

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

Duy-Long Ha

Sciences
Automatique - Productique





Tous nos livres sont imprimés dans les règles
environnementales les plus strictes

Il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente publication sans autorisation du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (CFC) – 20 rue des Grands-Augustins – 75006 PARIS – Tél. : 01 44 07 47 70 / Fax : 01 46 34 67 19.



© Éditions Edilivre – Collection Universitaire – 2010
ISBN : 978-2-8121-1841-8
Dépôt légal : Février 2010

Tous droits de reproduction, d'adaptation et de traduction,
intégrale ou partielle réservés pour tous pays.

Duy-Long HA

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

Editions EDILIVRE APARIS
Collection Universitaire
75008 Paris - 2010

Avant-Propos

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Table des matières

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

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

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

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

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

Introduction générale

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

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

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

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

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

par les autres couches.

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

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

Première partie

Problématique

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

St Exupery

Chapitre 1

Contexte et Enjeux

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

1 Panorama

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

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

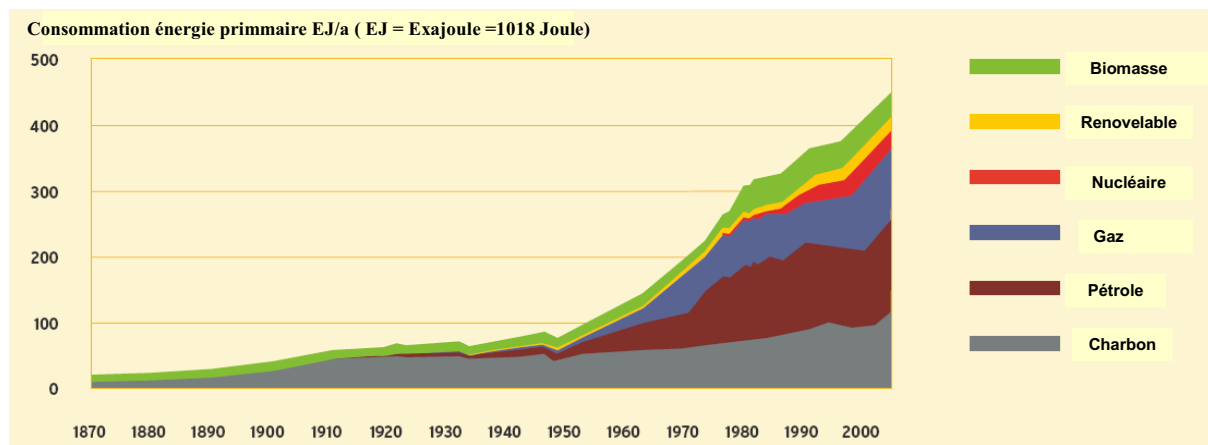


FIG. 1.1 – Consommation énergétique mondiale depuis 1870 (source IEA statistique et [BMU \(2006b\)](#))

1.1 Contexte mondial

1.1.1 Impact des activités énergétiques

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

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

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

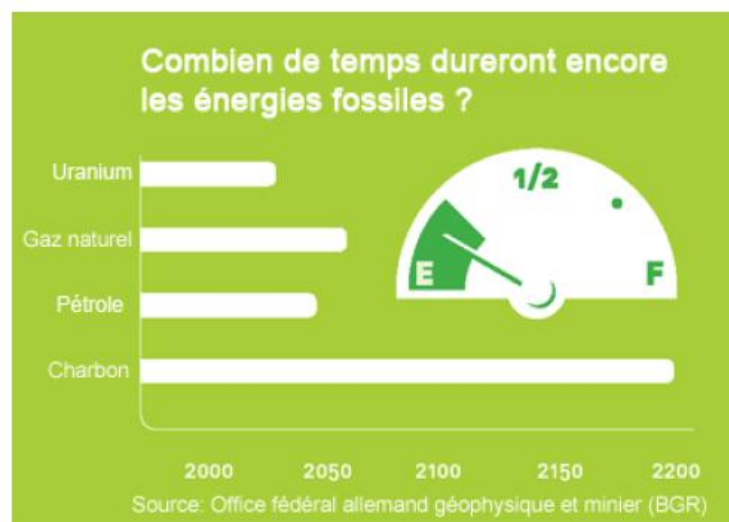


FIG. 1.2 – Réserve mondiale l'énergie fossile

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

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

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

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

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

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

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

1.1.2 De la production à la consommation d'électricité

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

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

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

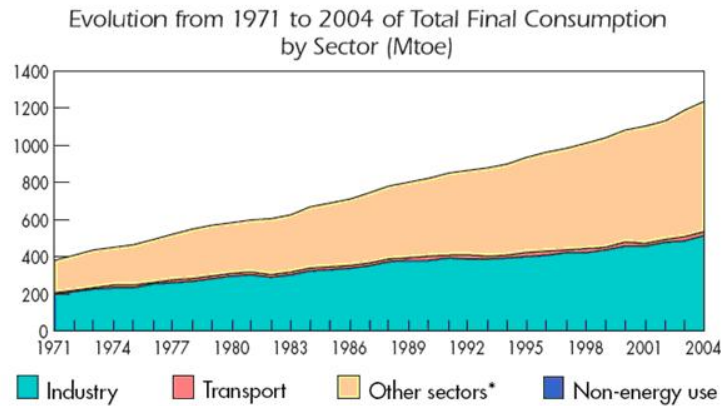


FIG. 1.3 – Consommation d’électricité par secteur dans le monde entier

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

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

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

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

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

1.2 Contexte français

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

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

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

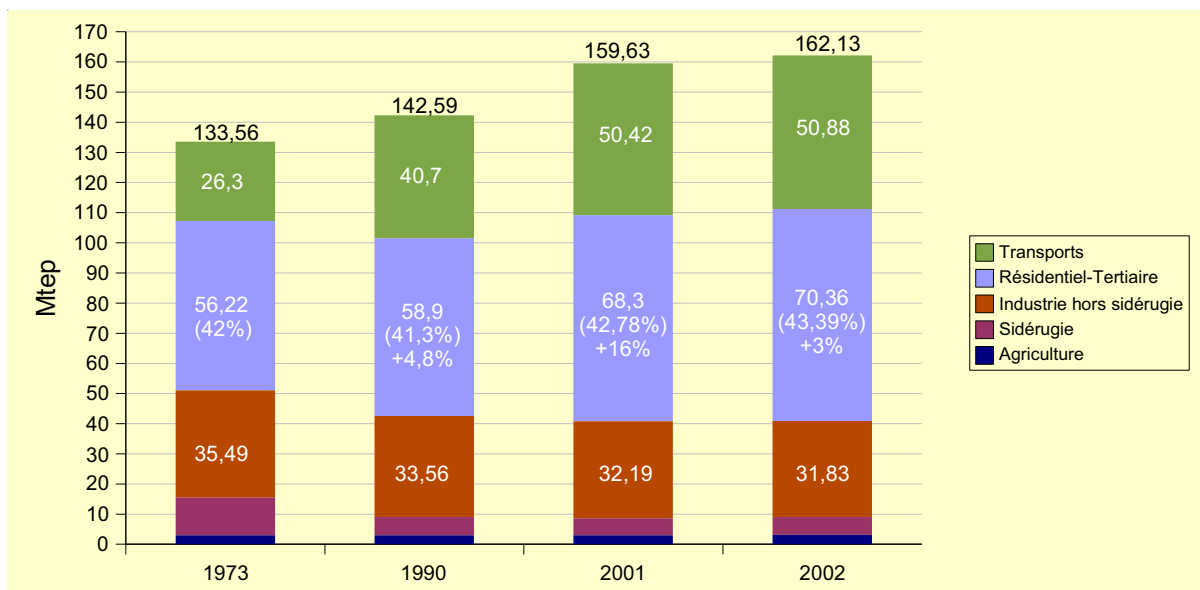


FIG. 1.4 – Évolution et répartition par secteur de la consommation finale d'énergie primaire (source (DGEMP, 2004)) en France

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

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

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

1.3 Conclusions sur le contexte

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

2 Problématique de la production et de la consommation

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

2.1 La structure et l'exploitation du réseau électrique

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

2.1.1 La structure du réseau électrique

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

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

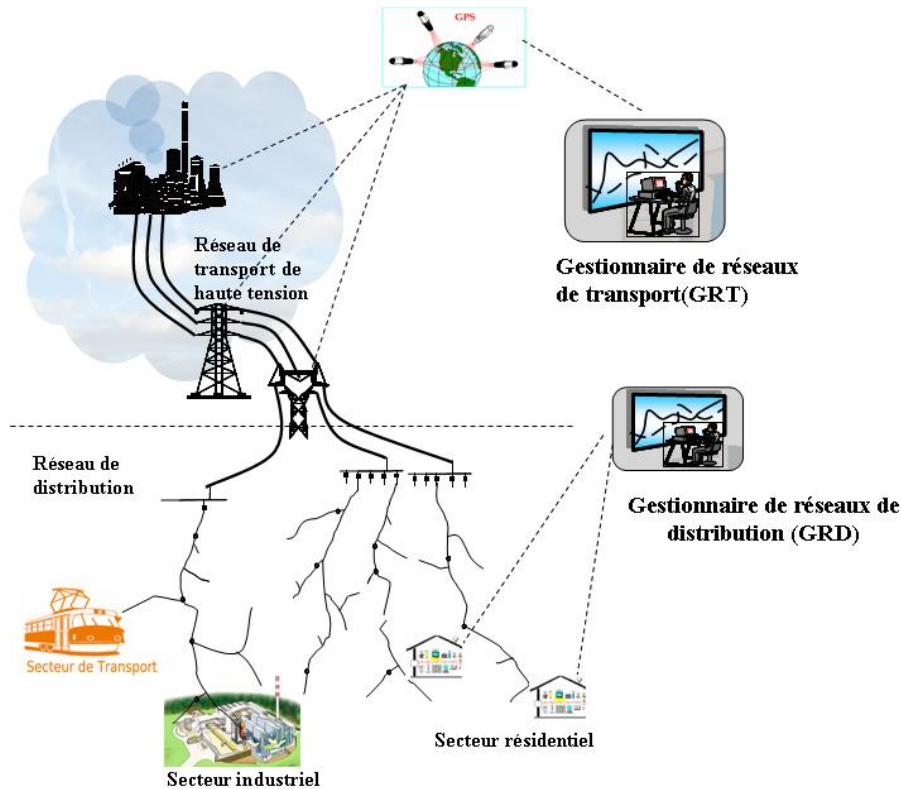


FIG. 1.5 – Structure du réseau de production et de distribution d'électricité

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

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

2.1.2 Supervision, conduite et exploitation du réseau électrique

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

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

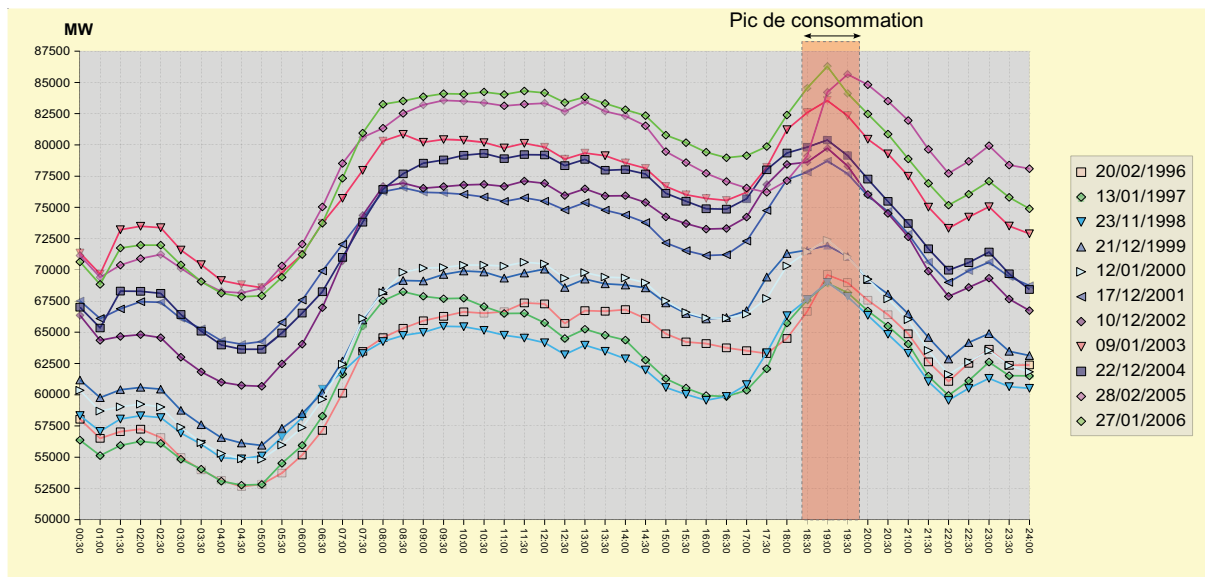


FIG. 1.6 – Les records de pic de consommation en France de 1996 à 2006 (source RTE)

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

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

2.1.3 Problématique des pics de consommation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3 Conclusion

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

Chapitre 2

Caractérisation du problème

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

1 Caractérisation des besoins énergétiques dans le bâtiment

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

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

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

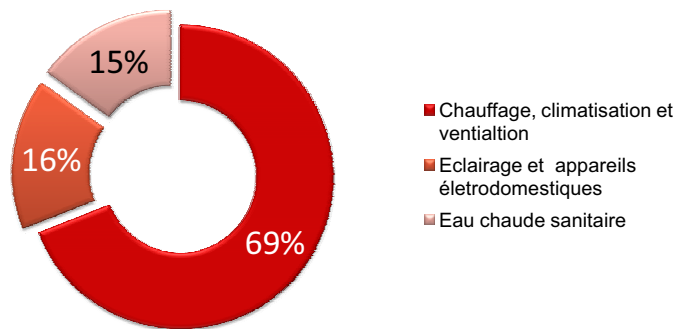


FIG. 2.1 – La répartition de la consommation de l'électricité par les différentes fonctions énergétiques dans le bâtiment (source [Angioletti et Despretz \(2004\)](#))

1.1 Chauffage et climatisation

1.1.1 Confort thermique

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

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

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

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

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

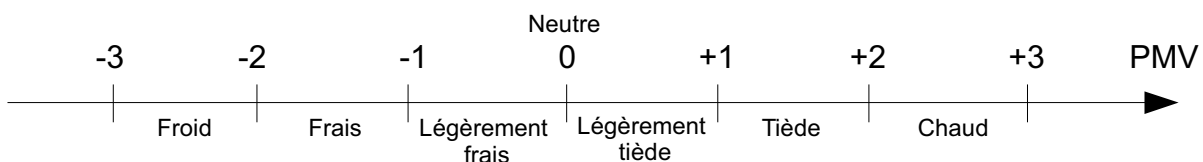


FIG. 2.2 – PMV : sensation thermique sur un échelle de 7 niveaux

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

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

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

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

1.1.2 Zone thermique

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

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

1.2 Ventilation

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

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

1.2.1 Besoin de ventilation

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

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

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

1.2.2 Contrôle du système de ventilation

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

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

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

1.3 Production d'eau chaude

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

1.3.1 Besoin en eau chaude

Trois facteurs principaux caractérisent le besoin en eau chaude :

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

Le tableau [2.2](#) fournit quelques estimations de besoin énergétique pour la production de l'eau chaude.