

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 SABONNADIERE / Quoc Tuan TRAN / Kim Hung LE

JURY

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

Chapitre I : Introduction

I.	CHAPITRE I : INTRODUCTION	11
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).

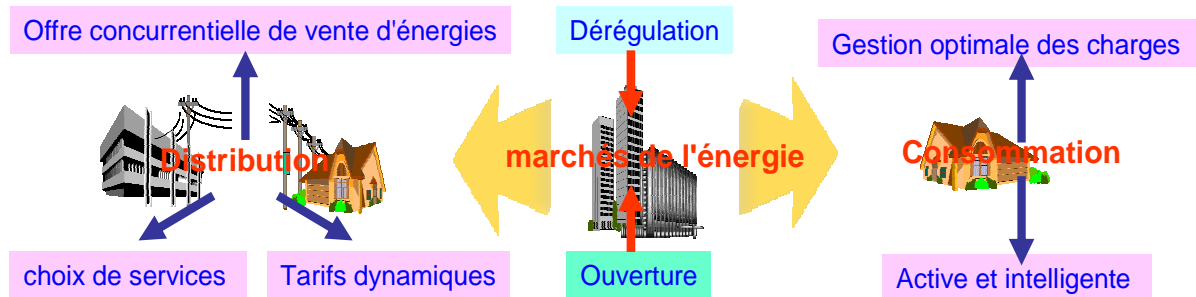


Fig. I-1: Changements majeur dans le domaine d'énergie

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, CO₂, SO₂ ou NO_x 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.

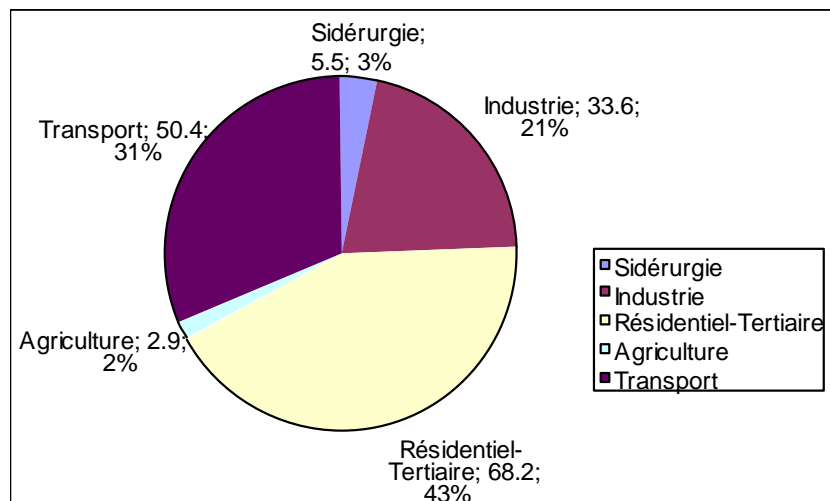


Fig. I-2: Consommation finale énergétique par secteur en France en 2005 (en Mtep)

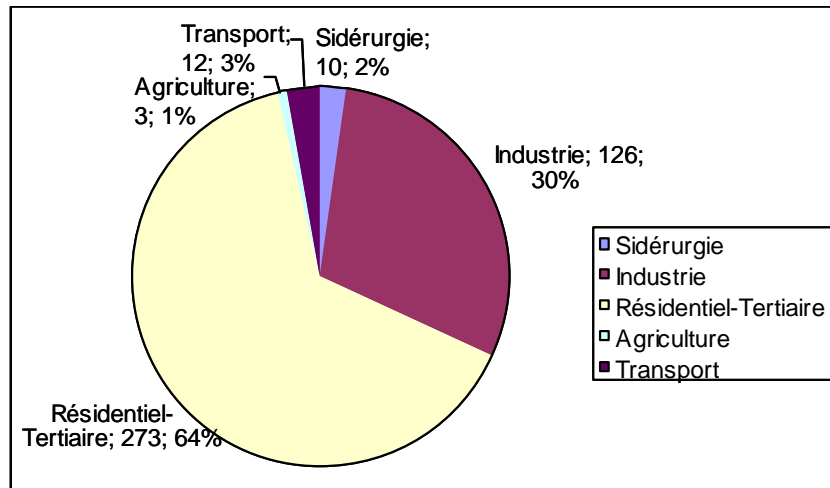


Fig. I-3: Consommation d'électricité par secteur en France en 2005 (en TWh)

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.

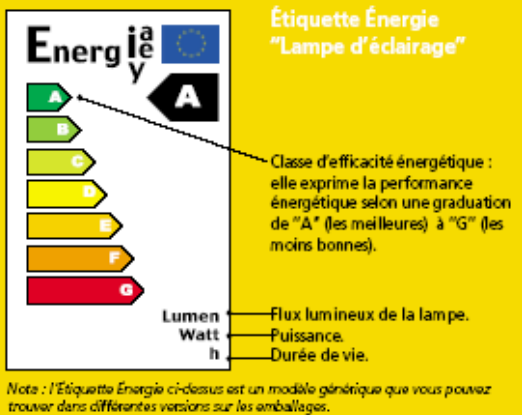
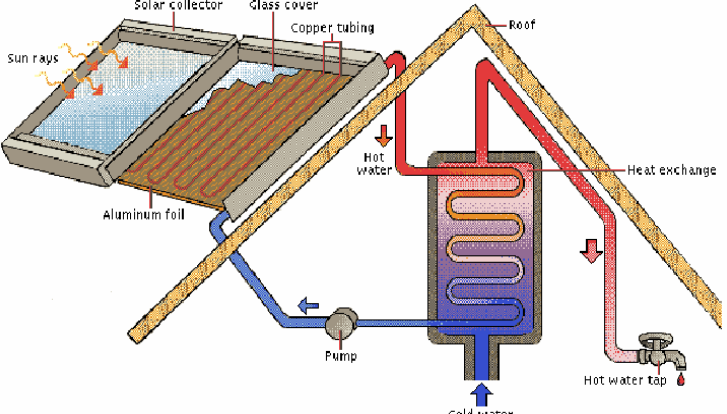

<p>Les équipements intrinsèquement performants : => lampes basse consommation, isolation des bâtiments chauffés à l'électricité, appareils ménagers et professionnels économes, ...</p>	 <p>Étiquette Énergie "Lampe d'éclairage"</p> <p>Classe d'efficacité énergétique : elle exprime la performance énergétique 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>La substitution de l'électricité par d'autres sources (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>Application d'une gestion intelligente de la charge (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

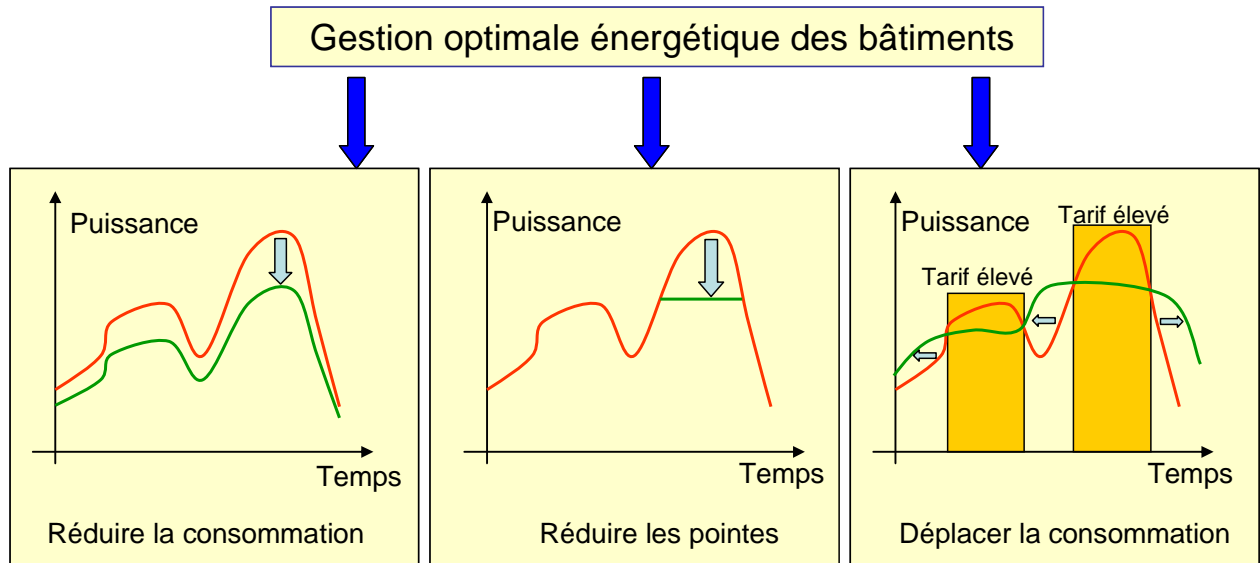


Fig. I-4: Solutions pour la gestion des charges dans les bâtiments

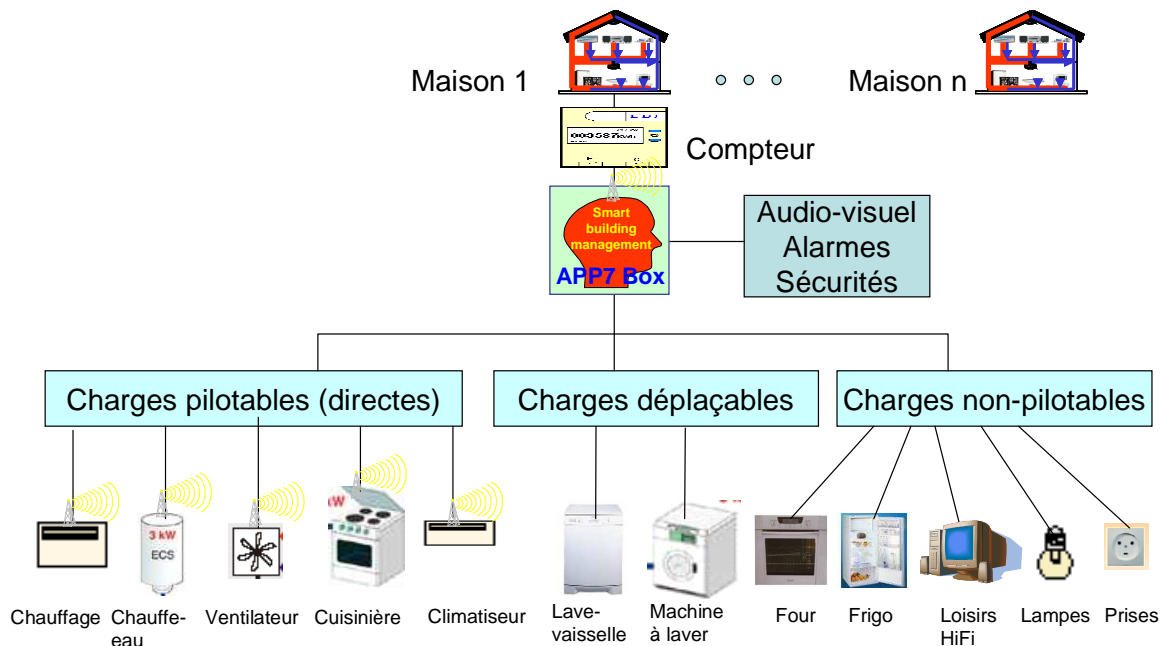


Fig. I-5: Gestion des charges après le compteur

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)...

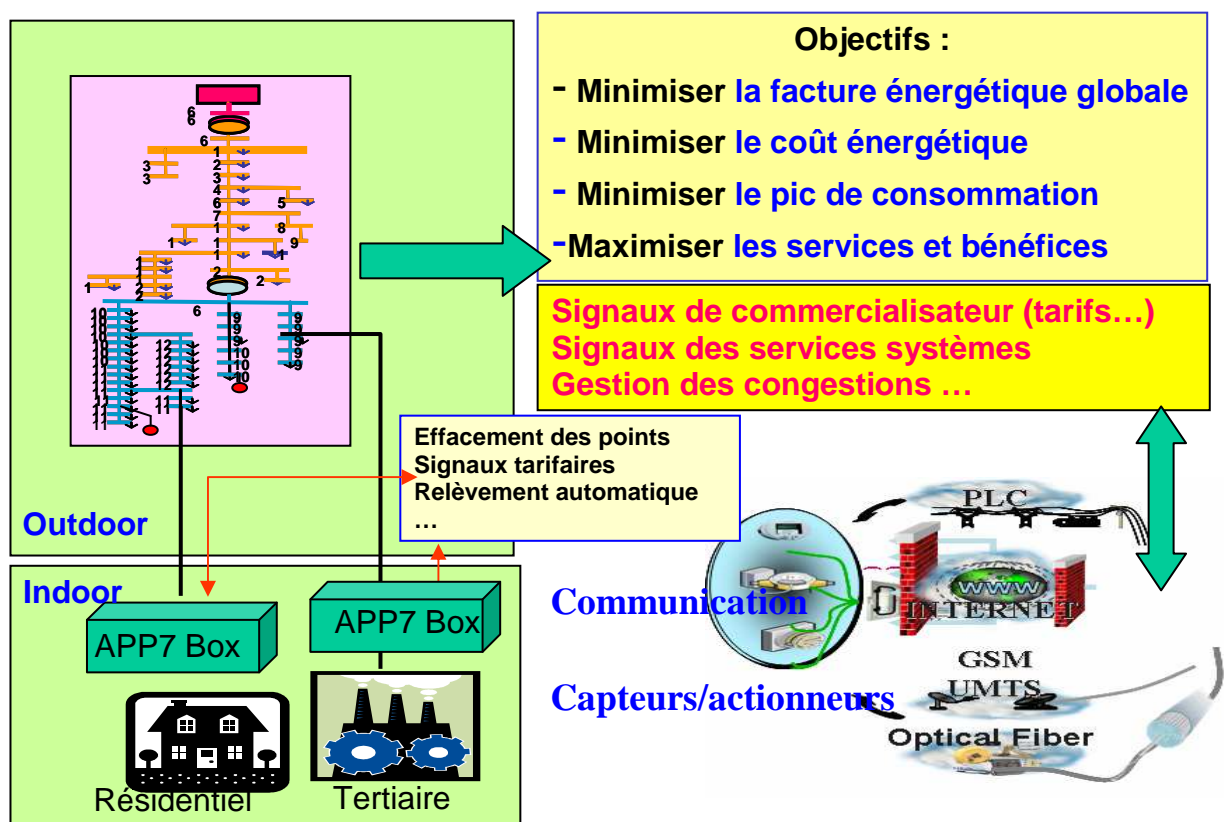


Fig. I-6: Objectif global du travail

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.

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

II. CHAPITRE II : GESTION DE CHARGE DANS LES BATIMENTS ET DEVELOPPEMENT DES MODELES DE CHARGE.....	23
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

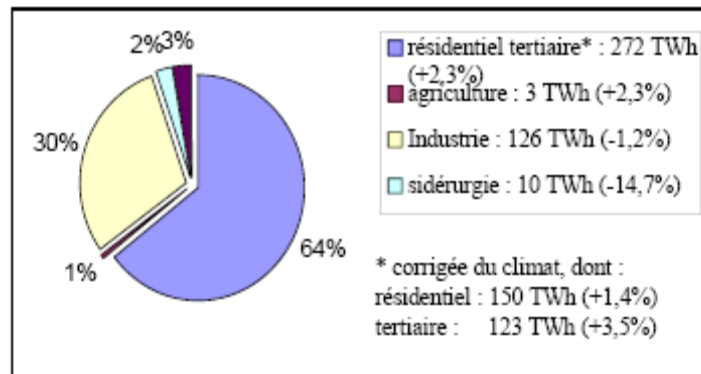


Fig. II-1: Consommation finale d'électricité en 2005 : 424 TWh

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.

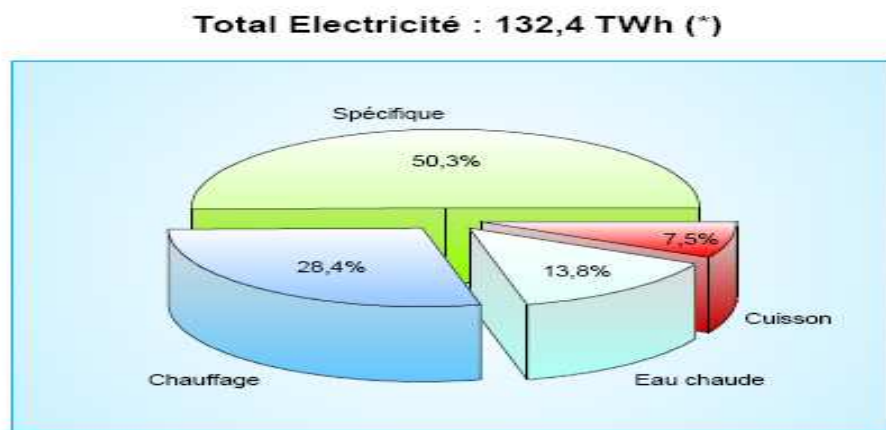
II.2.2.1 Secteur résidentiel

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].

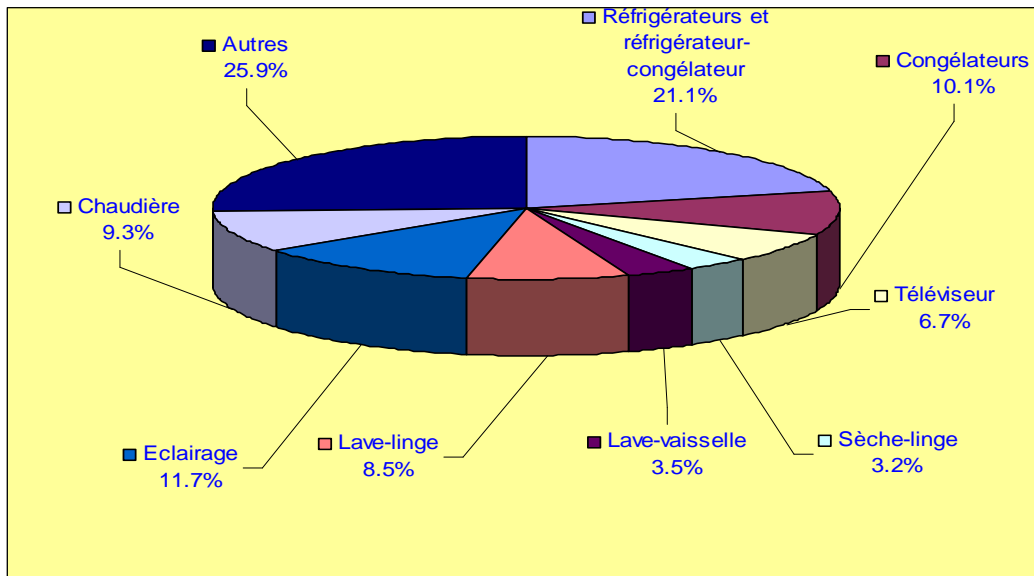


Fig. II-3: Répartition des consommations d'énergie électrique par usage dans les logements

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 ¹	Bouilloire	58
Plaques vitro	281 ¹	Friteuse	11
Table à induction	337 ¹	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-congélateur	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 ²)
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.

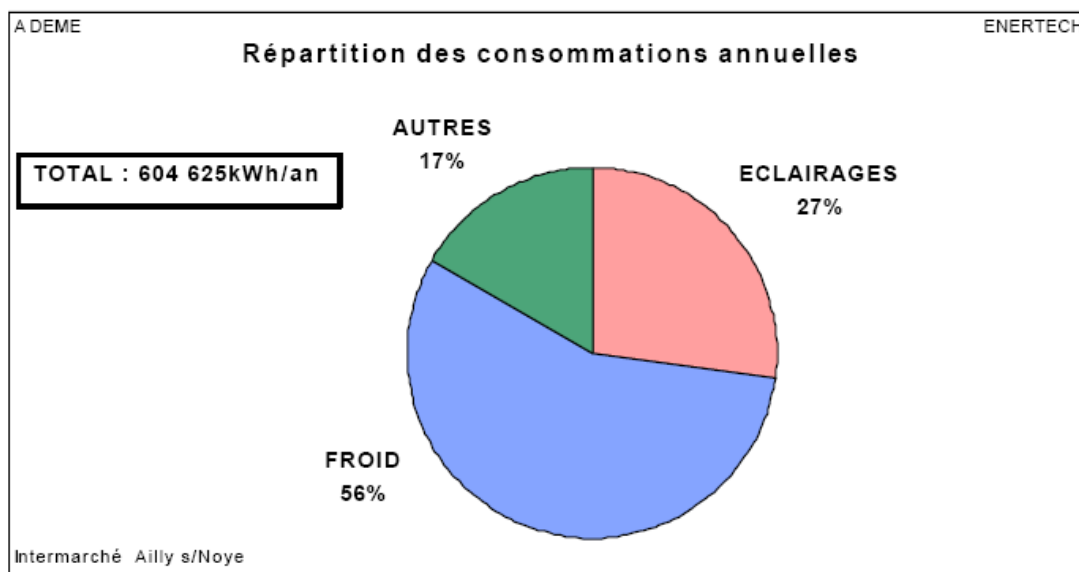


Fig. II-4: Répartition des consommations annuelles d'un super marché de moyenne surface [ADE01]

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]

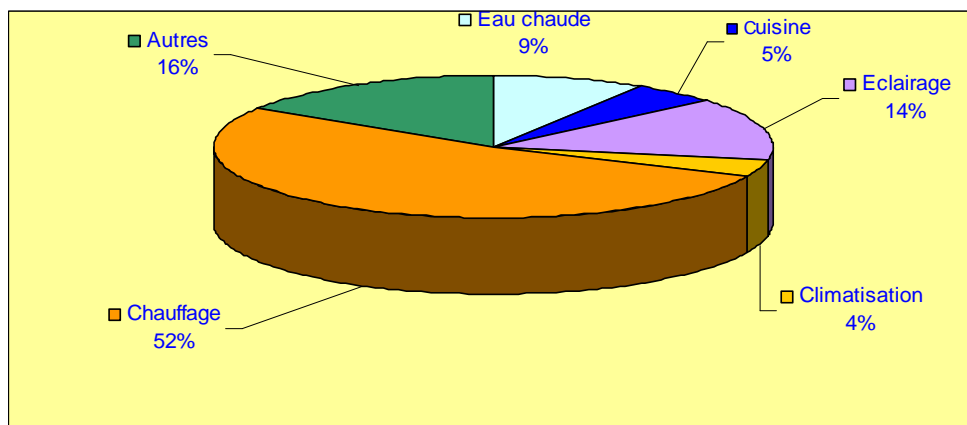


Fig. II-5: Consommation énergétique dans les bâtiments tertiaires de l'UE

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 50m²), 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 :

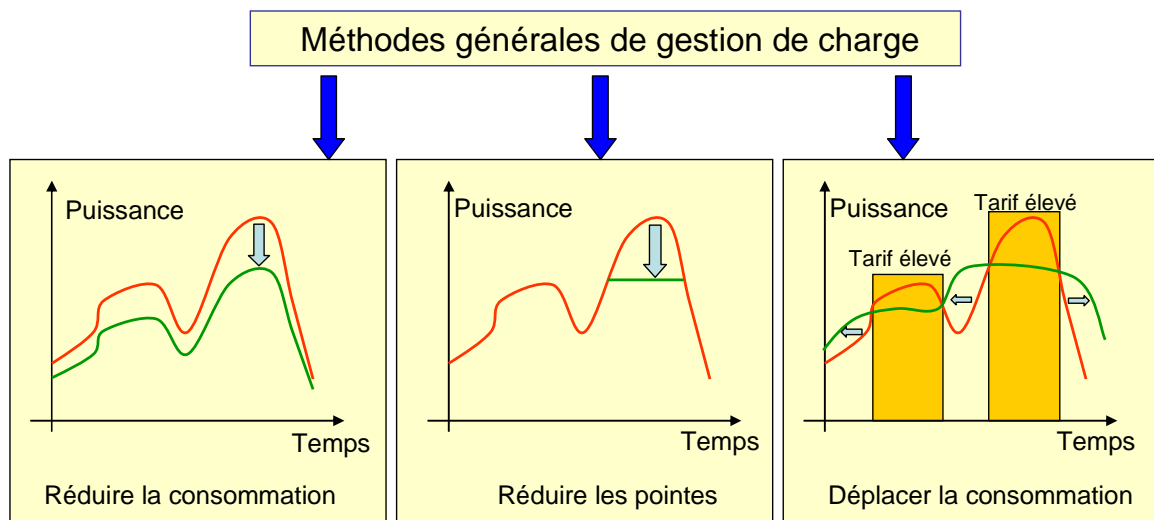


Fig. II-6: Les méthodes générales de gestion de charge

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 déletera 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.

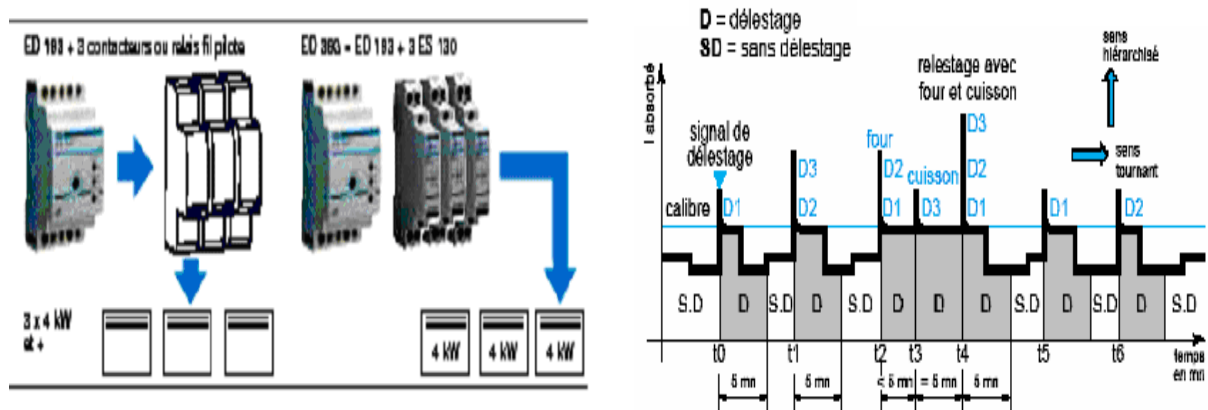


Fig. II-7: Délestage tournant et hiérarchisé

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^{ème} couche du mur i, le coefficient d'échange thermique intérieur et la surface du mur i.
- T_k^{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, λ_j, L_j et h^{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:

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

- α 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 :

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

- σ , ε et F sont la constance 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
- ρ , 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 :

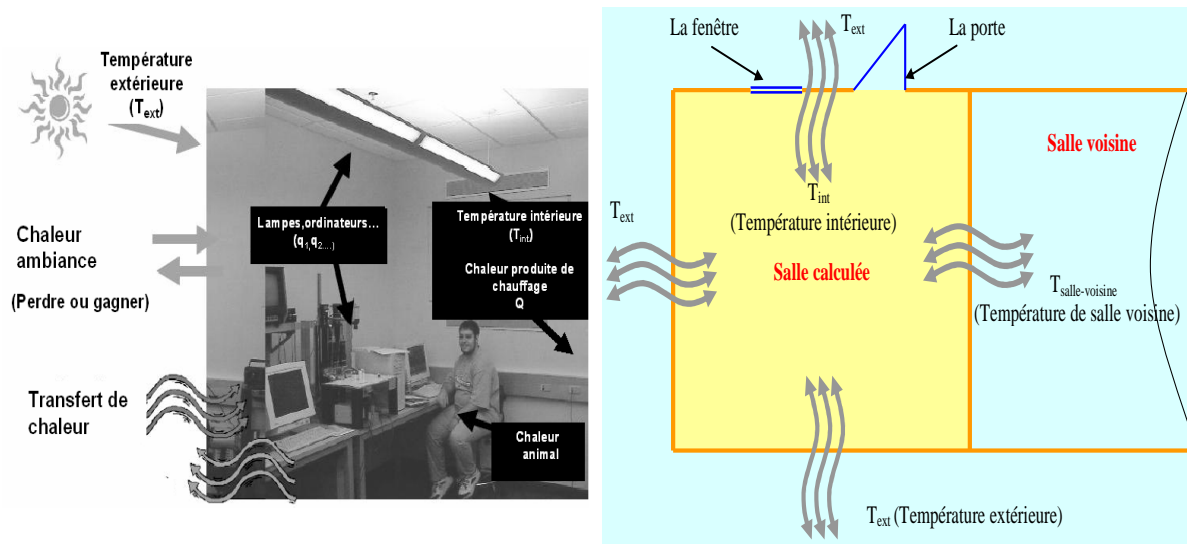


Fig. II-8: Transfert thermique dans une salle

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 :

- ρ_c densité d'air (kg/m^3)
- c_o chaleur spécifique d'air ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
- V_k^c volume de salle k (m^3)
- T_k^{int} température intérieure de la salle k ($^{\circ}\text{C}$)
- T_i^{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^{eq} résistance thermique équivalente de salle k ($^{\circ}\text{K}/\text{W}$)

La résistance thermique équivalente d'une salle k (R_k^{eq}) dépend de la résistance thermique des fenêtres, des portes (R_k^{fp}) et du mur (R_k^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 (m²)
- A^m surface du mur (m²)
- λ^{fp} conductibilité thermique des fenêtres et des portes (W/m°K)
- λ^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

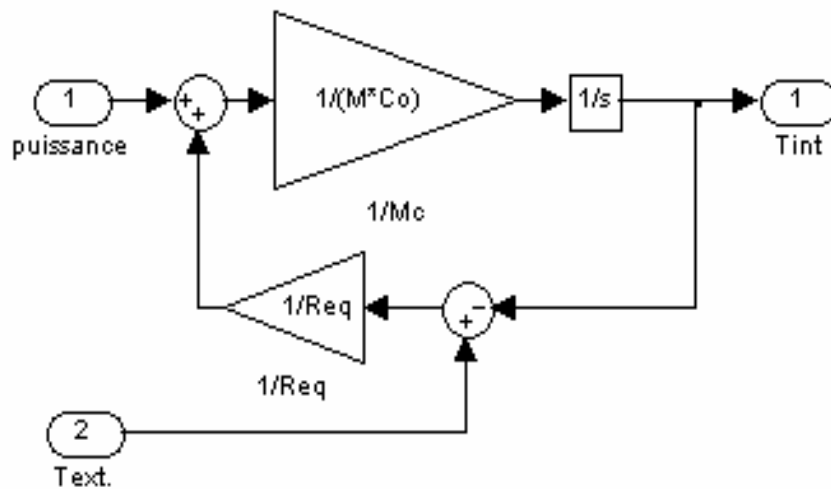


Fig. II-9: Modèle thermique de la salle en simulink

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 CO₂ 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.

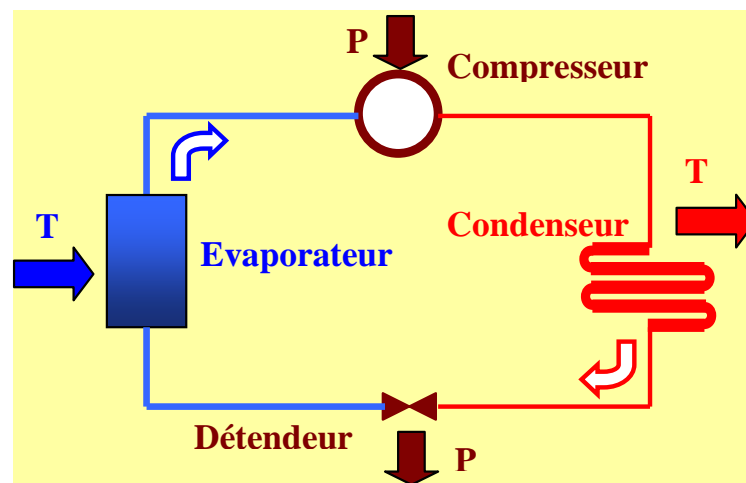


Fig. II-10: Principe de fonctionnement de la climatisation

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^{int} : la température intérieure ($^{\circ}\text{K}$)
- T^{ext} : la température extérieure ($^{\circ}\text{K}$)
- I^s : la source de courant de rayonnement solaire (W)
- I^{inst} : la source de courant de chaleur produite par des équipements, des personnes et du système de d'éclairage ...(W)
- I^{ac} : la source de courant de la chaleur produite par le climatiseur (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.

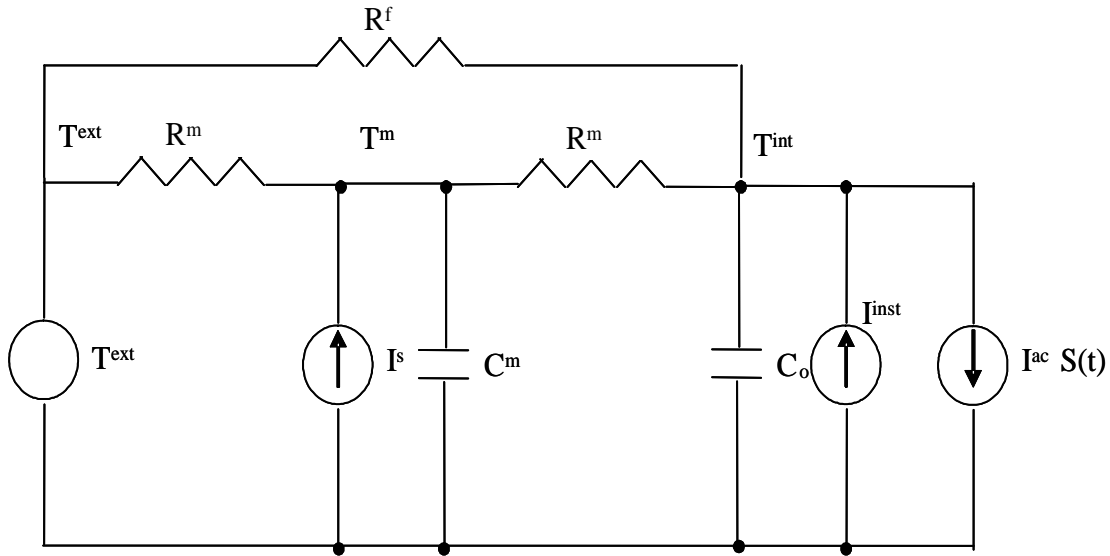


Fig. II-11: *Modèle électrique pour une salle conditionnée*

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:

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

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

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

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

- ρ_c = densité d'air (1.225 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^{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. .

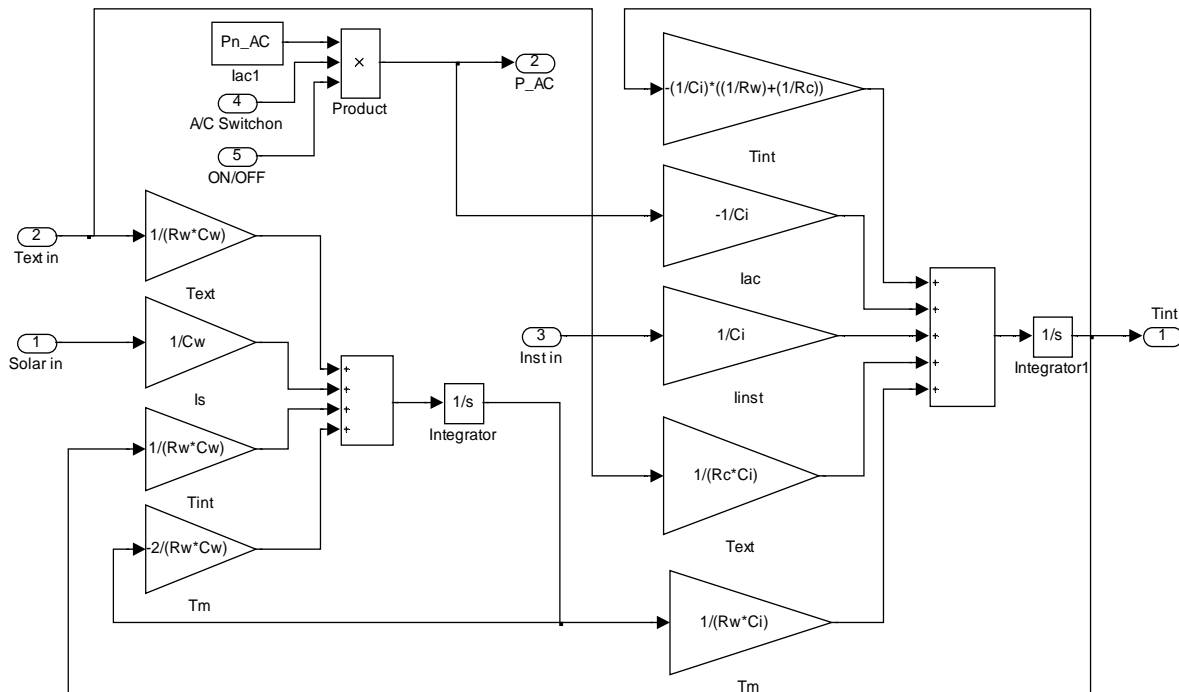


Fig. II-12: *Modèle thermique en Simulink d'une salle conditionnée*

Ce modèle comporte 5 entrées :

- La source de rayonnement solaire I^s
- La source interne : I^{inst}
- La température extérieure T^{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°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.

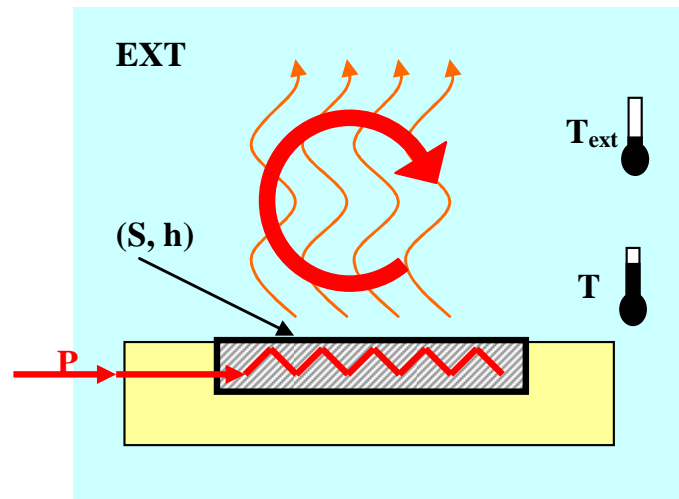


Fig. II-13: Transfert thermique de la cuisinière électrique

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 (m²)
- h coefficient d'échange thermique (W/m²K)
- P = Q puissance de chaleur produite par la cuisinière (W)
- T^{ext} 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/m²K)

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 ² K)	S (m ²)	MC (J/K)	T ^{ext} (°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 : $\rho = 6290$ (kg/m³)

Volume de la plaque électrique : $V = S d = 0.021 \cdot 0.02 = 0.00042$ (m³)

Masse de la plaque électrique : $M = V\rho = 0.00042 \cdot 6290 = 2.6418$ (kg)

$MC = 2.6418 \cdot 627 = 1656.4$ (J/K)

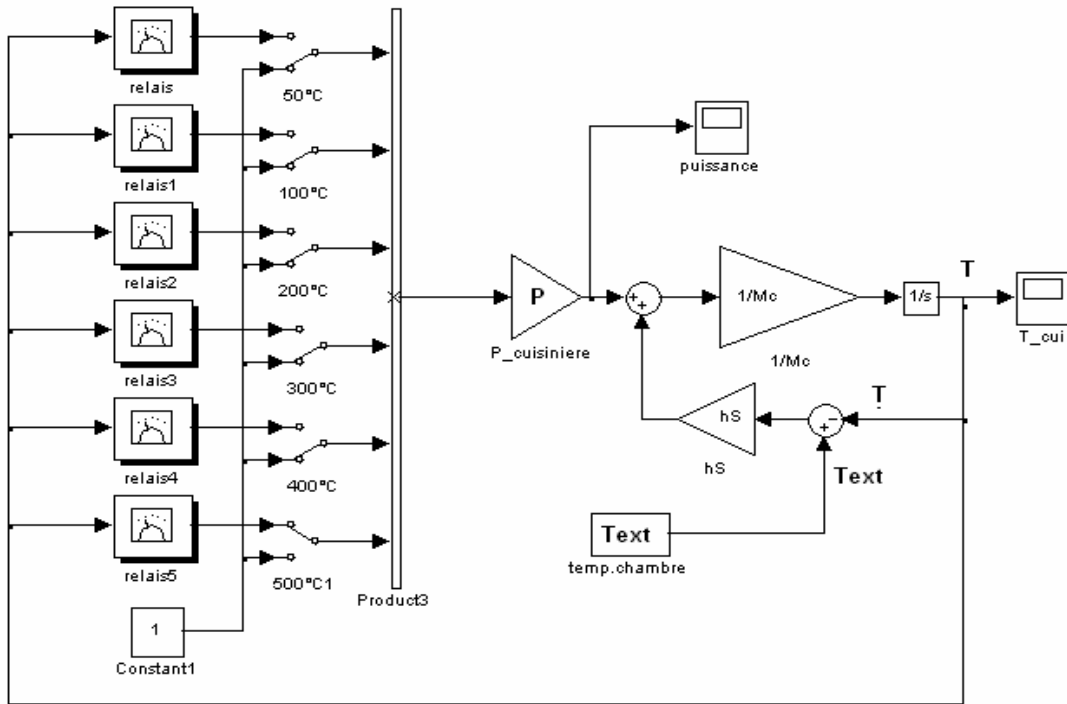


Fig. II-14: *Modèle de cuisinière électrique sous Simulink*

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.

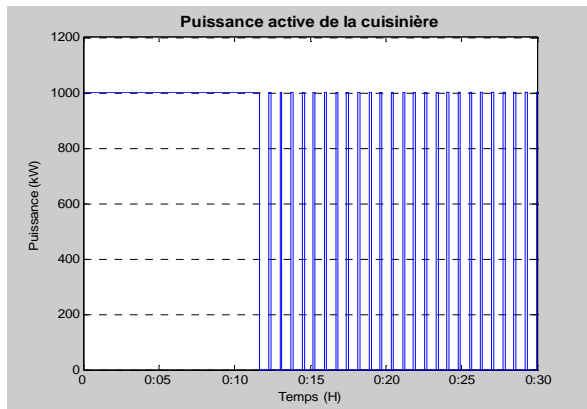


Fig. II-15: *Courbe de charge obtenue par Simulink*

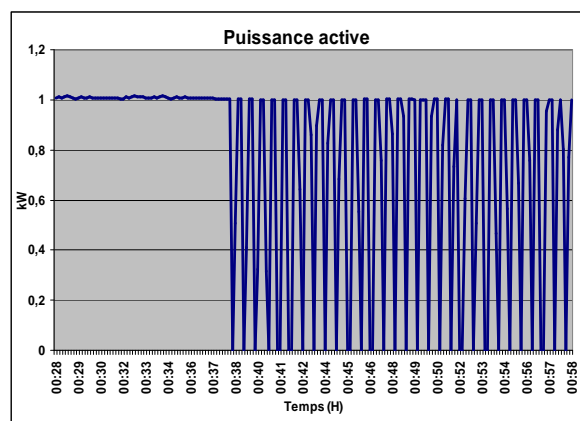


Fig. II-16: *Courbe de charge mesurée de la cuisinière*

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.

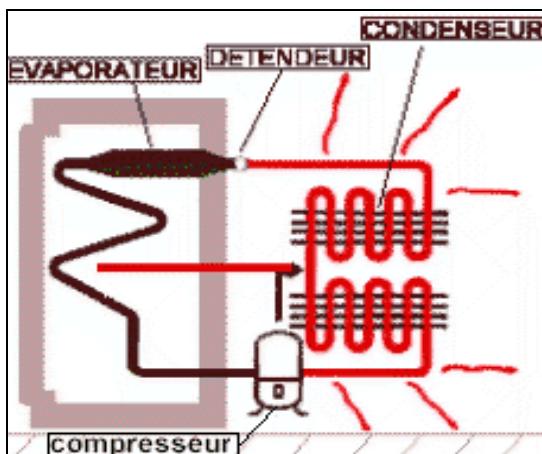


Fig. II-17: Circuit frigorifique du réfrigérateur

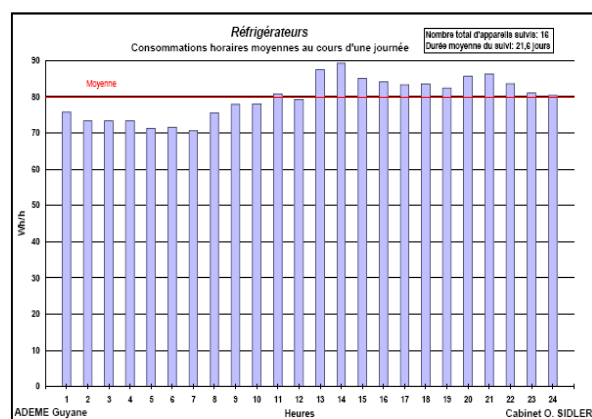


Fig. II-18: Consommation d'un réfrigérateur mesurée par ADEME

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).

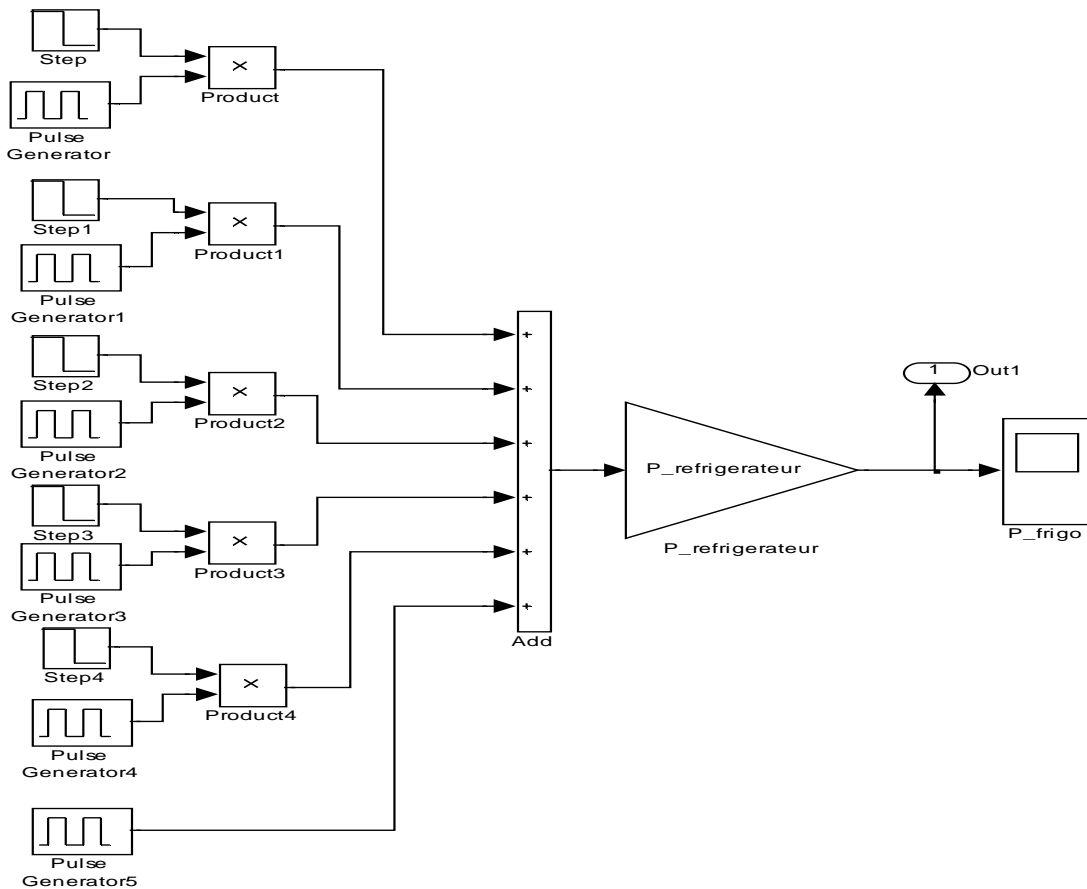


Fig. II-19: Modèle du réfrigérateur

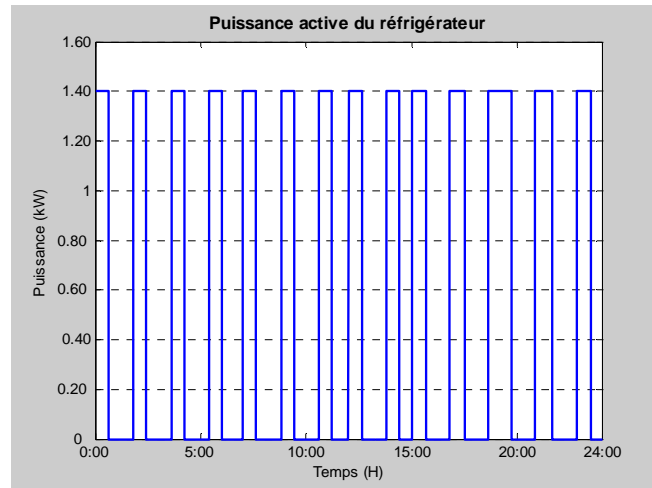


Fig. II-20: Puissance active obtenue par simulation de réfrigérateur (24h)

❖ **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.

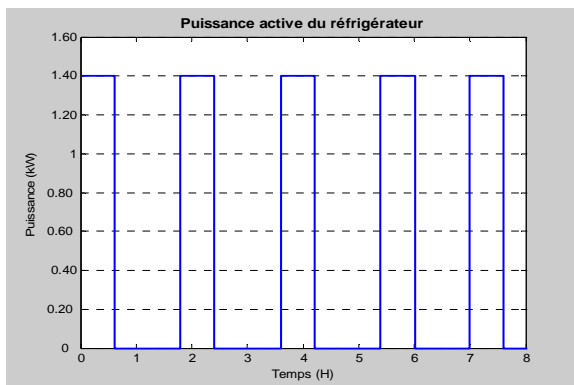


Fig. II-21 : Puissance active obtenue par simulation du réfrigérateur

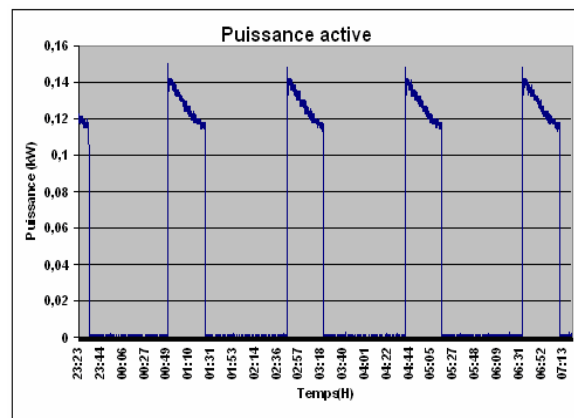


Fig. II-22 : Puissance active mesuré du réfrigérateur

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°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°C pour les appareils neufs. Avec une valeur moyenne de 81 % alors que la température moyenne est très inférieure à 32°C , il est patent qu'une inadaptation des matériels (mauvaise qualité, sous-dimensionnement) en est la cause.

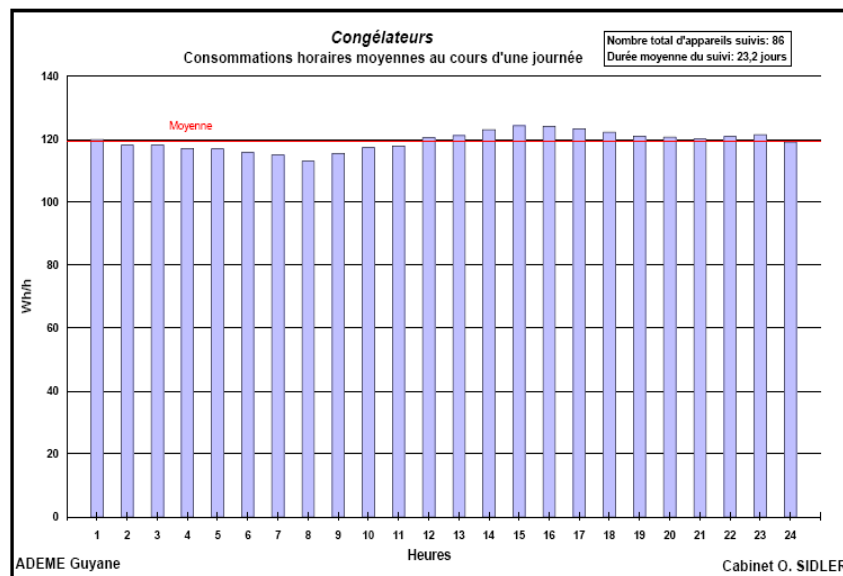


Fig. II-23: Consommation d'un congélateur mesurée par ADEME [SID-Guy]

- 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.

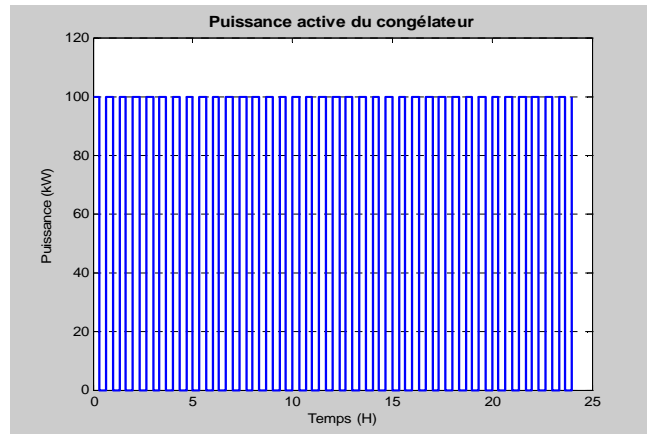
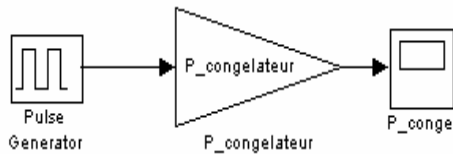


Fig. II-24: *Modèle de congélateur*

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°C , de 0h à 8h.

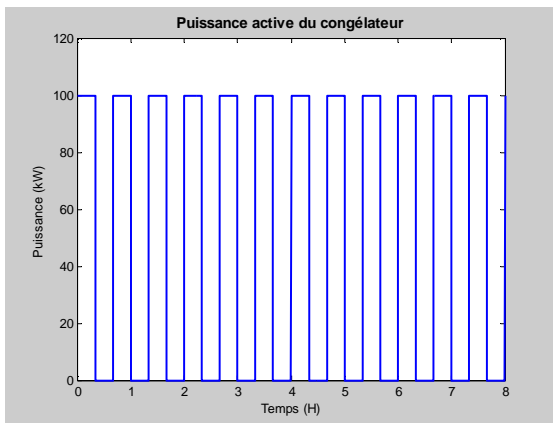


Fig. II-26: *Courbe obtenue par la simulation*

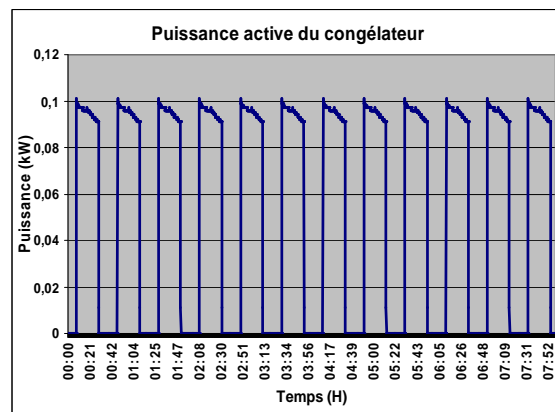


Fig. II-27: *Courbe mesurée*

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

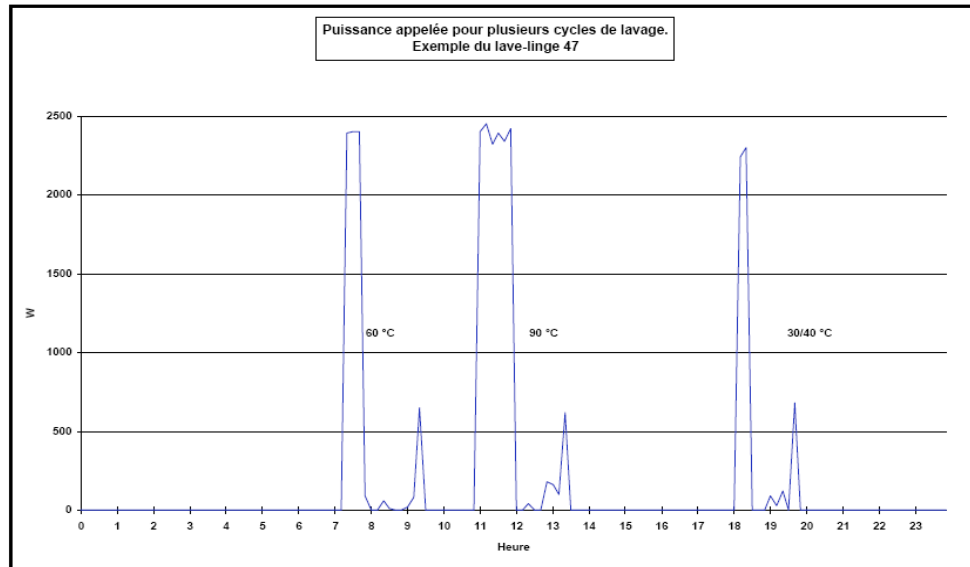


Fig. II-28: Puissance appelée pour les températures différentes

❖ 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.

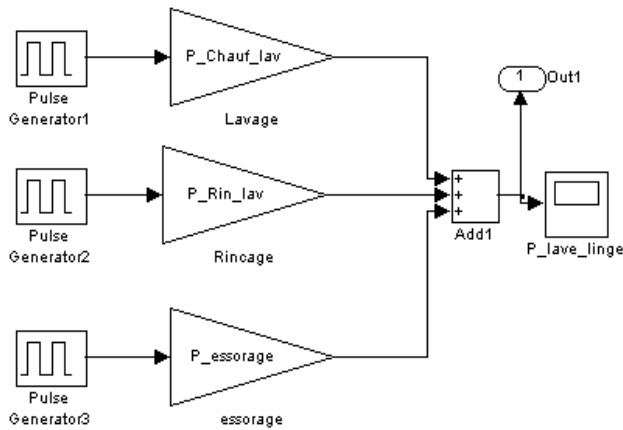


Fig. II-29: *Modèle de lave-linge*

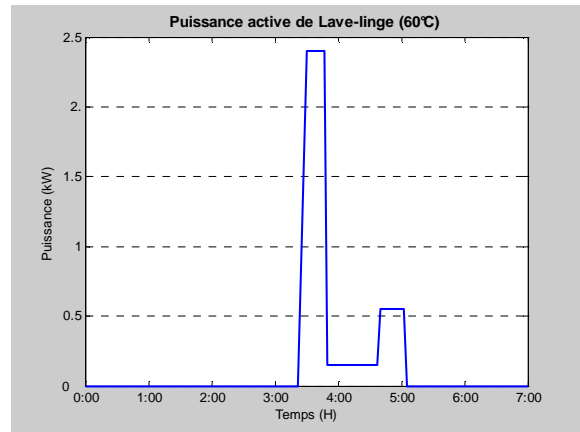


Fig. II-30: *Puissance active de lave-linge*

❖ **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.

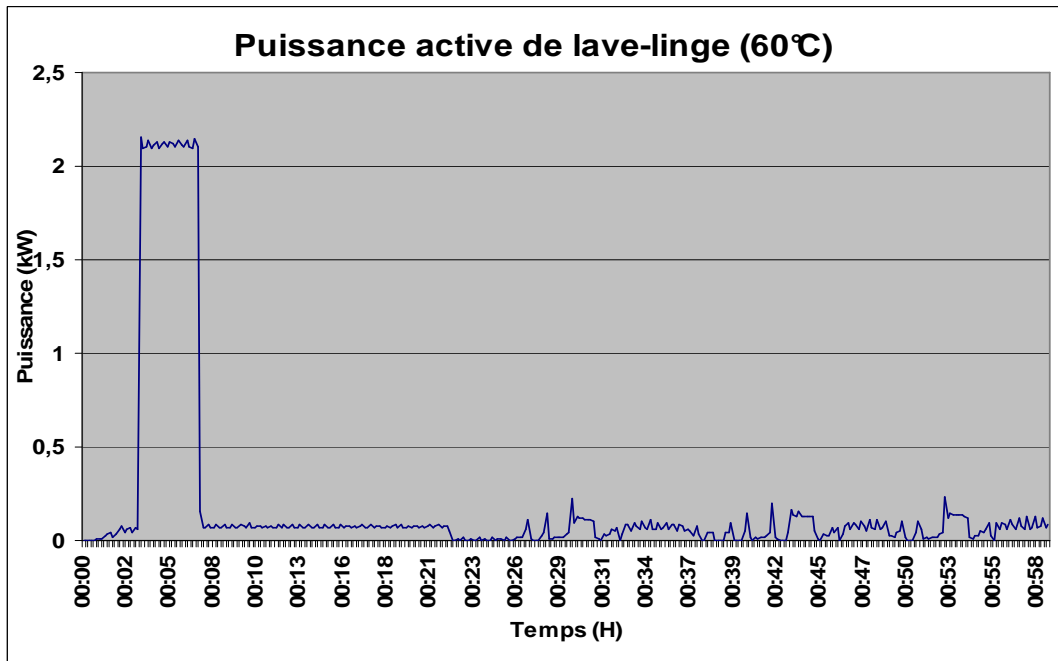


Fig. II-31: *Puissance active mesurée d'un lave-linge*

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

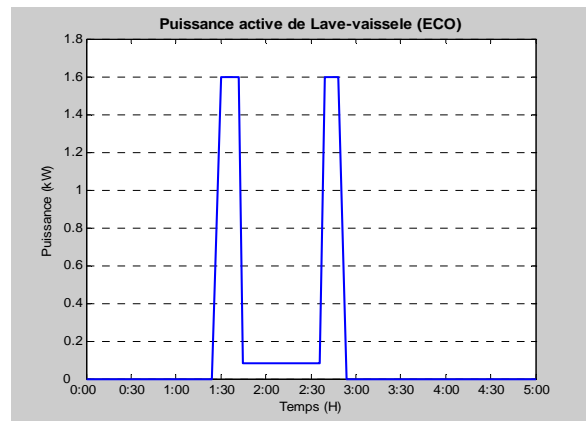
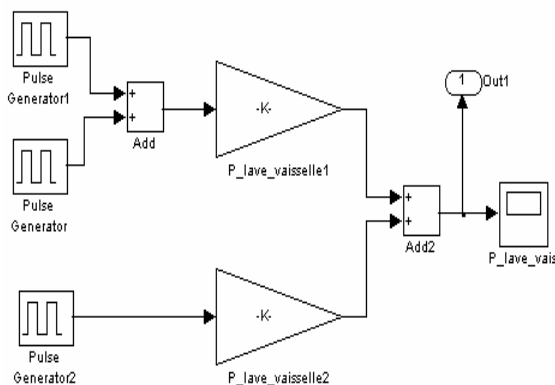


Fig. II-32: Modèle de lave-vaisselle

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).

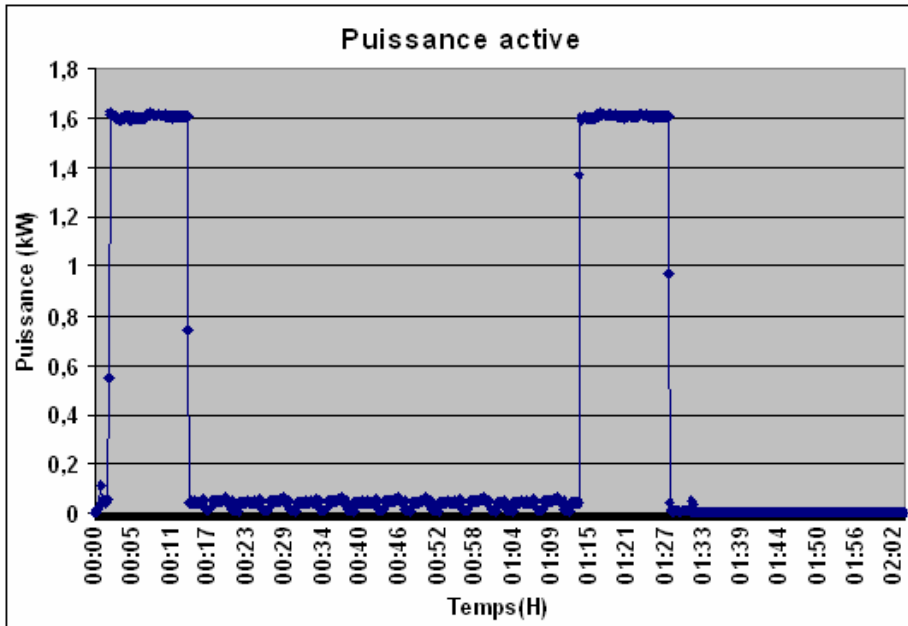


Fig. II-34 : Courbe mesurée d'un lave-vaisselle

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 IV : Développement des stratégies de gestion optimale des charges

IV. CHAPITRE IV : DEVELOPPEMENT DES STRATEGIES DE GESTION OPTIMALE DES CHARGES	99
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.

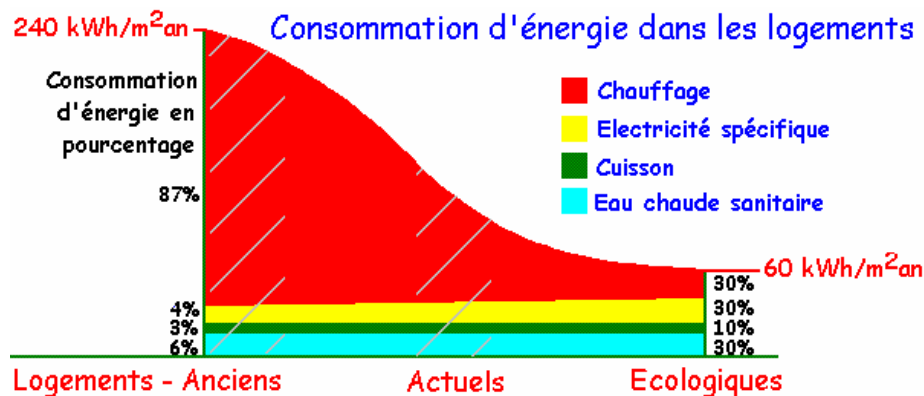


Fig. IV-1: Consommation d'énergie dans les logements

Dans ce secteur, le facteur 4 (réduction par 4 des émissions de CO₂ des pays développés) signifie qu'à partir d'une consommation moyenne plus de 200 kWh/m²/an actuellement, il faut parvenir à une consommation moyenne de 50 kWh/m²/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).

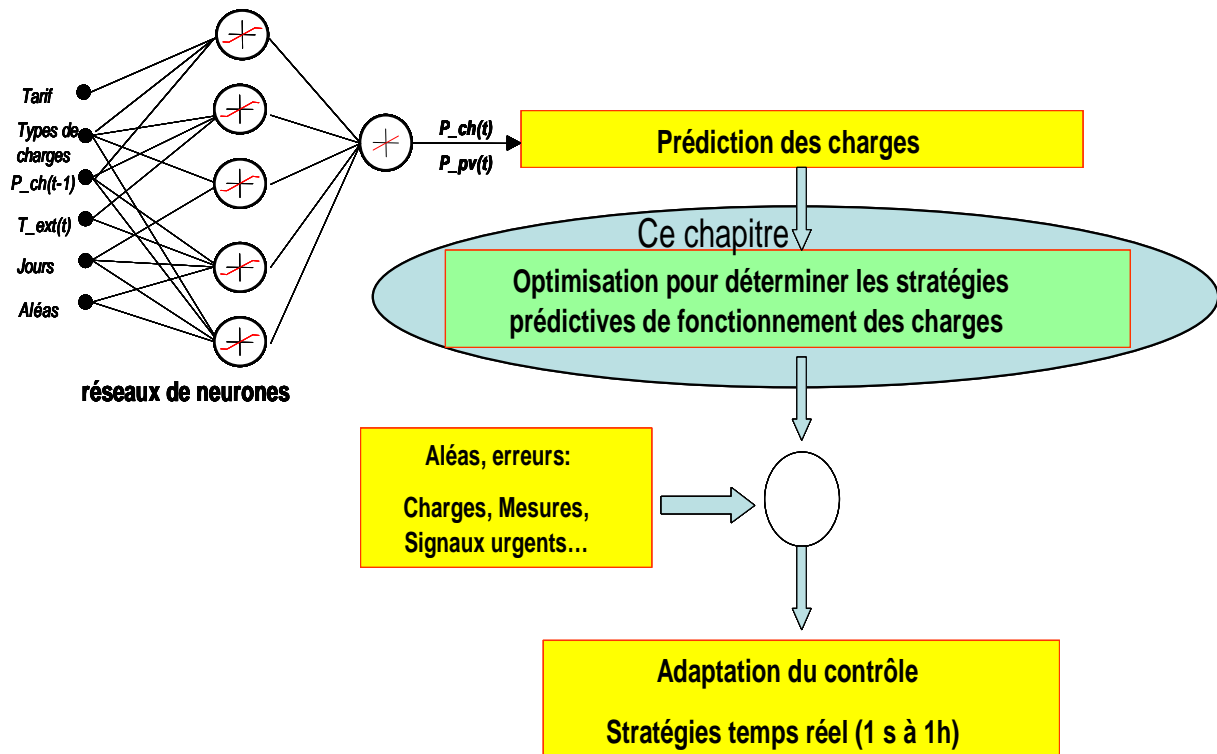


Fig. IV-2: Phases de la gestion prédictive dans le système proposé de gestion des charges

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 :

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

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).

$$\text{Min } f = -4x_1 + x_2 - 2x_3$$

$$\text{Avec } 0 \leq x_i \leq 1 ; i=1, 2, 3$$

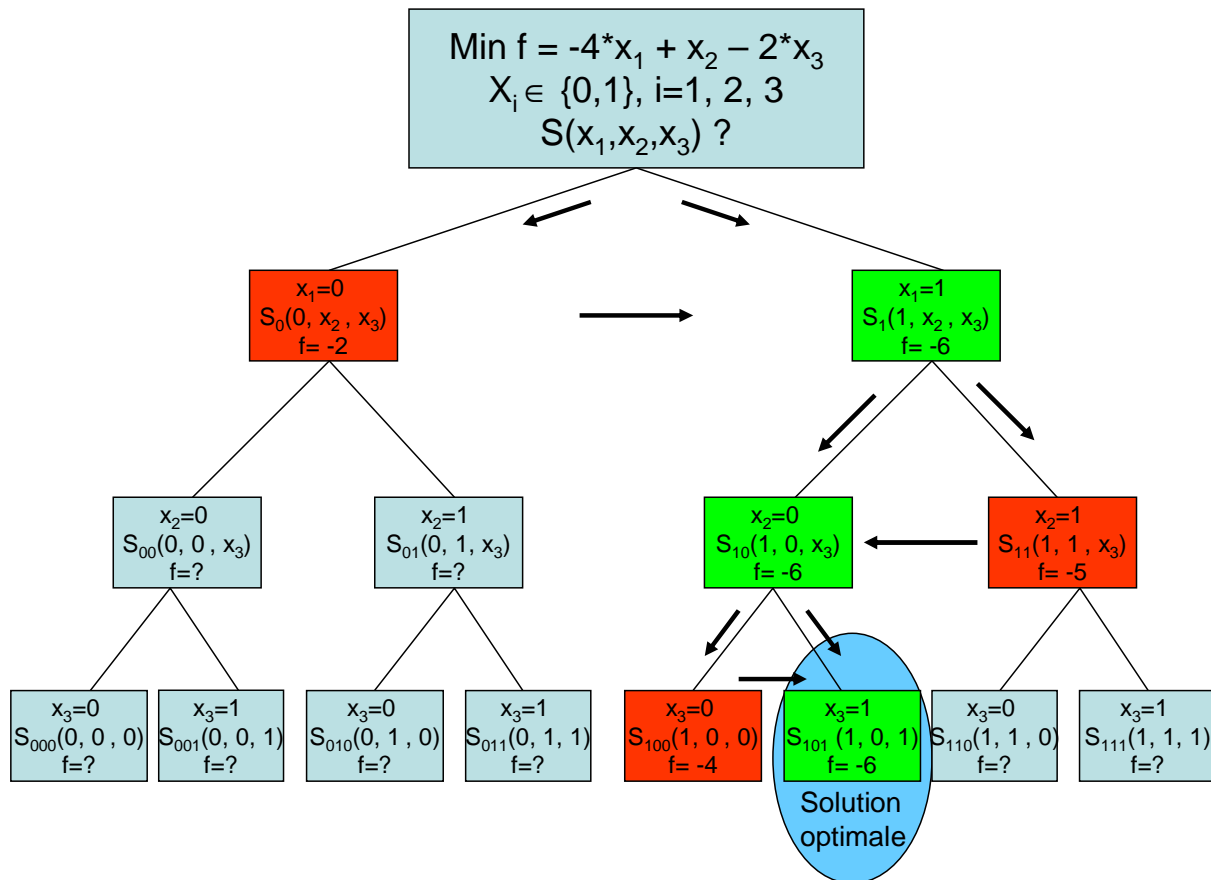


Fig. IV-3: Principe de séparation et d'évaluation

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 $S_0(0, x_2, x_3)$ 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 (2×3) 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)
 - η_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 :

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

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:

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

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*

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

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

❖ *Contrainte de la puissance permmissible (autorisée)*

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

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 :

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

- T_k^{cons} température de consigne de la salle k (ex : $T_k^{\text{cons}} = 20^\circ\text{C}$)
- ΔT_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 $2^{(n*24*60)}$ 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 $2^{(7*60)} = 2.7077e+126$ 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-linéaire 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 $u_{j,k} = 0$).

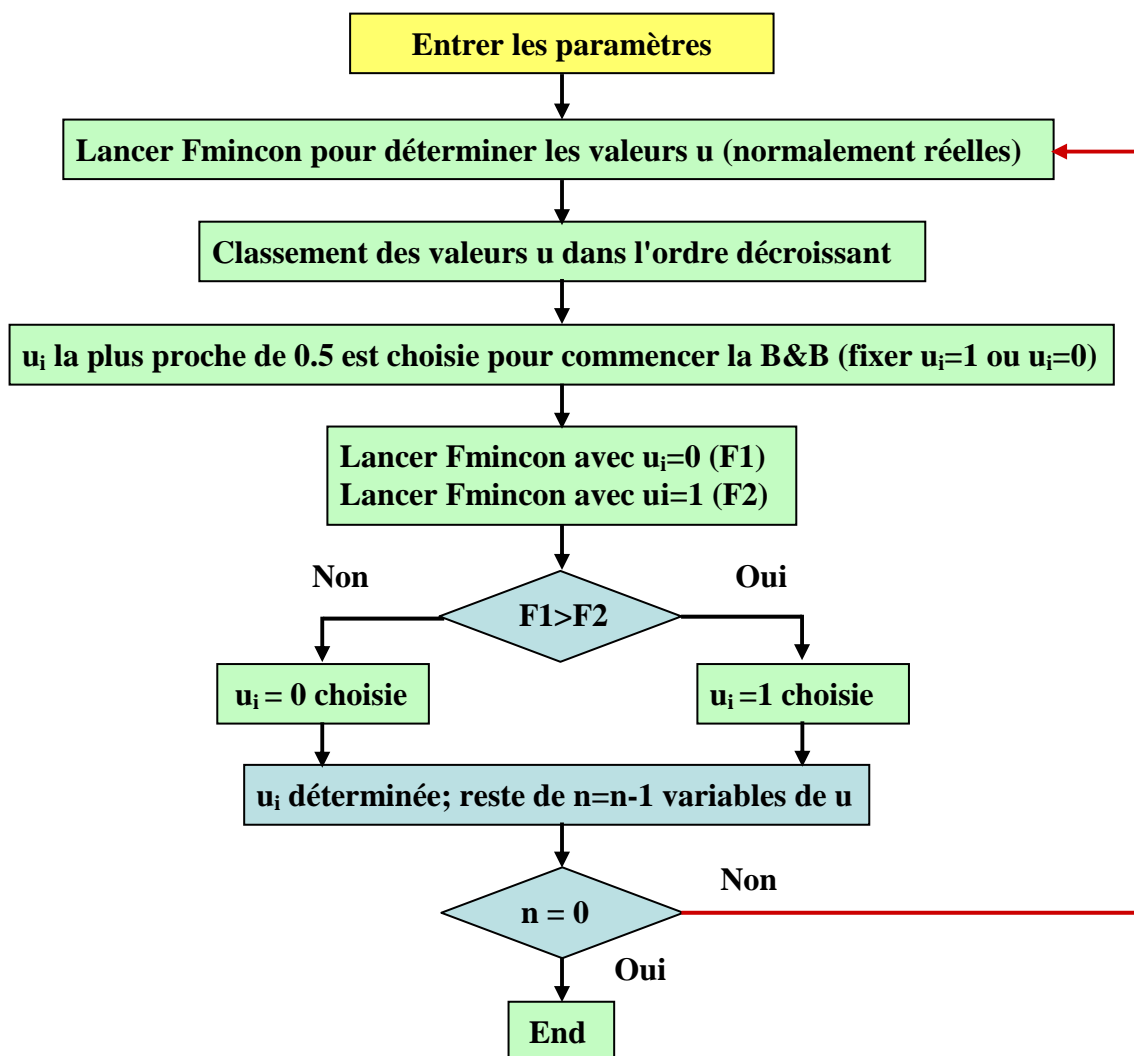


Fig. IV-4: Organigramme de l'algorithme de la méthode proposée

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.

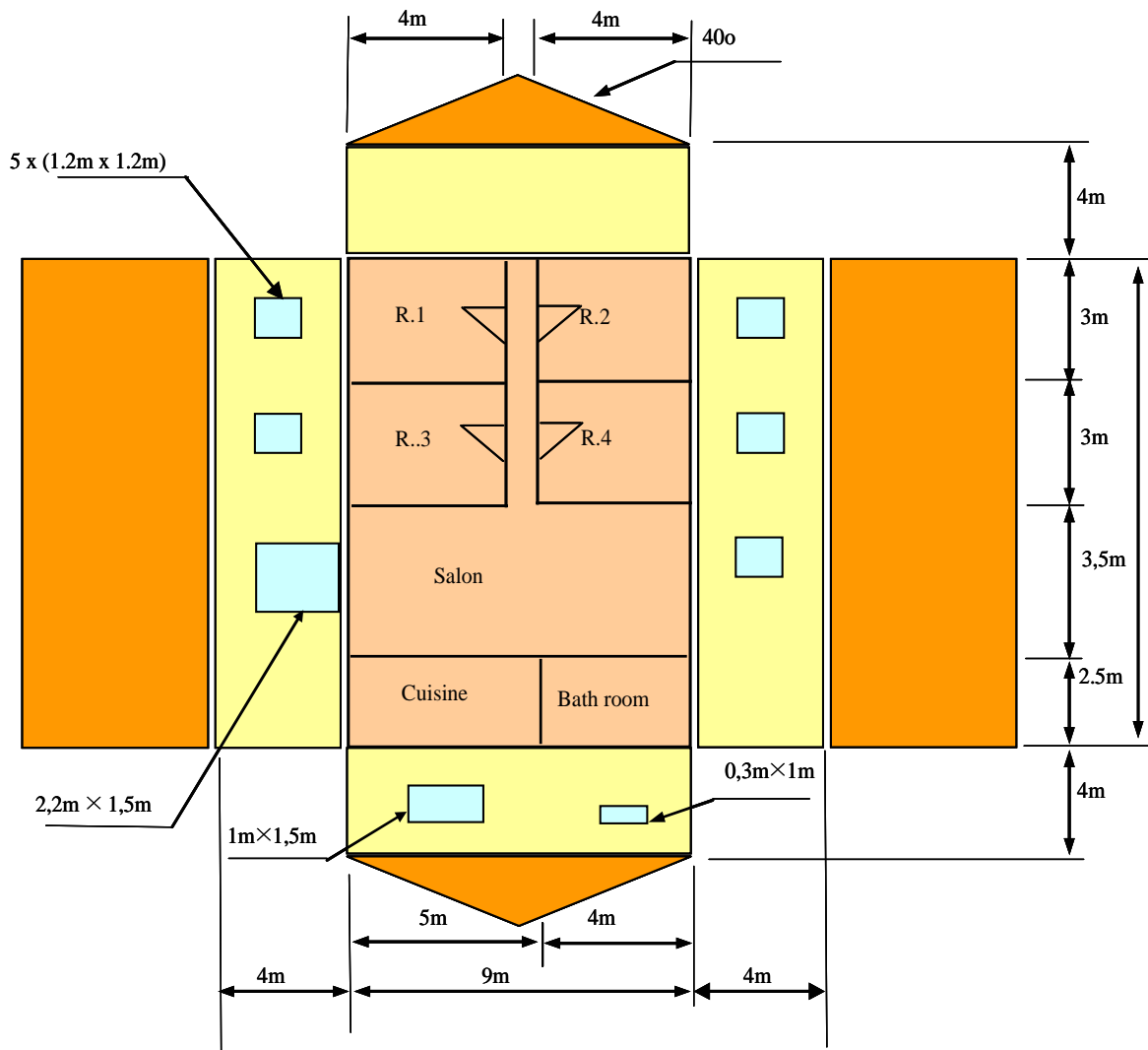


Fig. IV-5: Plan de la maison

	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
$C_o =$ Chaleur spécifique d'air (1005.4 J/kG-K)					

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
Puissance totale	22075	

Tableau IV-3: Usages électriques dans la maison

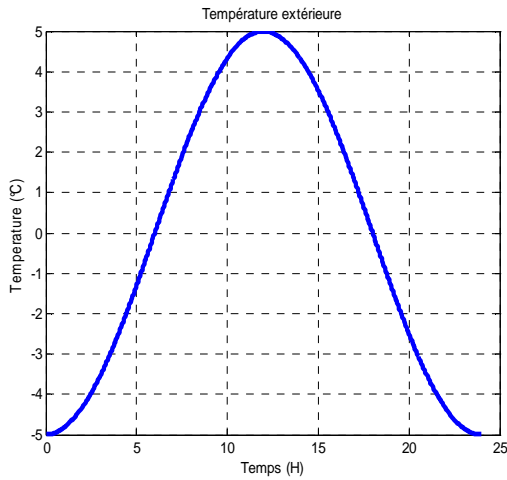


Fig. IV-6: *Température extérieure*

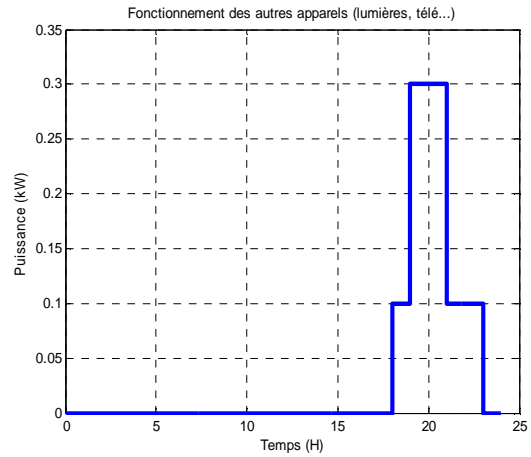


Fig. IV-7: *Fonctionnement des autres appareils (lumières, télé...)*

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.

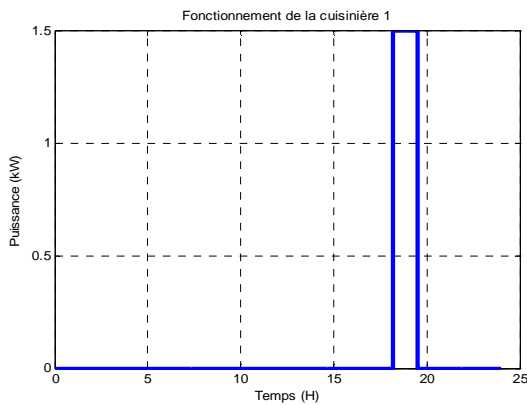


Fig. IV-8: *Fonctionnement de la cuisinière No. 1 (Marche à 18h10, arrêt à 19h30)*

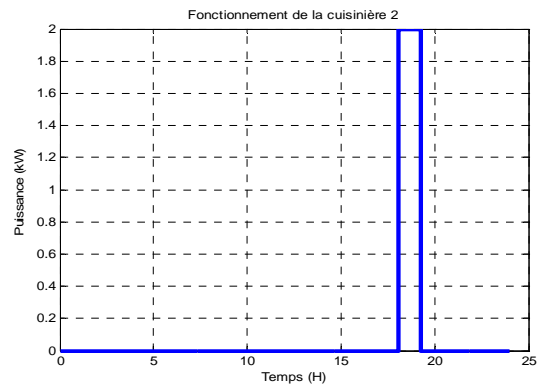


Fig. IV-9: *Fonctionnement de la cuisinière No. 2 (Marche à 18h02, arrêt à 19h15)*

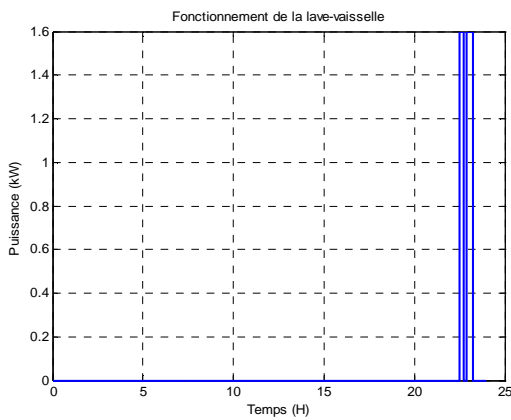


Fig. IV-10: *Fonctionnement du lave vaisselle (Marche à 22h30, arrêt à 23h15)*

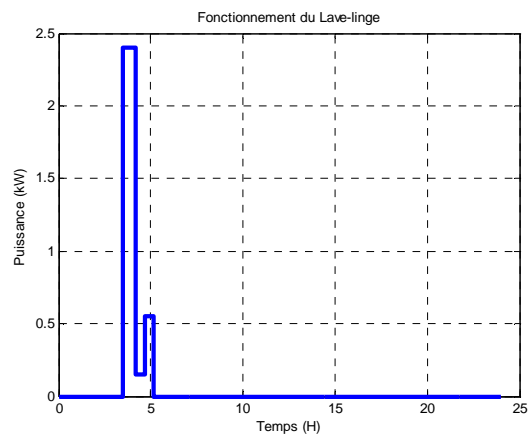


Fig. IV-11: *Fonctionnement du lave linge (Marche à 3h30, arrêt à 5h10)*

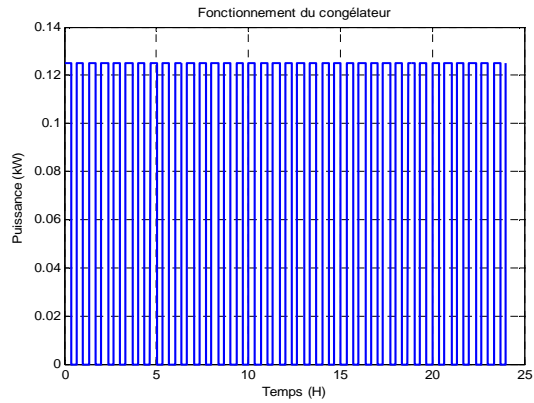
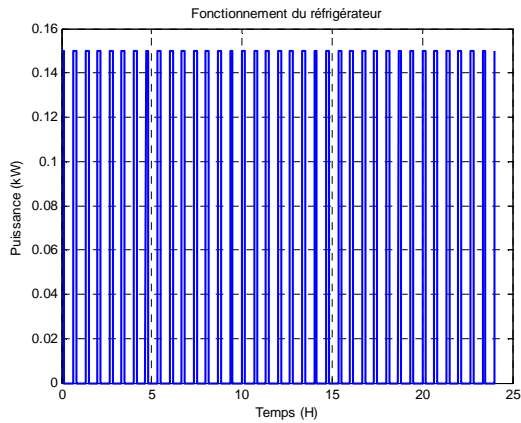


Fig. IV-12: *Fonctionnement du réfrigérateur* Fig. IV-13: *Fonctionnement du congélateur*

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.

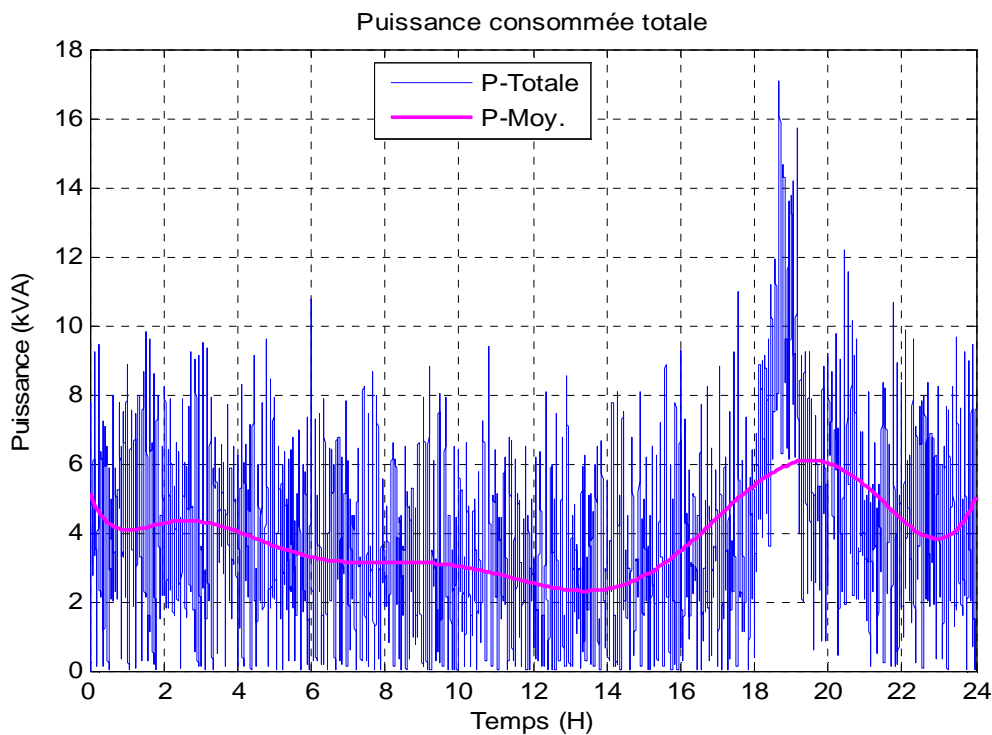


Fig. IV-14: *Puissance totale de consommation de la maison*

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.

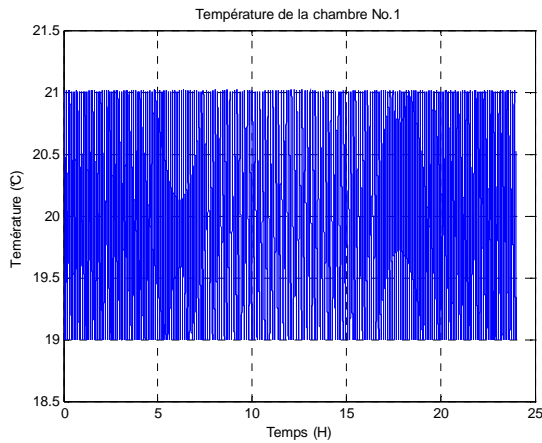


Fig. IV-15: Température de la chambre No. 1

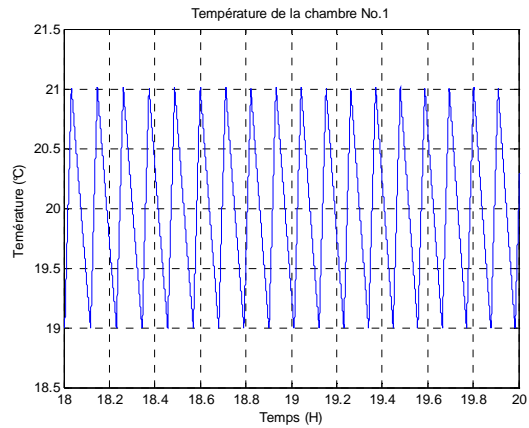


Fig. IV-16: Température de la chambre No. 1 (Zoom)

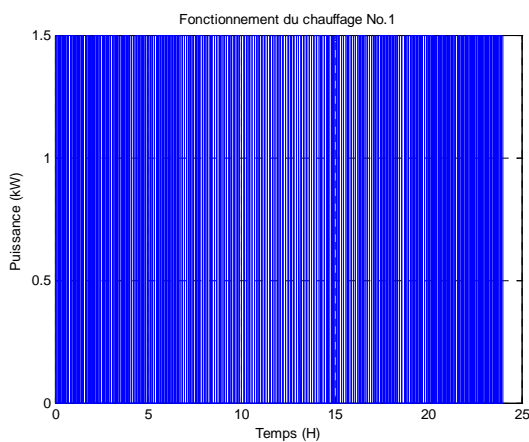


Fig. IV-17: Fonctionnement du chauffage No. 1

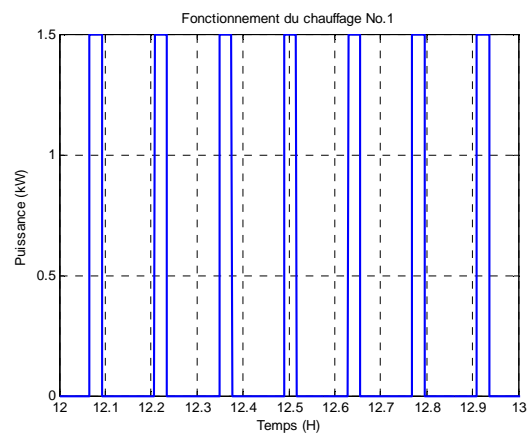


Fig. IV-18: Fonctionnement du chauffage No. 1 (Zoom)

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 permmissible 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.

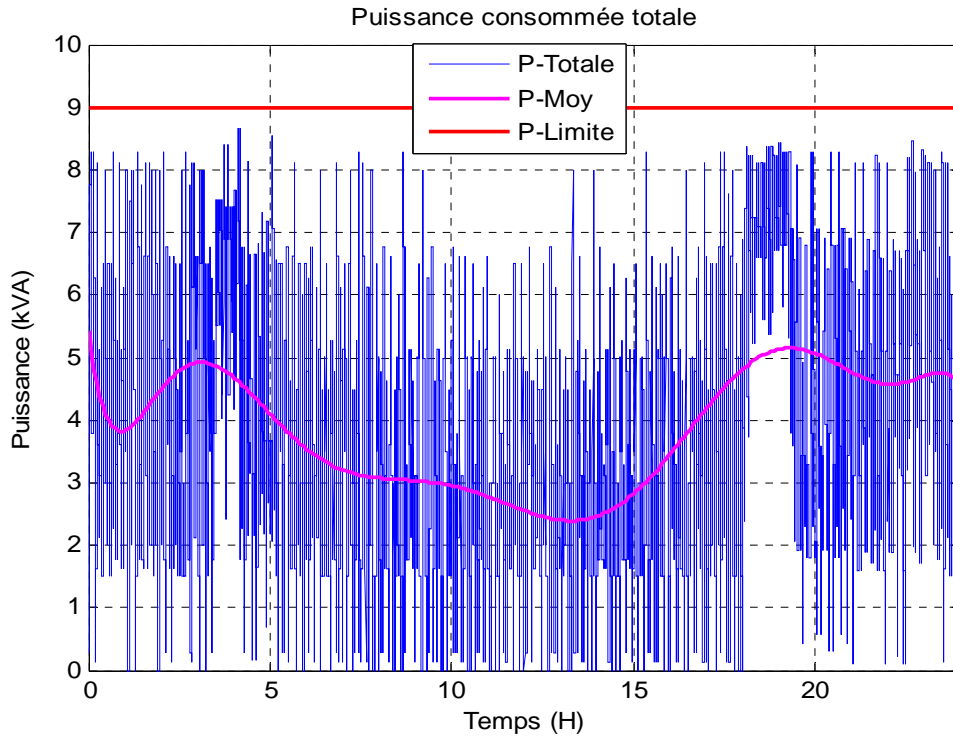


Fig. IV-19: Puissance totale de consommation de la maison

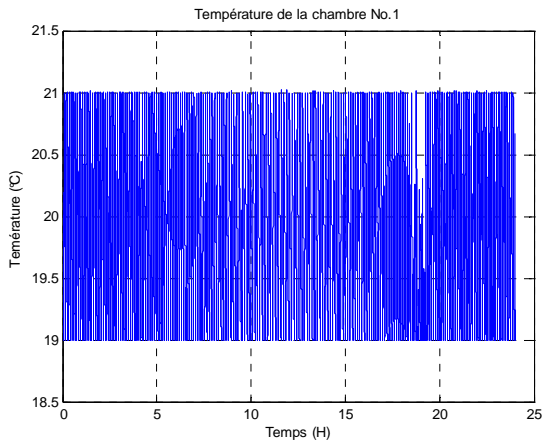


Fig. IV-20: Température de la chambre No. 1

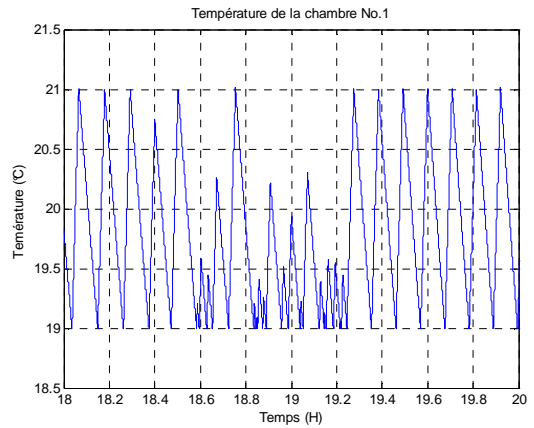


Fig. IV-21: Température de la chambre No. 1 (zoom)

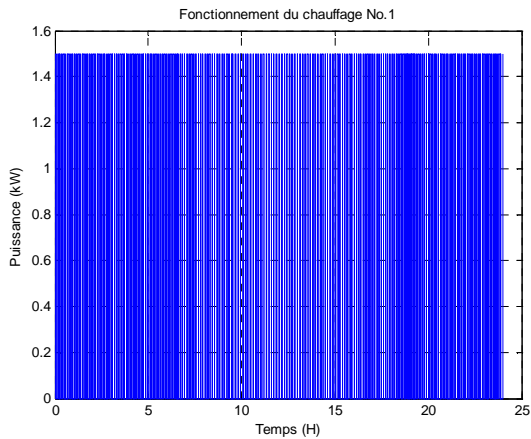


Fig. IV-22: Fonctionnement du chauffage No. 1

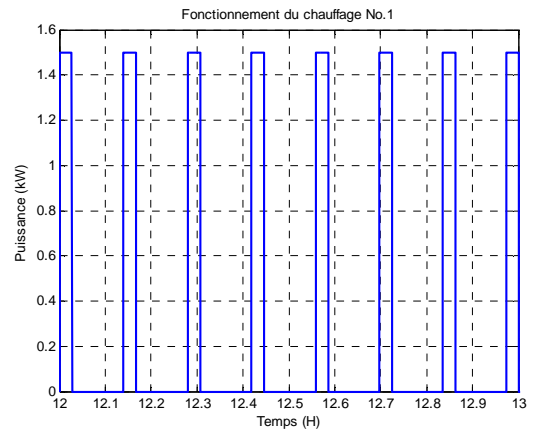


Fig. IV-23: Fonctionnement du chauffage No. 1 (Zoom)

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^{cons} : la température de consigne de la salle k
- T_k^{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_{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.

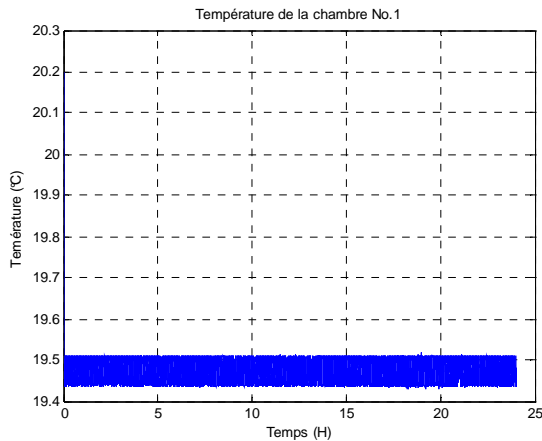


Fig. IV-24: Température de la chambre No. 1

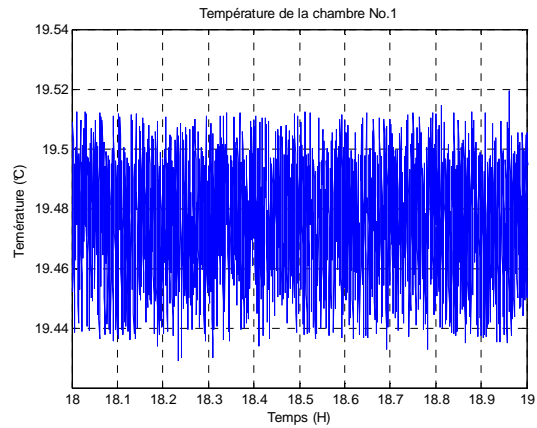


Fig. IV-25: Température de la chambre No. 1 (zoom)

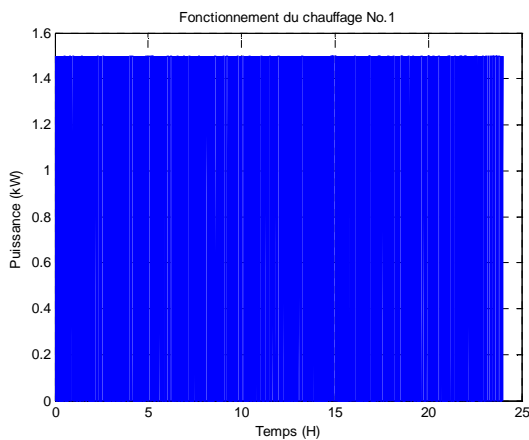


Fig. IV-26: Fonctionnement du chauffage No. 1

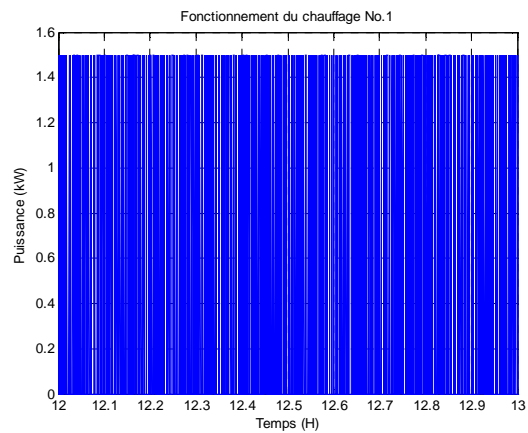


Fig. IV-27: Fonctionnement du chauffage No. 1 (Zoom)

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.

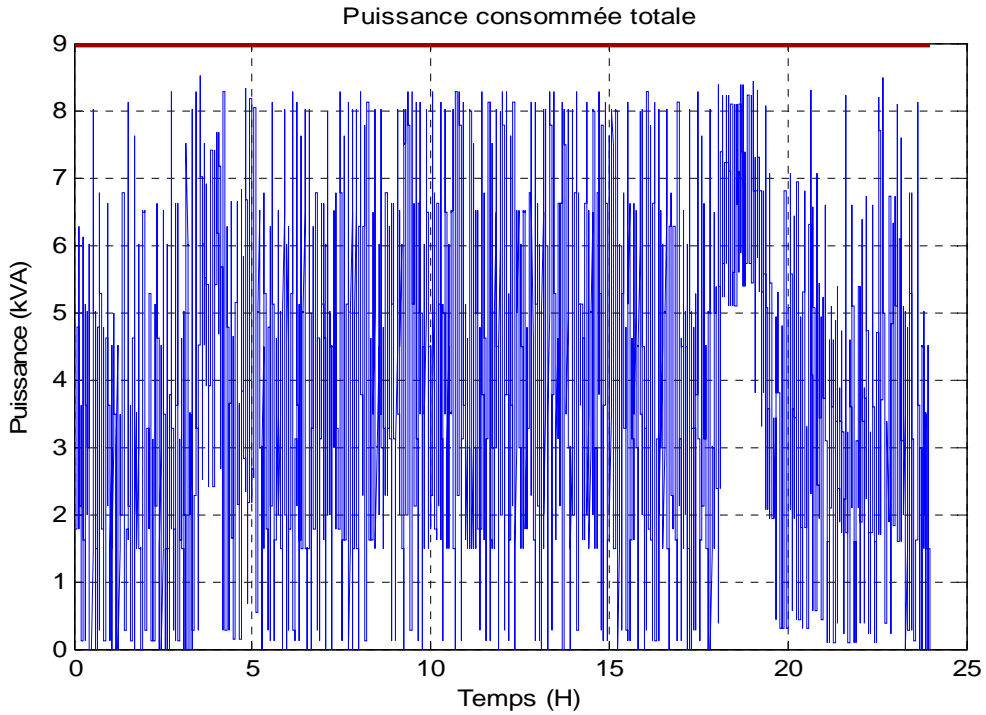


Fig. IV-28: Puissance totale de consommation de la maison

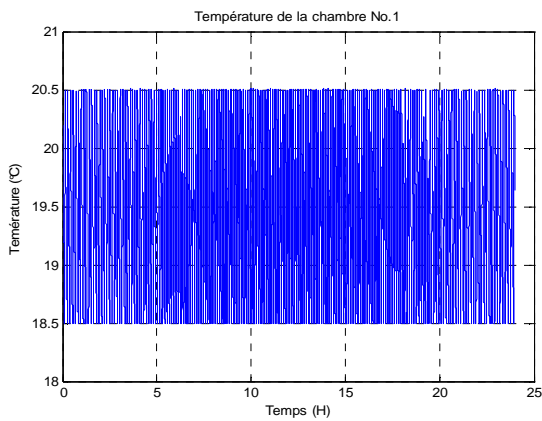


Fig. IV-29: Température de la chambre No.1

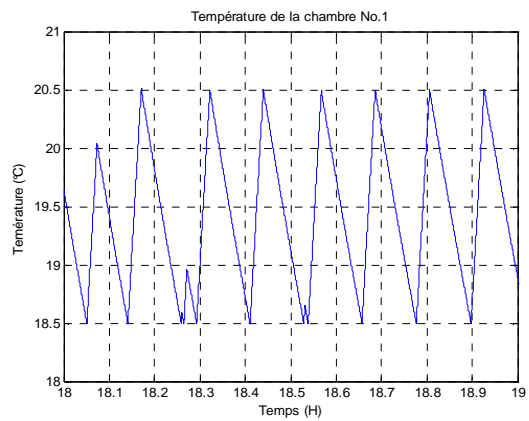


Fig. IV-30: Température de la chambre No.1 (zoom)

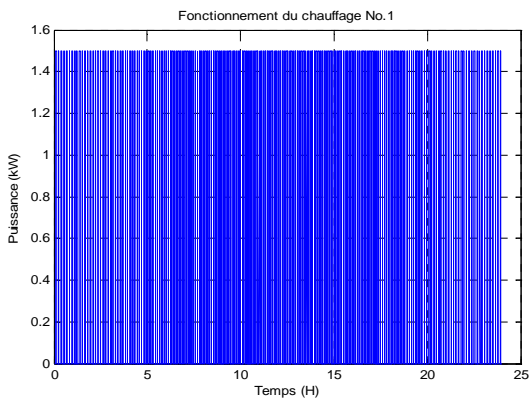


Fig. IV-31: Fonctionnement du chauffage No 1

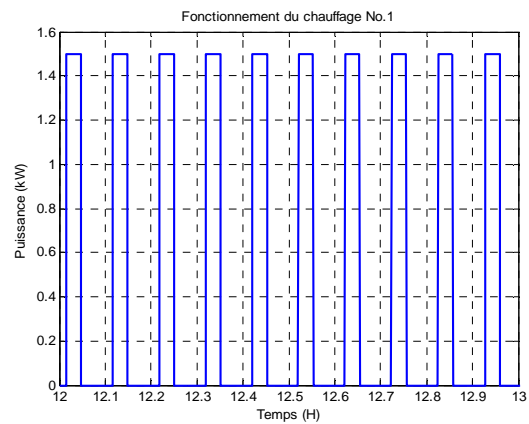


Fig. IV-32: Fonctionnement du chauffage No.1 (Zoom)

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 :

$$A_{i,k} = [p_i a_{i,k}^{elect} + A b_k^{elect}] \Delta\tau_i \quad (IV-12)$$

Où :

- $A_{i,k}$ = coût d'électricité consommé de client k pendant une période $\Delta\tau_i$ (Euro)
- i = l'heure du jour (1, 224)
- 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 (365x24x3600) 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.

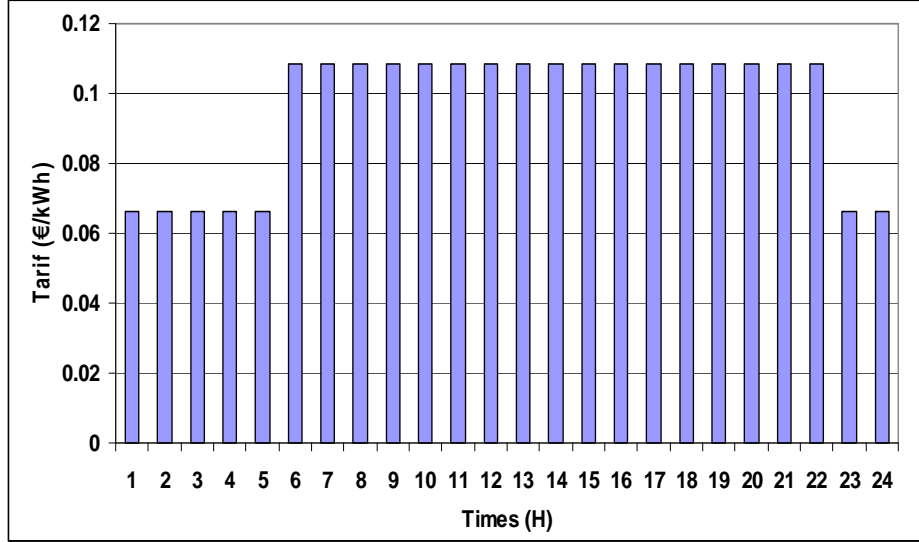


Fig. IV-35: Tarif Heure Pleines/Heures Creuse utilisé pour la simulation

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).

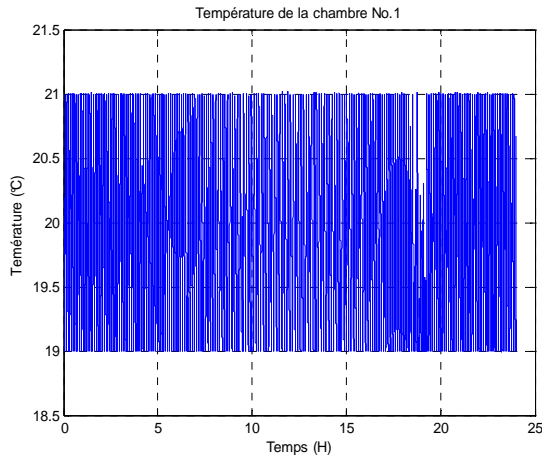


Fig. IV-36: Température de la chambre No. 1

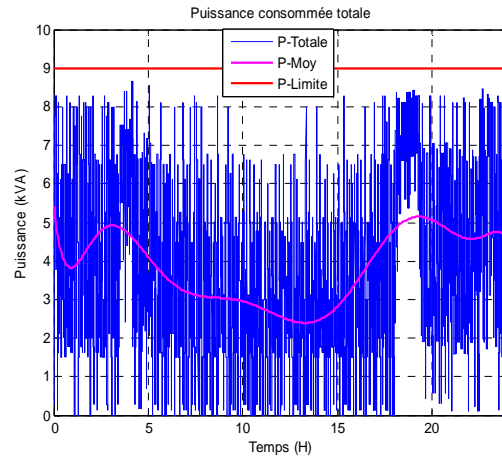


Fig. IV-37: Puissance totale de consommation de la maison

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	9.851	-
Avec gestion	9	92.324	8.492	0.526	9.017	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^{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^{int} la température intérieure de la salle k ($^{\circ}\text{K}$)
- T^{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^{inst} la source de courant de chaleur produite par des équipements, des gens et du système de d'éclairage ... (W)
- I_k^{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^{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^{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^{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 :

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

- T_k^{cons} température de consigne de la salle k (ex : $T_k^{\text{cons}} = 21^\circ\text{C}$)
- ΔT_k variation de température (ex : $\Delta T_k = \pm 1^\circ\text{C}$)
- P_{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)

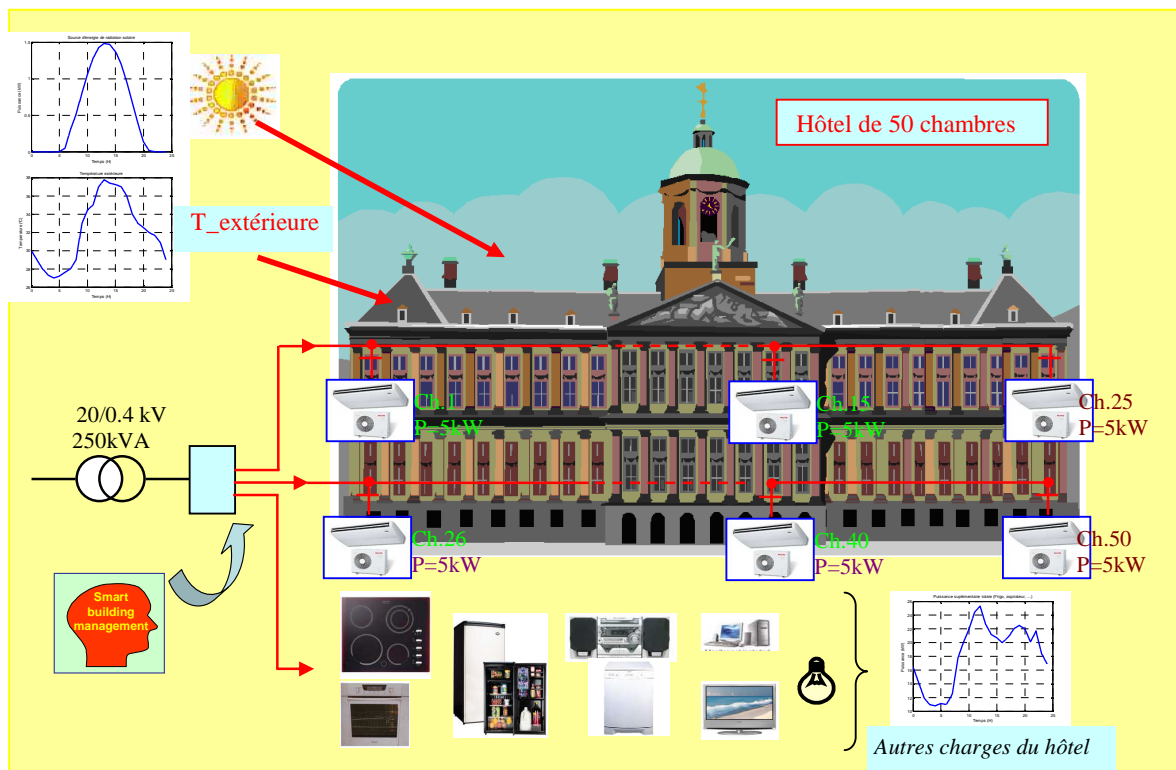


Fig. IV-38: Gestion optimale de climatisation d'un hôtel

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...)
Puissance totale	280 kW	

Tableau IV-5: Usages électriques dans la maison

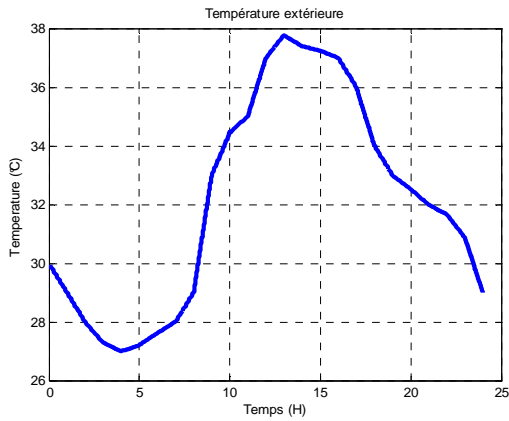


Fig. IV-39: *Température extérieure*

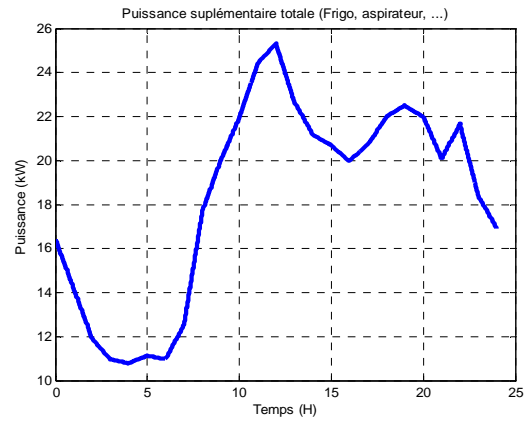


Fig. IV-40: *Fonctionnement des autres charges du hôtel (lumière, télé, frigo, ...)*

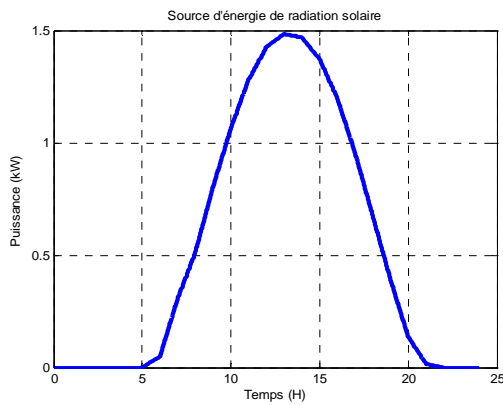


Fig. IV-41: *Source d'énergie de radiation solaire*

IV.4.2.3.1 Sans gestion des climatiseurs

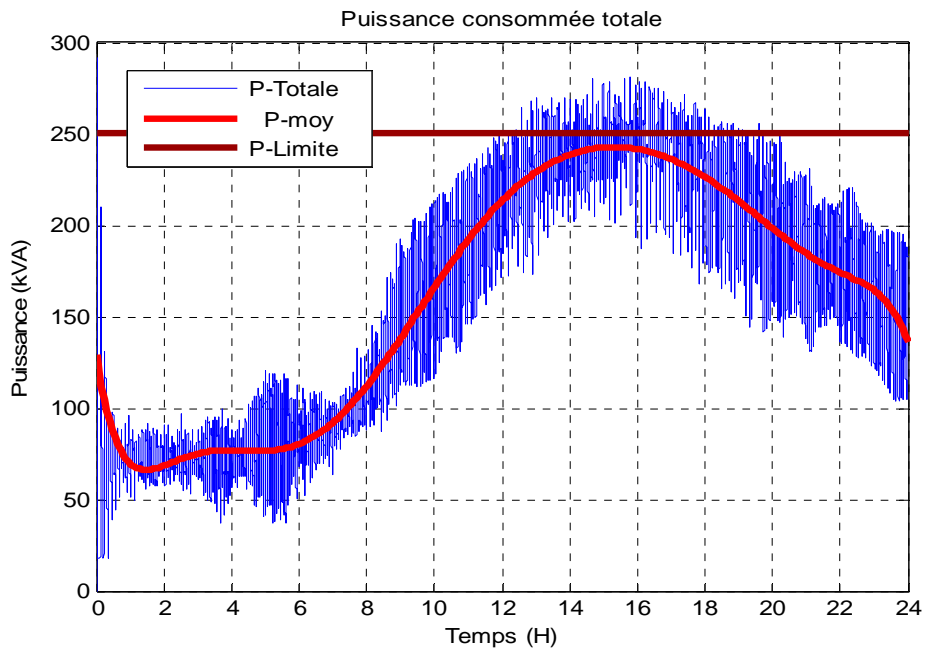


Fig. IV-42: *Puissance totale de l'hôtel*

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.

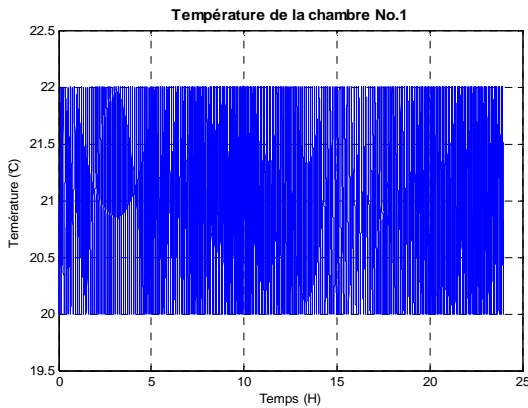


Fig. IV-43: *Température intérieure de la chambre No. 1*

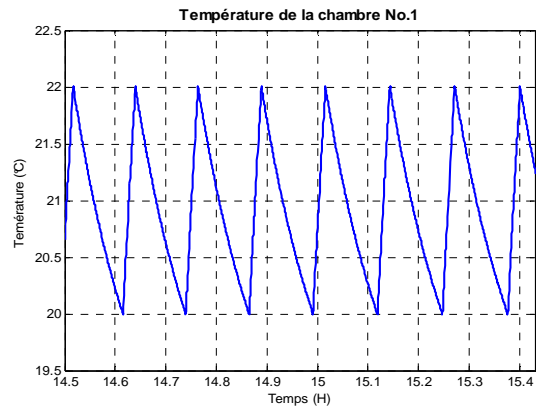


Fig. IV-44: *Température intérieure de la chambre No. 1 (zoom)*

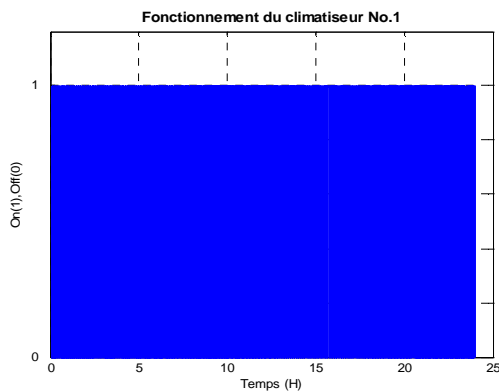


Fig. IV-45: *Fonctionnement du climatiseur No. 1*

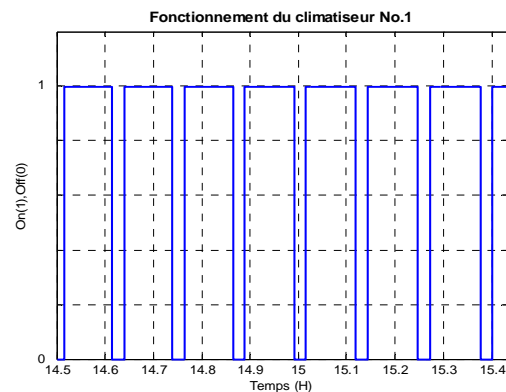


Fig. IV-46: *Fonctionnement du climatiseur No. 1 (Zoom)*

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.

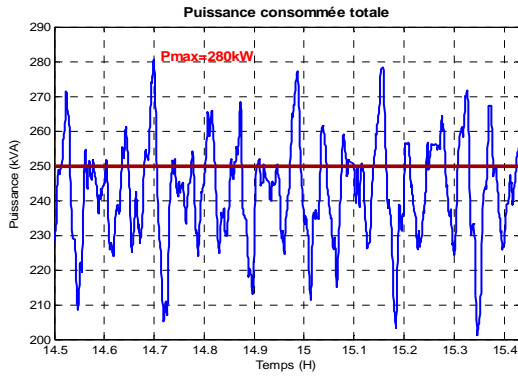


Fig. IV-47: Puissance totale de l'hôtel sans gestion (Zoom)

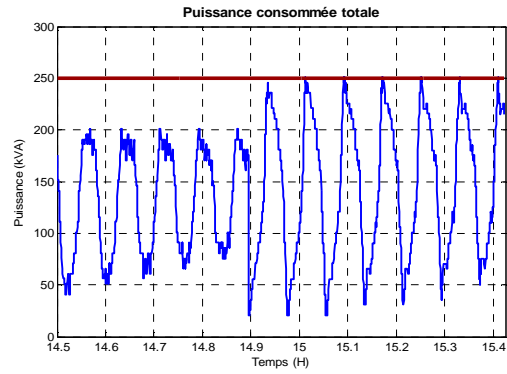


Fig. IV-48: Puissance totale de l'hôtel avec gestion optimale (Zoom)

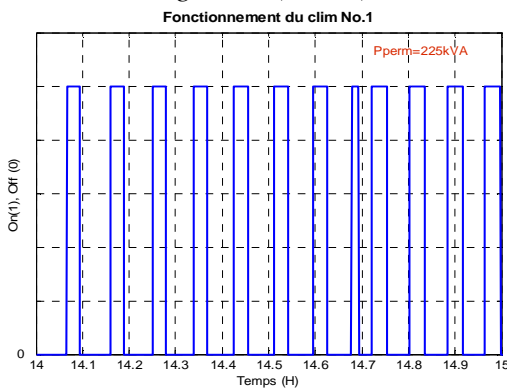


Fig. IV-49: Fonctionnement du climatiseur No.1 avec gestion optimale (Zoom)

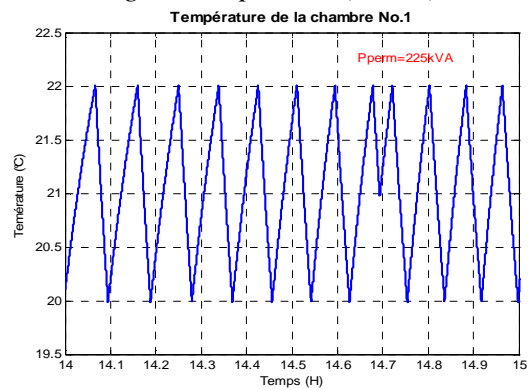


Fig. IV-50: Fonctionnement du climatiseur No.1 avec gestion optimale (Zoom)

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.

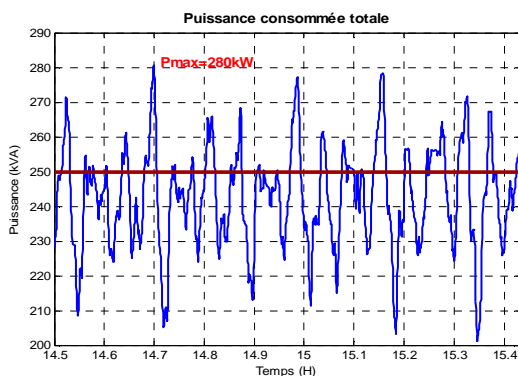


Fig. IV-51: Puissance totale de l'hôtel sans gestion (Zoom)

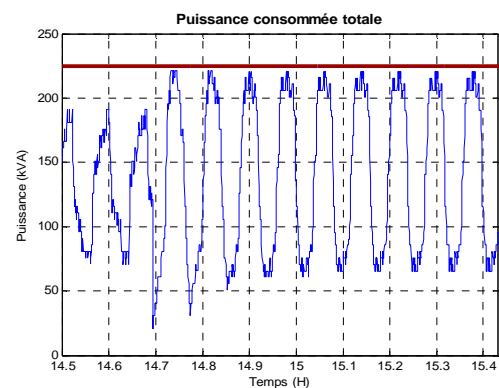


Fig. IV-52: Puissance totale de l'hôtel avec gestion optimale (Zoom)

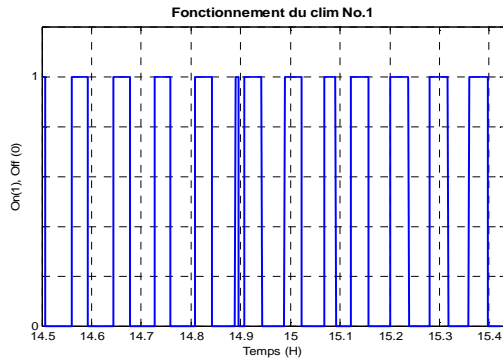


Fig. IV-53: *Fonctionnement du climatiseur No.1 avec gestion optimale (Zoom)*

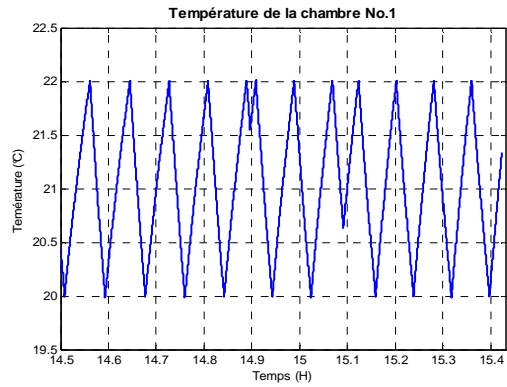


Fig. IV-54: *Fonctionnement du climatiseur No.1 avec gestion optimale (Zoom)*

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 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.

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

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 bottom-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