5: Courbe d'ensoleillement .....	180
Fig.A 6: Consommation par lumières (Avec utilisation des photoélectriques).....	180
Fig.A 7: Calculer le temps de retour.....	181
Fig.A 8: Consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de mars en 2005 (hiver).....	182
Fig.A 9: Erreur absolue entre la consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de mars en 2005 (hiver) .....	183
Fig.A 10: Consommation réelle et prévisionnelle pour le lundi 28 mars 2005 (hiver).....	183
Fig.A 11: Puissance totale de la maison .....	187
Fig.A 12: Courbe de charge de l'ensemble des appareils .....	187
Fig.A 13: Puissance de l'ensemble des chauffages.....	187
Fig.A 14: Lave-vaisselle.....	187
Fig.A 15: Fonctionnement de cuisinière .....	187
Fig.A 16: Lave-linge/ Sèche Linge .....	187
Fig.A 17: Fonctionnement de réfrigérateur .....	188
Fig.A 18: Micro-ondes -Cafetière .....	188
Fig.A 19: Téléviseur/DVD.....	188
Fig.A 20: Radio Player .....	188
Fig.A 21: Eclairage.....	188
Fig.A 22: Autres Charges.....	188
Fig.A 23: Ordinateur et imprimante .....	188

## TABLE DES TABLEAUX

Tableau I-1: <i>Quelques solutions pour la maîtrise de consommation</i> .....	17
Tableau II-1: <i>Consommation d'électricité du secteur résidentiel et tertiaire par usage</i> .....	26
Tableau II-2: <i>Classification des usages dans le secteur résidentiel et tertiaire</i> .....	26
Tableau II-3: <i>La consommation annuelle moyenne des cuissons électriques</i> .....	28
Tableau II-4: <i>La consommation annuelle moyenne des appareils ménagers et éclairage</i> .....	29
Tableau II-5: <i>Puissances minimales de dimensionnement à prévoir par point de livraison</i> .....	29
Tableau II-6: <i>Puissance installée de référence de l'éclairage</i> .....	30
Tableau II-7: <i>Consommation de chauffage de secteur tertiaire en 2000 [SON02]</i> .....	31
Tableau II-8: <i>Conductivités thermiques de quelques matériaux</i> .....	44
Tableau II-9: <i>Diamètre et puissance maximale de cuisinière électrique</i> .....	51
Tableau II-10: <i>Répartition d'énergie et durée moyenne de chaque type de cycle</i> .....	59
Tableau II-11: <i>Durée de chaque type de cycle</i> .....	59
Tableau II-12: <i>Puissance de chaque type de cycle</i> .....	59
Tableau II-13: <i>Durée de chaque type de cycle</i> .....	62
Tableau II-14: <i>Puissance de chaque type de cycle</i> .....	62
Tableau III-1: <i>Fonction de transfert</i> .....	73
Tableau III-2: <i>Consommation électrique moyenne</i> .....	79
Tableau III-3: <i>Données d'entrée pour le réseau de neurones</i> .....	80
Tableau III-4: <i>Erreur absolue, erreur moyenne et l'erreur quadratique (RMS) entre la consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de mars en 2005 (hiver)</i> .....	84
Tableau III-5: <i>Erreur absolue, erreur moyenne et erreur quadratique (RMS) entre la consommation réelle et de prévision pour le mois de juillet en 2005 (hiver)</i> .....	86
Tableau III-6: <i>Les meilleurs paramètres du réseau</i> .....	87
Tableau III-7: <i>Cycle et fréquence du fonctionnement du lave-vaisselle et de la télévision</i> .....	90
Tableau III-8: <i>Facteur horaire (probabilité horaire) de la cuisinière pour les jours ouvrables</i> .....	92
Tableau III-9: <i>Ensemble d'appareils électroménager pour le modèle</i> .....	95
Tableau IV-1: <i>Dimensions et propriétés thermiques des murs et des portes</i> .....	113
Tableau IV-2: <i>Paramètres thermiques de la maison</i> .....	113
Tableau IV-3: <i>Usages électriques dans la maison</i> .....	113
Tableau IV-4: <i>Comparaison des coûts pour le cas sans gestion et avec gestion optimale</i> .....	124
Tableau IV-5: <i>Usages électriques dans la maison</i> .....	127
Tableau V-1: <i>Comparaison des différents cas de gestion</i> .....	147
Tableau V-2: <i>Comparaison de l'influence des différentes conditions (Puissance admissible et Température extérieure) sur le confort</i> .....	150
Tableau V-3: <i>Usages électriques dans la maison</i> .....	151
Tableau V-4: <i>Comparaison des différentes conditions: Puissance admissible et Température</i> .....	157
Tableau V-5: <i>Usages électriques</i> .....	162
Tab.A 1: <i>Comparaison économique des cas</i> .....	178
Tab.A 2: <i>Erreur absolue, erreur moyenne et l'erreur quadratique (RMS) entre la consommation réelle et prévisionnelle pour le mois de mars en 2005 (hiver)</i> .....	184
Tab.A 3: <i>Cycles du fonctionnement et fréquences de l'ensemble d'appareil</i> .....	185
Tab.A 4: <i>Probabilité horaire des appareils</i> .....	186



# GESTION OPTIMALE DES CONSOMMATIONS D'ENERGIE DANS LES BATIMENTS

## RESUME

L'objectif de la thèse est de fournir les méthodes qui permettent de gérer au mieux l'énergie en assurant le confort souhaité. Les modèles de charges sont développés et validés par des mesures. La prévision à court-terme de la consommation correspondant aux multi bâtiments (région) et au secteur résidentiel est proposée par réseaux de neurones et la méthode ascendante. Trois méthodes originales de la gestion optimale prédictive des chauffages et des climatisations sont développées: optimisation du confort thermique, minimisation des pics et minimisation des coûts de consommation. Deux méthodes originales de la gestion des charges en temps réel sont proposées: méthode basée sur un système de régulation adaptative des chauffages et des climatisations et méthode basée sur le délestage en fonction de la courbe de protection. Les méthodes proposées sont validées par simulation pour une maison (secteur résidentiel) et un hôtel (secteur tertiaire) avec les résultats satisfaisants.

### Mots-cles

Bâtiment, consommation, coût d'énergie, gestion intelligente, climatisation, chauffage, réseaux de neurones, bottom-up, optimisation, régulation adaptative

---

# OPTIMAL MANAGEMENT OF ENERGY CONSUMPTION IN THE BUILDINGS

## ABSTRACT

The aim of the thesis is to provide the methods that can better manage energy in ensuring the level of comfort. The load models are developed and validated by measures. The neural networks and the method botom-up are proposed for the short-term consumption forecasting corresponding to the multi buildings (region) and to the residential sector. Three original methods of optimal predictive management for heating and air conditioning are developed: the optimization of thermal comfort, the minimization of peak consumption, and the minimization of costs of energy consumption. Two original methods for the load management in real time are proposed: the method based on a system of adaptive regulation for heating and air conditioning and the method based on the shedding in function of protection characteristic. The proposed methods are validated by simulation for one house (residential sector) and a hotel (tertiary sector) with satisfied results.

### Keywords

Buildings, consumption, energy cost, intelligent management, air conditioning, heating, neural networks, bottom-up, optimization, adaptive control