UNIVERSITÉ DE TOURS

ÉCOLE DOCTORALE : Sciences de la Société : Territoires, Economie et Droit - SSTED

ÉQUIPE DATE

THÈSE présentée par :

Farinaz FALAKI

soutenue le : **17 juin 2021**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Tours**

Discipline/ Spécialité : Aménagement de l'espace et urbanisme

Optimisation de la consommation énergétique des ménages : application sur l'usage des appareils électriques pour le *smart grid*

THÈSE dirigée par :

M. MARTOUZET Denis	Professeur, Université de Tours
M. MERABTINE Abdelatif	Enseignant-Chercheur, EPF Ecole d'Ingénieur-e-s

RAPPORTEURS :

Mme. MATTA Nada	Professeure, Université de Technologie de Troyes
M. STABAT Pascal	Professeur, MINES ParisTech

PRESIDENT :

M. LECLERCQ Pierre	Professeur, Université de Liège

JURY :

Mme. HENRIOT Carine	Maître de conférences, UTC
M. LECLERCQ Pierre	Professeur, Université de Liège
M. MARTOUZET Denis	Professeur, Université de Tours
Mme. MATTA Nada	Professeure, Université de Technologie de Troyes
M. MERABTINE Abdelatif	Enseignant-Chercheur, EPF Ecole d'Ingénieur-e-s
M. STABAT Pascal	Professeur, MINES ParisTech

Remerciements

Ce travail n’a pu être mené à bien qu’avec le soutien de plusieurs personnes que je voudrais, à travers ces quelques lignes, remercier du fond du cœur.

Je voudrais tout d’abord exprimer ma plus profonde gratitude à Denis Martouzet, mon Directeur de thèse et le Directeur de l'Ecole Doctorale SSTED Orléans-Tours pour son écoute et pour la confiance qu’il a accordée à cette recherche avec beaucoup de patience et un immense savoir. Je tiens également à adresser mes sincères remerciements à Abdelatif Merabtine, mon co-encadrant de thèse, qui m’a guidé avec ses précieux commentaires et ses grands encouragements.

Je voudrais remercier Nada Matta et Pascal Stabat d’avoir accepté de lire cette thèse et d’en être rapporteurs. Je suis reconnaissante pour leur lecture attentive et leurs remarques précieuses et constructives. Je remercie aussi tous les membres du jury et particulièrement Pierre Leclercq le président du jury pour les conseils et les remarques.

Mes remerciements vont aussi à Fabienne Tronel avec qui j'ai eu l'occasion de travailler comme architecte/urbaniste durant cette thèse, pour m’avoir présentée à des experts en smart grid et m'avoir permise de présenter mes travaux de recherche en diverses occasions devant des professionnels.

Je remercie également Eric Vorger de Mines ParisTech et ces collègues pour les échanges d'informations et les questions qui m'ont ouvert de nouveaux horizons.

Je suis aussi redevable à tous mes amis et collègues de bureau du Département Aménagement et mes partenaires de bibliothèque qui m'ont aidée et accompagnée pendant la première partie de ce travail.

J’exprime également ma reconnaissance à Béatrice Otsmane-André de l'association FLA qui m'a accompagnée dans l’apprentissage de la langue française, à Mindjid Maïzia qui m'a fait découvrir le monde de l'énergie, des systèmes urbains et des réseaux intelligents, et à Anne-Michèle Janssen et à Laura Verdelli sans qui ce travail n'aurait pu être achevé.

Enfin, je tiens à remercier mes parents Hamid et Farkhonde ainsi que ma sœur Jasmin pour leur soutien inconditionnel et mon époux Olivier pour sa patience et ses encouragements durant ces années.

Résumé

Les technologies de l'information et de la communication combinées avec le système énergétique existant, créent un réseau – *smart grid* – connu pour avoir un impact positif sur l'efficacité de la production et de la consommation d'énergie en utilisant une approche *top-down* et/ou *bottom-up*. La recherche suppose que l'analyse de la consommation/demande d'électricité permet de comprendre le système énergétique actuel et est nécessaire pour illustrer les mesures d'efficacité énergétique requises pour le futur réseau. La complexité de l'analyse de la consommation/demande d'électricité résidentielle (désagrégée en cinq usages finaux : éclairage, eau chaude, chauffage/refroidissement des locaux, cuisson et appareils ménagers) est due au manque de méthode spécifique pour déterminer le nombre d'appareils électroménagers dans les bâtiments résidentiels, et la difficulté d'estimer leur mode d'utilisation en raison de l'imprévisibilité du comportement des ménages. Ainsi, cette recherche considère une approche *top-down* du côté fournisseur d'énergie et une approche *bottom-up* du côté des consommateurs, pour une rationalisation de la consommation et de la production d'électricité et la gestion de la charge à l'échelle du quartier et celle de la ville pour déterminer les variables ayant un impact sur la possession et l'utilisation des appareils électriques. En proposant une procédure de gestion locale de l'efficacité énergétique des appareils électriques résidentiels basée sur la modélisation énergétique, la thèse met en évidence la contribution de la gouvernance *top-down* et *bottom-up* de *smart grid* dans l'aplatissement de la courbe de charge électrique quotidienne et la gestion des charges électriques et elle applique les modèles développés sur une étude de cas Français pour vérifier la robustesse de la méthode.

Mots-clés : *smart grid, systèmes urbains, optimisation énergétique, approche descendante/ascendante, analyse spatio-temporelle, effacement énergétique, appareils électroménagers*

Summary

The information and communication technologies combined with the existing energy system, creates a new network – smart grid – known to have a positive impact on efficiency in energy production and consumption using top-down and/or bottom-up approach. The research assumes that electricity consumption/ demand analysis allows for understanding of the current energy system and is necessary for illustrating the energy efficiency measures required for future grid. The complexity in analysing residential electricity consumption/demand (broken down into five end-uses: lighting, hot water, space heating/cooling, cooking, and domestic appliances) is due to the lack of specific method to determine the number of electric appliances in residential buildings, and the difficulty to estimate their pattern of usage due to unpredictability of household behaviour. Thus, this research considers top-down approach of energy supplier side and bottom-up approach of consumers demand side for electricity consumption and production optimisation and demand management in neighbourhood and city scale to determine the variables impacting the ownership and utilisation of electric appliances. By proposing a procedure of local energy efficiency management for residential electric appliances based on energy modelling, the thesis highlights the contribution of top-down and bottom-up governance of smart grid in flattening the daily electric load curve and load charge management and it applies the developed models on a French case study to verify the robustness of the method.

Keywords**:** *smart grid, urban systems, energy optimization, top-down/bottom-up approach, spatio-temporal analysis, energy load management, electric home appliances*

Sommaire

Remerciements iii
Résumé iv
Summary v
Sommaire vii
Abréviations et acronymes ix
Glossaire des termes et des expressions xi
Liste des Tableaux xiii
Liste des Figures xv
Liste des Annexes xvii
Introduction 1
Section 1 : Partie théorique 12
Chapitre 1 : Du réseau actuel au *smart grid* 13
1.1 Réseaux 13
1.1.1 Infrastructures urbaines 13
1.1.2 Service public 15
1.1.3 Réseau électrique 15
1.1.4 Topologies du *grid* 16
1.2 Nécessité de moderniser le réseau électrique 21
1.2.1 Pointe de consommation électrique 31
1.2.2 Consommation inactive de l'électricité 34
1.3 Avantages et bénéficiaires du développement du *smart grid* 37
1.4 Exigences pour la mise à niveau du réseau 44
1.5 Évaluation des coûts 46
Chapitre 2 : Conception du *smart grid* 48
2.1 Exemples de projet *Smart grid* 48
2.1.1 Arrowhead 51
2.1.2 Nice Grid 52
2.1.3 Smart City Kalundborg 53
2.1.4 Analyse comparative de ces trois exemples 54
2.2 Pratiques et méthodologies de mise en œuvre du *smart grid* 55
2.2.1 Approche *top-down* 55
2.2.2 Approche *bottom-up* 56
2.2.3 Discussions : *top-down* et *bottom-up* 58
2.3 Intégrer l'intelligence au réseau 59
2.3.1 Configuration *top-down* (MDE des autorités) et *bottom-up* (RD des consommateurs) 61
2.3.2 Intelligence des autorités et celle des consommateurs 62
2.4 Obstacles et défis liés à l'adoption du smart grid 64
2.4.1 Défis procéduraux 64
2.4.1 Défis techniques 71
2.5 Architecture et modèle du *smart grid* 73
2.5.1 Architecture du *smart grid* 73
2.5.2 Modèle du *smart grid* 83
Section 2 : Partie expérimentale 88
Chapitre 3 : Simulation de consommation électrique pour le *smart grid* 89
3.1 Modèles pour l'analyse de consommation électrique : *top-down* et *bottom-up* 89
3.1.1 Consommation d'électricité *top-down* 89
3.1.2 Consommation d'électricité *bottom-up* 91

3.2 Techniques de modélisation de consommation/demande électrique 94
3.3 Simulation de consommation/demande électrique à l'échelle d'une ville 100
3.4 Contexte et méthodes 103
3.4.1 Contextualisation 103
3.4.2 Méthodologie 106
3.4.3 Feuille de route 110
Chapitre 4 : Analyse et gestion de la demande d'électricité pour le *smart grid* 112
4.1 Analyse spatio-temporelle pour la demande d'usage final des appareils électroménagers : étude de cas de Tours (France) 113
4.1.1 Étape 1 : Investigation 113
4.1.2 Étape 2. Élimination 127
4.1.3 Étape 3. Classification 132
4.1.4 Étape 4. Examen 133
4.1.5 Étape 5. Attribution 136
4.1.6 Étape 6. Occupation 138
4.1.7 Étape 7. Calcul 148
4.1.8 Étape 8. Création 153
4.1.9 Étape 9. Application urbaine 158
4.1.10 Étape 10. Vérification 161
4.1.11 Étape 11. Évolution 162
4.2 Stratégies de réduction de la charge électrique 167
4.3 Modèle de production électrique (MPE) 172
4.4 Échelle de l'application du *smart grid* 178
Conclusions, analyse critique et perspectives 180
Bibliographie 196
Annexes 212

Abréviations et acronymes

ACA	Analyse Coûts-Avantages
ACP	Analyse en Composantes Principales
ADMS	*Advanced Distribution Management Solutions*
AIE	Agence Internationale de l'Energie
AIEA	Agence Internationale de l'Energie Atomique
AMI	*Advanced Metering Infrastructure*
ANAH	Agence Nationale de l'Habitat
AOS	Architecture Orientée Services
CA	Courant Alternatif
CC	Courant Continu
CCI	Chambre de Commerce et d'Industrie
CCR	Centre Commun de Recherche
CE	Commission Européenne
CEN	Comité Européen de Normalisation
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CGR	Centre de Gestion du Réseau
CNIS	Conseil national de l'information statistique
CNR	Compagnie Nationale du Rhône
COMMEND	Community of Energy, Environment and Development
CO_2	Dioxyde de Carbone
CRE	Commission de Régulation de l'Énergie
CSS	*Consumer Side System*
CT	Comité Technique
CTC	*Complexity Theories of Cities*
DAO	Dépendance Active de l'Occupation
DJU	Degré Jour Unifié
DoE	*The U.S Department of Energy*
EDF	Électricité de France
EEX	*European Energy Exchange*
EISA	*The Energy Independence and Security Act*
EnR	Énergie Renouvelable
EPRI	*Electric Power Research Institute*
ERGEG	*The European Regulators' Group for Electricity and Gas*
ETP	*European Technology Platform*
ETSI	*European Telecommunications Standards Institute*
GES	Gaz à Effet de Serre
GW	Gigawatt
IBM	*International Business Machines Corporation*
IDH	Indice de Développement Humain
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
IPP	*Independent Power Producer*

IRIS	Ilots Regroupés pour l'Information Statistique
JF	Jour Férié
JM	Journée Moyenne
JO	Jour Ouvré
kVA	Kilovolt-ampère
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-Heure
LAN	*Local Area Network*
LED	*Light-Emitting Diode*
MCRI	Modèle Conceptuel du Smart Grid
MDE	Maîtrise de la Demande en Électricité
MES	Modélisation d'Equations Structurelles
MPE	Modèle de production électrique
MTES	Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (2017)
MTE	Ministère de la Transition Ecologique (2020)
N/A	Non applicable
NEMA	*National Electrical Manufacturers Association*
NERC	*The North American Electric Reliability Corporation*
NTIC	Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
O&M	Opération & Maintenance
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OTC	*Over-The-Counter*
PIB	Produit Intérieur Brut
PTE	Plateformes Technologiques Européennes
R&D	Recherche et Développement
RD	Réponse à la Demande
RED	Ressource Énergétique Distribuée
RGPD	Règlement Général sur la Protection des Données
RP	Recensement de la Population
RTE	Réseau de Transport d'Électricité
SA	*Substation Automation*
SCE	*Southern California Edison*
SGAM	*Smart Grid Architecture Model*
SIEIL	Syndicat Intercommunal d'Énergie d'Indre-et-Loire
SIG	Système d'Information Géographique
SOeS	Service de l'Observation et des Statistiques
SPOF	*Single Point Of Failure*
T&D	Transport & Distribution
TIC	Technologies de l'Information et de la Communication
TOA	Taux d'Occupation Actif
TWh	Térawatt-heures
UE	Union Europpéenne
UEM	Usine d'Électricité de Metz
V2G	*Vehicle-to-Grid*
VE	Véhicule Électrique
VEHR	Véhicule Electrique Hybride Rechargeable
WE	Week-end

Glossaire des termes et des expressions

Architecture : (Informatique). Le concept principal ou la propriété fondamentale, dans son environnement incarné, ses éléments, ses relations et ses principes de sa conception et de son évolution. [ISO/IEC42010]

Architecture orientée services : (Informatique). Un modèle de conception de logiciels informatiques dans lequel des composants d'application fournissent des services à d'autres composants via un protocole de communication, généralement sur un réseau. [Microsoft library]

***Black start* :** (Réseau électrique). La procédure de rétablissement après un arrêt total ou partiel du réseau de transport électrique qui a provoqué une perte importante d'approvisionnement, il s'agit de démarrer individuellement des centrales isolées et de les reconnecter progressivement les unes aux autres pour reconstituer un système interconnecté. [National Grid]

***Blockchain* :** (Informatique). Une technologie de stockage et de transmission d'informations, elle fonctionne sans organe central de contrôle. Elle est comme une grande base de données qui peut être partagée simultanément avec tous les utilisateurs. Selon des règles spécifiques fixées par un protocole informatique sécurisé, les utilisateurs ont la possibilité de participer. [Assemblée Nationale, 2018].

Cas d'utilisation : (Ingénierie système). Un artefact qui définit une séquence d'actions qui produit un résultat concret pour la valeur. Il fournit une structure permettant de représenter des exigences fonctionnelles dans le contexte des processus système et métier. [IBM, 2017]

Degré jour unifié : (Thermique). La différence entre la température extérieure et celle de référence, elle permet une estimation de consommations d'énergie thermique afin de maintenir la température confortable [Météo France, 2017]

Domaine : (Réseau électrique). Un regroupement de haut niveau d'organisations, de bâtiments, d'individus, de systèmes, de dispositifs ou d'autres acteurs qui ont des objectifs similaires et qui dépendent - ou participent - à des types d'applications similaires, il peut contenir des sous-domaines et avoir plusieurs fonctionnalités qui se chevauchent, comme dans le cas des domaines de la transmission et de la distribution. [NIST, 2014]

Dorsale Internet (*Internet backbone*) : (Informatique). Une des principales routes de données qui crée une connexion de manière stratégique entre les grands réseaux interconnectés et les routeurs centraux de l'Internet. [Intricately, 2021]

Ecrêtement des pointes (*peak shaving*) : (Réseau électrique). Le processus qui consiste à réduire la quantité d'énergie achetée par les consommateurs pendant les heures de pointe de la demande énergétique aux fournisseurs de services publics. [WPC, 2021]

Effet rebond : (Economie). La différence entre les économies théoriquement attendues et les économies réalisées dans la réalité, il peut être indiqué en pourcentage de l'écart par rapport aux économies prévues. [Build Up, 2017]

Exposition au capital : (Finance). Le montant du capital qui peut être perdu si une transaction évolue à l'encontre de la position initiale. En d'autres termes, le coût potentiel pour déterminer si la décision sera profitable ou non. [Qwoter financial dictionary]

Hétéroscédasticité : (Statistiques). Irrégularité de la variance sur le domaine de la variable aléatoire. [Dictionnaire Cordial]

Libre marché : (Economie). Un marché basé sur l'offre et la demande avec peu ou pas de contrôle gouvernemental, il est la forme idéalisée d'économie de marché dans laquelle les acheteurs et les vendeurs sont autorisés à effectuer des transactions (achat, vente ou commerce) librement sur la base d'un accord mutuel sur le prix, sans intervention de l'État sous forme de taxes, de subventions ou de réglementation. [Investopedia]

Marché de gré à gré : (Finance). Un marché décentralisé dans lequel les participants négocient des actions, des matières premières, des devises ou d'autres instruments directement entre deux parties. Aussi appelé une transaction hors cote (*Over-the-counter - OTC*). [Investopedia, 2020]

Marché de gros : (Finance). La livraison est après une négociation entre les fournisseurs/négociants et les producteurs. [EcoEnergytech, 2015]

***Micro-grid* :** (Réseau électrique). Un réseau électrique local permettant l'intégration des ressources énergétiques distribuées locales, qui peuvent fonctionner en parallèle avec le réseau ou en mode îlotage intentionnel (isolé et indépendant) afin de fournir un niveau personnalisé avec davantage de fiabilité et de résilience aux perturbations du réseau. [DOE/OE, 2010]

Modélisation d'équations structurelles : (Statistique). Une technique d'analyse statistique multivariée permettant de représenter, d'estimer et de tester un réseau théorique de relations essentiellement linéaires entre des variables. [StatisticsSolutions, 2021]

Pair-à-pair : (Informatique). Un modèle de communication décentralisé dans lequel chaque partie a les mêmes capacités et peut initier une session de communication. [TechTarget, 2014]

Prosommateur (*prosumer*) : (Energie). Un consommateur traditionnel qui est équipé de technologie et d'intelligence et qui participe donc à l'alimentation du réseau électrique en devenant producteur. [TOFFLER, 1980]

Rentabilité des actifs : (Finance). L'indicateur de la rentabilité d'une entreprise par rapport à ses actifs totaux, affichée par pourcentage, elle donne au gestionnaire, à l'investisseur ou à l'analyste une idée de l'efficacité avec laquelle la direction d'une entreprise utilise ses actifs pour générer des bénéfices. [Investopedia, 2021]

Single Point of Failure : (Ingénierie système). Toute partie non redondante d'un système qui, en cas de dysfonctionnement, entraînerait la défaillance de l'ensemble du système. [AVI Networks, 2021]

Synchrophaseur : (Réseau électrique). Un équipement de mesure et de communication de données, il permet la surveillance, la protection et le contrôle d'infrastructures électriques. [Vizimax, 2019]

Zone : (Réseau électrique). Les zones représentent les niveaux hiérarchiques de la gestion du système électrique. Elles sont conçues pour créer une séparation fonctionnelle. [CEN-CENELEC-ETSI, 2014]

Liste des Tableaux

Tableau 1-1 : Quelques acteurs du marché français de l'électricité 29
Tableau 1-2 : Caractéristiques et avantages du *smart grid* 41
Tableau 1-3 : Analyse des parties prenantes du *smart grid* 44
Tableau 1-4 : Capacité technologique pour transformer le réseau actuel en *smart grid* 45
Tableau 1-5 : Rapport coûts-avantages de certains projets de *smart grid* 47

Tableau 2-1 : Projets de *smart grid* en France 49
Tableau 2-2 : Projets smart grid de base de données JRC 51
Tableau 2-3 : Comparaison entre le *smart grid top-down* et *bottom-up* 61
Tableau 2-4 : Comparaison entre l'intelligence des responsables du service public et celle des consommateurs 64

Tableau 3-1 : Exemples d'approches de modélisation des usages finaux de l'électricité résidentielle utilisées dans des études précédemment 94
Tableau 3-2 : Différentes techniques pour collecter les données de consommation énergétique 95
Tableau 3-3 : Variables influençant l'application du *smart grid* en France 102
Tableau 3-4: Demande totale d'énergie désagrégée en secteurs, sous-secteurs, sous-utilisations et dispositifs 104
Tableau 3-5 : Facteurs déterminant la demande d'énergie dans les différents scénarios 108
Tableau 3-6 : Étapes de modélisation de la demande d'électricité pour un usage final 111

Tableau 4-1 : Quelques appareils électroménagers 126
Tableau 4-2 : Valeur moyenne et écart-type des variables les plus influentes sur la demande d'électricité 129
Tableau 4-3 : Matrice de corrélation pour les variables étudiées influençant la demande électrique . 131
Tableau 4-4 : Calcul des valeurs propres initiales de l'ACP pour les variables étudiées influençant la demande électrique 131
Tableau 4-5 : Calcul de la proportion cumulative pour l'ACP 132
Tableau 4-6 : Variables déterminantes de la consommation d'électricité d'usage final des appareils électriques 132
Tableau 4-7 : Différentes types et possibilités de profils de consommateurs 133
Tableau 4-8 : Analyse statistique sur la taille des logements, l'âge des personnes de référence et le type de ménages dans 22 quartiers de Tours en pourcentage 134
Tableau 4-9 : Pourcentage de types (T) de consommations existants dans les différents quartiers(Q) de Tours 136
Tableau 4-10 : Types éliminés 136
Tableau 4-11 : Les appareils électriques les plus possédés dans l'échantillon étudié 137
Tableau 4-12 : Simulation de la répartition des appareils électriques entre les types de ménages 138
Tableau 4-13 : Emploi du temps des Français en fonction de leur profession et de leur sexe en France métropolitaine 139
Tableau 4-14 : Temps moyen quotidien consacré par les Français à différentes activités 141
Tableau 4-15 : Durée moyenne des activités quotidiennes des Français par minute en France métropolitaine 142
Tableau 4-16 : Activité quotidienne des Français en journées moyennes (JM), jours ouvrés (JO) et week-ends/jours fériés (WE/JF) en France métropolitaine 142
Tableau 4-17 : Taux d'occupation des différentes compositions individuelles en fonction de leurs activités 145
Tableau 4-18 : Consommation annuelle et demande maximale des différents ménages 157
Tableau 4-19 : Type de ménage auquel appartiennent les individus en France en 2010 159

Tableau 4-20 : Pourcentage du type de ménages à Tours et en France en 2016 160
Tableau 4-21 : Taux d'activité et de chômage à Tours et en France en 2017 160
Tableau 4-22 : Consommation totale d'électricité à différentes échelles 161
Tableau 4-23 : Scénarios futurs dans la modélisation de la demande énergétique 163
Tableau 4-24 : Evolution de la population en France de 1990 à 2070 (scénario central) 164
Tableau 4-25 : Évolution de la structure des ménages de 1975 à 2005 en France 166
Tableau 4-26 : Types d'énergies renouvelables en France et leur capacité de production actuelle 176
Tableau 4-27 : Types d'énergies renouvelables en France et leur capacité de production supplémentaire à l'avenir 176

Tableau IV-1 : Taille commune des logements en fonction de leur type en France métropolitaine 245
Tableau IV-2 : Superficie (m^2) et type de logement de 1000 logements aléatoires en location ou en vente en ligne en France métropolitaine (2012) 246

Tableau V-1: Références utilisées pour collecter les données nécessaires associées aux appareils électriques domestiques 250
Tableau V-2 : Puissance moyenne et fréquence d'utilisation des appareils électriques de : a) cuisson/cuisine ; b) stockage/entretien ; c) salon/loisir ; d) salle de bain/soins personnels et e) bureau 251
Tableau V-3 : Puissance nominale et consommation moyenne des appareils électriques 255

Tableau VI-1 : Différentes types et possibilités de profils de consommateurs 288

Tableau VII-1 : Appareils électriques par type d'activité pour chaque type 290
Tableau VII-2 : Résultats du calcul de la demande d'électricité pour les appareils de : a) cuisson/cuisine ; b) stockage/entretien ; c) salon/loisir ; d) salle de bain/soins personnels et e) bureau 291
Tableau VII-3 : Nombre moyen de minutes par an d'utilisation de chaque appareil électrique pour différentes compositions de ménages 294
Tableau VII-4 : Nombre de ménages pour chaque type et catégorie dans le quartier Centre de Tours 295
Tableau VII-5 : Consommation électrique annuelle totale pour tous les ménages du quartier Centre de Tours 296
Tableau VII-6 : Simulation de la consommation annuelle d'électricité de la ville de Tours par quartier 297
Tableau VII-7 : Consommation électrique annuelle totale pour tous les ménages du quartier Centre de Tours après application des stratégies de réduction de la charge 298
Tableau VII-8 : Simulation de la consommation annuelle d'électricité de la ville de Tours par quartier après application des stratégies de réduction de la charge 298
Tableau VII-9 : Consommation annuelle et demande maximale après application des stratégies de réduction de la charge 299

Liste des Figures

Figure 1-1 : Certaines couches schématiques de l'infrastructure urbaine : Exemple du quartier des Deux-Lions à Tours 14
Figure 1-2 : Schéma général d'un réseau électrique traditionnel 15
Figure 1-3 : Schéma du réseau de distribution d'électricité radial à partir d'une sous-station 17
Figure 1-4 : Schéma du réseau de distribution d'électricité maillé à partir d'une sous-station 17
Figure 1-5 : Schéma du réseau de distribution d'électricité en boucle à partir d'une sous-station 18
Figure 1-6 : Schéma d'un *smart grid* à partir d'un centre de gestion 19
Figure 1-7 : Schéma général d'un *smart grid* de la production à la consommation 20
Figure 1-8 : Structure du marché de l'électricité en France 26
Figure 1-9 : Exemple de demande électrique en pointe et en creux d'une journée d'hiver en France .. 33
Figure 1-10 : Exemple de demande électrique en pointe et en creux d'une journée d'été en France 34

Figure 2-1 : Schéma général du projet Arrowhead 52
Figure 2-2 : Schéma général du projet Nice Grid 53
Figure 2-3 : Schéma général du projet de la ville intelligente de Kalundborg 54
Figure 2-4 : Le modèle d'architecture de *smart grid* avec sept domaines 74
Figure 2-5 : Un modèle d'architecture de *smart grid* à huit niveaux 76
Figure 2-6: Un modèle primaire d'interopérabilité du *smart grid* à cinq niveaux 77
Figure 2-7 : Modèle final d'architecture de *smart grid* à cinq niveaux 77
Figure 2-8 : Un modèle d'architecture de *smart grid* à trois niveaux 78
Figure 2-9 : Modèle simplifié d'architecture de *smart grid* à trois niveaux 79
Figure 2-10 : Niveau physique du modèle d'architecture de *smart grid* proposé 81
Figure 2-11 : Niveau gestion du modèle d'architecture de *smart grid* proposé 81
Figure 2-12 : Niveau communication du modèle d'architecture de *smart grid* proposé 82

Figure 3-1 : Evolution de la demande d'électricité dans différents secteurs en France (horizon 2030) en GWh/an 103
Figure 3-2 : Cinq usages finaux d'électricité dans le secteur résidentiel 105
Figure 3-3 : Consommation d'énergie du secteur résidentiel en France par usage final en pourcentage en 2017 105
Figure 3-4 : Evolution des différents usages finaux résidentiels d'électricité de 1973 à 2010 106
Figure 3-5 : La relation entre la demande d'énergie et ses facteurs déterminants via le changement de comportement dans le secteur résidentiel 1109
Figure 3-6 : Organigramme de programmation de la feuille de route pour la modélisation de la demande d'électricité 111

Figure 4-1 : Bâtiment individuel – Maison individuelle 116
Figure 4-2 : Bâtiment individuel – Ensemble de maisons individuelles 116
Figure 4-3 : Bâtiment collectif – Maison mitoyenne 116
Figure 4-4 : Bâtiment collectif – Appartement 117
Figure 4-5 : Corrélations entre les variables étudiées 130
Figure 4-6 : 22 quartiers de Tours 134
Figure 4-7 : Pourcentage d'appareils électriques possédés par les ménages 137
Figure 4-8 : Profil d'occupation quotidien (variation temporelle) des ménages 147
Figure 4-9 : Variation saisonnière moyenne de Tours en 2019 148
Figure 4-10 : Variables déterminantes de la consommation électrique résidentielle 149

Figure 4-11 : Profil de charge journalière pour T12 AFM (femme et homme actif) pour : (a) Jours de semaine été/hiver ; (b) Samedis d'hiver ; (c Samedis d'été ; (d) Dimanche d'hiver ; (e) Dimanche d'été (f) Jours fériés d'hiver ; (g) Jours fériés d'été 155
Figure 4-12 : Profil de charge totale pour T12 AFM kWh. Sur une base : (a) quotidienne ; (b) hebdomadaire ; (c) mensuelle 156
Figure 4-13 : Évolution de la population en France de 1990 à 2070 165
Figure 4-14 : Pyramide des âges (en milliers) en 2005 et 2030 en France 165
Figure 4-15 : Proportion d'individus vivant en couple selon leur âge et leur sexe 166
Figure 4-16 : Estimation de l'évolution des différents types de ménages jusqu'en 2030 en France métropolitaine 167
Figure 4-17 : Techniques de gestion des pics de charge 168
Figure 4-18 : Scénarios de simulation de la demande d'électricité et de la gestion de la charge pour le quartier Centre de Tours 172
Figure 4-19 : Consommation et production d'électricité dans les régions Centre-Val de Loire et Ile-de-France lors d'une journée de saison froide 173
Figure 4-20 : Consommation et production d'électricité dans les régions Centre-Val de Loire et Ile-de-France lors d'une journée de saison chaude 173
Figure 4-21 : Production maximale d'électricité lors d'une journée chaude (figure de gauche) et froide (figure de droite) dans la région CVL 174
Figure 4-22 : Profil de charge électrique et demande maximale de la ville de Tours pour un jour de semaine typique 174
Figure 4-23 : Profil de charge électrique et demande maximale de la ville de Tours pour un jour de semaine typique après la gestion de la charge 175
Figure 4-24 : Capacité actuelle d'énergie renouvelable et capacité des futurs projets de développement en France par région 177

Figure I-1 : Genre des participants à l'enquête 212
Figure I-2 : Âge des participants à l'enquête 212
Figure I-3 : Statut familial des participants à l'enquête 213
Figure I-4 : Structure de ménage des participants à l'enquête 213
Figure I-5 : Taille de ménage des participants à l'enquête 214
Figure I-6 : Nombre d'enfants (individus moins de 18 ans) vivant dans un même logement 214
Figure I-7 : Taille de logement des participants à l'enquête 214
Figure I-8 : Appareils électroménagers possédés par les participants à l'enquête 215

Figure IV-1 : Taille moyenne des différents types de logements en France métropolitaine 245
Figure IV-2 : Carte climats de France métropolitaine hors Corse 248
Figure IV-3 : Répartition des logements selon leur fonctionnalité en France par pourcentage 248
Figure IV-4 : Statut de la propriété concernant le secteur résidentiel en France métropolitaine 249
Figure IV-5 : Logements avec ou sans problèmes en France métropolitaine 249

Liste des Annexes

Annexe I : Aperçu de l'enquête et de ses résultats 212
Annexe II : Méthode de calcul/estimation des usages finaux 217
Annexe III : Article publié 223
Annexe IV : Paramètres effectifs sur la consommation électrique en France 245
Annexe V : Consommation électrique des appareils domestiques 250
Annexe VI : Différents types de consommateurs des ménages 288
Annexe VII : Résultats du calcul de la demande électrique pour Tours (de l'échelle du quartier à celle de la ville) 290

Introduction

Introduction Générale

Énergie, sciences sociales et urbanisme

L'énergie est liée à la vie quotidienne des gens, ainsi que, directement, à divers sujets tels que la sécurité, les questions environnementales et le développement économique de toutes les nations. L'insuffisance des ressources énergétiques non renouvelables, le coût croissant des installations d'approvisionnement en énergie et de leur maintenance ainsi que les dommages causés à l'environnement sont autant de sujets qui méritent d'être étudiés. Il en découle que divers projets de recherche sont en cours pour traiter ces questions. Ces travaux et approches sont exécutés à trois niveaux : 1) les réglementations et les politiques (par exemple, les études de RYDIN & TURCU, 2019 et de RUGGIERO et al., 2021) ; 2) la production (telle que l'étude de NARAYANAN et al., 2019) ; et 3) la consommation (comme une étude réalisée par MRÓWCZYŃSKA et al., 2020). Ainsi, pour être efficace en abordant les problèmes énergétiques actuels, il faut non seulement des études techniques, d'ingénierie et économiques, mais aussi des recherches dans diverses disciplines telles que l'urbanisme et les sciences sociales. Il est également important de savoir comment les aspects sociaux et techniques liés à la production et à la consommation d'énergie interagissent les uns avec les autres. En d'autres termes, « l'énergie est un thème relevant de la recherche sur les défis liés aux évolutions sociales et technologiques » [LUTZENHISER & SHOVE, 1999 et JANDA, 2009].

Les sciences sociales peuvent être mobilisées pour étudier les décisions, les comportements, les activités et les conséquences des choix des individus en matière d'énergie. Ces études peuvent mettre en évidence l'attitude générale des gens concernant leurs pratiques relatives aux questions énergétiques, leurs points de vue sur les services énergétiques et leurs incitations à appliquer des mesures d'efficacité énergétique. Elles peuvent également discuter de l'état d'esprit des gens sur la relation entre la consommation d'énergie, le degré de confort et les préoccupations environnementales ; de leurs choix et de leurs moyens d'investissement pour remplacer les anciens équipements par des modèles plus efficaces ; de leurs méthodes d'entretien de ces équipements en vue de leur efficacité en matière de réduction de la consommation énergétique et des principaux facteurs qui déterminent leurs comportements. Ces études portent aussi sur l'examen des organisations qui relient les personnes au réseau énergétique (par exemple les fournisseurs d'énergie) et les réglementations et les politiques énergétiques existantes et, ainsi, potentiellement, les améliorer.

Par conséquent, les chercheurs en sciences sociales, en mettant en œuvre des méthodes et des techniques de recherche spécifiques et en développant des modèles formels et des expériences de terrain, peuvent s'attaquer à des problèmes sociaux tels que l'utilisation inefficace de l'énergie [VINE, 1993]. L'analyse énergétique doit donc dépasser les dimensions technologiques et économiques et s'inscrire dans un contexte plus large et intégratif. Le contexte urbain permet d'inclure des éléments sociaux et humains. Ainsi, les relations entre l'urbanisme et les questions énergétiques et l'importance d'étudier ces questions en tant qu'urbaniste semblent être d'une grande valeur.

En outre, l'inefficacité énergétique peut elle-même créer des problèmes sociaux [BIGGART & LUTZENHISER, 2007] et les spécialistes des sciences sociales et/ou les urbanistes peuvent donc jouer un rôle important pour éviter ces problèmes en utilisant différentes méthodes telles que la création d'enquêtes qui évaluent le comportement et les attitudes du public, la conception de stratégies d'échantillonnage pour l'évaluation des programmes, la création de plans d'étude expérimentaux (par exemple, les différentes stratégies marketing ou les mécanismes d'incitation financière), le développement de modèles analytiques, la conception de différentes techniques de mesure pour évaluer les comportements déclarés par les consommateurs, l'utilisation de techniques d'entretien et d'études de cas innovantes, la fourniture d'informations générales sur les individus et la dynamique des programmes sur la base de leurs travaux dans les domaines de la sociologie, de la psychologie, de l'anthropologie, de l'écologie humaine et de l'économie [VINE, 1993].

En résumé, le problème de l'énergie en tant que question sociale, économique et environnementale peut être abordé dans un contexte de planification qui peut conduire au développement et à l'évaluation des politiques énergétiques, des stratégies et des réglementations. Ce point de vue sur les systèmes énergétiques n'est pas nécessairement étudié dans d'autres disciplines. Par conséquent, cette recherche, en se concentrant sur l'énergie et plus spécifiquement sur l'électricité dans le contexte urbain et du point de vue de l'urbanisme et des sciences sociales, tente d'examiner les questions relatives aux systèmes énergétiques sous un angle nouveau.

Énergie électrique et *smart grid*

Le réseau électrique est l'une des infrastructures les plus critiques, stratégiques et techniques de notre société actuelle [SULLIVANT, 2007]. Il est la base de la vie moderne et est

indispensable à toutes les grandes infrastructures telles que le système de transport, les bâtiments, etc. et à tous les services publics modernes, comme le téléphone, la télévision et l'Internet. Elle joue un rôle direct dans la fourniture fiable de l'énergie aux points d'utilisation, ce qui permet la mise en place de toutes les autres infrastructures et services, et son importance ne cesse de croître. Par exemple, l'électricité est impliquée dans notre mobilité avec l'émergence et le développement des véhicules électriques (VE) et le transport en commun électrique. Un approvisionnement énergétique fiable, sûr et sécurisé est donc d'une importance capitale non seulement pour l'industrie, mais aussi pour la vie quotidienne de toute la société [EUR-LEX (Directive 2004/8/EC), 2004; SKOPIK, 2014].

Récemment, de nombreux efforts ont été faits pour réduire la consommation d'électricité, ce qui est important pour plusieurs raisons. Parmi les plus significatifs, on peut citer : la pénurie d'énergies non renouvelables ; l'augmentation de la consommation d'énergie (augmentation de la consommation mondiale d'électricité d'environ 3% par an sur la période 2008-2016 – IEA , 2018) ; l'augmentation des coûts de l'énergie (augmentation moyenne de 2% par an entre 1990 et 2011 dans le secteur résidentiel en France métropolitaine - INSEE) ; les impacts du changement climatique ; les émissions de gaz à effet de serre et autres pollutions environnementales. Toutes ces préoccupations liées à l'énergie sont en quelque sorte affectées par la façon dont nous produisons et consommons l'électricité.

Par conséquent, la réduction de la consommation électrique permet la réduction des coûts, de l'insalubrité et des pollutions. Cette réduction est la base du développement durable respectivement en termes de composantes économiques, sociales et environnementales. Elle est également une composante essentielle du respect des engagements politiques pris quant à la réduction des émissions de carbone (par exemple, l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie à 32% d'ici 2030, la réduction de la consommation d'énergie de 50% d'ici 2050 en France d'après la loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte et le pacte vert pour l'Europe avec l'objectif de faire de l'Europe le premier continent neutre de point de vue climatique d'ici 2050).

D'une part, des problèmes tels que l'inefficacité du système électrique, la demande croissante d'électricité, en particulier aux heures de pointe, et le coût important de stockage de l'électricité pour une utilisation future, ont poussé les services publics à rechercher de nouvelles méthodes de gestion des charges de pointe. Le réseau actuel, par des problèmes tels

que les coupures d'électricité, les charges de pointe, les fluctuations et les besoins de maintenance et de modernisation, s'est avéré difficile à gérer pour répondre à cette demande et assurer un approvisionnement énergétique durable.

D'autre part, l'évolution des technologies de l'information et de la communication (TIC) et le développement de nouveaux dispositifs de comptage et de capteurs de surveillance ont marqué le début de l'utilisation des technologies de traitement informatique pour la gestion de l'électricité.

C'est pourquoi, depuis quelques années, le *smart grid* a été présenté dans de nombreux travaux tels que ceux de FLICK & MOREHOUSE (2011) ; ALAGOZ et al. (2012) ; BAYLISS & HARDY (2012) et GAO et al. (2012) comme une solution exceptionnelle qui assure l'efficacité énergétique, répond à la demande mondiale croissante d'électricité et fournit une capacité, une fiabilité et une durabilité suffisantes non seulement du fait de la réduction de la consommation ainsi permise mais aussi par l'équilibre entre la consommation et la production, par la réduction de la demande de pointe [PRAVEEN & RAO, 2020] et l'optimisation de l'ensemble du système [XU et al., 2020].

Contribution de la recherche

Les défis complexes concernant la consommation d'énergie et les objectifs futurs concernant le réseau électrique conduisent à une évolution rapide des technologies de *smart grid*. En ce qui concerne le *smart grid* et son contexte, plusieurs aspects ont déjà été abordés dans la littérature. Les éléments importants de certaines de ces études sont mentionnés ci-dessous.

FLICK & MOREHOUSE (2011) ont présenté le *smart grid* comme un concept évolutif qui peut augmenter l'efficacité, la fiabilité et présenter une manière plus économique de distribuer et de transmettre l'énergie en utilisant de nouvelles technologies et un meilleur niveau d'interconnexion, de coopération et d'analyse de données massives (*big data*). BAYLISS & HARDY (2012) ont donné un aperçu général d'un réseau plus intelligent avec des ressources énergétiques renouvelables. ALAGOZ et al. (2012) ont également fait la démonstration d'une architecture de *smart grid* et l'on décrit comme un système flexible, fiable, contrôlable, observable et efficace. GAO et al. (2012) ont proposé un réseau « plus intelligent » comme moyen de prévenir les problèmes liés au réseau électrique. COLL-MAYOR et al. (2007) ont comparé les visions européenne et américaine des *smart grid* et ont indiqué que toutes deux sont basées sur l'intégration des nouvelles technologies de l'information et de la

communication et sur le soutien actif des consommateurs afin d'optimiser le système et de créer un réseau électrique abordable et fiable.

FELDER (2012), après avoir tenté de définir le *smart grid*, a étudié les avantages et les coûts ainsi que sa répartition selon différentes perspectives (normes, équité, etc.). GIORDANO & FULLI (2012) ont indiqué que les coûts de déploiement des compteurs intelligents sont inférieurs aux avantages économiques et sociétaux attendus. SAMAD & KILICCOTE (2012) ont examiné les coûts de mise en œuvre des technologies de *smart grid* et leurs avantages dans le secteur industriel.

ANASTASOPOULOS et al. (2008) ; REN et al. (2011) ; ALONSO et al. (2012) et KOSTKOVÁ et al. (2013) ont exploré la cybersécurité et la fiabilité du réseau. GUNDUZ & DAS (2020) ont présenté le *smart grid* comme un système complexe vulnérable aux cyberattaques ayant des répercussions à grande échelle et proposé des études approfondies et des solutions adaptées pour les réseaux de demain.

MAH (2012) ; WOLSINK (2012) et VERBONG et al. (2013) ont examiné la sensibilisation, l'acceptation et la participation du public aux projets de réseaux intelligents. Une étude par ABDMOULEH et al. (2018) révèle qu'il est nécessaire de sensibiliser le public au sujet de *smart grid*, même dans une communauté telle que le Qatar axée sur la technologie, et que des questions telles que la vie privée, la sécurité des données et les coûts potentiels influencent négativement l'acceptation du public.

D'autres études telles que celles de SUN (2011) ; SAPUTRO et al. (2012) et ACHARJEE (2013) se sont focalisées sur la mise en œuvre technique, les difficultés d'exécution et les enjeux industriels concernant le *smart grid*. KAPPAGANTU & DANIEL (2018) ont expliqué que ces défis de déploiement sont principalement associés à l'adaptation des technologies émergentes, aux questions socio-économiques, au manque de politiques et à la sensibilisation.

De nombreuses études se sont consacrées à l'aperçu général, aux caractéristiques, aux avantages, aux coûts, à la faisabilité financière, à la sûreté et à la sécurité, à l'acceptation par le public et également aux obstacles à la mise en œuvre du *smart grid*. Plusieurs d'entre eux ont mentionné les avantages du *smart grid* et le fait qu'il est capable de réduire la consommation globale d'électricité en aplatissant la charge électrique [BARKER et al., 2012 ; BOUCKAERT et al., 2012] en utilisant des approches *top-down* et/ou *bottom-up* de la gestion de la charge, en d'autres termes, en contrôlant et en gérant la consommation/production soit

par les collectivités locales soit aussi par les consommateurs. Toutefois, peu d'études ont porté sur la méthode efficace de gestion de la charge et sur les étapes de déploiement du *smart grid* qui semble complexe.

Cette complexité est probablement due à l'imprévisibilité du comportement humain en matière de consommation/production d'énergie et à la difficulté d'analyser ses réactions. Cette ambivalence peut également être influencée par les connaissances individuelles, l'éducation, les normes de la société, les traditions, le mode de vie, les habitudes, les coutumes, le degré d'acceptation du public et de flexibilité sociale, la résistance au changement et les conditions de la cohérence idéologique car des idées répétées et des hypothèses de base cohérentes peuvent avoir un impact sur les décisions individuelles en matière de consommation et/ou production d'énergie [SUBREMON, 2011]. La multiplicité et l'hétérogénéité des variables (individus, bâtiments, équipements, etc.) rendent l'analyse encore plus difficile.

La première problématique de cette recherche se résume donc la question suivante :

Comment les approches (*top-down* et *bottom-up*) de gouvernance du *smart grid* aplatissent la courbe électrique quotidienne et contribuent à la gestion de sa charge ?

Bien que la première étape du déploiement du *smart grid* consiste à comprendre les caractéristiques de consommation/production des bâtiments d'une zone sélectionnée, trouver la relation entre la consommation d'énergie de chaque ménage et son logement est malaisé.

Alors que des efforts de recherche considérables ont été consacrés à la réduction de la consommation totale d'énergie en réponse aux problèmes énergétiques, peu de recherches ont porté sur les synergies entre la consommation d'énergie de l'ensemble du parc immobilier d'une ville et la gestion des pics de demande en tant que moteur puissant d'investissement dans les réseaux et/ou les centrales électriques [REN et al., 2013]. De nombreuses recherches, telles que celles de WIDÉN et al. (2009a), GU & RAUSTAD (2011), se sont concentrées sur les usages finaux tels que l'eau chaude, le système de chauffage et de climatisation, etc. et n'ont donc pas accordé beaucoup d'attention aux appareils électriques.

Cela peut s'expliquer par le fait que la consommation de la plupart de ces usages finaux peut être simulée car elle dépend des caractéristiques des bâtiments et est souvent calculable, alors que la relation entre les ménages et leur choix d'appareils électriques n'est pas aussi clairement mesurable. En outre, pour d'autres usages finaux tels que les systèmes d'éclairage, de

chauffage/climatisation, les appareils de cuisson et le système de production d'eau chaude, il est possible de réaliser des économies d'énergie en prêtant attention aux modes de consommation, mais il est compliqué de mettre en œuvre des stratégies d'écrêtement des pointes (*peak shaving*) pour ces usages finaux, qui devraient souvent être utilisés à des heures précises (par exemple, éclairage la nuit ou appareils de cuisson avant les repas, etc.). Cependant, moins pris en compte dans les études, ce sont eux qui peuvent faire l'objet d'optimisations.

Au contraire, le fait d'avoir les appareils électroménagers (comme la télévision, la machine à laver, etc.) peut dépendre de plusieurs facteurs et leur utilisation peut également dépendre de nombreuses variables. Ainsi, il existe peu d'informations sur la relation entre les individus et leur nombre et type d'appareils électriques, ainsi que sur la durée et la fréquence de leur utilisation.

Par conséquent, la deuxième question de cette recherche est la suivante :

Quels méthodes ou outils adopter pour simuler la consommation/demande de l'usage final des appareils électroménagers ?

Ainsi, les travaux de cette thèse ont pour but de :

- Comprendre les problèmes de réseau actuel et la nécessité d'adopter le *smart grid*
- Présenter les méthodes de gestion du *smart grid* et ses contradictions
- Comparer les techniques de modélisation électrique dans le cadre de développement du *smart grid*
- Simuler la consommation et la demande des ménages liée à l'usage final des appareils électriques à l'échelle urbaine
- Déterminer la relation entre les ménages, leurs logements et leur choix d'appareils électriques (achat et fréquence d'utilisation)
- Etudier l'impact des approches *top-down* et *bottom-up* pour cette analyse
- Analyser la gestion de cette demande et la contribution de *smart grid* en aplatissement de la courbe de charge

Cette recherche n'abordera pas notamment les domaines suivants (pour les raisons expliquées en chapitre 3) :

1. La consommation/production d'énergie des bâtiments non résidentiels ;

2. Les catégories d'usage final suivantes : a) système de production d'eau chaude, b) systèmes de chauffage/climatisation, c) appareils d'éclairage et luminaires et d) tables de cuisson et fours électriques.

Après avoir présenté un aperçu du *smart grid*, ses avantages, ses enjeux, ses progrès, ses approches, etc. en poursuivant différentes analyses, cette recherche vise à clarifier le processus de déploiement du *smart grid* dans un contexte urbain en se concentrant sur la gestion de la demande de pointe concernant les appareils électriques du secteur résidentiel et l'optimisation de la production-consommation. Elle met en évidence les contradictions existantes dans les politiques urbaines.

Elle se concentre sur le développement du *smart grid* comme moyen d'atteindre des objectifs d'une part de réduction de consommation d'électricité et d'autre part d'écrêtement des pics de consommation tout en envisageant ses configurations *top-down* et *bottom-up* tant avant (dans la phase de modélisation) qu'après la mise en œuvre du *smart grid* (dans la phase de gestion de la charge). Par conséquent, au cours des chapitres suivants, la recherche tente à répondre aux problématiques identifiées.

Les méthodes proposées dans le cadre de cette recherche visent à servir de base non seulement pour le développement de futures améliorations du système énergétique, mais aussi pour l'utilisation des producteurs et des fournisseurs d'électricité, des consommateurs individuels ainsi que d'autres acteurs du *smart grid* afin de garantir l'efficacité de la méthode de gestion de la charge.

Ainsi, les principales contributions de cette thèse peuvent être listées comme suit dans deux catégories : théorique et méthodologique :

- Contributions théoriques :

    - L'intelligence (*smartness*) du *smart grid* est présentée et discutée du point de vue *top-down* et *bottom-up*. Cette intelligence est liée aux données et ses niveaux de visibilité, partage et contrôle et conduit à un contraste entre les autorités et les consommateurs.

- La Maîtrise de la Demande en Electricité (MDE) et la Réponse à la Demande (RD) sont présentées comme deux techniques distinctes de gestion de la charge électrique basées sur la gestion des fournisseurs ou du consommateur.

- Le modèle d'architecture de *smart grid* est défini comme une architecture à trois niveaux afin de permettre l'étude de chaque niveau séparément selon les disciplines : génie électrique, informatique, urbanisme et sciences sociales.

- Contributions méthodologiques :

  - Une série d'analyses comparatives entre différentes méthodes de modélisation de la demande électrique est effectuée, ce qui a permis de sélectionner une combinaison des méthodes, à savoir une technique d'enquête aléatoire et des statistiques d'enquête nationales pour créer des types.

  - Le taux d'occupation active des ménages et leurs activités quotidiennes a permis de simuler les horaires et la durée d'utilisation des appareils électriques.

  - Le temps d'utilisation des appareils électriques dans un ménage est estimé sur la base du taux d'occupation de tous les occupants d'un logement et pas seulement de la personne de référence. Ce temps est synchronisé entre les membres du ménage pour donner une approche plus réaliste dans la simulation du profil de charge électrique.

  - Une collection de 74 appareils électriques domestiques de différents modèles et marques de divers fabricants, avec leur puissance électrique nominale annoncée par leurs fabricants sous forme de spécifications techniques, est préparée et peuvent être utilisées comme référence pour les simulations de la demande électrique.

Organisation du manuscrit de thèse

Le manuscrit est composé de deux parties : théorique et expérimentale, soutenues par sept annexes. Chaque partie est composée de deux chapitres. Afin de permettre une compréhension complète de la question, les deux premiers chapitres sont consacrés aux approches théoriques mobilisées et les deux derniers abordent les aspects méthodologiques et techniques ainsi que l'analyse et l'étude de cas.

Le chapitre 1 donne une introduction sur les infrastructures énergétiques et plus spécifiquement sur les infrastructures électriques et explique pourquoi le *smart grid* se distingue des autres topologies de réseau. Il présente les questions concernant le système électrique actuel qui conduisent à une transition vers le futur réseau et à la création d'un *smart grid*. Il examine ensuite les avantages du développement du *smart grid*, les bénéfices pour les parties prenantes, le point requis pour cette transition et l'Analyse Coûts-Avantages (ACA) de certains exemples sont également présentés dans ce chapitre.

Le chapitre 2 explique comment les différentes échelles de prise de décision peuvent conduire à créer différentes méthodes de développement de *smart grid*. En outre, il y a une analyse des avantages et des inconvénients de chaque approche. Avant cela, le chapitre passe en revue certains projets de *smart grid* et tire quelques conclusions de ces travaux. Ensuite, ce chapitre parle de l'intelligence du réseau, met en évidence la différence entre les méthodes mentionnées précédemment et l'examine sous un angle nouveau. Il aborde également les défis concernant le *smart grid*. Enfin, il décrit l'architecture de *smart grid*.

Le chapitre 3 commence la partie expérimentale par la nécessité de modélisation électrique. Il décrit différentes techniques courantes pour analyser la consommation et la demande d'électricité. Il se concentre ensuite sur un processus séquentiel et logique pour faire une analyse dans le cadre du déploiement d'un projet *smart grid*.

Enfin, le chapitre 4 commence par la collecte des données nécessaires et leur analyse. Il développe une analyse spatio-temporelle de la demande dans le secteur résidentiel de la ville de Tours et propose des simulations pour faire la gestion de cette demande. Enfin, il applique les résultats à l'échelle urbaine et les vérifie en comparant les simulations avec les données existantes.

Les conclusions sont présentées après le chapitre 4. Elles résument d'abord les résultats de ce travail de thèse et tirent en suite des conclusions concernant les questions de thèse. Elles abordent les limites des analyses réalisées. Enfin, elles mettent en évidence les travaux et les perspectives possibles pour l'avenir.

Section 1 : Partie théorique

Chapitre 1 : Du réseau actuel au *smart grid*

1.1 Réseaux

Les principaux termes relatifs aux réseaux électriques utilisés dans cette recherche sont décrits ci-dessous afin d'en permettre une meilleure compréhension.

1.1.1 Infrastructures urbaines

Au long de l'histoire, les villes ont été présentées physiquement et sous forme de modèles, de cartes et d'images qui pouvaient avoir des implications spatiales d'équité et d'efficacité dans la géométrie, les morphologies, l'occupation des sols, etc. Le monde actuel dominé par les communications exige de se concentrer sur une nouvelle science de la ville et met l'accent sur les interactions plutôt que sur les lieux [BATTY, 2013].

Les habitants des villes ont besoin d'air pur, d'eau potable et de sécurité. Ils ont besoin également de bâtiments efficaces, d'un réseau électrique fiable et de solutions de transport performants. La mise en place d'infrastructures urbaines efficaces, résilientes et durables est donc essentielle pour les villes, constituant une base à partir de laquelle le succès économique et la prospérité peuvent se développer.

D'autre part, l'évolution des théories de la complexité des villes (*Complexity Theories of Cities - CTC*) conduit la planification urbaine vers une vision quantitative plus complexe qui peut être présentée par des scénarios de simulation, des modèles de calcul et des technologies de l'information sophistiquées, et une vision qualitative présentée sous la forme d'un nouveau langage de planification [PORTUGALI, 2000]. Ainsi, une ville peut être considérée comme une série de couches superposées d'infrastructures urbaines (systèmes urbains) que nous pouvons analyser par la suite.

Dans le cadre de cette recherche, le terme « infrastructure urbaine » fait référence à tout équipement de base, structure physique ou réseau non physique sur un territoire donné qui fait fonctionner le territoire, qui facilite les conditions de vie de sa population et qui est créé par l'intervention humaine. Ces infrastructures sont les suivantes (Figure 1-1) :

1. L'ensemble des bâtiments : toute construction indépendamment de sa fonction (résidentielle, industrielle, commerciale, etc.) ;

2. Le système de transport : les chemins de fer, les voies aériennes, les canaux d'eau, les routes, les voies piétonnières, les pistes cyclables, etc. permettant la mobilité ;

3. Le réseau électrique : le réseau entre le producteur et le consommateur d'électricité ;

4. Le réseau de gaz : le système de transfert du gaz naturel pour le chauffage, la cuisinière, etc. ;

5. Le système de télécommunication : les équipements, les technologies d'informations et de communication qui permettent de communiquer à distance (par exemple le téléphone et l'internet) ;

6. Le réseau d'eau potable : le système qui fournit l'eau potable aux bâtiments pour le lavage, les sanitaires, l'entretien, l'alimentation, etc. ;

7. Le réseau des eaux usées : le moyen d'évacuation des eaux usées depuis leur origine jusqu'à leur traitement ou leur élimination éventuelle ;

8. Le déchet : le système de ramassage des ordures ménagères et autres déchets ;

9. Les espaces verts aménagés : l'ensemble constitués des espaces verts créés par l'homme (les parcs à thème, les paysages, les espaces verts publics, les jardins, les terrains de jeux, etc.).

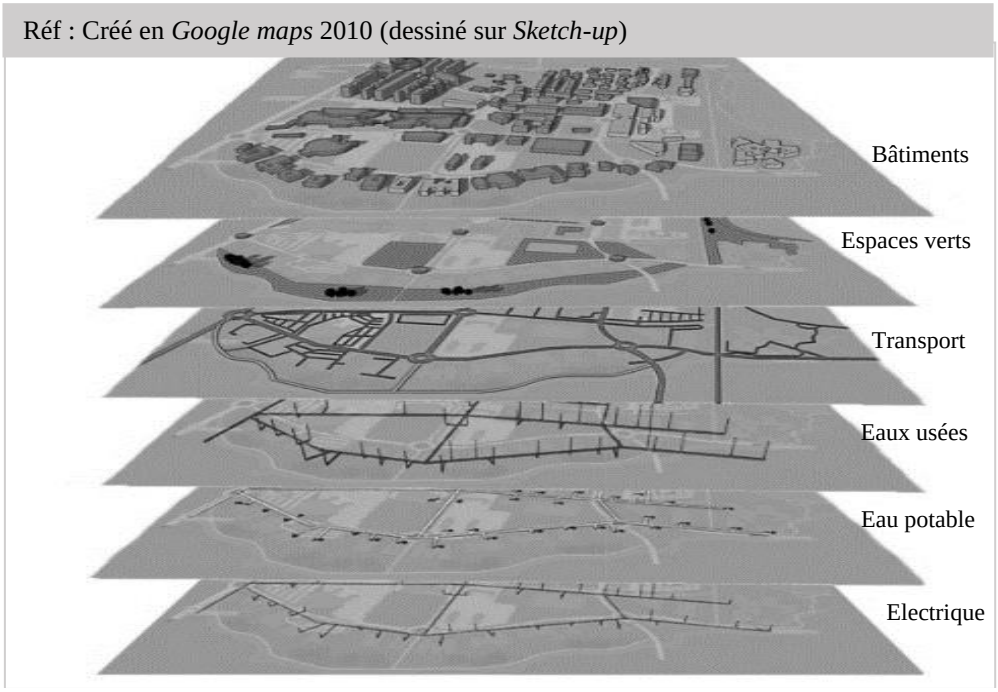


Figure 1-1 : Certaines couches schématiques de l'infrastructure urbaine : Exemple du quartier des Deux-Lions à Tours

Dans cette recherche, le sujet d'étude est le réseau électrique.

1.1.2 Service public

Un service public (*utility*) peut être défini comme une activité, proposé au public des fournitures telles que l'eau, l'électricité, le gaz naturel, la télécommunication, etc. mais aussi la santé et la sécurité sociale. Le terme peut également désigner l'organisme qui servit le public pour les fournir avec ces activités nécessaires. Ces organismes (public ou privé mais sous contrôle public) sont souvent responsables de l'entretien, de la réparation ou de la modernisation de l'infrastructure et des réseaux et sont soumises à des formes de contrôle et de réglementation publics. Il existe différentes échelles de services publics, allant des groupes communautaires locaux aux monopoles gouvernementaux à l'échelle de l'État.

Le service public d'électricité en France est responsable de produire de l'électricité ou l'acheter ou l'importer, le transporter vers son lieu de consommation, et finalement la distribuer auprès des consommateurs. Il est ainsi composé de 4 activités : la production, le transport, la distribution et la commercialisation. Ce dernier est réalisé par les fournisseurs d'électricité.

1.1.3 Réseau électrique

Le terme « réseau électrique » peut désigner une infrastructure complète qui comprend la production, le transport, la distribution et la consommation d'électricité, ou un ensemble d'une infrastructure plus vaste (*Super grid*) (Figure 1-2). Un *grid* électrique est tout simplement un réseau d'électricité.

Réf : Basé sur la définition du réseau électrique

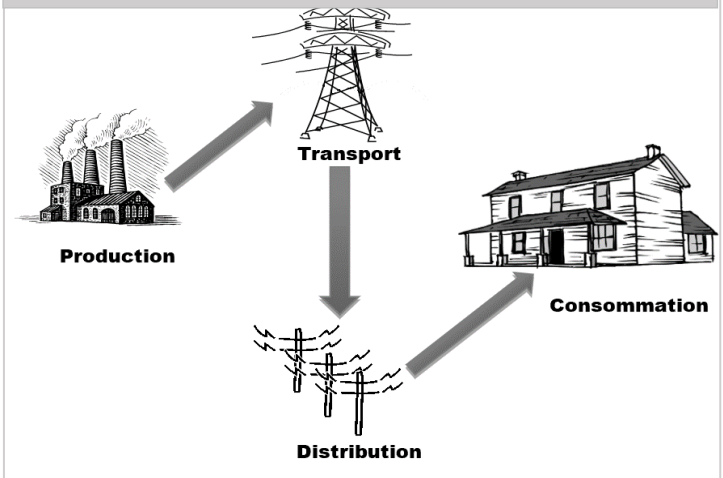


Figure 1-2 : Schéma général d'un réseau électrique traditionnel

Le réseau électrique actuel est principalement composé de grandes centrales de production reliées par un réseau à haute tension aux systèmes de distribution électrique locaux qui, à leur tour, desservent les bâtiments résidentiels, commerciaux et industriels. Dans le système électrique actuel, l'électricité circule principalement et à l'aide de commandes mécaniques, souvent dans un seul sens, des producteurs aux consommateurs alors que dans le système futur, le consommateur pourra aussi être producteur d'électricité et injecter du courant sur le réseau de distribution pour d'autres consommateurs (par exemple dans le cas d'une surproduction domestique et décentralisée par un consommateur).

Le réseau électrique remplit trois grandes fonctions :

1. La production d'électricité : la première étape qui est effectuée dans les centrales électriques ;

2. Le transport d'électricité : la deuxième étape qui implique le transfert de l'électricité des centrales électriques vers les systèmes de distribution des compagnies d'électricité ; et

3. La distribution de l'électricité : l'étape finale qui consiste à fournir de l'électricité aux consommateurs.

1.1.4 Topologies du *grid*

L'électricité est distribuée avec des topologies différentes à partir de sous-stations vers les bâtiments. Il existe deux topologies communes pour la distribution de l'électricité aux États-Unis (réseaux radial et maillé) et une topologie commune en Europe (réseau bouclé) [FLICK & MOREHOUSE, 2011].

Grid radial

La topologie la plus courante de la distribution électrique est un schéma ressemblant à un arbre avec de nombreuses branches et feuilles qui reçoivent de l'énergie d'une seule ressource (le tronc d'arbre) (Figure 1-3). Il n'y a donc qu'une seule ressource d'énergie pour tous les bâtiments. Comme l'électricité est transportée par les lignes électriques, elle perd une partie de sa puissance avant qu'elle atteigne sa destination. Par conséquent, une panne de courant, un court-circuit ou une ligne électrique tombée en panne interrompt le courant dans toute les lignes qui en dépendent et la ligne principale doit être réparée afin que le courant puisse être

rétabli. Cette topologie est la moins chère à construire et est largement utilisée dans les zones peu peuplées.

Réf : Basé sur la définition du *grid* radial

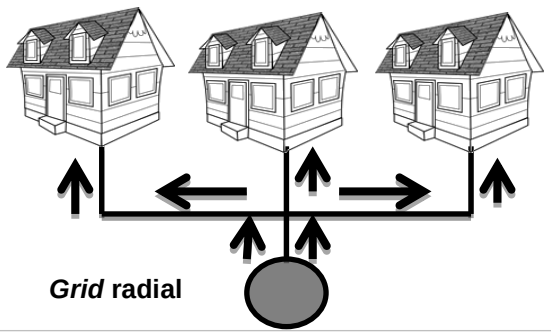


Figure 1-3 : Schéma du réseau de distribution d'électricité radial à partir d'une sous-station

Grid maillé

Le système en circuit fermé est la structure la plus compliquée des topologies du réseau. Chaque bâtiment peut être alimenté par plusieurs ressources et aussi selon plusieurs circuits (Figure 1-4). Le grand avantage d'un tel système est évidemment la fiabilité accrue par rapport au *grid* radial. Il est plus coûteux.

Réf : Basé sur la définition du *grid* maillé

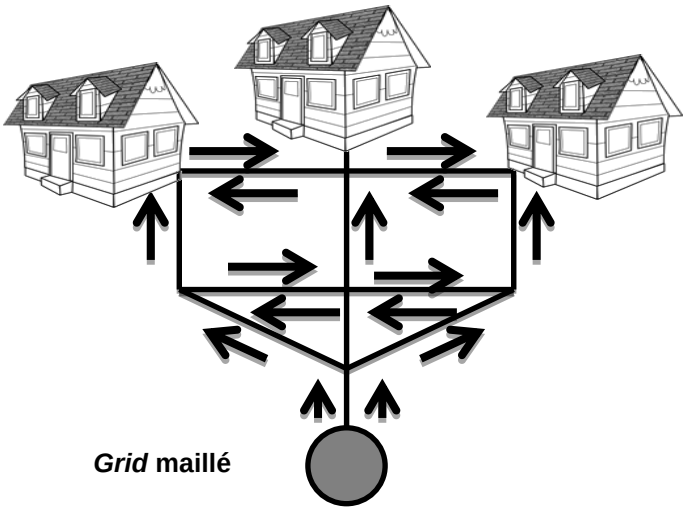


Figure 1-4 : Schéma du réseau de distribution d'électricité maillé à partir d'une sous-station

Grid en boucle

Un système en boucle, comme son nom l'indique, traverse la zone de service et revient au point de départ. C'est un mélange de topologie radiale et de topologie maillée avec beaucoup

de ressemblance avec une topologie radiale, à la différence que chaque branche et chaque feuille a deux chemins séparés depuis la sous-station (Figure 1-5). Par conséquent, en plaçant des interrupteurs à des endroits stratégiques, les services publics peuvent fournir de l'électricité aux clients dans les deux sens.

Contrairement à la topologie radiale qui est vulnérable à des points de défaillance uniques (*single point of failure* - *SPOF*), la topologie en boucle offre une plus grande fiabilité. L'objectif de cette dernière est de pouvoir résister à une perturbation du réseau, quel qu'en soit l'emplacement. Si une source d'énergie tombe en panne, des interrupteurs vont être actionnés (automatiquement ou manuellement) et l'énergie sera fournie aux consommateurs à partir de l'autre source (sous-station). Par conséquent, le système en boucle assure une meilleure continuité de service que le système radial, avec seulement de courtes interruptions pour la commutation. En cas de panne de courant due à des défauts sur la ligne, le service public n'a qu'à trouver le défaut et à le contourner pour rétablir le service. Le défaut lui-même peut alors être réparé avec un minimum d'interruption. Tout comme la topologie maillée, celle en boucle est plus coûteuse que la topologie radiale, car chaque extrémité de la boucle doit répondre aux exigences du système en matière de puissance et de chutes de tension. En outre, il faut davantage de commutateurs et de conducteurs.

Réf : Basé sur la définition du *grid* en boucle

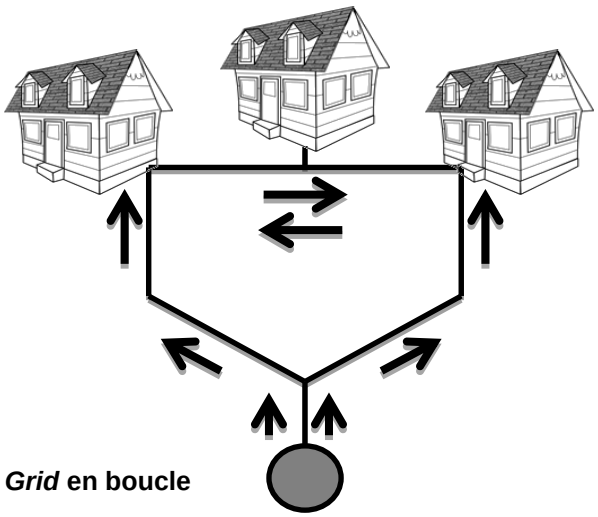


Figure 1-5 : Schéma du réseau de distribution d'électricité en boucle à partir d'une sous-station

Réseau intelligent (*Smart grid*)

Le premier article écrit sur le *smart grid* remonte à 2006 en proposant de rendre les réseaux électriques plus intelligents [ASMUS, 2006], c'est-à-dire plus fiables que les topologies

mentionnées précédemment en utilisant des technologies intelligentes (connectées). Dans ce type de réseau, il est possible de connecter (virtuellement) plusieurs nœuds (bâtiments) dans diverses configurations plutôt que de recourir à une topologie prédéfinie (Figure 1-6). Par conséquent, un système de distribution bidirectionnel et la connexion de chaque nœud au réseau Internet permettent de distribuer l'électricité de manière plus optimisée et plus gérable sur le territoire donné dans une structure libre.

Réf : Basé sur la définition du *smart grid*

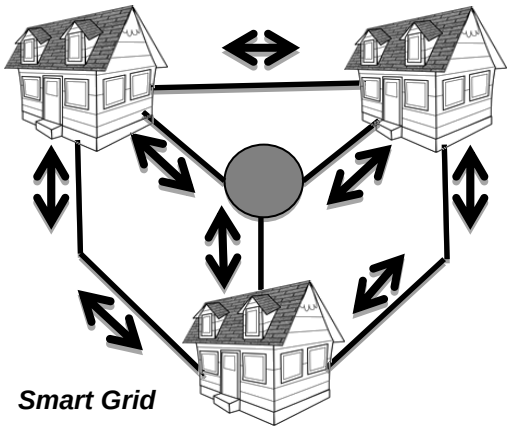


Figure 1-6 : Schéma d'un *smart grid* à partir d'un centre de gestion du réseau (CGR)

Il n'existe pas de définition précise faisant autorité pour le terme « *smart grid* ». Il est possible de décrire le *smart grid* comme un dispositif, une application, un système, un réseau ou encore une infrastructure commune. Il s'agit d'une idée « transactive » [MILLER, 2009], dynamique, qui se développe grâce à l'expansion et à l'évolution des nouvelles technologies.

Il existe de nombreuses définitions provenant de différentes organisations telles que le département de l'Énergie des États-Unis (*DoE*), la Commission Européenne, la Commission de Régulation de l'Energie (CRE), la *North American Electric Reliability Corporation (NERC*), la plateforme technologique européenne (*European Technology Platforms - ETP*) sur les *smart grids*, le Groupe des régulateurs européens dans le domaine de l'électricité et du gaz (*The European Regulators' Group for Electricity and Gas - ERGEG*) et la loi sur la sécurité et l'indépendance énergétiques (*The Energy Independence and Security Act - EISA*), dont certaines sont reprises ci-dessous :

- Selon la loi sur la sécurité et l'indépendance énergétiques (*EISA*) de 2007, « le *smart grid* est décrit comme une modernisation du système national de transport et de

distribution d'électricité afin de maintenir une infrastructure électrique fiable et sûre qui puisse répondre à la croissance future de la demande ».

- Selon la COMMISSION EUROPEENNE (2011), « le *smart grid* est un réseau électrique qui peut intégrer de manière rentable le comportement et les actions de tous les utilisateurs qui y sont connectés – producteurs, consommateurs et ceux qui sont à la fois producteurs et consommateurs– afin de garantir un système électrique économiquement efficace et durable avec de faibles pertes et des niveaux élevés de qualité et de sécurité d'approvisionnement ».

- Selon la CRE (2019), « le *smart grid* intègre les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) pour développer une multitude de nouveaux usages. Rendre les réseaux plus intelligents en les équipant de NTIC, c'est, in fine, améliorer la fourniture d'énergie… ».

Réf : Basé sur la définition du *smart grid*

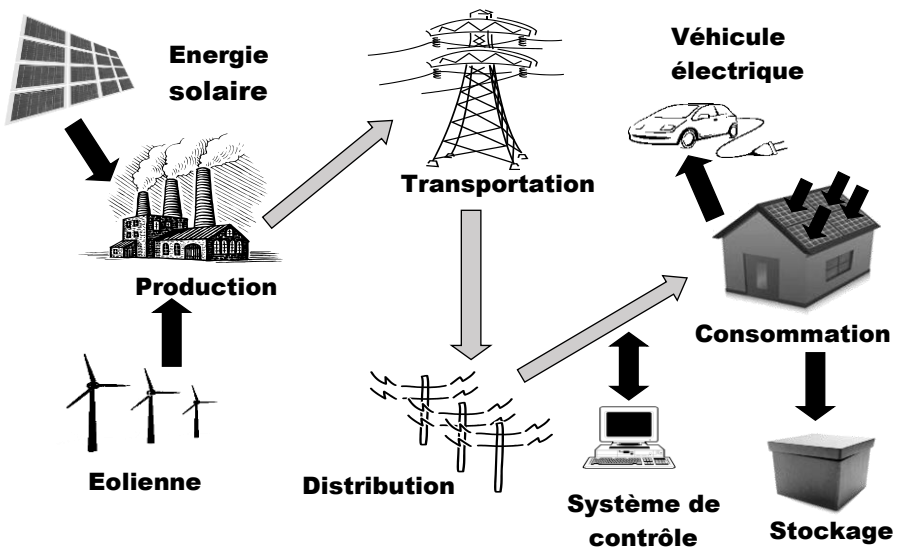


Figure 1-7 : Schéma général d'un *smart grid* de la production à la consommation

Toutes ces idées et les autres définitions disponibles suivent un thème commun : le *smart grid* utilise les technologies de l'information et de la communication (TIC) pour optimiser le transport et la distribution de l'électricité entre les fournisseurs et les consommateurs et aussi la production en permettant chaque consommateur de devenir un producteur (Figure 1-7). En d'autres termes, le *smart grid* est un réseau d'énergie géré par des connexions Internet et CAO & YANG (2013) ont même utilisé l'expression de « Internet de l'énergie » pour le décrire. Ces

TIC doivent correspondre à divers profils de production des consommateurs. Les profils varient de temps en temps et changent en fonction des conditions météorologiques. Cette variation est associée aux capacités de production renouvelable notamment l'éolienne et la photovoltaïque. Par conséquent, le *smart grid* est équipé d'une distribution à variation continue en termes de direction et de flux d'énergie, contrairement au réseau unidirectionnel classique. On peut donc comparer le réseau électrique unidirectionnel classique à une « machine » et le *smart grid* à un « organisme ».

1.2 Nécessité de moderniser le réseau électrique

Au cours des deux derniers siècles, l'électricité est devenue un élément essentiel de la vie quotidienne. Sans l'électricité, le travail, les transports, les loisirs, les soins de santé, l'économie, l'industrie et, plus généralement, la vie et les moyens de subsistance seraient interrompus. Même une coupure temporaire (ou d'autres causes de pannes de courant) peut avoir plusieurs conséquences irréparables et, dans des cas tels que les hôpitaux équipés de systèmes de survie électriques et les zones de contrôle de la circulation des transports comme les aéroports et les gares ferroviaires équipés de technologies de coordination électrique, elle peut avoir des effets catastrophiques. Elle peut également entraîner la perte de données dans les centres de données, les instituts de recherche et les universités.

Tout problème dans le réseau électrique actuel risque de se propager à d'autres secteurs énergétiques et de les perturber. Par exemple, l'électricité est nécessaire pour transférer le pétrole et le gaz naturel par des pipelines, dans les stations-service pour la distribution d'essence et dans les bâtiments résidentiels pour les systèmes de production d'eau chaude et les fours électriques. Même à l'échelle individuelle dans le secteur résidentiel, une panne de courant peut entraîner une défaillance du système de chauffage/refroidissement électrique, de l'eau chaude, de la table de cuisson électrique, de l'éclairage, des télécommunications et de tous les autres appareils électriques domestiques. Par conséquent, il est nécessaire de disposer d'un approvisionnement continu et suffisant en électricité pour assurer le confort attendu.

Toutefois, le réseau électrique actuel n'est pas en mesure de répondre aux exigences de notre marché de l'électricité moderne. D'une part, la demande croissante d'une société pour la technologie et l'information et, d'autre part, la nécessité d'utiliser la production d'énergie renouvelable et la micro-production pour contrebalancer la hausse de la consommation électrique obligent le réseau à être mieux adapté à ces nouveaux besoins. En outre, le réseau

exige d'être entretenu constamment, réparé, amélioré, développé et étendu. De plus, les centrales électriques actuelles et les autres éléments physiques du réseau sont vulnérables face à plusieurs menaces, en termes de sécurité [SIOSHANSI, 2012]. Par conséquent, il est crucial d'identifier ses points faibles et ses problèmes ainsi que les raisons pour lesquelles ces problèmes surviennent afin de pouvoir trouver des solutions appropriées et efficaces.

Problèmes et menaces du réseau électrique actuel :

Dans le réseau actuel, plusieurs points de défaillance se produisent. Cependant, la probabilité d'apparition de l'un de ces problèmes n'entre pas dans le cadre de cette recherche. Ces problèmes sont décrits comme suit :

1. Les pannes de courant *(blackout)* : c'est la situation dans laquelle le courant est complètement coupé et il n'y a aucune possibilité d'utiliser l'électricité. Dans les cas les plus graves, les coupures de courant ont d'énormes conséquences sur la vie des personnes et aussi des dommages économiques. La durée des coupures de courant en France était 134,7 minutes en moyenne par habitant en 2017 (selon les données d'Enedis publiées dans un rapport par le SIEIL en 2019). Ce chiffre peut être décomposé de façon suivante : les incidents haute tension (100 minutes), les incidents basse tension (14 minutes), les travaux haute tension (11 minutes), les travaux basse tension (5 minutes), l'amont de la concession (4 minutes) et les incidents exceptionnels (0,7 minutes). En raison de la fréquence des phénomènes météorologiques, ils ne sont pas considérés comme incidents exceptionnels. À l'exception des coupures planifiées pour des raisons de maintenance ou de modernisation du réseau, plusieurs raisons non souhaitées peuvent être à l'origine de ce problème :

- Les animaux : selon le type d'espèces que l'on trouve autour du réseau électrique, divers types d'animaux peuvent interrompre l'alimentation électrique. Par exemple, les écureuils, les ratons laveurs ou les chats peuvent entrer en contact avec les lignes électriques, s'électrocuter et provoquer une perte de courant. Les oiseaux peuvent également se percher sur les fils et provoquer des interruptions ou peuvent toucher deux lignes électriques, prendre feu et causer des dégâts plus importants à la centrale électrique. Le recouvrement des poteaux à haut risque, la protection des équipements par des

clôtures, des fileuses de lignes, des garde-animaux et des couvertures pour oiseaux sont quelques solutions à ce problème.

- Les plantes : les branches d'arbres qui poussent peuvent perturber les lignes électriques, en particulier dans les zones rurales, et provoquer une panne de courant. Dans les zones urbaines, les arbres peuvent également tomber sur les lignes électriques en raison de risques naturels tels que les tremblements de terre ou de mauvaises conditions météorologiques telles que de fortes tempêtes. Comme solution, les autorités peuvent identifier les zones à faible performance électrique à cause des plantes et établir des programmes d'élagage pour couper régulièrement les grands arbres et libérer le réseau électrique de toute végétation perturbatrice. Cette mesure permet également d'éviter que certains animaux comme les écureuils grimpent aux arbres et aient un accès plus facile aux sous-stations et aux équipements électriques.

- Les humains : les accidents avec des équipements électriques, les actes de vandalisme ou de terrorisme, les erreurs lors de la construction d'autres infrastructures et le contact de tout objet avec les lignes électriques peuvent provoquer des coupures de courant.

- Les Conditions météorologiques : diverses conditions météorologiques telles que la foudre, les fortes pluies, les fortes chutes de neige ou les vents violents peuvent provoquer des coupures de courant. Même une pluie légère peut parfois transformer la saleté sur la ligne électrique en boue qui, à son tour, crée un circuit et entraîne une panne de courant. Les vagues de chaleur ou les températures froides excessives peuvent également contribuer à une énorme demande d'électricité entraînant un délestage du réseau.

- Les risques ou les phénomènes naturels : les conditions météorologiques peuvent détruire le réseau électrique. Les éruptions solaires et les orages géomagnétiques peuvent également avoir un effet destructeur sur le réseau.

- La panne d'équipement : les défaillances des interrupteurs, des transformateurs, des conducteurs ou d'autres équipements du réseau électrique dues à des défauts mécaniques, à la dégradation, etc. peuvent provoquer des pannes de

courant. En cas de défaillance d'un équipement souterrain, le diagnostic et la réparation sont encore plus compliqués et entraînent une panne plus longue.

- Une Surcharge de la demande : lorsque la demande d'électricité est supérieure à l'offre, le fournisseur est obligé de réduire la consommation en mettant en œuvre des coupures forcées sur le réseau surchargé.

2. Les problèmes liés à la tension :

- La panne de courant : il s'agit d'une situation dans laquelle la tension électrique chute mais l'alimentation n'est pas totalement coupée. Elle peut donc endommager les équipements électriques résidentiels ou les générateurs industriels en les surchauffant. Dans cette situation, la tension diminue et les lumières deviennent donc plus faibles. Cela peut être dû à une surcharge du réseau ou simplement à une perturbation du *grid*.

- L'affaissement de la tension : c'est une chute rapide de tension due à un court-circuit, une surcharge, etc. et qui est plus courte qu'une panne de courant [BOLLEN, 1999].

- Le creux de tension : contrairement à la chute de tension, il s'agit d'une condition dans laquelle la tension est augmentée momentanément en raison de l'arrêt d'une lourde charge dans le réseau électrique [KAZIBWE & SENDAULA, 1993].

- L'instabilité de la tension et la pénurie de puissance réactive : cela se produit lorsqu'une perturbation, une augmentation de la demande de charge ou un changement dans l'état du système provoque une baisse progressive et incontrôlable de la tension. L'instabilité du système électrique pour répondre à la demande de puissance réactive est la principale cause de ce problème et peut provoquer une panne totale ou partielle [SAUER, 2006].

3. La surtension : cela se produit lorsque l'électricité recommence rapidement à circuler après une interruption. La foudre peut également créer cette condition. Les surtensions peuvent endommager les appareils résidentiels et les équipements industriels, par exemple en le surchauffant, en dégradant son circuit interne qui peut

entraîner sa défaillance complète. Des parafoudres et des disjoncteurs doivent être installés pour protéger l'équipement électrique.

4. L’arbre électrique : il s'agit d'un processus d'endommagement en forme d'arbre qui se produit sur les installations à haute tension en raison des impuretés ou des défauts mécaniques de leurs équipements et qui provoque la décharge partielle des câbles électriques, des transformateurs ou de toute autre installation à haute tension. Il doit être détecté rapidement, avant la dégradation totale de l'équipement. Par conséquent, un entretien régulier des équipements peut être une solution pour prévenir ce genre de problèmes.

5. Le court-circuit : si un courant électrique passe par un chemin involontaire, il se produit un court-circuit qui peut provoquer un dommage, voire un incendie ou une explosion. La présence accidentelle d'un matériau conducteur externe (tel que l'eau) ou le fonctionnement forcé de moteurs électriques alors que leurs pièces mobiles sont bloquées peut également entraîner ce problème. Les courts-circuits peuvent être suffisamment importants pour provoquer des pannes de courant.

En plus des problèmes et des menaces qui pèsent sur le réseau électrique actuel, on peut évoquer certaines lacunes :

a) La sécurité : les éléments physiques du réseau est mise en danger par le vandalisme, le terrorisme, les mauvaises conditions météorologiques, les risques naturels, les accidents ou même le vieillissement et la dégradation mentionnés précédemment dans les problèmes du réseau.

b) La possibilité de stockage : l'électricité doit être consommée en même temps qu'elle est produite en raison de la complexité de la stocker notamment en grande quantité [ERDMANN, 2015]. Par conséquent, il faut produire suffisamment d'électricité pour répondre à la demande variable des consommateurs à chaque moment et pour éviter l'instabilité de l'approvisionnement en électricité. Les possibilités de stockage peuvent contribuer à optimiser la consommation en réduisant le déséquilibre entre l'offre et la demande.

c) La capacité d'intégration de la production d'énergie renouvelable intermittente (PV et éolien) : la part des ressources énergétiques non renouvelables dans la production totale

diminue en raison de leurs inconvénients pour l'environnement et de leur rareté. Toutefois, le réseau actuel nécessite des mesures spécifiques et une réflexion nouvelle afin de pouvoir intégrer une plus grande part de ressources énergétiques renouvelables.

d) La possibilité de production décentralisée : les centrales électriques sont souvent situées loin des zones résidentielles ou d'autres endroits où l'électricité est consommée. Cela entraîne des pertes d'électricité lors du transport et de la distribution ainsi que des problèmes d'encombrement le long de ces lignes. Le fait d'avoir plusieurs points de production plutôt qu'une seule centrale permet de réduire les pertes et les inefficacités.

Structure et fonctionnement du marché de l'électricité en France :

Pour mieux comprendre les raisons des problèmes probables et la nécessité de moderniser le système, il est important de passer en revue la structure et le fonctionnement du marché de l'électricité actuel mentionnés par le Ministère de la Transition Ecologique (MTE) (Figure 1-8).

Réf : MTES (2017)

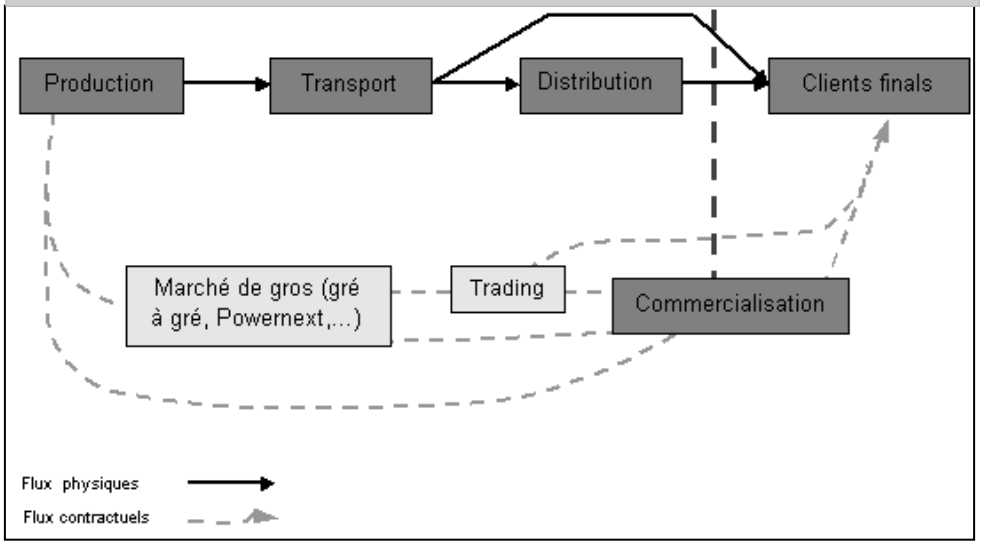


Figure 1-8 : Structure du marché de l'électricité en France

Le marché de l'électricité en France se compose de quatre domaines principaux : la production, le transport, la distribution et la commercialisation ; chaque partie est responsable d'une activité pour fournir l'électricité au consommateur final. En plus de ces quatre domaines, des activités financières et des marchés de gré à gré sont effectués sur le marché boursier de l'électricité (par exemple, l'électricité peut être négociée par les membres de la plateforme *European Energy Exchange - EEX*).

L'industrie de production en France comprend aujourd'hui plusieurs acteurs dont trois principaux : Electricité de France (EDF) (avec une capacité de 139 GW), ENGIE (ex-GDF-Suez) (avec une capacité de 102 GW) et Gazel Energie (ex-Uniper France) (avec une capacité de 690 MW). L'électricité est transportée par des lignes de transmission jusqu'àux zones de distribution. RTE (Réseau de Transport d'Electricité) est le gestionnaire de réseau public en charge des infrastructures de transport (gestion, construction, maintenance, etc.). Le processus de distribution consiste à distribuer l'électricité aux consommateurs finaux par l'intermédiaire des lignes du réseau de transport. Certaines grandes industries et des fournisseurs sont directement approvisionnées par le réseau. Cette opération est établie sans négociation. Les gestionnaires de réseaux de distribution sont également chargés de relever les compteurs électriques. EDF et les entreprises locales de distribution sont les acteurs en charge de la distribution, sous le contrôle des collectivités locales organisant la distribution publique d'électricité.

Les opérations de transport et de distribution sont toutes deux réglementées par la CRE qui est chargée de garantir un comportement transparent et non discriminatoire de ces gestionnaires de réseau et de contrôler les tarifs pour des consommateurs et les investissements.

Enfin, la commercialisation est l'activité de vente d'électricité aux consommateurs finaux, qui se situe à l'interface entre les distributeurs et les utilisateurs finaux (consommateurs). Dans ce processus, l'électricité est produite [si le négociant dispose lui-même des moyens de production, comme c'est le cas d'Endesa France, de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) et d'ENEDIS] et/ou achetée en gros afin de satisfaire toute la demande d'électricité requise.

Aujourd'hui, les différents acteurs du marché de l'électricité peuvent échanger des « unités » (blocs) d'électricité dans le cadre d'une transaction hors cote (*Over-the-counter - OTC*) ou sur le marché boursier. Ce dernier assure l'anonymat et la transparence des échanges. Les plateformes d'échange sont utilisées par les négociants, les « *traders* » et les utilisateurs finaux. En 2006, sur environ 420 TWh échangés sur le marché de gros, environ 115 TWh provenaient du marché Powernext et 300 à 305 TWh du marché de gré à gré. Ces échanges sont totalement contractuels, ne correspondent à aucun mouvement physique d'électricité et participent à la distribution entre les différents acteurs du secteur de la production [CRE, 2018].

L'activité de production d'électricité est une activité concurrentielle menée dans le cadre d'un système d'autorisations délivrées par le ministre responsable de l'énergie (MTE). La possibilité d'organiser un appel d'offres dans le cadre défini par la programmation pluriannuelle des investissements de production électrique est également disponible. Cette organisation assure la sécurité d'approvisionnement et soutient le développement des énergies renouvelables et des générations distribuées.

L'activité de négoce d'électricité est menée dans le cadre d'un système de *reporting*. L'activité de transport d'électricité est assurée par le RTE, une entreprise juridiquement distincte des entreprises exerçant des activités concurrentielles dans le secteur de l'électricité, telles que la production ou la vente. Cette séparation juridique est assortie de plusieurs actes visant à garantir l'indépendance de gestion de cette entreprise.

En ce qui concerne l'activité de distribution d'électricité, les obligations de séparation juridique (loi du 7 décembre 2006 modifiant la loi du 9 août 2004) et de séparation managériale (loi du 9 août 2004) s'imposent aux plus grands distributeurs d'électricité situés au sein d'entreprises intégrées, c'est-à-dire ceux qui desservent plus de 100 000 consommateurs : EDF et quatre distributeurs non nationalisés (Centrale de Metz-UEM, Sorégies, Pouvoirs publics des Deux Sèvres et Electricité de Strasbourg). Ouvert à tous les clients professionnels depuis le 1er juillet 2004, le marché de l'électricité a été totalement ouvert à la concurrence le 1er juillet 2007. En outre, la France met en place un système réglementé d'accès aux réseaux dont les tarifs d'utilisation sont établis sur proposition d'une autorité de régulation indépendante et spécialisée - la CRE - dans le but d'assurer la transparence et l'efficacité.

Analyse des causes profondes des problèmes liés au réseau électrique et les solutions possibles :

Selon l'article publié par la Chambre de Commerce et d'Industrie (CCI) de Paris (2014), depuis 2004 (loi 2004-803 du 9 août 2004), les activités de transport (exercées en monopole par les opérateurs) et les activités de production et de fourniture (exercées par plusieurs opérateurs) sont légalement séparées en France. En effet, une multiplicité d'acteurs intervient dans le monde de l'énergie (Tableau 1-1) : l'électricité, après avoir été produite ou importée, sera transportée puis distribuée avant d'être commercialisée. Les activités de production et de commercialisation sont dérégulées depuis 2007, c'est-à-dire ouvertes à la concurrence. En

outre, il existe d'autres entités qui surveillent le fonctionnement du système et sont chargées de son entretien et de son développement futur. Si l'on examine la structure et le fonctionnement du marché de l'électricité et les actes associés, les problèmes probables sont liés à la structure de marché. Etant centralisé, il s'est transformé en un monopole réglementé et ces dernières années, il va vers une industrie déréglementée suivant un modèle de marché libre et concurrentiel en réponse à un nouveau contexte économique et énergétique [BENHASSINE, 2009].

Tableau 1-1 : Quelques acteurs du marché français de l'électricité

Réf : Fournisseur-energie.com	
Production	EDF / ENGIE (CNR, SHEM) / E.ON
Transport	RTE
Distribution	ENEDIS / ELD
Commercialisation	EDF / Electrabel / Direct energie / ENGIE / Alterna / Enercoop / GEG / ES / UEM / Enalp / Energem / Lampiris / Lucia / Planète oui / ELD / Sélia / Proxelia

Le réseau actuel, avec une division en plusieurs entités dérégulées au niveau de la production et de la commercialisation, a peut-être accru la compétitivité, mais il a également causé certaines difficultés dans l'exploitation du réseau et rendu la modernisation du réseau plus compliquée. Ces problèmes et ces complications sont les suivants :

1. Complication financière : les modèles de financement et les règlements existants rendent très difficile le financement d'une modernisation du réseau [TVERBERG, 2008]. Souvent, les entités de gestion déréglementées ne sont pas les propriétaires du réseau et elles n'ont pas la responsabilité financière de la totalité des entités. Elles sont donc moins incitées à le moderniser et, en fait, il est plus rentable de le changer à la fin de sa durée de vie. Comme les factures d'électricité des consommateurs sont également réglementées, il est compliqué de financer la modernisation du réseau en ajoutant des coûts supplémentaires à leurs factures.

2. Faible capacité de production d'électricité : les lignes entre les stations sont principalement conçues avec une capacité spécifique et il est possible qu'elles ne puissent pas supporter une utilisation plus importante après de futures extensions.

3. Détérioration plus rapide : le fait que les centrales électriques se mettent en marche et s'arrêtent plus fréquemment pour injecter de la production renouvelable en raison de la déréglementation peut entraîner une dégradation plus rapide des équipements.

4. Faible capacité du réseau : l'intégration de l'énergie éolienne et solaire renouvelable sans plan préalable peut poser des problèmes. D'une part, les lignes du réseau n'ont pas nécessairement une capacité suffisante pour les accueillir. D'autre part, il y a la question de l'emplacement des nouvelles centrales électriques. Bien qu'elles soient plus petites, il est préférable de les placer plus loin des communautés locales, ce qui rend la modernisation du réseau actuel plus compliquée et les lignes électriques plus encombrées.

5. De longues distances : avec ce modèle de financement, l'électricité est transportée sur de longues distances, car l'électricité est achetée et vendue par différents fournisseurs. D'après RUIZ-ROMERO et al. [2013], plus de 60 % de l'énergie primaire dans le monde est transformée par la dissipation de chaleur pendant la production, la transmission et la distribution jusqu'à sa transformation en énergie finale et avant de parvenir aux consommateurs finaux. Cette perte pourrait être expliquée en partie en raison de cette longue distance et peut être réduite en utilisant une production décentralisée plus proche des utilisateurs. Selon la Banque Mondiale (2014), la perte d'électricité lors de la transmission et de la distribution en France est 6% de l'électricité produite.

6. Manque de planification : pour une infrastructure complexe, telle que le réseau électrique, avec de nombreux acteurs et la difficulté d'attribuer les coûts à chacun d'eux, avoir un plan global est vital.

Ces défis ont conduit à développer des solutions telles que le *smart grid* et les micro-générations. Par conséquent, des améliorations dans tous les domaines du réseau électrique ainsi qu'un changement de comportement des utilisateurs d'électricité sont nécessaires pour développer le *smart grid*. Outre les problèmes susmentionnés dus à la complexité organisationnelle du réseau actuel, il existe d'autres problèmes techniques liés à la consommation qui mettent en évidence la nécessité d'une mise à niveau. L'analyse de ces sujets aide à comprendre et à répondre à la première question de recherche. Même si elles sont moins étudiées, c'est là que se trouvent les possibilités d'optimisation. Pour résoudre ces problèmes, non seulement l'intervention des services publics est nécessaire, mais la participation du public joue également un rôle important.

1.2.1 Pointe de consommation électrique

Pour comprendre la demande de pointe, nous pouvons étudier le processus de facturation de l'électricité. Les services publics calculent généralement la consommation d'électricité selon deux méthodes :

1) Sur la base de la consommation réelle totale au cours de la période de facturation donnée par relevé de compteur, estimations antérieures ou profils moyens similaires et parfois avec des tarifs qui dépendent des heures de pointe ou des heures creuses ;

2) Directement sur la base de la demande qui est la capacité la plus élevée requise dans un intervalle de 15 minutes généralement enregistré par les compteurs au cours de la période donnée même si elle n'est pas utilisée tout le temps. Cette demande appelée demande de pointe est souvent facturée sous la forme d'un tarif fixe mesuré par kW (kilowatt). La demande peut être indirectement considérée comme la puissance maximale par kVA (kilovolt-ampère). Cette puissance est la capacité maximale en cas de mise en marche simultanée de tous les appareils électriques. Plus le kVA est élevé, plus la demande d'électricité est élevée et plus la facture d'électricité est élevée.

La principale raison pour laquelle la demande d'électricité joue un rôle si important pour les services publics est que l'électricité ne peut pas être stockée en grandes quantités. Par conséquent, afin de ne pas être confronté à des pannes d'électricité ou à d'autres problèmes causés par une demande excessive, les services publics ont des obligations en termes de capacité de production et de demande maximale. Toutefois, cela n'est pas exclusif des services publics d'électricité. Dans d'autres conceptions d'infrastructures urbaines, telles que le système de transport pour la conception d'une autoroute ou d'un pont, le nombre maximum de voitures aux heures de pointe qui peuvent passer sur l'autoroute ou sur le pont est pris en considération. Dans ces infrastructures, des solutions telles que la création de barrières de péage ou la construction de nouvelles routes autour de l'autoroute sont utilisées pour répondre à cette demande et la minimiser. Alors que les services publics d'électricité, contrairement aux autres services publics, doivent produire suffisamment d'électricité pour satisfaire la demande des consommateurs à tout moment. En d'autres termes, l'offre doit toujours être adaptée la demande, ce qui signifie que la production d'électricité doit être basée sur la demande de pointe.

La demande de pointe d'électricité pose des problèmes aux services publics en termes de surproduction et de gaspillage d'énergie ; et aux consommateurs en termes de surfacturation des factures d'électricité pour une demande de courte durée qui ne correspond pas à leur consommation habituelle. Bien évidemment, son impact sur l'environnement est indéniable notamment en ce qui concerne l'émission des gaz à effet de serre et d'autres polluants atmosphériques.

À l'échelle individuelle, chaque ménage, au-delà de sa consommation annuelle, a une demande qui varie de temps à autre mais qui suit en même temps des variations cycliques. En d'autres termes, la demande est différente à chaque heure (par exemple, heure de pointe ou heure creuse), jour (par exemple, jours de la semaine ou week-end, jours ouvrables ou jours fériés) ou saison (par exemple, saisons chaudes qui nécessitent la climatisation et certains appareils électriques spéciaux ou saisons froides qui nécessitent des équipements de chauffage et certains autres appareils). À une échelle plus grande, telle que l'échelle nationale, des profils de ménages similaires créent un modèle de demande assez raisonnablement prévisible qui permet aux services publics de simuler leurs besoins nationaux de production d'électricité à chaque seconde, en tenant également compte des circonstances imprévues telles que les risques naturels ou les pannes accidentelles.

La courbe de la consommation totale quotidienne d'électricité indique la demande minimale et maximale des consommateurs et reflète leurs habitudes, leur mode de vie, leur situation économique, les conditions météorologiques et de nombreux autres facteurs. À titre d'exemple, selon les données fournies par RTE, en considérant 24 heures en hiver 2015 (le 3 février 2015) en France dans tous les secteurs, cinq moments de pointe et de creux maximum sont observés approximativement (Figure 1-9) :

- Creux du matin vers 4h30 : il s'agit de la consommation minimale de la journée ;
- Pointe du matin vers 8h00 : tout le monde se réveille, allume les lumières et les appareils électriques liés au petit déjeuner, se prépare et prend le moyen de transport pour aller au travail. Jusqu'à 9h30, la consommation augmente, puis se stabilise pendant la pause déjeuner ;
- Creux de l'après-midi vers 16h30 : après la pause de midi, la consommation diminue progressivement ;

- Pointe du soir vers 19h00 : la consommation atteint son point culminant (88207 MW pour ce jour précis) en raison du transport du travail à la maison, de l'éclairage public et résidentiel, des appareils électriques de cuisson, de la télévision, etc. qui créent une demande énorme ;
- Creux nocturne vers 22h00 : après le dîner, la consommation diminue progressivement et augmente à nouveau en raison des quarts de nuit ou des travaux divers effectués pendant la nuit (travailler, étudier, regarder la télévision, etc.) et plus tard, lorsque les gens dorment, elle devient plus faible et plus stable.

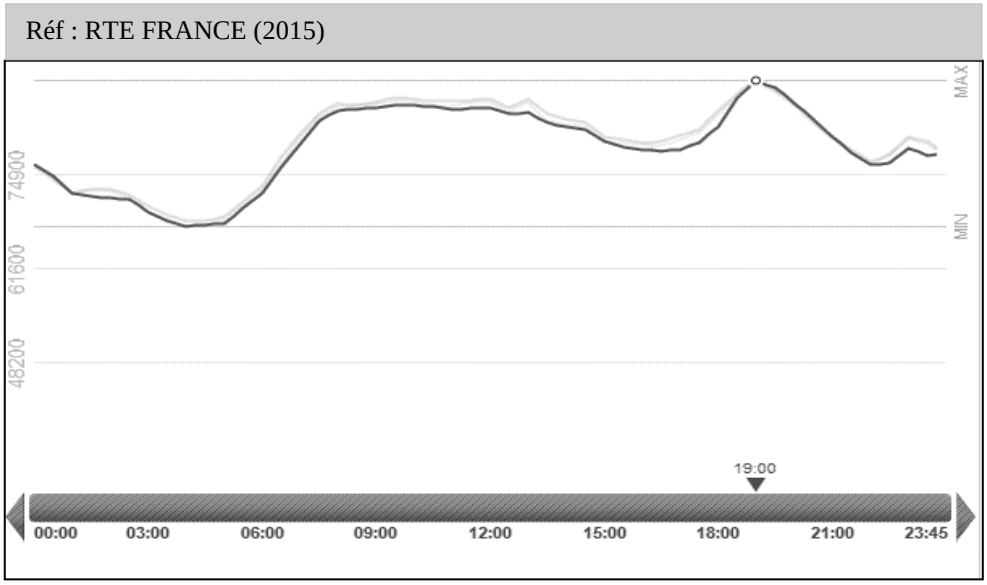


Figure 1-9 : Exemple de demande électrique en pointe et en creux d'une journée d'hiver en France

Une analyse sur 24 heures en été 2015 (le 7 août 2015) en France, dans tous les secteurs, montre quatre moments, peu précis, de pointe et de creux maximum (Figure 1-10) :

- Creux du matin vers 4h30 : c'est la consommation minimale de la journée ;
- Pointe de l'après-midi vers 13h00 : à partir de 4h30, la consommation augmente jusqu'à l'heure du déjeuner, puis elle diminue avec une légère augmentation à l'heure du dîner vers 19h30 et poursuit la réduction. Le pic de 13h00 est donc le plus important de la journée ;
- Creux du soir vers 21h00 : après le dîner, la consommation diminue progressivement jusqu'à 21h00. Le fait de passer plus de temps à l'extérieur en été et l'augmentation de la lumière du jour (due au solstice d'été) et l'arrêt des systèmes de refroidissement en sortant du logement, la consommation d'aliments froids, etc. peuvent être responsables de cette heure creuse ;

- Pointe nocturne vers 23h00 : le dernier pic se situe à 23 heures. Pendant la nuit, certaines activités peuvent créer de petits pics jusqu'à 4h30 du matin.

Réf : RTE FRANCE (2015)

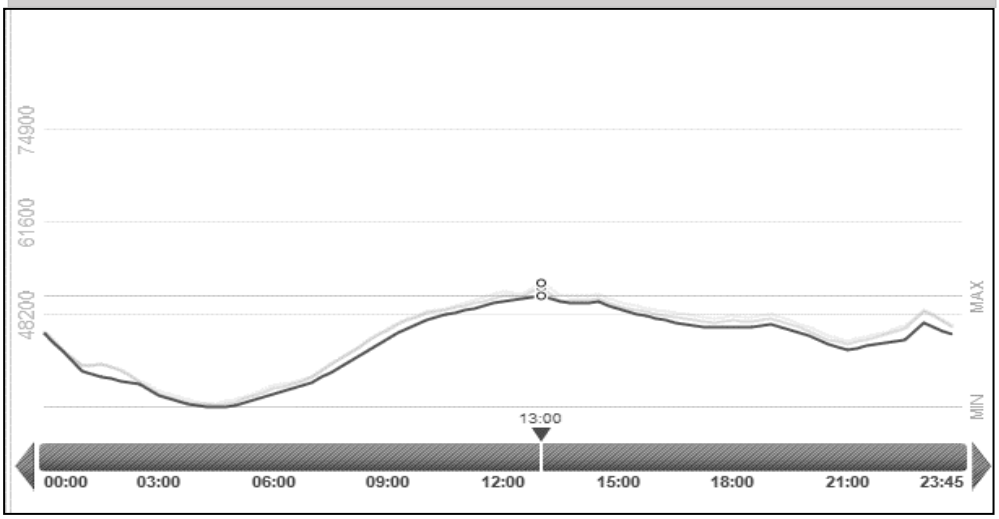


Figure 1-10 : Exemple de demande électrique en pointe et en creux d'une journée d'été en France

Pour lisser la courbe de demande électrique, plusieurs mesures peuvent être prises par les particuliers (dans une approche *top-down*) et par les responsables des services publics (dans une approche *bottom-up*). Ces mesures sont examinées dans le chapitre suivant. En outre, certaines analyses devraient avoir lieu afin d'évaluer comment le *smart grid* peut réduire la demande de pointe et déplacer la charge de pointe vers les périodes creuses et enfin contribuer à la réduction totale de la consommation d'électricité qui sera étudiée, validée par une étude de cas et présentée au chapitre 4. Ces analyses visent à quantifier la manière dont les changements dans les habitudes de consommation d'électricité et les méthodes de gestion des services publics contribuent à la réduction de la consommation d'électricité.

1.2.2 Consommation inactive de l'électricité

Plusieurs appareils électriques éteints ou non utilisés continuent de consommer de l'électricité s'ils ne sont pas débranchés. L'utilisation d'un wattmètre à la borne de ces appareils permet de déterminer une quantité non nulle pour leur consommation. Cette consommation en veille, en sommeil, en mode arrêt ou supplémentaire [que nous appelons consommation inactive dans cette recherche], est produite dans différentes conditions et avec la présence des éléments suivants :

- Télécommandes : certains appareils sont en mode « veille » pour répondre à un signal à distance. Tous les appareils électriques munis de télécommandes, tels que les téléviseurs, consomment lorsqu'ils sont éteints mais branchés.

- Les écrans : tous les types d'affichage, y compris les écrans *LED* (*Light-Emitting Diode)* numériques, les claviers souples, les minuteries, les alarmes et les horloges, comme par exemple celui d'un micro-onde ou d'un lave-linge, qui fournissent des informations numériques, consomment lorsqu'ils sont allumés.

- Les boîtiers muraux (adaptateurs) : une alimentation électrique située à l'extérieur de l'appareil est non seulement moins efficace en termes de consommation d'énergie, mais elle continue à consommer lorsqu'elle est branchée et que l'appareil lui-même est éteint. Certains répondeurs, ordinateurs portables, chargeurs, brosses à dents électriques, téléphones sans fil, etc. disposent d'une alimentation externe pour transformer les tensions relativement élevées en basses tensions. Dans les appareils minuscules, il est plus facile de placer le transformateur à l'extérieur de l'appareil, mais dans les appareils plus encombrants, le fabricant choisit cette alimentation pour réduire la difficulté de production, la taille, le poids, les problèmes de sécurité, la chaleur produite, le bruit, les complications réglementaires et les problèmes de normalisation internationale. Plus important encore pour les fabricants, l'utilisation de boîtier mural leur évite des dépenses pour des tests de sécurité, car ils ne sont obligatoires que pour les alimentations électriques et non pour les appareils à basse tension en Courant Continu (CC) qui y sont connectés [CALWELL & REEDER, 2002]. En intégrant les adaptateurs à l'intérieur de l'appareil, lorsque le circuit secondaire est coupé, le primaire continue de consommer jusqu'à ce qu'il soit déconnecté du point d'alimentation. Les adaptateurs contribuent donc à augmenter la consommation d'électricité sans offrir de fonctions spéciales aux utilisateurs, contrairement aux écrans ou aux télécommandes.

- Les systèmes embarqués : tous les appareils ayant une demande de puissance de calcul sont équipés d'un système électronique embarqué. Le système passe la plupart du temps en mode de veille réseau à faible consommation et se réveille en réponse à un événement extérieur [ECKERMANN & HUFF, 2013]. Dans ce système, les circuits électroniques restent "allumés" afin de répondre aux commandes numériques comme dans les lecteurs mp3, les téléphones portables, les consoles de jeux vidéo, les

appareils photo numériques, les lecteurs DVD, les décodeurs, les récepteurs GPS, les imprimantes, les fours à micro-ondes, les plaques de cuisson, les machines à laver, les lave-vaisselle, etc.

- Équipement en ligne : certains appareils sont connectés entre eux via Internet afin de fonctionner, comme les imprimantes en état de marche connectées à des ordinateurs.

- Mode veille : certains appareils tels que les ordinateurs ont un mode veille qui les éteint mais pas complètement, de sorte qu'il évite à l'utilisateur de les redémarrer ou de les relancer et qu'il puisse les réutiliser sans grand délai. L'ordinateur peut également être réglé pour passer en mode veille après un certain temps d'inutilisation ou à la fin d'une opération afin d'économiser l'énergie. Cette fonction de mise en marche instantanée peut exister également dans d'autres appareils tels que les climatiseurs.

En général, dans cette « consommation inactive », deux types d'appareils sont pris en considération :

1) Ceux qui fonctionnent à faible consommation d'énergie et qui offrent des informations numériques et/ou attendent une commande pour fonctionner sans délai (mode veille) ;
2) Ceux qui ne fonctionnent pas du tout mais qui consomment parce qu'ils sont branchés (mode arrêt).

Aujourd'hui, pour plusieurs raisons cette consommation existe, y compris des raisons opérationnelles (par exemple, les télécommandes qui facilitent l'utilisation). Mais à l'origine, cette consommation a été créée par les industries pour réduire les coûts de production ou diminuer la consommation de l'appareil en mode de fonctionnement. Cependant, la puissance inactive de nombreux nouveaux appareils est inférieure à 1 watt, mais avec le nombre croissant d'appareils connectés et l'augmentation du niveau de confort avec le mode de vie des ménages, la part globale de cette consommation sur la consommation totale d'électricité nationale et mondiale n'est pas négligeable. C'est pourquoi la Commission Européenne a établi des exigences d'éco-conception pour la consommation électrique en mode veille et en mode arrêt des équipements électriques et électroniques des ménages et des bureaux (règlement (UE) n° 801/2013 du 22 août 2013 modifiant le règlement (CE) n° 1275/2008 et le règlement (CE) n° 642/2009.

Une consommation plus importante d'électricité est proportionnelle à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre à plus grande échelle. Ça signifie aussi une plus grande dissipation de chaleur à l'échelle d'un appareil et donc un besoin de refroidissement plus important en saison chaude et par conséquent plus de consommation.

En outre, à l'échelle individuelle, c'est un élément supplémentaire sur les factures d'électricité qui n'est pas négligeable. Selon SIDLER (2012), la puissance inactive en moyenne est d'environ 60 W par logement.

Certains appareils tels que la vidéosurveillance, les alarmes de sécurité, les détecteurs d'incendie, certains téléphones et télécopieurs, les sonnettes de porte électriques et les détecteurs/capteurs de mouvement ou de lumière doivent être connectés en permanence à l'électricité afin de fonctionner quand nécessaire. Au contraire, l'existence d'une consommation inactive n'est pas essentielle dans d'autres appareils et il est possible de simplement débrancher l'appareil de la source d'électricité pour éliminer cette consommation. Plusieurs autres actions peuvent être exécutées par les consommateurs, les services publics, les fabricants et les producteurs de technologie pour diminuer la consommation inactive. Ce point sera examiné plus en détail dans les prochains chapitres.

1.3 Avantages et bénéficiaires du développement du *smart grid*

Afin d'identifier les avantages de la mise à niveau du réseau actuel vers un *smart grid*, nous définissons les caractéristiques du *smart grid*. Les caractéristiques énumérées ci-dessous sont tirées des concepts et des feuilles de route de MILLER (2009) et DoE (2009) :

- L'évaluation dynamique (en temps réel) et la participation active des consommateurs : dans la conception de réseaux intelligents, les consommateurs deviennent partie intégrante du système et ont la possibilité de participer à son fonctionnement. L'évolution des nouvelles technologies, les prix en temps réel, la visibilité des informations et les mesures d'incitation et de dissuasion en matière de prix permettent de prendre des décisions plus intelligentes et, par conséquent, de modifier les comportements en matière de consommation électrique. Une plateforme d'échange d'électricité et un modèle de marché libre permettent aux consommateurs d'acheter et de vendre au réseau et contribuent à l'optimisation de l'ensemble du système.

- La capacité de stockage de l'énergie : les ressources énergétiques renouvelables présentent de nombreux avantages par rapport aux combustibles fossiles d'un point de vue économique et environnemental. Cependant, en termes de disponibilité, les Ressources Energétiques Distribuées (RED), y compris les ressources renouvelables, (telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire, elles sont pour la plupart des alternatives, dépendantes des conditions météorologiques et qui échappent au contrôle direct des services publics. Le *smart grid* utilisant la technologie de stockage des batteries apporte une solution à ce problème. Ainsi, l'électricité peut être stockée par un stockage physique de l'énergie (pompage, air comprimé ou volant d'inertie), par une batterie chimique (plomb-acide, lithium-ion, flux, sel fondu ou nickel-hydrogène) ou par d'autres technologies telles que les condensateurs électrochimiques, le stockage d'énergie magnétique supraconducteur, les piles à combustible et les batteries métal-air [LI et al., 2015] est donc utilisée en l'absence de ces ressources. Cela permet une meilleure intégration de ces ressources.

- La capacité de production décentralisée : dans le réseau actuel, l'électricité est produite dans de grandes centrales électriques. Alors que le *smart grid* a la capacité de bénéficier d'un large éventail de ressources (par exemple, l'énergie éolienne et solaire), la micro-génération et la production à l'échelle individuelle par des producteurs d'électricité indépendants tels que les panneaux photovoltaïques domestiques. Le *smart grid* permet également de recycler la chaleur résiduelle grâce à la production combinée de froid, de chaleur et d'électricité (la cogénération). L'avantage de la production décentralisée est qu'elle réduit les pertes de transport et de distribution sur de longues distances et, par conséquent, les coûts associés. De plus, la décentralisation permet au réseau de rétablir l'électricité dans des délais plus courts. Pour plus de coordination, ces petites unités de production décentralisée ou centrales électriques virtuelles peuvent être gérées par une autorité centrale.

- Un marché concurrentiel, de nouveaux produits, technologies, biens, services et opportunités : le *smart grid* modifie le modèle de marché réel de l'électricité en transformant le consommateur en producteur d'électricité indépendant et en reliant l'acheteur et le vendeur. Cela donnera l'occasion et la nécessité de développer de nouvelles technologies telles que les batteries de stockage d'électricité et de nouveaux produits tels que les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides

rechargeables. En outre, chaque appareil électrique devient capable d'afficher sur des écrans numériques son processus de fonctionnement, le type d'énergie utilisée, les défauts, les solutions de réparation, etc.

- Une Energie fiable, constante, rentable, propre et de qualité : le réseau électrique intelligent peut fournir une énergie de qualité supérieure à partir de ressources énergétiques plus propres pour tous les types de consommateurs, tels que les particuliers et les industries. Grâce à son système optimisé et à ses options alternatives, il provoque des pannes d'électricité moins nombreuses et plus courtes, laisse moins de traces de carbone et de pollution environnementale et est plus économique.

- Une rentabilité des actifs et une efficacité plus élevées : la tarification dynamique et la détection continue optimisent la capacité des actifs dans le *smart grid*, contrairement au réseau traditionnel. L'efficacité de l'exploitation est accrue grâce à des dispositifs de contrôle du système qui réduisent les pertes et éliminent les congestions avec un coût optimisé et minimum.

- Dépannage automatisé, notification, auto-réparation et capacité de *black start* : le *smart grid*, grâce à des auto-évaluations, est capable d'identifier les points faibles du réseau de production, de transport et de distribution, diagnostiquer les problèmes, analyser les solutions possibles et prendre rapidement les mesures nécessaires. Ainsi, le *smart grid* peut se remettre en état après une panne sans intervention humaine. À plus petite échelle, les appareils électriques de nouvelle génération sont connectés au réseau domestique et peuvent être allumés et éteints à distance. Cela peut être utile, par exemple, lorsqu'un appareil est allumé et cause un problème en l'absence des occupants du logement. En outre, dans de tels cas, l'assurance ne couvre souvent pas les dommages [MERT et al., 2008], alors que le *smart grid* informe le consommateur par internet ou par téléphone de la panne ou du défaut éventuel de l'appareil. L'appareil peut également donner des informations en cas de problème, d'usure, de calcification, etc. et suggérer des solutions de réparation.

- La fourniture d'un relevé automatique des compteurs, d'une assistance aux consommateurs et de services auxiliaires : le système de communication avancé permet de mesurer à distance la consommation d'électricité. Ce système est indépendant de l'homme et de ses erreurs, permet de gagner du temps et est précis, facilite le problème

de la mesure dans les zones rurales et moins accessibles et améliore l'efficacité du service à la clientèle. De plus, les données collectées peuvent être utilisées pour de futures analyses de l'électricité (par exemple, demande, charge de pointe, etc.).

- Un système résilient aux risques naturels, aux cybermenaces et aux menaces physiques : les moniteurs d'auto-détections peuvent observer des situations dangereuses et peu sûres telles que les catastrophes naturelles, les cyberattaques ou les attaques physiques intentionnelles, les accidents, etc. et envoyer des signaux pour des réactions rapides afin de protéger les parties physiques du réseau ainsi que pour sauvegarder la base de données et la vie privée des consommateurs.

Il est important d'estimer des autres bénéfices qui découlent des caractéristiques mentionnées ci-dessus, et ne sont pas toujours facilement quantifiables. Le *smart grid* contribue à plusieurs co-bénéfices liés à l'énergie à l'échelle individuelle et nationale. Il permet de :

- Renforcer l'indépendance énergétique: les politiques de l'offre, telles que l'augmentation de l'efficacité énergétique, la réduction de la demande d'énergie et le développement de la cogénération, l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments et aussi de l'étiquetage énergétique des appareils domestiques conduisent à une réduction globale de la consommation énergétique et une indépendance énergétique notamment vis-à-vis des énergies fossiles et par conséquent une réduction du déficit commercial.

- Répondre aux exigences des programmes-cadres stratégiques : les caractéristiques du *smart grid* répondent à plusieurs exigences de la planification nationale et de la Commission européenne telles que la réduction du CO_2, le programme d'atténuation du changement climatique, les initiatives « 1-watt », etc.

- Réduire les pollutions environnementales : la réduction de la consommation d'énergie ainsi que la diminution de la production basée sur les combustibles fossiles et le développement de véhicules électriques peuvent être bénéfiques pour l'environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'autres polluants.

- Apporter du confort et de la facilité aux consommateurs et aux services publics : les systèmes automatisés et les nouvelles technologies facilitent de nombreuses fonctions

du réseau concernant les lignes de transmission et de distribution ainsi que dans les logements.

- Générer des emplois et des compétences et maximiser les possibilités d'emploi : le *smart grid* attire de nouveaux investissements et crée de nouveaux emplois dans l'industrie technologique ainsi que dans l'informatique et les logiciels de communication. MCNAMARA (2009) estime que les mesures d'incitation en faveur des réseaux intelligents, d'une valeur de 16 milliards de dollars aux États-Unis, pourraient déclencher des projets associés d'un montant de 64 milliards de dollars. Il en résulterait la création directe d'environ 280 000 postes et la création indirecte d'un nombre d'emplois nettement plus important.

Toutefois, les avantages ne sont pas indépendants les uns des autres et leurs externalités sont intrinsèquement difficiles à quantifier, mais ils sont résumés dans le Tableau 1-2.

Tableau 1-2 : Caractéristiques et avantages du *smart grid*

Réf : Basé sur les rapports de MILLER (2009) et de DoE (2009)

Caractéristiques du *smart grid*	**Avantages**	**Domaine bénéfique**
Tarification dynamique et participation active des consommateurs	• Courbes de charge plus plates • Changement de comportement plus rapide • Offre et demande plus équilibrées • Système plus optimisé • Moins de consommation globale d'électricité • Plus d'avantages financiers pour les consommateurs et les services publics • Moins de problèmes environnementaux	Société
Capacité de stockage de l'énergie	• Plus d'intégration des ressources énergétiques renouvelables et des VE	Environnement
Capacité de production décentralisée	• Sites de production plus proches, coûts de transmission réduits • Baisse de la facture d'électricité pour les consommateurs • Plus d'ER, d'IPP et de cogénération • Des terrains plus petits pour construire de plus centrales électriques • Moins d'investissements et d'exposition au capital • Plus de capacité de transfert de transmission • Plus d'efficacité en matière de T&D	Economie
Marché compétitif, nouveaux produits, technologies, biens, services et opportunités	• plus d'appareils connectés • Plus de technologie EV et PHEV	Technologie
Electricité fiable, en continue, rentable et propre	• Moins de pannes ou autres problèmes, ou pannes plus courtes • Moins de pannes d'équipement • Moins de pollutions environnementales et d'impacts du changement climatique	Fiabilité

	• Moins de perturbations de la qualité de l'énergie	
Rentabilité économique et efficacité	• Exploitation et gestion des actifs plus efficaces • Moins de temps de restauration en cas de dommages • Plus d'équilibre entre la demande et l'offre	Efficacité
Dépannage automatisé, capacité d'auto-réparation et de *black start*	• Moins de coûts d'opération et de maintenance (O&M) • Moins de dommages aux appareils électriques • Plus de sécurité pour le public et la main-d'œuvre	Sûreté
Fourniture de services de relevé automatique des compteurs, d'assistance aux consommateurs et de services auxiliaires	• Moins de coûts de relevé des compteurs • Notification automatique de l'état des équipements • Détection automatique des défauts • Service client plus rapide • Plus de connaissances et de transparence	Facilité
Résilience face aux risques naturels, aux menaces cybernétiques et physiques	• Moins d'incidents liés à l'électricité • Réseau électrique plus résilient • Protection plus rapide	Sécurité

Selon les avantages et les co-avantages mentionnés plus haut, il existe trois types de bénéficiaires généraux dans les projets du *smart grid* : les individus en tant que consommateurs, les services publics d'électricité et la société en tant qu'entité générale. Un avantage pour l'un de ces acteurs peut à son tour profiter aux autres.

- Les consommateurs sont les utilisateurs finaux de l'électricité qui sont touchés par les changements de tarifs et les services fournis par les services publics, ainsi que par les améliorations de la fiabilité, de la qualité et de l'efficacité de l'énergie. Le *smart grid* est bénéfique pour les consommateurs en réduisant les factures d'électricité, en diminuant les interruptions de courant et en améliorant la qualité de l'énergie. Les consommateurs peuvent être mieux informés sur leurs propres habitudes de consommation, équilibrer leur consommation d'énergie avec la fourniture d'énergie en temps réel et modifier leur comportement en matière de consommation d'électricité.

- Les services publics d'électricité comprennent les compagnies d'électricité qui la produisent ainsi que les entités de transmission et de desserte, celles qui commercialisent et les fournisseurs qui finalement la fournissent aux consommateurs (ou les services publics intégrés qui font les quatre). En passant au *smart grid*, énergie plus fiable peut être fournie. La production est plus efficace et le système est optimisé et, notamment en cas de panne d'électricité ou d'autres situations d'urgence, l'entité en charge est en mesure d'agir de manière plus rapide et rentable.

- La société est très influencée par le développement des réseaux intelligents. En général, les impacts dans cette catégorie sont difficiles à calculer et sont directement liés à la mise à niveau de l'électricité. La réduction des pollutions, la création de nouveaux emplois, l'amélioration de l'état de santé des consommateurs, une énergie fiable et suffisante et d'autres avantages macro-économiques sont quelques-uns des avantages pour la société en général.

Dans tout projet d'ingénierie complexe, une identification précise et complète des parties prenantes est nécessaire. De même, la coopération et la participation des parties prenantes sont essentielles pour l'avancement du projet. Dans les nouveaux projets – comme dans le cas du *smart grid* – l'importance de l'analyse des parties prenantes est encore plus grande. En général, il existe deux types de parties prenantes : celles qu'on peut qualifier de positives qui peuvent bénéficier du développement du nouveau système, et celles que l'on dira négatives qui ont tendance à être défavorablement concernées par celui-ci.

Pour vérifier si le projet du *smart grid* a des répercussions sur d'autres groupes ou individus plutôt que sur les trois groupes mentionnés précédemment (consommateurs, services publics et société), une approche commune utilisée par LAPLANTE & STATE (2010) consiste à croiser différents aspects du *smart grid*. Par conséquent, une série de questions peut être soulevée afin d'identifier précisément les parties prenantes du *smart grid*. Ces questions sont dérivées des questions originales de LAPLANTE & STATE (2010) et sont mises à jour et complétées pour être adaptées à un projet du *smart grid*.

1) Qui va investir économiquement dans le développement du système ?

2) Qui sera chargé de sa spécification, de sa conception, de sa construction et de ses essais ?

3) Qui s'occupera de sa régulation ?

4) Qui sera impliqué dans son administration et sa supervision ?

5) Qui supervisera son adéquation ?

6) Qui sera responsable de son entretien, de sa réparation et de sa mise hors service ?

7) Qui seront les utilisateurs finaux ?

8) Qui sera affecté négativement ?

9) Qui d'autre sera concerné par son existence ?

10) Qui sera touché en cas d'abandon du projet ?

En répondant à ces questions, on pourra découvrir un ensemble de parties prenantes pour le *smart grid*. Les questions et les réponses sont résumées dans le Tableau 1-3.

Tableau 1-3 : Analyse des parties prenantes du *smart grid*

Réf : Basé sur le rapport de LAPLANTE & STATE (2010)			
	Question	**+ Domaine ?**	**= Réponse (partie prenante)**
1	Responsable de	Investissement	Ceux qui paient les impôts Services publics Gouvernement Autorités nationales Producteurs/fournisseurs de technologies
2		Conception/Construction	Fournisseurs de logiciels Intégrateurs de systèmes Fournisseurs de technologies Fabricants d'équipements
3		Régulation	Régulateurs / agences de régulation Décideurs politiques
4		Administration/supervision	Operateurs Prestataires de services
5		Supervision	Autorités Locales
6		Maintenance/Retraite	Prestataires de maintenance
7		Consommation	Ménages
8	Négativement affectés		Concurrents Travailleurs des centrales électriques Services à la clientèle
9	Affectés par le projet	Son existence	Fournisseurs de technologies Vendeurs Fabricants d'équipements
10		Son abandon	Services publics
11	Diverses parties prenantes		Groupes environnementaux

1.4 Exigences pour la mise à niveau du réseau

Comme mentionné précédemment, il ne suffit pas d'éliminer les lacunes du réseau et de remplacer les pièces obsolètes, car le réseau existant n'est pas adapté aux exigences de la vie actuelle et à la nécessité d'accueillir une production décentralisée renouvelable et une capacité de cogénération. Il est donc essentiel de moderniser le réseau et de prendre des mesures d'optimisation.

TVERBERG (2008) a identifié trois éléments fondamentaux à intégrer au réseau pour en améliorer le fonctionnement :

- Des lignes de transmission adaptées à très haute tension ;
- Du réseau numérique avec de nouveaux transformateurs et de nouveaux compteurs capables de communiquer dans les deux sens ; et
- Du système de surveillance de la transmission en temps réel.

Pour mettre en œuvre ces trois changements en vue de la modernisation du réseau, de nombreuses capacités technologiques principales doivent être ajoutées au réseau, notamment la communication intégrée, la détection et la mesure, les composants avancés, l'équipement de stockage du réseau, l'automatisation du système électrique et les méthodes de contrôle avancées [FEINBERGE, 2012]. Chacun de ces éléments est responsable d'une tâche classée dans le Tableau 1-4.

Tableau 1-4 : Capacité technologique pour transformer le réseau actuel en *smart grid*

Réf : Basé sur les travaux de FEINBERGE (2012)

Capacité technologique	**Caractéristique ou tâche principale**
Communication intégrée	Communications rapides et fiables / Contrôle en temps réel / Information et échange de données / Fiabilité, utilisation des ressources et sécurité du système optimisées / Sans fil, via les lignes électriques ou la fibre optique / Large-bande sur les lignes électriques / Moniteurs et relais intelligents dans les sous-stations / Moniteurs dans les transformateurs et les disjoncteurs / Communication bidirectionnelle
Détection et mesure	Congestion et stabilité du réseau / Santé des équipements / Vol d'énergie / Mesure de la signature électromagnétique / Tarification en temps réel / Unités de mesure du phosphore / Surveillance de la qualité de l'énergie en temps réel / Utilisation du GPS comme référence pour une mesure précise
Composants avancés	Production d'énergie distribuée / Dispositifs de stockage / Véhicules électriques / Dispositifs de systèmes de transmission souples à courant alternatif (CA) / Matériaux conducteurs avancés / Appareils intelligents
Matériel de stockage en réseau	Déplacer la charge des heures de pointe vers les heures creuses / Améliorer l'utilisation des infrastructures existantes / Réduire les investissements requis pour les nouvelles centrales électriques / Réduire les investissements pour augmenter les limites de transport et de distribution / Transférer les coûts réduits aux utilisateurs finaux / Améliorer la qualité de l'énergie / Régulation de la fréquence / Stockage de l'énergie sur le réseau / Contrôle de la tension
Automatisation du système électrique	Diagnostic rapide et solutions précises aux perturbations ou aux pannes spécifiques du réseau / Agents intelligents distribués / Outils analytiques impliquant des algorithmes des logiciels et des ordinateurs à grande vitesse / Applications opérationnelles
Méthodes de contrôle avancées	Surveiller et collecter les données des capteurs / Analyser les données pour diagnostiquer et fournir des solutions / Déterminer et agir de manière autonome ou par l'intermédiaire d'opérateurs / Effectuer des prédictions des conditions d'exploitation et des risques futurs (simulation et modélisation rapides)

Les huit solutions technologiques ci-dessous permettent au réseau de devenir un réseau numérique à haute tension avec une tarification en temps réel :

- Des infrastructures de comptage avancé (*Advanced Metering Infrastructure - AMI*)
- Des systèmes côté consommateur (*Consumer Side System - CSS*)
- La Réponse à la Demande (RD) ou la Maîtrise de la Demande en Electricité (MDE)
- Des solutions avancées de gestion de la distribution (*Advanced Distribution Management Solutions - ADMS*)
- Des applications des technologies de l'information et de la communication (TIC)
- Des opérations de ressources énergétiques distribuées (RED) et *des micro-grids* (par exemple, l'éolien et le photovoltaïque)
- Le réseau de transport automatisé
- Des sous-stations automatisées (*Substation Automation - SA*)

1.5 Évaluation des coûts

L'évaluation détaillée des coûts du *smart grid* et, par conséquent, l'Analyse Coûts-Avantages (ACA) ne font pas partie du champ d'application de cette recherche. Toutefois, afin de prendre des décisions opérationnelles pour la mise en œuvre de tout projet, il est essentiel d'identifier les coûts, de les comparer avec les bénéfices futurs et de disposer d'un plan d'affaires. L'estimation des coûts du *smart grid* est plus compliquée par rapport au système d'infrastructure traditionnel pour plusieurs facteurs mentionnés ci-dessous par l'EPRI (2011) et WAKEFIELD (2010) :

- L'intégration de la technologie : En raison de la pénétration constante de nouvelles technologies, les composants des *smart grid* deviennent rapidement obsolètes et inopérants et cette situation se produit plus rapidement que dans le réseau actuel. En outre, leur espérance de vie et leur taux de défaillance peuvent être différents. Par conséquent, les composants intégrés ont souvent besoin d'être remplacés, ce qui complique la prise en compte dans l'évaluation des coûts des services généraux.
- L'augmentation de la production. Le *smart grid* se développe grâce aux améliorations technologiques. Ainsi, à mesure que la technologie se développe, la production

augmente et les coûts marginaux diminuent à un rythme plus élevé, ce qui complique l'estimation des coûts précis à long terme.

- Les technologies interconnectées. Les avantages du *smart grid* sont tirés d'autres technologies telles que les panneaux solaires, les éoliennes, les véhicules électriques, les véhicules hybrides rechargeables, etc. Ainsi, la valeur de l'investissement du *smart grid* provient d'autres innovations et leur amélioration doit également être prise en compte dans l'évaluation des coûts des projets *smart grid*.

- Le manque de fiabilité de l'exploitation. Les technologies de *smart grid* en raison de leur nouveauté ne sont pas encore vérifiées. Il existe donc des incertitudes quant à leurs performances qui peuvent entraîner des dépenses imprévues.

- La portée et l'échelle importantes des technologies. La création d'un *smart grid* fait appel à une grande variété de technologies allant du petit appareil électrique résidentiel à la très grande production d'électricité industrielle, ce qui complique le calcul des coûts.

- Le nombre important de parties prenantes. La diversité des parties prenantes mentionnée précédemment complique l'investissement, le financement et l'évaluation des coûts.

En outre, il convient de mentionner que les coûts du projet sont à court terme contrairement à ses avantages, qui sont à long terme et que de nombreux avantages, comme mentionné précédemment, ne sont pas quantifiables. En tout état de cause, pour prouver la rentabilité d'un projet de *smart grid*, une évaluation des coûts est importante. Les conclusions de certaines des études précédentes sont rassemblées dans le Tableau 1-5 à titre d'exemple.

Tableau 1-5 : Rapport coûts-avantages de certains projets de *smart grid*

Réf : N/A

Etude	**Institut de recherche**	**coûts**	**Avantages**	**Rapport coûts-avantages**
Le système de distribution d'électricité du futur	EPRI (2013)	$ 165 milliards	$ 660 milliards	4.00
Projet d'intérêt commun pour le *smart grid* « GREEN-ME »	CIRED (2015)	€ 105-127 millions	€ 167-197 millions	1.57
Estimation des coûts et des bénéfices du *smart grid*	EPRI (2011)	$ 338-476 milliards	$ 1.3-2 trillions	4.05

Chapitre 2 : Conception du *smart grid*

2.1 Exemples de projet *smart grid*

L'analyse d'exemples de projets de *smart grid*, de leurs diverses techniques et des stratégies qui ont été appliquées pour les mettre en œuvre permet d'identifier leurs caractéristiques communes ainsi que leurs différences afin d'améliorer les approches actuellement utilisées.

Récemment, de grands progrès ont été réalisés, à l'échelle mondiale, en matière de déploiement des réseaux intelligents. C'est pourquoi, dans les pages qui suivent, certains projets sont mis en évidence afin de fournir des informations utiles pour les développements futurs.

Les Plateformes Technologiques Européennes (PTE), reconnues par la Commission Européenne comme l'un des principaux acteurs autofinancés dans la mise en œuvre du *smart grid* en Europe, rassemblent plusieurs projets de recherche et développement (R&D) et également de démonstration dans ce domaine. Les initiatives européennes se sont concentrées sur l'intégration de la production d'énergie à partir de ressources renouvelables, avec la perspective d'accroître la participation des consommateurs à la gestion du système, grâce à des politiques de gestion de la demande et au déploiement d'infrastructures de compteurs communicants [JRC, 2020].

L'expérimentation est cruciale pour la validation des nouvelles technologies mais aussi pour l'étude du comportement des consommateurs et s'inscrivent dans une démarche de partenariat suivie par l'établissement des accords industriels.

Tout d'abord, dans cette thèse, l'avancement de plusieurs projets et expérimentations de *smart grid* est suivi et étudié. Cette étude est réalisée sur 29 projets français présentés par la CRE. Les objectifs de 23 d'entre eux sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau 2-1).

Cette étude permet également de comprendre qu'il existe deux grandes catégories de projets de *smart grid* en France au niveau de la gestion de demande :

1. Projets focalisés sur le producteur ;

2. Projets focalisés sur les consommateurs.

Tableau 2-1 : Projets de *smart grid* en France

Réf : CRE (2012)		
Nom de projet ou d'expérimentation	**Objectifs**	**Visibilité des données aux consommateurs**
A3M	Gestion de demande par les consommateurs	X
ECOFFICES	Application des TIC dans les tertiaires	
Ecolink	Installation des capteurs communicants sur les appareils électroménagers	
EconHome	Diagnostic des appareils les plus énergivores/ Solution pour la réduction de consommation	
ADRESSE	Production optimisée/ Résolution des problèmes techniques	
AfficheEco	Gestion de demande par les consommateurs	X
Alliance TBH	Evaluation de l'impact de l'affichage sur la réduction de consommation	X
ENBRIN	Gestion de demande par les consommateurs/ Optimisation du réseau/ Résolution des problèmes techniques	X
Une Bretagne d'avance	Coupure de chauffage aux heures de pointe par le producteur	
EnR Pool	Etude comportementale des consommateurs / Intégration de la production renouvelable	X
Greenlys	Gestion de demande par compteurs intelligents/ Optimisation du réseau	
MILLENER	Optimisation de l'équilibre entre l'offre et la demande en temps réel / Gestion de demande par les consommateurs	X
MODELEC	Affichage et contrôle des consommations des appareils électroménagers par les consommateurs / Gestion des principaux éléments de consommation par le fournisseur / Etude comportementale des consommateurs	X
Multisol	Optimisation de l'équilibre entre l'offre et la demande	
MYRTLE	Gestion de pic par stockage d'énergie renouvelable	
PEGASE	Optimisation de l'équilibre entre l'offre et la demande / Intégration des énergies renouvelables dans la production d'électricité	
POSTE	Développement d'algorithmes d'optimisation	
SCE	Analyse des données énergétiques / Modélisation du comportement des consommateurs	
SEAS	Optimisation du réseau par une approche compréhensive / Installation des capteurs communicants / Interaction en temps réel	
Smart Electric Lyon	Gestion de demande par les consommateurs / Optimisation par une approche compréhensive et collaborative	X
Tenerrdis	Optimisation du réseau / Augmentation de l'efficacité énergétique	
Watt & Moi	Gestion de demande par les consommateurs / Sensibilisation du public aux économies d'énergie	X

Les données de consommation (coût, heures de pointes, conseils, etc.) peuvent être visibles aussi aux consommateurs, en plus des fournisseurs afin de leur permettre une participation active. GEELEN et al. (2019) ont fait une expérience sur ce sujet.

Dans leur projet, les compteurs traditionnels ont été remplacés par des compteurs communicants de façon bidirectionnelle pour certains ménages. Un réseau local (*Local area network -LAN*) et plusieurs applications ont permis à l'opérateur énergétique de mettre en

place un système de retour d'information pour les consommateurs. La consommation réelle désagrégée et les données antérieures pouvaient être affichées sous forme d'informations quantitatives accompagnées de graphiques pour faciliter l'interprétation par les consommateurs.

L'objectif était d'influencer leur décision et de les sensibiliser à la réalisation de mesures d'économie d'énergie. À l'aide de leur smartphone, tablette, ordinateur personnel et applications en ligne, ils pouvaient ensuite contrôler et commander les appareils en tenant compte des conseils de l'opérateur. Les données concernant différents jours (exemple, comparaison entre le jour en cours et le jour précédent) pourraient être utiles pour analyser l'impact de chaque changement de comportement.

Cela permet au consommateur de participer à la gestion de sa propre demande activement par modifiant le temps, la fréquence et la durée d'utilisation des équipements électriques et d'avoir un comportement plus responsable. Les résultats de cette expérience ont révélé que les ménages ayant accès à des données graphiques et à des analyses en temps réel réduisaient davantage leur consommation que celles qui avaient accès à des factures d'électricité détaillées à la fin du mois.

Le Centre Commun de Recherche (CCR) sur les « réseaux électriques intelligents et l'interopérabilité » de la Commission Européenne liste 527 projets. Nous en avons sélectionné trois pour les examiner plus en détail (Tableau 2-2), selon les critères suivants :

- Être en phase de démonstration
- Disposer des applications telles que la Réponse à la Demande (RD)
- Avoir des consommateurs qui participent activement en gestion de leur consommation et leur demande
- Être applicable sur plusieurs sites

Tableau 2-2 : Projets smart grid de base de données JRC

Réf : SES JRC EC (2020)

Projet	**Début-fin**	**Pays**	**Objectifs**
Arrowhead	2013-2017	Autriche, Belgique, République tchèque, Danemark, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Italie, Lettonie, Pays-Bas, Norvège, Portugal, Suède, Royaume-Uni	Gestion des réseaux, Intégration de la production décentralisée renouvelable, Intégration des SER à grande échelle, Agrégation (RD ; Centrale électrique virtuelle), consommateurs intelligents et maisons intelligentes, Véhicules électriques et applications *Vehicle2Grid*, Comptage intelligent
Nice Grid	2012-2015	Belgique, France	Gestion du réseau des marchés publics, Intégration de la production décentralisée renouvelable, Intégration des SER à grande échelle, Agrégation (RD ; Centrale électrique virtuelle), consommateurs intelligents et maisons intelligentes, Véhicules électriques et applications *Vehicle2Grid*, Comptage intelligent
Smart City Kalundborg	2012-2015	Danemark, France	Gestion des réseaux, Intégration de la production décentralisée renouvelable, agrégation (RD; Centrale électrique virtuelle), consommateurs intelligents et maisons intelligentes, véhicules électriques et applications *Vehicle2Grid*

2.1.1 Arrowhead

Arrowhead vise à résoudre des défis en matière d'énergie et de compétitivité en créant de nouvelles interactions dynamiques entre les producteurs et les consommateurs d'énergie, entre les machines, les systèmes et les consommateurs. L'idée est d'utiliser l'Internet des objets et l'architecture orientée services (AOS) pour développer « une automatisation coopérative ». Pour cela, on peut fournir un cadre technique adapté en termes de fonctions et de performances et proposer des solutions d'intégration avec les systèmes existants. Ce projet essaye d'évaluer l'automatisation coopérative par des expérimentations réelles appliquées à différents domaines tels que l'électromobilité, les bâtiments intelligents, les infrastructures, les villes intelligentes, la production industrielle, la production d'énergie résidentielle et le marché virtuel de l'énergie (Figure 2-1).

Réf : Arrowhead – Inneon AG (2019)

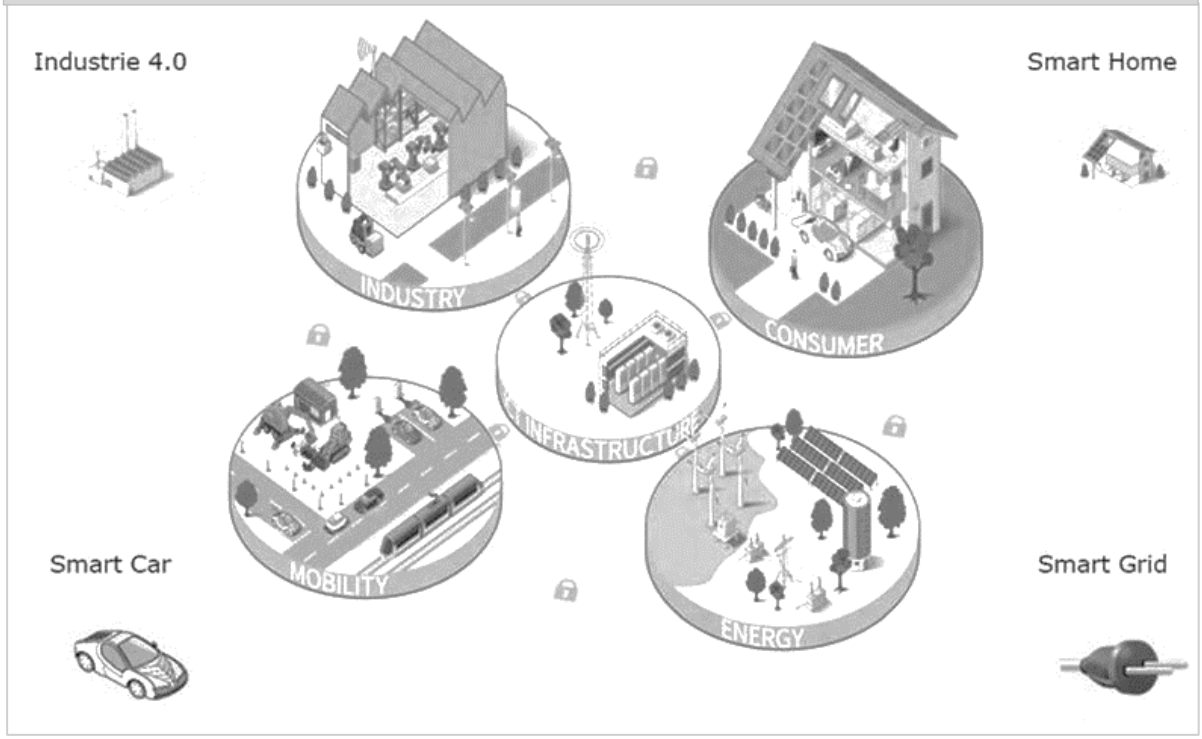


Figure 2-1 : Schéma général du projet Arrowhead

2.1.2 Nice Grid

Ce projet a été conçu comme un démonstrateur de quartier solaire intelligent (Figure 2-2). Il est composé des zones résidentielles (dont logements sociaux) et industrielles et implique 1500 consommateurs (résidentiels, entreprises et bâtiments publics) équipés de compteurs intelligents. Plusieurs questions sont soulevées par le concept de *smart grid* que ce projet vise à résoudre avec une double approche technico-économique. Les objectifs de ce projet sont résumés comme suit :

- Optimisation de l'exploitation d'un réseau de moyenne et basse tension, intégrant une production massive d'énergie renouvelable décentralisée et intermittente principalement photovoltaïque ;

- Etude comportementale des consommateurs en matière de gestion de la production et de la consommation de l'électricité, la réduction de la demande de pointe et l'impact des incitations tarifaires ; et

- Stockage de l'énergie par des batteries en différents points du réseau (par exemple, postes primaires, postes secondaires, au domicile des consommateurs) afin d'offrir une

plus grande souplesse pour absorber la production intermittente et faire face aux pics de demande.

Réf : Thomas Drizard, CC BY-SA 4.0 (2016)

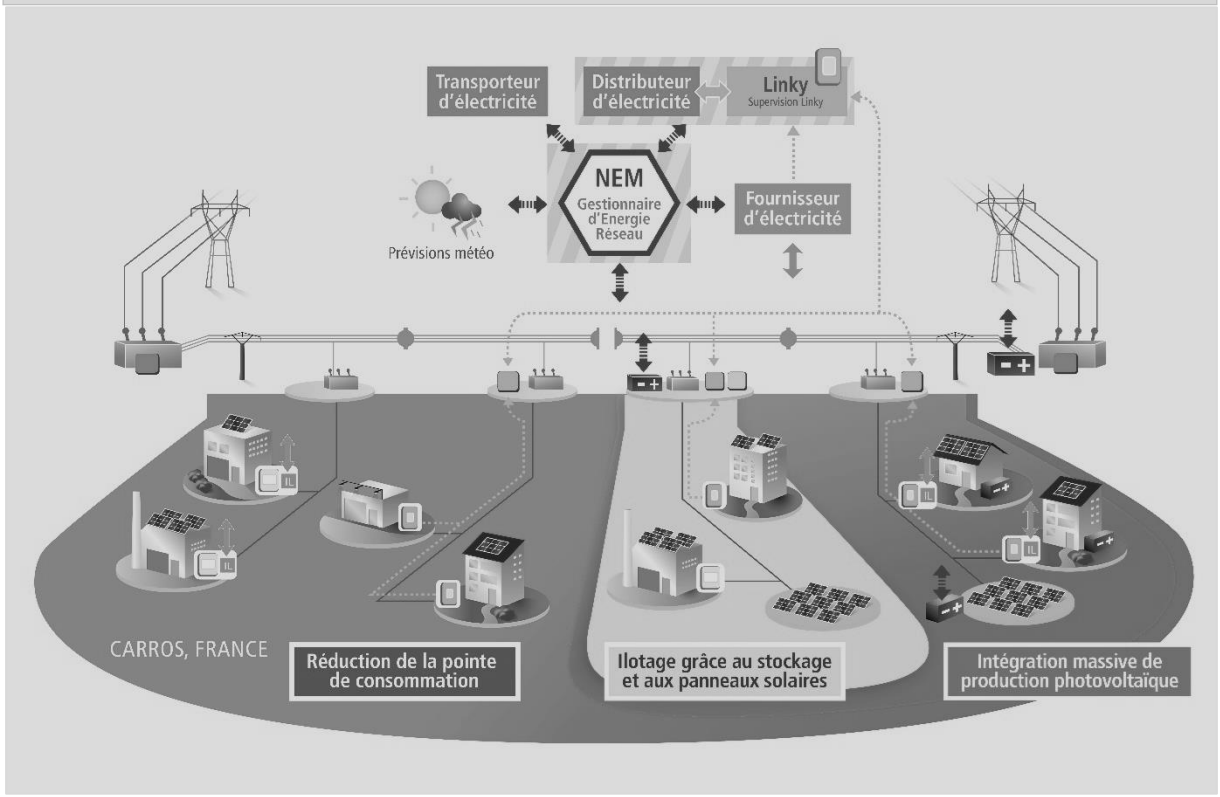


Figure 2-2 : Schéma général du projet Nice Grid

2.1.3 Smart City Kalundborg

L'objectif de Smart City Kalundborg est de démontrer l'utilisation optimisée des énergies renouvelables et des possibilités de production et de gestion décentralisées de l'énergie, et de montrer dans la vie réelle comment une ville peut atteindre une efficacité énergétique optimale. Cela se fera en permettant le contrôle de l'électricité, de l'eau, du chauffage, des transports et des bâtiments communicants. Le *smart grid* dans ce projet ne représente pas seulement le réseau électrique intelligent mais l'ensemble des infrastructures et des réseaux. La coordination entre ces systèmes rend la ville efficace en matière de consommation d'énergie comme « un écosystème » (Figure 2-3).

Réf : Kalundborg Symbiosis (2015)

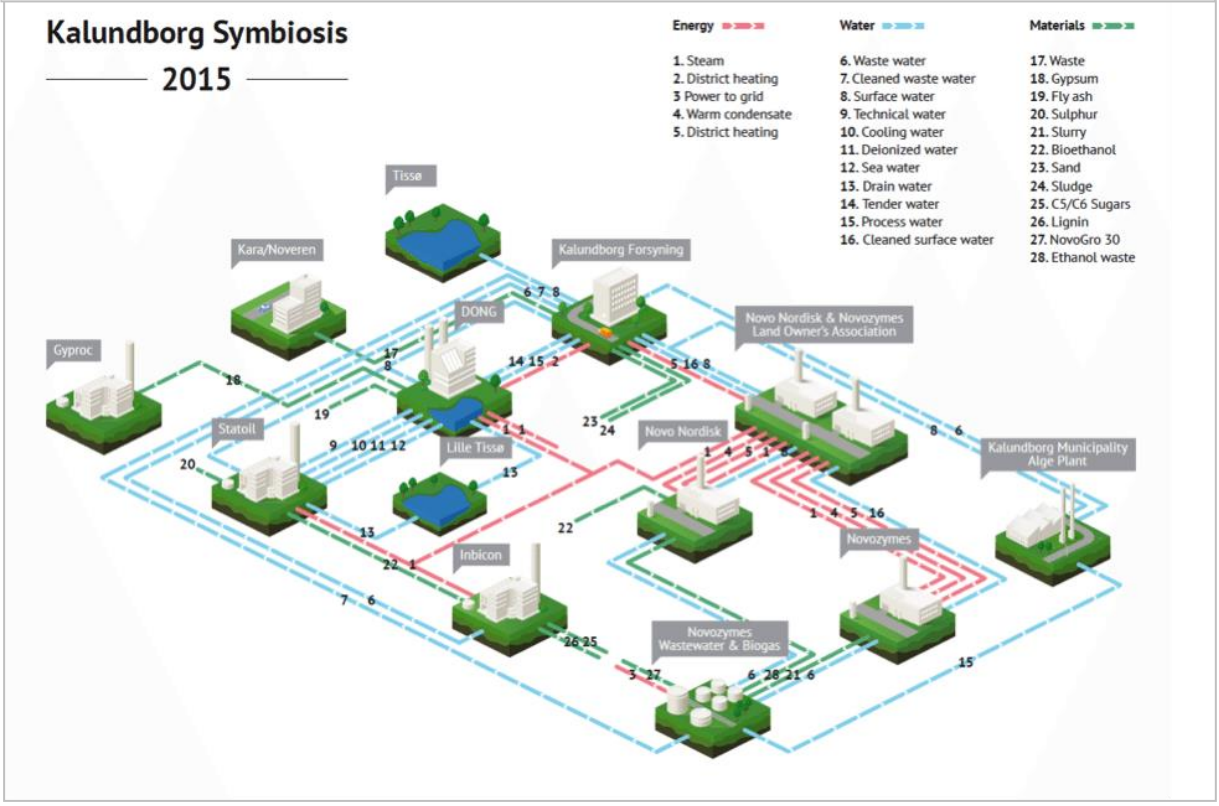


Figure 2-3 : Schéma général du projet de la ville intelligente de Kalundborg

2.1.4 Analyse comparative de ces trois exemples

Les trois projets présentent plusieurs similitudes. Ils ont tous une vision holistique de l'optimisation énergétique. Ils tentent de créer une coordination et un équilibre entre la consommation et la production, ainsi qu'entre les différentes infrastructures (électricité, bâtiments, système de transport, etc.). L'objectif des trois est de créer une optimisation du système qu'ils essaient de gagner par l'automatisation. Enfin, ils utilisent tous des données pour atteindre leurs objectifs.

Le premier projet tente d'atteindre les objectifs du *smart grid* par la compétitivité entre les domaines tout en maintenant la coordination. Le second se concentre sur le côté consommateur (sa façon de consommer et la cogénération renouvelable). Et le dernier étend l'idée du second à l'ensemble de l’échelle urbaine pour créer une ville intelligente.

2.2 Pratiques et méthodologies de mise en œuvre du *smart grid*

La transition du réseau actuel au *smart grid* a commencé en France depuis 2015 par la mise en place de compteurs communicants Linky et la collecte d'informations sur la manière dont les ménages consomment l'électricité. Le *smart grid* en utilisant ensuite ces informations vise à optimiser la consommation et la production d'électricité par le biais de la gestion de la charge selon diverses techniques. Chaque technique repose sur différents niveaux de flux d'informations, de nombreux calculs ou simulations et fournit des résultats dont l'applicabilité est distincte et varie en fonction de la partie responsable qui contrôle le système (les consommateurs et/ou les fournisseurs d'énergie). Ces méthodologies peuvent être divisées en deux approches : *top-down* et *bottom-up.*

2.2.1 Approche *top-down*

Dans l'approche *top-down* ou descendante, l'information concernant la consommation (telle que la quantité d'électricité consommée) circule du consommateur vers l'entité de contrôle responsable (gestionnaire du réseau), tandis que les commandes de contrôle circulent en sens inverse. Schématiquement, dans ce concept, l'énergie est acheminée vers un centre d'exploitation central avant d'être mise à la disposition des consommateurs. L'entité de contrôle vérifie la demande du consommateur et si elle décide qu'il y a une surconsommation, la charge sera déconnectée et reportée à un moment plus approprié. Cette décision est prise au regard de la consommation et de la demande créées par l'ensemble des consommateurs et dans le but de réduire la demande électrique.

Les particuliers ne sont pas responsables, mais les autorités sont tenues de prendre certaines mesures pour réduire la consommation électrique et de guider les consommateurs aux heures de pointe en conséquence afin de déplacer les charges de pointe vers les heures creuses. Dans cette stratégie, il y a un contrôle centralisé de la consommation/production d'énergie qui est indépendant du comportement et du processus décisionnel des individus en matière d'énergie. Ce type de gestion de la charge existe déjà depuis de nombreuses décennies dans les secteurs industriel et commercial [MORGAN & TALUKDAR, 1979 et STRBAC, 2008] et le *smart grid* s'efforce d'intégrer ce concept dans un système plus automatisé, en particulier dans le secteur résidentiel, afin de maximiser ses avantages en matière d'économie d'énergie.

Par conséquent, l'utilisation de certains appareils aux heures de pointe n'est pas autorisée ou n'est pas conseillée. L'unité responsable contrôle le schéma de consommation des ménages et

détermine les récompenses ou les techniques d'incitations pour encourager les consommateurs à contribuer à l'aplatissement de la courbe de charge de pointe et à la réduction de la consommation électrique. Elle peut également prévoir les amendes ou les méthodes de dissuasions pour les décourager de mauvaises habitudes en matière de consommation d'énergie telles que la surconsommation et la consommation en mode veille.

Le défi de cette approche est l'acceptation des consommateurs. Dans le réseau actuel, l'électricité est théoriquement fournie sans interruption et à tout moment, alors que le *smart grid* configuré en *top-down* propose de l'électricité soumise à des vérifications. Même si ces mesures incitatives ou dissuasives sont financièrement avantageuses pour les ménages et se répercutent directement sur leurs factures d'électricité, elles sont également dérangeantes. L'idée d'être sous le contrôle permanent des autorités et de ne pas avoir la possibilité de consommation libre rend les consommateurs mal à l'aise et rend le service public peu fiable pour eux. Ils peuvent même douter des avantages économiques et écologiques de cette approche et se méfier de la stratégie des services publics [MERT et al., 2008].

Les autres inconvénients de cette approche sont les questions d'extensibilité et de risque. L'élargissement de l'échelle de mise en œuvre du *smart grid* peut réduire ses avantages, car chaque consommateur supplémentaire dans le système augmente considérablement les coûts associés et diminue donc le rapport coûts-avantages. Une partie de ce problème peut être résolue par une stratégie hiérarchique (par exemple, en engageant une entité d'arbitrage pour surveiller le mouvement des informations entre le consommateur et le service public). Toutefois, cela peut entraîner une augmentation des dépenses et de la complexité du système. En ce qui concerne les questions de sécurité, en cas d'imitation des signaux de contrôle, le réseau électrique peut subir des coupures ou même des dommages irréparables [HINES, 2009].

2.2.2 Approche *bottom-up*

Dans l'approche *bottom-up* ou ascendante, les informations concernant les tarifs de l'électricité (prix en temps réel), la courbe de charge générale et les possibilités d'écrêtement des pics de consommation sont transmises des services publics aux consommateurs. Ainsi, les consommateurs sont capables de gérer le système en utilisant des applications, des smartphones, des réseaux locaux (*LAN*), des réseaux sociaux, etc. en réponse à l'information et en échange d'une incitation financière. Par conséquent, une variété de technologies est nécessaire pour permettre cette méthode. Cela crée une compétitivité entre les producteurs de

technologies et une plate-forme technologique moins uniforme pour les consommateurs. Grâce à cette technologie, l'accès au portail est plus compliqué pour les pirates informatiques. Ainsi, dans cette méthode, le facteur de risque est moins élevé.

La particularité de cette approche est la visibilité et la transparence des données générées par le consommateur pour leur propre usage. Cela permet aux consommateurs de s'informer et de participer au fonctionnement de leur réseau de manière indépendante ou semi-indépendante des autorités. D'un point de vue social ou psychologique, il y a plus d'engagement des citoyens et plus de comparaison, d'échanges et de collaborations entre les quartiers. Les individus ont le sentiment d'appartenir aux villes [SASSEN, 2013] et la réalisation des objectifs du *smart grid* repose sur leur capacité d'action et leur libre choix. Ça peut également les motiver à agir de manière plus responsable. Par conséquent, ils sont plus motivés, car ils partagent les mêmes valeurs et intérêts sociaux (par exemple, les améliorations économiques et écologiques).

La création de communautés comprenant des ménages ayant des profils de consommation similaires augmente la compétitivité entre eux, soutient les campagnes sociales et sensibilise le public aux avantages de la réduction de la consommation. En outre, il est beaucoup plus facile de promouvoir le changement de comportement par des stratégies d'engagement communautaire.

Dans cette approche, le problème de la vie privée est sans conséquence. En effet, dans le cas des réseaux traditionnels, la seule situation dans laquelle les services publics établissaient un lien entre le montant de la consommation et le profil du ménage était au moment du relevé du compteur et, par conséquent, la présence permanente des services publics au sein du ménage n'était pas nécessaire. Quoi qu'il en soit, en termes de sécurité (risque de piratage par exemple), l'approche *bottom-up* est plus avantageuse.

En ce qui concerne l'évolutivité, le développement *bottom-up* du *smart grid* permet d'augmenter le nombre de consommateurs plus facilement en utilisant la technologie de *Blockchain*. Par conséquent, dans cette approche, le *smart grid* peut être plus facilement évolutif.

2.2.3 Discussions : *top-down* et *bottom-up*

La gestion de la consommation d'énergie du secteur résidentiel joue un rôle majeur dans le système de gestion de l'énergie. Différentes méthodes sont utilisées pour gérer la consommation électrique des logements selon une approche *top-down* ou *bottom-up*.

Pour résumer, les technologies avancées permettent une communication bidirectionnelle et la question de la vie privée devient donc plus importante lorsque les appareils sont gérés par les services publics (*utility-driven*) dans le cadre d'une approche *top-down* et centralisé. Cette dernière est donc plus compliquée à mettre en place en raison de l'acceptation publique que l'approche *bottom-up* et décentralisée.

Cependant, la demande gérée par les consommateurs (*consumer-driven*) à l'aide des affichages et des informations des services publics dans une approche *bottom-up* augmente la compétitivité de l'industrie des technologies et du marché des logiciels, ainsi que l'engagement des ménages et leur participation à une démarche d'efficacité énergétique tout en réduisant les complexités de contrôle et de gestion et en protégeant les consommateurs des risques de piratage informatique et de cyberattaques.

Dans l'approche *top-down*, le système est centralisé et un seul algorithme choisit l'action suivante de chaque appareil. Par exemple, le fournisseur d'énergie allume et éteint le ballon d'eau chaude des habitants en utilisant une télécommande centralisée. Cette méthode est efficace car elle permet de mobiliser rapidement une grande capacité de réglage directement par le fournisseur. Mais l'impact sur le confort des ménages est également un des problèmes de cette approche.

En revanche, le contrôle de la consommation résidentielle dans une approche *bottom-up* dépend principalement de la participation des habitants. Différentes méthodes des arguments économiques aux techniques sociales et éducatives sont utilisées pour faire participer les habitants à un programme de réponse à la demande. Selon LEQUAY (2019), la grande majorité des approches de la gestion énergétique de *smart grid* en France suivent une approche *top-down*, où les besoins et les contraintes du réseau prévalent sur ceux des habitants. Lorsque la charge est priorisée dans une telle approche, les exigences, les préférences, le bien-être et les contraintes des habitants sont moins pris en compte. Pourtant, ils sont les premiers acteurs et bénéficiaires du *smart grid* et ils ont des préférences diverses et variées. Ces deux approches peuvent fonctionner de manière complémentaire selon les usages finaux.

2.3 Intégrer l'intelligence au réseau

Pour la mise en œuvre d'un *smart grid*, il faut faire face à nombreux défis d'ingénierie tels que la mise en place des systèmes de production renouvelable, de cogénération et de cybersécurité. Afin d'optimiser le système et de fournir suffisamment d'électricité pour répondre à la charge croissante de la demande, le futur réseau, indépendamment de son approche *top-down* ou *bottom-up*, doit permettre l'utilisation des technologies de communication et de l'information et donc augmenter son niveau d'intelligence (*smartness*).

Le mot « intelligent » (*smart*) est utilisé depuis quelques années notamment pour les composants de *grid*, ses équipements ou le *grid* lui-même qui sont connectés, qui communiquent via des réseaux et qui sont contrôlés à l'aide des technologies de l'information et de la communication (TIC). ALLEN (1996) a utilisé l'expression « maison intelligente » (*smart house*) ; MARVIN & GUY (1997) a indiqué « compteur intelligent » (*smart meter*) ; MAHIZHNAN (1999) a parlé de « ville intelligente » (*smart city*) ; MERT et al. (2008) ont mentionné « appareil intelligent » (*smart appliance*) ; et HEMMENT & TOWNSEND (2013) ont cité « citoyens intelligents » (*smart citizens*).

Plusieurs recherches portent sur l'intelligence du réseau, notamment l'intelligence décentralisée, l'automatisation et l'échange d'informations en utilisant l'intelligence artificielle [JENNINGS et al, 2012]. La *National Electrical Manufacturers Association* - NEMA (2009) utilise des facteurs suivants pour définir l'intelligence dans un système électrique :

- Communications (interaction et échange de données et de paramètres de contrôle entre entités pouvant contribuer à améliorer la sensibilisation à certaines situations, prise en charge du protocole de communication standard de l'industrie) ;
- Calculs/algorithmes (complexité et efficacité des algorithmes fonctionnels) ;
- Détection (extraction d'informations à partir des données détectées) ;
- Actions (performances) ;
- Réactions (traitement des données) ; et
- Adaptabilité (souplesse d'adaptation à un environnement changeant).

Afin d'intégrer l'intelligence au réseau, plusieurs facteurs doivent être adaptés : des communications bidirectionnelles entre les consommateurs et le fournisseur ; des algorithmes sophistiqués pour permettre la domotique au niveau local et l'automatisation du transport et de la distribution à un niveau plus large ; des cyberattaques, des fausses données ou des anomalies à détecter avec les actions nécessaires à entreprendre ; grande quantité de données à collecter via des infrastructures de mesure avancée ; et des réseaux de distribution flexibles capables d'intégrer des ressources énergétiques renouvelables.

Selon cette définition, le niveau d'intelligence dépend du niveau de partage des informations, de la coordination, du contrôle et de la transparence des données. Par conséquent, il est important d'étudier la visibilité des informations et le contrôle des configurations du système au sein du futur réseau afin d'en maximiser les avantages.

L'interaction entre les opérateurs centralisés de production et de transport d'électricité à grande échelle et qui contrôlent l'offre et les acteurs locaux qui contrôlent la demande (par la promotion de la tarification en temps réel ou d'autres stratégies) crée premièrement certaines complications dans le développement du projet de *smart grid*. Elles sont liées à la gestion de l'énergie en proposant des stratégies soit du côté de la production, soit du côté de la consommation, ainsi que ces exigences en termes de technologie et de budget et le degré d'efficacité visé.

Les acteurs de la production centralisée d'électricité souhaitent intégrer l'intelligence au réseau en utilisant les systèmes d'automatisation. La nécessité de remplacer les infrastructures de transmission et de distribution d'électricité dégradées incite ces acteurs de services publics à les moderniser avec des systèmes automatisés. Cela comprend des stratégies telles que l'intégration de capteurs, de solutions automatiques, de dispositifs de production décentralisée renouvelables et de stockage.

En revanche, les collectivités locales n'ont pas la même stratégie pour associer l'intelligence au réseau. Leur objectif est de se concentrer sur la consommation et l'utilisation d'open source (*open-sourced*) et d'applications. L'intégration de l'intelligence de cette manière peut se faire progressivement, à mesure que les foyers sont équipés de compteurs intelligents et rejoignent le système.

Les stratégies de gestion de la demande peuvent aussi être différentes :

2.3.1 Configuration *top-down* (MDE des autorités) et *bottom-up* (RD des consommateurs)

Comme mentionné précédemment au chapitre 1, selon la théorie des systèmes urbains, les villes deviennent des séries d'entités en interaction, chacune ayant des fonctions clairement contrôlables [BATTY, 2013]. Ces entités ont des fonctions telles que la fourniture de gaz, d'électricité, de télécommunications, d'eau ou de services tels que le ramassage des déchets ou le traitement des eaux usées.

De plus, la planification urbaine est passée d'une approche centralisée *top-down*, axée sur l'utilité, à une approche décentralisée *bottom-up*, axée sur la prise de décision participative. Aujourd'hui, ces deux visions de la planification sont également observables dans les systèmes urbains et la conception des infrastructures, y compris la conception et la configuration de *smart grid*.

Pour mieux comprendre ces deux approches dans la conception du *smart grid*, différents aspects peuvent être analysés (Tableau 2-3) : 1) La vie privée des consommateurs ; 2) La gestion ; 3) L'évolutivité ; 4) Le risque ; et 5) La technologie et l'innovation.

Tableau 2-3 : Comparaison entre le *smart grid top-down* et *bottom-up*

Réf : Basé sur des descriptions précédentes		
	Top-down	**Bottom-up**
Vie privée	- Moins acceptable pour les consommateurs de partager leurs données - Plus compliqué pour les services publics de convaincre et de protéger les consommateurs	- Plus de respect de la vie privée - Moins d'indépendance extérieure
Gestion	- Contrôle centralisé dans les cadres réglementaires existants	- Contrôle décentralisé avec l'engagement des individus et des autorités locales
Évolutivité	- Plus coûteux pour chaque consommateur - Davantage de composants, de domaines et d'interfaces logiques du *grid*	- Nécessité d'une plus grande capacité d'information en ligne
Risque	- Plus vulnérable au piratage informatique	- Plus compliqué de contrôler les comptes des personnes et l'authentification des utilisateurs - Moins vulnérable aux cyberattaques
Technologie et innovation	- Plus de technologies de systèmes de contrôle	- Plus d'innovations, de solutions et d'affichages de tarifs au niveau national

Ainsi, la question qui se pose ici est de savoir s'il est plus efficace de laisser le contrôle et la gestion du *smart grid* aux services publics dans une approche *top-down* ou d'informer les consommateurs sur les tarifs de l'électricité et les possibilités d'économie d'énergie et de leur permettre de prendre des décisions intelligentes concernant la consommation et/ou la

production afin d'atteindre un état d'équilibre entre l'offre et la demande ou une combinaison des deux approches

2.3.2 Intelligence des autorités et celle des consommateurs

Le *smart grid top-down* ou celui de *bottom-up* signifie le réseau piloté par les responsables de service public ou par les consommateurs et oriente la production de masse vers une production distribuée et décentralisée. Cette discussion suscite de nouvelles interrogations : à qui doit appartenir l'intelligence du réseau ou la transparence des données discutée précédemment ? Les responsables de service public ou les consommateurs ? ou les deux ?

Dans la mise en œuvre du *smart grid*, il existe les solutions de plateforme de données ouvertes (*open data*) dans lesquelles un accès facile aux ensembles de données et aux informations est crucial pour permettre aux entités responsables (autorités ou consommateurs) de prendre plus rapidement des décisions et des mesures fondées sur les données concernant la consommation et/ou la production d'électricité. L'ouverture des données peut appartenir aux services publics ou aux consommateurs, ce qui donne lieu à deux concepts idéologiquement opposés.

Les responsables de service public peuvent surveiller les détails de la consommation des ménages et décider d'interdire l'utilisation de certains appareils aux heures de pointe et de déplacer automatiquement l'activité vers la période hors pointe la plus proche. L'inconvénient de cette approche est que, comme les ménages ayant un profil de consommation similaire réagissent automatiquement à une crise de pointe de la même manière, une nouvelle pointe peut être créée dans la période décalée [STRBAC, 2008]. Retarder la demande de pointe ne résout pas le problème tant que la distribution de la demande n'a pas une répartition équitable.

D'autre part, si les consommateurs sont censés réduire eux-mêmes leur consommation d'électricité en observant les données fournies concernant les prix en temps réel et les heures de pointe, en reportant les tâches non urgentes aux périodes creuses et en modifiant progressivement leurs mauvaises habitudes de consommation, les résultats ne correspondraient pas nécessairement aux attentes des autorités car certains ménages peuvent ignorer les conseils de gestion de la demande ou être moins sensibles aux incitations financières.

En outre, les plans d'incitation financière utilisés pour promouvoir une attitude d'économie d'énergie ne peuvent être efficaces et conduire à un changement de comportement et à des engagements à long terme que s'ils traitent les erreurs sous-jacentes de manière stratégique et didactique [KOHN, 1993]. Cela signifie que si les responsables de service public réduisent les primes (factures d'électricité attrayantes dans ce cas), les utilisateurs sont moins motivés pour continuer à utiliser les appareils électriques en période creuse. Ainsi, les incitations financières peuvent réduire les motivations intrinsèques et avoir des conséquences négatives si elles ne sont pas soutenues par une éducation complémentaire. En outre, le niveau d'efficacité des incitations financières diminue avec l'augmentation du pouvoir d'achat des ménages. Les consommateurs qui appartiennent à des ménages de catégories socio-économiques supérieures sont moins motivés pour suivre des conseils d'économie d'énergie [HAMILTON et al., 2005].

Bien que le fait de permettre aux consommateurs de se coordonner entre eux directement et indépendamment des responsables du service public, de choisir des partenaires énergétiques et de commercer avec eux présente plusieurs avantages pour les autorités et les consommateurs, tels que la production d'électricité plus proche de son point d'utilisation, il s'agit également d'un défi et d'un inconvénient. Si les consommateurs participent à l'alimentation du réseau en produisant de l'électricité sous une forme décentralisée et en vendant leur surplus d'électricité directement à d'autres membres du réseau, les préoccupations en matière de sécurité augmentent notamment pour afficher le profil de consommation et les informations d'un consommateur (y compris la localisation, la taille de logement, le temps d'occupation de logement, etc.) à d'autres pour permettre leur échange d'énergie car ces informations peuvent être sujet d'une utilisation malveillante.

Par conséquent, aucune des approches qui s'appuient sur le contrôle automatique par des responsables de service public ou sur les réactions sélectives des consommateurs aux signaux de prix en temps réel ne fonctionne parfaitement et ne convient exclusivement à la gestion de la demande. Une étude plus complexe est nécessaire et une approche plus adaptative est requise pour répondre plus efficacement à chaque consommateur en ce qui concerne sa situation particulière, ses potentiels de production, son historique de consommation, etc. la comparaison de ces deux idées peuvent être résumées ci-dessous (Tableau 2-4).

Tableau 2-4 : Comparaison entre l'intelligence des responsables du service public et celle des consommateurs

Réf : basé sur des descriptions précédentes	
Service public intelligent	**Consommateur intelligent**
Directement [par les autorités]	Indirectement [par les autorités]
Prises intelligentes	Tarifs aux heures de pointe, visibilité pour les consommateurs et récompenses financières pour l'utilisation des appareils intelligents
Contrôle de la charge des services publics	RD des consommateurs
De la pointe à la creuse automatiquement	Décision *smart* du consommateur
Automatique	Sélectif
Organisme central	Organisation communautaire
Données de recensement ou administratives	Données locales

2.4 Obstacles et défis liés à l'adoption du smart grid

La transition du réseau actuel [avec un flux d'électricité monodirectionnel provenant de centrales électriques] vers un *smart grid* [avec un flux bidirectionnel, une capacité de cogénération et de production décentralisée et des TIC et des applications] comporte plusieurs défis importants en termes techniques et organisationnels qui méritent une refonte complète de la manière dont l'énergie est produite, fournie et consommée aujourd'hui.

Ces défis peuvent être divisés en deux catégories selon l'EPRI (2011) : la complication procédurale et technique. Nous ajoutons les problèmes potentiels liés à l'adoption du *smart grid* à cette dernière.

2.4.1 Défis procéduraux

Les difficultés procédurales dans la mise en œuvre du *smart grid* sont principalement dues aux raisons suivantes :

1. La complexité du système : le *smart grid* n'est pas seulement une machine complexe intégrant des interactions humaines avec des capteurs automatisés, c'est aussi un système techno-socio-économique [JRC, 2012] avec de multiples couches en interaction et plusieurs variables (situations économiques, évolution technologique, conditions météorologiques, etc.). Le comportement des individus, leurs attitudes, leur niveau de confort, leur éducation, leur situation financière, etc. ont également un impact sur le système qui doit être étudié avec soin.

2. Une mise à niveau longue et lente : la transition du réseau actuel au *smart grid* ne peut se faire d'un seul coup en remplaçant les équipements actuels par de nouvelles technologies. Cela ne peut se faire qu'en plusieurs étapes et progressivement pour assurer la fiabilité et la sécurité du réseau. En outre, pour passer à un réseau plus numérique, il est nécessaire d'assurer la cybersécurité du système et la protection de la vie privée de ses membres, ce qui nécessite des évaluations des risques, des précautions et des formations supplémentaires.

3. L'évolution du réseau à haut débit : comme mentionné précédemment, le *smart grid* est une idée dynamique qui se développe grâce à l'expansion et à l'évolution des nouvelles technologies. Ainsi, avec l'évolution rapide des technologies, il est constamment nécessaire de mener des travaux de R&D pour évaluer l'évolution des avantages et des coûts.

4. Les difficultés liées à l'acceptation publique : d'après une étude de PAPACHRISTOS (2015), l'effort cognitif nécessaire pour prendre en compte le retour d'information et/ou la complexité accrue de l'appareil et des informations, l'effort nécessaire pour changer les habitudes établies de longue date et les routines quotidiennes, les questions de protection de la vie privée et l'âge des occupants sont des facteurs qui compliquent l'acceptation de la technologie et ralentissent l'adoption de compteurs intelligents et, par conséquent, du *smart grid*.

5. Les défis réglementaires : le mode de fonctionnement différent du *smart grid* par rapport au réseau traditionnel crée plusieurs nouveaux obstacles pour les régulateurs, notamment les mesures dissuasives des services publics, l'inefficacité des prix et l'inertie des consommateurs, etc. [MAH et al., 2014] car les données générées dans le cadre d'un *smart grid* pourraient servir à rendre le système plus optimisé. Afin de faciliter l'adoption des *smart grid* et de répondre aux exigences nationales, européennes ou internationales (par exemple, les programmes de réduction de l'énergie et des émissions de gaz à effet de seere (GES) et les mesures d'atténuation du changement climatique), des politiques et initiatives gouvernementales doivent être mises en œuvre. Alors que le projet de *smart grid* passe de la phase de conception à la phase d'exécution, les défis associés aux régulateurs deviennent plus importants. Il est donc nécessaire d'analyser ces complications pour pouvoir envisager un meilleur développement du *smart grid*.

Ces défis procéduraux concernent les sujets suivants :

Parties prenantes :

Une des difficultés dans la mise en œuvre du *smart grid* est de traiter avec un trop grand nombre de parties prenantes qui ne contribuent pas toutes nécessairement à son développement. Par exemple, les consommateurs jouent un rôle important dans le fonctionnement du réseau et l'aident à atteindre ses objectifs, mais ils ne participent pas directement à la phase de réalisation et de financement. En outre, les nombreux acteurs tels que les responsables de service public, les opérateurs de systèmes, les prestataires de services, les acteurs de distribution et de transport d'électricité, etc. font partie d'un *smart grid* ce qui rend la coordination du projet plus compliquée. Par conséquent, il est nécessaire de définir à l'avance le rôle de chaque acteur et sa part de financement, ainsi que de désigner l'entité de coordination et également l'entité chargée de résoudre les désaccords et les problèmes entre les membres du réseau de manière légale.

Normalisation :

L'un des défis les plus importants est le manque de normes et d'interopérabilité dans le réseau électrique, qui décourage les parties prenantes à investir dans le projet [GLOBALDATA, 2013] et rend difficile l'expansion future du projet à plus grande échelle. Cependant, des normes basées sur le consensus peuvent permettre à tous les acteurs de participer au développement du réseau et rendre ses éléments plus compatibles et interopérables. Il peut être coûteux en temps et en argent au départ, restreindre certaines nouvelles technologies et réduire la flexibilité et la compétitivité du marché.

Données :

Comme mentionné précédemment, quelle que soit l'approche choisie (*top-down* ou *bottom-up*), le *smart grid* fonctionne comme une plate-forme de données ouvertes. En d'autres termes, l'une des caractéristiques fondamentales du *smart grid* est la transparence et la visibilité des données de consommation et de production d'ensemble du système générées par les consommateurs pour les consommateurs et les autorités. Un certain nombre de questions se pose concernant la transparence des données notamment :

- Quels sont les avantages de la plate-forme de données ouvertes ?

- Comment les données sont-elles collectées ?
- Comment les données sont-elles diffusées ?
- A qui les données sont-elles ouvertes ?
- Quelle est l'échelle du partage des données ? locale ? régionale ? nationale ?
- Qui est propriétaire des données ?
- Qui contrôle le système ?
- Combien de temps les données sont-elles conservées ?
- Quelles mesures doivent être prises pour protéger les données ?
- Les législations nécessaires ?

Avant de choisir une approche quelconque, il convient de répondre à ces questions de manière exhaustive. La gestion des données concerne tous les aspects de la collecte, de l'analyse, du stockage et de la fourniture de données aux utilisateurs et aux applications, y compris les questions d'identification des données, de validation, d'exactitude, de mise à jour, de marquage temporel, de cohérence entre les bases de données, etc. Les méthodes de gestion des données qui fonctionnent bien pour de petites quantités de données échouent souvent ou deviennent trop lourdes pour de grandes quantités de données et l'automatisation de la production et de la distribution génère beaucoup de données. C’est prioritaire de protéger la vie privée des consommateurs et d'empêcher l'utilisation non autorisée de leurs informations personnelles et des données relatives à la consommation d'énergie, telles que leur emplacement, leur équipement, leur temps d'absence, etc. La difficulté est de partager les données nécessaires avec d'autres membres de réseau sans mettre leur vie privée en danger.

Communication et commerce :

Pour équilibrer la production et la consommation d'électricité ainsi que l’offre et la demande, le *smart grid* opte pour plusieurs stratégies. Parmi celles-ci, il y a la possibilité pour les consommateurs de contribuer à la production d'électricité du réseau sous une forme distribuée (par exemple, production d'électricité par des panneaux solaires photovoltaïques). Quelle que soit l'approche choisie (*top-down* ou *bottom-up*), le *smart grid* permet l'échange d'électricité

entre les membres du réseau en leur permettant de vendre le surplus de leur production renouvelable.

Les questions sont les suivantes :

1) Est-il plus avantageux de permettre aux consommateurs d'échanger de l'électricité via une plateforme de réseau social supervisée par les autorités ou est-il plus avantageux et pratique de permettre à chaque consommateur d'alimenter le réseau en premier lieu ?

2) Quelles mesures devraient être prises pour contrôler la procédure et protéger la vie privée des consommateurs dans le cas d'une approche *bottom-up* ?

Grâce à la mise en œuvre d'un *smart grid* et au développement de technologies telles que la production décentralisée d'énergie renouvelable, les systèmes de stockage de l'énergie, les véhicules électriques et les communications bidirectionnelles [BAYRAM et al., 2014], le modèle commercial du marché de l'électricité a la possibilité de devenir un libre marché doté de capacités de négoce de l'électricité. Les membres du réseau ont la possibilité d'acheter et de vendre de l'électricité par le biais du réseau, indépendamment de leur emplacement. Cela soulève plusieurs questions :

- Est-il plus avantageux pour les consommateurs et/ou les fournisseurs d'échanger sans l'intervention des autorités ?
- Quels sont les avantages et les inconvénients de l'échange direct d'électricité entre les membres du réseau ? Ou est-il préférable pour chaque membre d'échanger des charges avec les autorités pour des raisons de sécurité et d'autres raisons (économiques, écologiques, etc.) ?
- La capacité des lignes existantes est-elle suffisante pour que les consommateurs puissent échanger de l'électricité ou cela peut-il entraîner une congestion des lignes ?
- Comment pouvons-nous définir les tarifs ? Les consommateurs peuvent-ils proposer des tarifs individuels ou doivent-ils suivre les tarifs définis par les autorités ?

- L'échange pose-t-il des problèmes de sécurité pour les consommateurs dans la mesure où ils peuvent partager leur temps d'occupation ou rend-il le marché plus concurrentiel ?

Comme mentionné précédemment, la visibilité des données rendue possible par les technologies de *smart grid* peut conduire à des décisions responsables de la part des ménages et/ou du service public dans le but de réduire la consommation. Le service public peut appliquer la même méthode de réduction aux ménages ayant un profil de charge similaire et les ménages peuvent entrer en concurrence avec les membres de leur communauté ayant un profil de consommation similaire pour réduire leur consommation globale. Le défi est que si tous les ménages similaires ont des solutions temporelles similaires et utilisent les mêmes techniques pour faire face à la charge de pointe, ils peuvent finalement réussir à réduire des pointes spécifiques. Mais le problème n'est toujours pas résolu car les pics existants sont simplement déplacés vers de nouveaux horaires au lieu d'être étalés dans le temps de 24 heures. Ce problème doit également être analysé avant la réalisation du *smart grid* afin de ne pas se contenter de transférer les pics à de nouveaux endroits mais aussi d'aplatir la courbe de charge de consommation.

Prix de l'énergie :

Les prix en temps réel devraient être définis par l'Etat en premier lieu et ensuite approuvés par l'organisme de régulation (la CRE). Plusieurs analyses devraient avoir lieu sur les données issues des compteurs intelligents pour permettre la définition des prix en temps réel conformément aux prix du marché de gros. En outre, si les consommateurs sont autorisés à échanger de l'énergie directement entre eux, la question est la suivante : 1) Qui devrait déterminer les prix ? 2) Est-il plus compétitif de permettre aux vendeurs de fixer leurs propres prix ? 3) Est-il plus pratique de maintenir le commerce de l'électricité comme un système monopolisé dans lequel les autorités ajustent les prix en fonction de la courbe de la demande ?

Véhicules électriques :

Le projet de *smart grid* est censé intégrer de nouvelles technologies telles que les véhicules électriques (VE) et les véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHR). Ces véhicules, pour pouvoir être rechargés à partir du *smart grid*, ont plusieurs exigences qui nécessitent soit la reconstruction du système de transport de l'électricité, soit la reconfiguration et l'adaptation des lignes de transmission. De plus, comme de nombreux utilisateurs de VE peuvent

recharger leur véhicule lorsqu'ils rentrent chez eux, les impacts de la charge de pointe à cette heure de la journée ne sont pas négligeables.

Par conséquent, un modèle complet devrait révéler les avantages et la faisabilité de chaque possibilité d'intégration de ces véhicules et étudier la gestion des pics de charge. En outre, le système de communication bidirectionnelle du *smart grid* permet non seulement de charger directement la batterie du VE à partir du réseau, mais aussi de décharger la charge et de la réinjecter dans le réseau aux heures de pointe pour compenser l'éventuelle pénurie d'électricité [ZHANG et al., 2011].

Ainsi, de nombreuses études introduisent le concept de « véhicule vers réseau » (*Vehicle to Grid - V2G*) comme solution pour atteindre les objectifs d'écrêtement des pointes [GALLARDO-LOZANO, 2012] et [KHEMAKHEM et al., 2017]. La technologie *V2G* permet non seulement aux VE de se connecter au réseau et de se recharger, mais aussi au réseau d'utiliser les VE comme stockage tampon temporaire dans les cas nécessaires et de les transformer en solutions de soutien provisoires.

Par conséquent, les utilisateurs de VE peuvent refuser d'alimenter le réseau et préférer garder leur charge pour des occasions imprévues. Bien que ce défi puisse être relevé grâce à des incitations financières, les parties législatives et réglementaires de l'idée de *V2G* et ses avantages et inconvénients doivent être étudiés attentivement et plusieurs questions doivent être résolues au préalable afin que les consommateurs et les services publics puissent bénéficier de cette possibilité :

1) Quand la recharge des VE doit-elle être autorisée afin de ne pas contribuer à l'augmentation de la demande de pointe ?

2) Comment les autorités peuvent-elles prendre des dispositions pour permettre le passage aux heures de pointe en utilisant la charge de la batterie des VE avec un minimum de perturbation pour les consommateurs (par exemple, dans les cas d'urgence, les consommateurs peuvent trouver leur véhicule déchargé) ?

3) Comment les autorités peuvent-elles tenir compte du nombre de VE et de leur temps de charge dans chaque quartier pour créer un nombre suffisant de stations de charge de manière efficace ?

2.4.2 Défis techniques

Il existe également certaines complications techniques qui empêchent le développement rapide du *smart grid.* Elles sont présentées ci-dessous :

1. La nécessité d'équipements et d'appareils communicants : pour optimiser le fonctionnement du *smart grid*, une nouvelle génération d'appareils électriques est nécessaire. Ces appareils doivent être capables de communiquer avec le réseau et de recevoir des commandes des occupants du logement et/ou des autorités. Les organismes de normalisation devraient s'entendre sur les réglementations applicables aux fabricants d'appareils électriques. De sorte que les nouvelles productions répondent aux exigences du *smart grid*. Le problème est que de nombreux appareils existent déjà dans le secteur résidentiel et qu'il faut de nombreuses années [en raison de la longue durée de vie des appareils], avant que les utilisateurs ne décident de les remplacer par de nouveaux appareils plus modernes. Le défi pour les fabricants est de produire des appareils à faible consommation d'énergie qui peuvent permettre d'économiser une quantité raisonnable d'argent par an sur les factures d'électricité des ménages. Ainsi, avec l'argent qu'ils peuvent économiser dans les prochaines années, ils peuvent acheter de nouveaux appareils. Les responsables de service public peuvent également concevoir des programmes d'incitation pour les ménages afin d'accélérer la pénétration des équipements communicants dans les habitations.

2. La confidentialité des informations et des données : il s'agit des médias et des protocoles de communication en cours de développement. Le *smart grid* devrait pouvoir s'adapter à ces nouvelles technologies tout en préservant l'interopérabilité et la sécurité du système. La principale différence entre le réseau traditionnel et le *smart grid* réside dans les systèmes et services d'information et de communication. Par conséquent, la cybersécurité est l'un des principaux défis de ce système pour prévenir les dommages intentionnels au réseau et l'exploitation non autorisée des données afin que la confidentialité, l'intégrité et la disponibilité soient assurées à tout moment. La protection et la surveillance de la vie privée sont une préoccupation importante dans un système interconnecté tel que le *smart grid* et les droits concernant les données doivent être définis à l'avance.

3. Applications et logiciels : les programmes, les algorithmes, les calculs et l'analyse des données – depuis les algorithmes de contrôle de base jusqu'au traitement de transactions particulièrement importantes – sont nécessaires au fonctionnement du *smart grid*. Ces applications sont compliquées et doivent être précises et actualisées afin de répondre avec rapidité aux nouveaux problèmes d'ingénierie.

Outre les principaux défis mentionnés ci-dessus, l'adoption d'un *smart grid* peut également avoir des conséquences négatives sur les points suivants :

1. L'automatisation et la perte d'emplois : bien que le *smart grid* crée des emplois dans les secteurs de la technologie, de l'informatique et de l'industrie, de nombreux services à la clientèle et consultants perdraient leur emploi en raison de l'automatisation et seraient remplacés par des applications et des systèmes automatisés. La main-d'œuvre des lignes de production, de transport ou de distribution actuelles serait également remplacée par des travailleurs formés qui sont initiés aux nouvelles technologies et possèdent des compétences plus techniques.

2. Les radiofréquences (RF) et les risques pour la santé : grâce aux ondes de radiofréquence, le centre de services énergétiques et le logement des consommateurs se communiquent de façon sans fils mais aussi par courant porteur de ligne. De nombreux centres de santé et de recherche débattent du danger d'une exposition continue à ces radiations [PERLINGIERI, 2011]. Cependant, comme le mentionne AMERICAN CANCER SOCIETY (2014), les compteurs communicants ne sont pas les seuls appareils qui émettent des radiofréquences dans le secteur résidentiel et il est compliqué de les considérer comme responsables des problèmes de santé et de définir leur niveau de risque. Il est donc nécessaire de poursuivre l'évaluation et l'analyse des risques dans ce domaine.

Les défis discutés peuvent affecter le fonctionnement du *smart grid*. Ses sujets doivent être abordés avant le début de toute opération et des règlements et des directives supplémentaires peuvent être ajoutés progressivement pendant ou après la mise en œuvre du *smart grid* afin d'éviter les problèmes futurs. De plus, afin d'accélérer la transition énergétique et l'adoption du *smart grid*, il est essentiel de relever ces défis de manière plus attentive et systématique.

De nombreuses questions ont été posées dans cette section auxquelles nous n'avons pas répondu. Cependant, ces questions permettent d'avoir une compréhension complète du sujet et d'expliquer la raison pour laquelle malgré toutes les avancées dans les études sur le sujet, dans de nombreux pays, le *smart grid* est toujours en phase R&D. Toutefois, l'étude présentée dans le chapitre suivant doit apporter des éléments de réponse à des questions concernant les données et la configuration *top-down/bottom-up*.

2.5 Architecture et modèle du *smart grid*

En raison de la complexité du *smart grid*, une seule technologie n'est pas suffisante pour son développement [SGIC, 2013]. Des technologies telles que celles de télécommunication, de surveillance, de contrôle, de gestion et de stockage sont nécessaires pour le fonctionnement de *smart grid*. De plus, cette complexité s'accroît constamment grâce aux progrès technologiques [USLAR et al., 2019]. Il est donc impératif de développer un modèle d'architecture de *smart grid* (*Smart Grid Architecture Model - SGAM*) global qui permet l'interopérabilité entre les différents systèmes et composants du réseau. Ce modèle conceptuel devrait clarifier le cadre général, identifier les complexités opérationnelles, trouver les acteurs et les parties prenantes, aider à sélectionner l'approche la plus appropriée et optimisée et enfin avoir la capacité de soutenir les futures modernisations du réseau et l'intégration des technologies de l'information et de la communication (TIC).

2.5.1 Architecture du *smart grid*

La première étape avant de choisir une configuration *top-down* ou *bottom-up* pour un *smart grid*, consiste à examiner les architectures existantes développées par les organismes de normalisation et leurs comités techniques (CT) et à identifier leurs méthodes et leurs points de vue sur le sujet.

L'une des premières définitions du *smart grid* est celle de FAZA et al. (2009) qui le définissent comme un système cyber-physique composé d'un niveau physique et d'un réseau de systèmes intégrés pour des raisons de cyber-contrôle.

Le *National Institute of Standards and Technology* (*NIST*) (2014) a développé initialement une architecture de *smart grid* à partir d'un des premiers modèles conceptuels qui est la version détaillée de la même idée. Ce modèle a été mis à jour en 2014 (Figure 2-4), couvrant tous les aspects du réseau, de la production à la consommation.

Réf : Traduit de la version 3.0 NIST (2014)

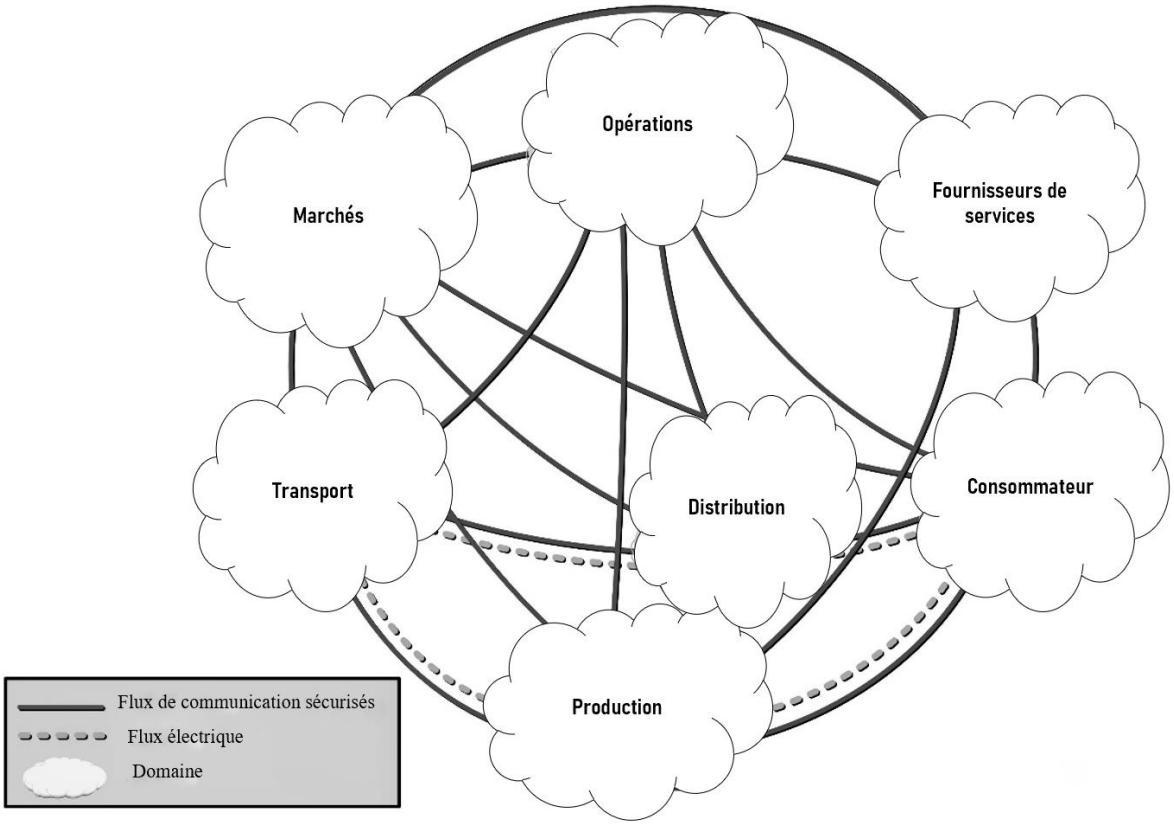


Figure 2-4 : Le modèle d'architecture de *smart grid* avec sept domaines

Le modèle est composé de sept domaines ci-dessous :

1. Consommateur : il prend en compte les éventuels besoins fonctionnels d'un client résidentiel ou commercial du *smart grid* (tels que la production et le stockage d'énergie, la surveillance et la gestion de la consommation).

2. Marché : il examine les exigences fonctionnelles et opérationnelles des opérateurs et des acteurs du marché de l'électricité et donne la possibilité d'équilibrer la production et la consommation.

3. Fournisseur de services : il comprend les producteurs d'électricité, les distributeurs, les organismes de régulation, les banques et les bureaux de crédit, etc. qui répondent aux exigences fonctionnelles des services publics ou des organisations associées.

4. Opérations : il comprend les exigences de gestion de l'exploitation du réseau.

5. Génération de masse : il comprend les besoins des entités de production d'électricité pour un marché en gros.

6. Transmission : il contient les exigences et les fonctions permettant de fournir de l'électricité à partir de longues distances (comme un gestionnaire de transport régional ou un gestionnaire de réseau indépendant).

7. Distribution : il permet la distribution et la gestion de l'électricité à destination et en provenance des consommateurs. Elle permet notamment l'intégration des Véhicules Electriques (VE) et des Véhicules Electriques Hybrides Rechargeables (VEHR) ainsi que des possibilités de stockage.

Ce modèle a été créé en utilisant l'approche *top-down* à partir de l'examen respectivement de la législation énergétique et des cas d'utilisation de l'industrie. Par conséquent, ce modèle, en passant en revue toutes les lois et tous les cas d'utilisation, révèle le nombre total de nouvelles exigences professionnelles dans chaque domaine, ce qui est l'un des avantages de ce modèle. Un autre avantage est que l'utilisation d'une architecture orientée vers les services permet d'offrir des services à plusieurs niveaux car ils requièrent des compétences et des expertises similaires. Ainsi, les services publics peuvent combiner des fonctions proches telles que la distribution et la transmission et créer une infrastructure unique qui peut gérer les deux de manière plus efficace.

Cependant, l'un des problèmes de ce modèle est qu' il ne prend pas directement en compte l'intégration des Ressources Energétiques Distribuées (RED), qui est une nécessité en raison des problèmes environnementaux et des exigences écologiques telle que celle de l'UE [EUR-LEX (directive 2004/8/CE), 2004]. Par ailleurs, il ne permet pas aux consommateurs d'échanger de l'électricité entre eux ou avec le responsable de service public, ce qui est l'un des principaux objectifs du *smart grid* et de sa distinction par rapport au réseau traditionnel.

Pour résoudre ces problèmes, le SCE-CISCO-IBM (2011) a ajouté deux niveaux potentiels supplémentaires en tant qu'extensions du modèle conceptuel original du (NIST) (2014) :

1. Interaction : qui permet une meilleure relation entre les consommateurs et les autorités pour assurer l'équilibre de l'offre et de la demande par la RD et les RED ;

2. Échange : qui comprend la visibilité des informations et facilite la communication et la gestion des données.

Ces deux niveaux mettent l'accent sur le rôle des consommateurs dans l'optimisation de la consommation et de la production d'électricité et aident les responsables de service public à bénéficier de la participation active des consommateurs à la gestion du réseau.

Par la suite, le *GridWise Architecture Council* (GWAC) (2011) a proposé une architecture à huit niveaux dans laquelle les fonctions les plus simples sont assurées par les niveaux inférieurs. Les niveaux supérieurs sont responsables des tâches plus complexes. Le défi de ce modèle est que plus les fonctions deviennent complexes, plus il faut de niveaux. Ce modèle met l'accent sur l'importance des alignements organisationnels (de gestion), y compris les activités et les politiques, en plus des aspects informationnels et techniques. Cependant, l'avantage est qu'en établissant l'interopérabilité dans chaque niveau, le modèle permet une flexibilité dans les autres niveaux et favorise une communication facile entre elles. Ce modèle comporte trois catégories d'interopérabilité : organisationnelle (y compris la politique économique/réglementaire, les objectifs et les procédures commerciaux), informationnelle (y compris le contexte commercial et la compréhension sémantique) et technique (y compris l'interopérabilité syntaxique/réseau et la connectivité de base) (Figure 2-5).

Réf : Traduit de GWAC (2011)

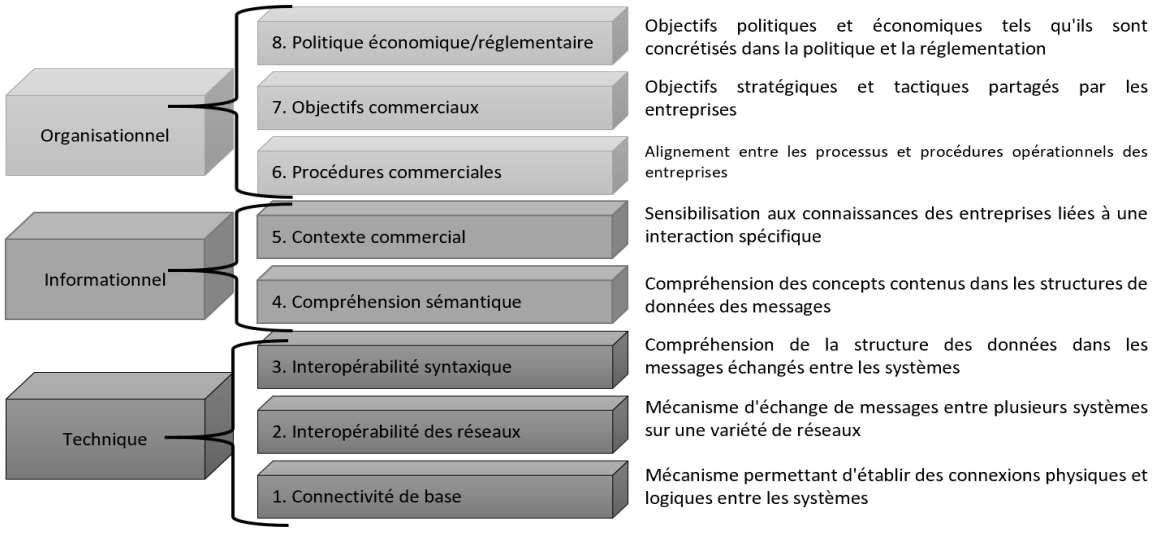


Figure 2-5 : Un modèle d'architecture de *smart grid* à huit niveaux

Le CEN-CENELEC-ETSI (Comité européen de normalisation - Comité européen de normalisation électrotechnique - Institut européen des normes de télécommunication) (2012) a défini pour la première fois cinq niveaux d'interopérabilité pour le *smart grid* (Figure 2-6). Ils sont composés de niveaux : d'activité, de fonction, d'information, de communication et de composants.

Réf : Traduit de CEN-CENELEC-ETSI (2012)

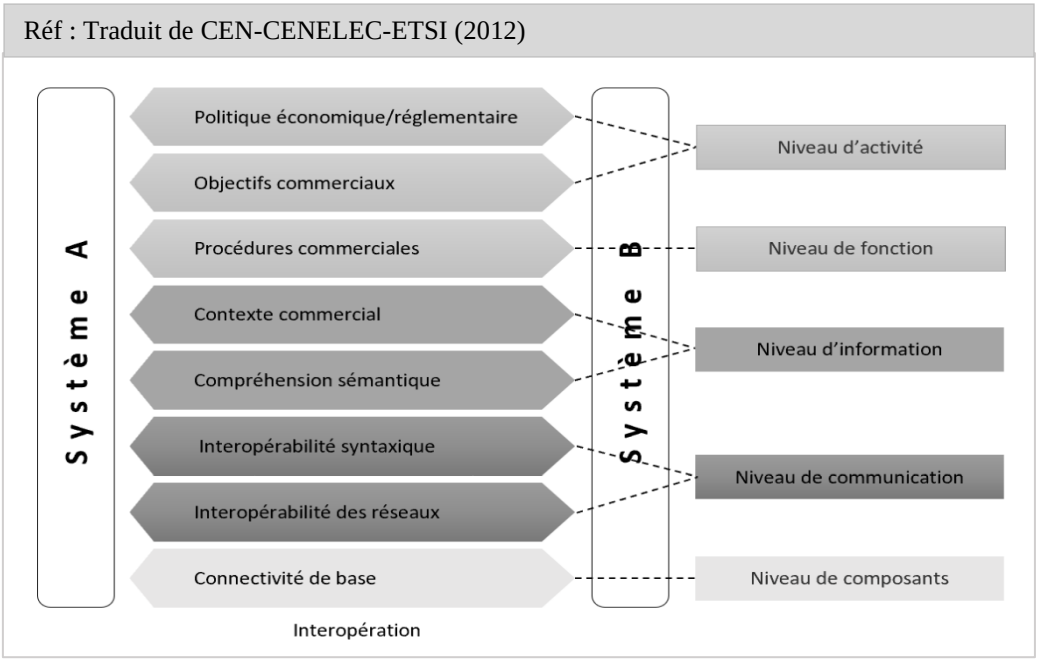


Figure 2-6: Un modèle primaire d'interopérabilité du *smart grid* à cinq niveaux

En ajoutant deux dimensions supplémentaires, le modèle du CEN-CENELEC-ETSI (2012) a finalement été présenté en prenant en considération différents domaines (production, transport, distribution, RED et locaux des consommateurs) et différentes zones (processus, champ, station, exploitation, entreprise et marché) (Figure 2-7). Les domaines sont composés d'éléments physiques de la grille et les zones sont constituées d'aspects de gestion.

Réf : Traduit de CEN-CENELEC-ETSI (2012)

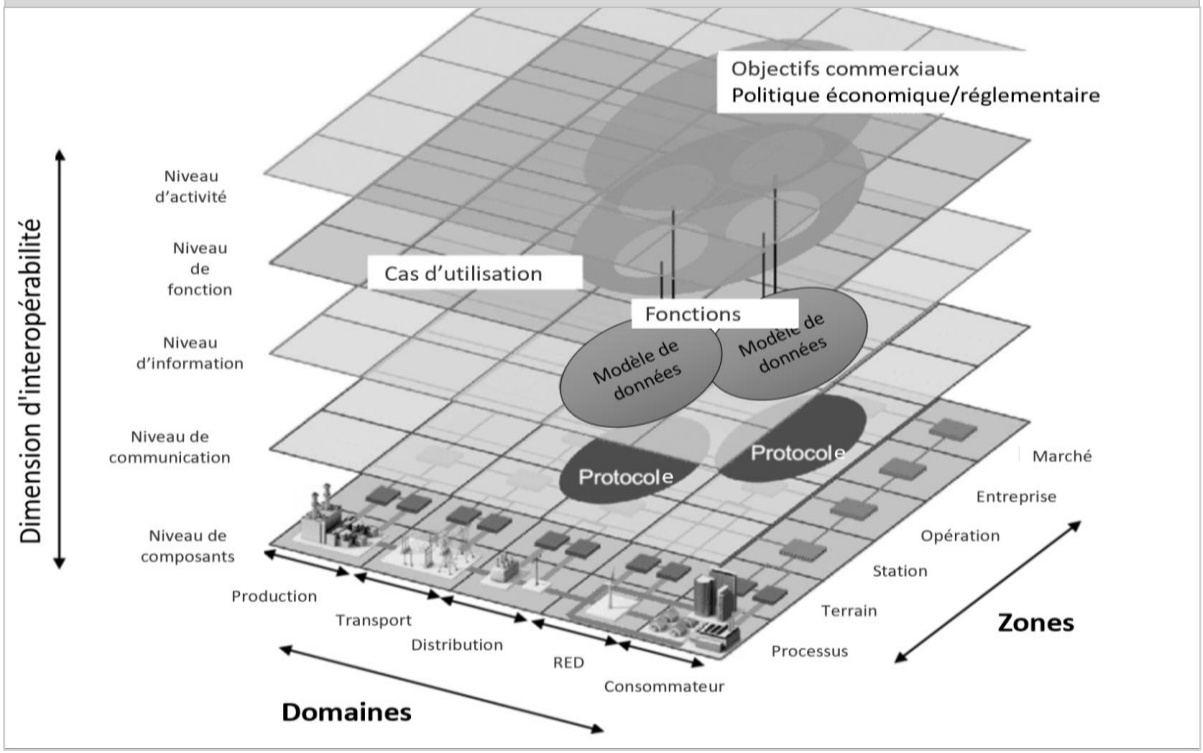


Figure 2-7 : Modèle final d'architecture de *smart grid* à cinq niveaux

Contrairement à certains modèles précédents, le modèle du CEN-CENELEC-ETSI (2012) prend en considération les ressources énergétiques renouvelables et distribuées. Cependant, dans ce modèle, les sujets superposés créent des actions transversales (par exemple, la question relative aux consommateurs et la procédure se trouvent dans le domaine et la zone). Ainsi, pour la question de la sécurité par exemple, le risque doit être étudié sur chaque domaine de chaque zone sur tous les niveaux, c'est-à-dire sur chaque cellule du modèle. Cela complique toutes les analyses.

AL-OMAR et al (2012) proposent également une architecture à trois niveaux pour le *smart grid* basée sur le modèle du *NIST* (2014) : (Figure 2-8). Dans ce modèle, les trois couches sont composées de :

1) la couche technologie de l'information ;

2) la couche communication ; et

3) la couche système électrique et énergétique.

Réf : Traduit de l'article d'Omar et al. (2012)

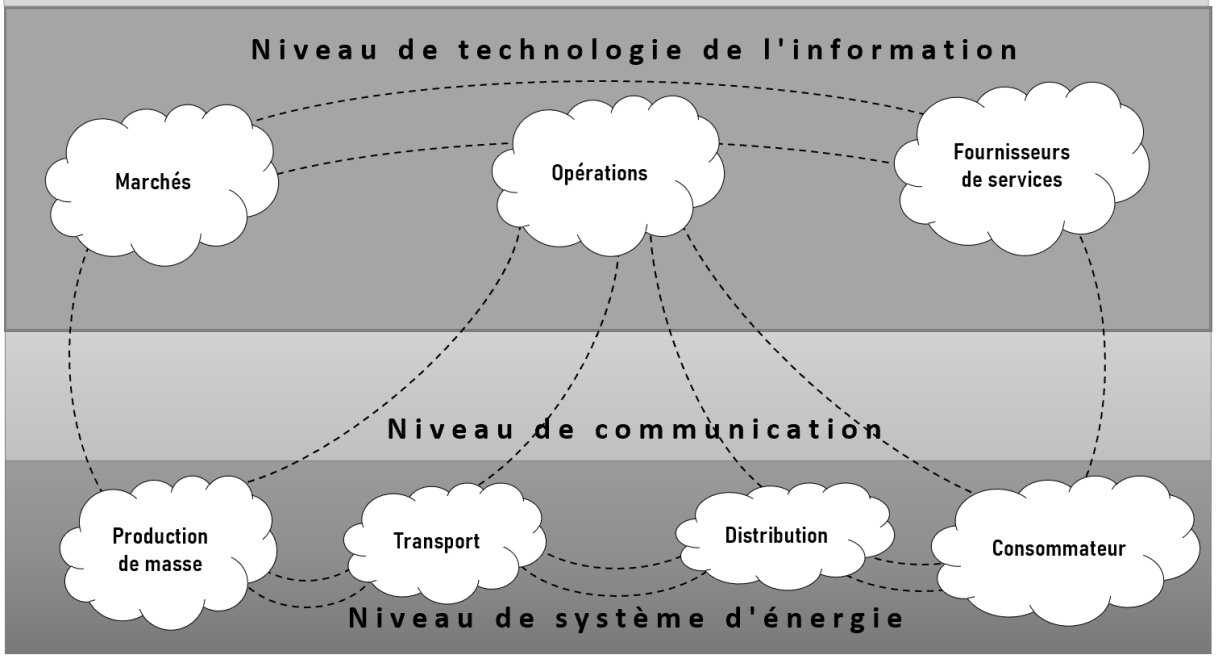


Figure 2-8 : Un modèle d'architecture de *smart grid* à trois niveaux

Dans ce modèle le *smart grid* est présenté comme trois niveaux de TIC qui s'interconnectent et se chevauchent : 1) l'information ; 2) la communication ; et 3) le système d'énergie.

Afin de faciliter la compréhension et de l'examiner de trois points de vue distincts selon les disciplines (respectivement génie électrique, informatique, urbanisme et sciences sociales), le modèle d'architecture de *smart grid* dans cette recherche est défini comme trois niveaux de :

1) Physique (composants du *grid*) ;

2) Gestion (dorsale Internet du *grid* et systèmes de gestion) ; et

3) Communication (réseaux sociaux et communications).

Ce dernier niveau permet la participation des consommateurs et des organisations et permet la communication entre eux et constitue le point central de cette recherche. Dans ce modèle, chaque niveau contient des applications et les acteurs sont reliés par des associations au moyen d'interfaces (Figure 2-9).

KAVASSERI (2013) appelle également le *smart grid* « le système énergétique socio-cyber-physique » et discute des défis concernant le déploiement de ce système et de l'importance des études multidisciplinaires (systèmes d'énergie électrique, informatique, cryptographie, psychologie comportementale, etc.) pour la modélisation du *smart grid*.

Réf : Sur la base des architectures précédentes

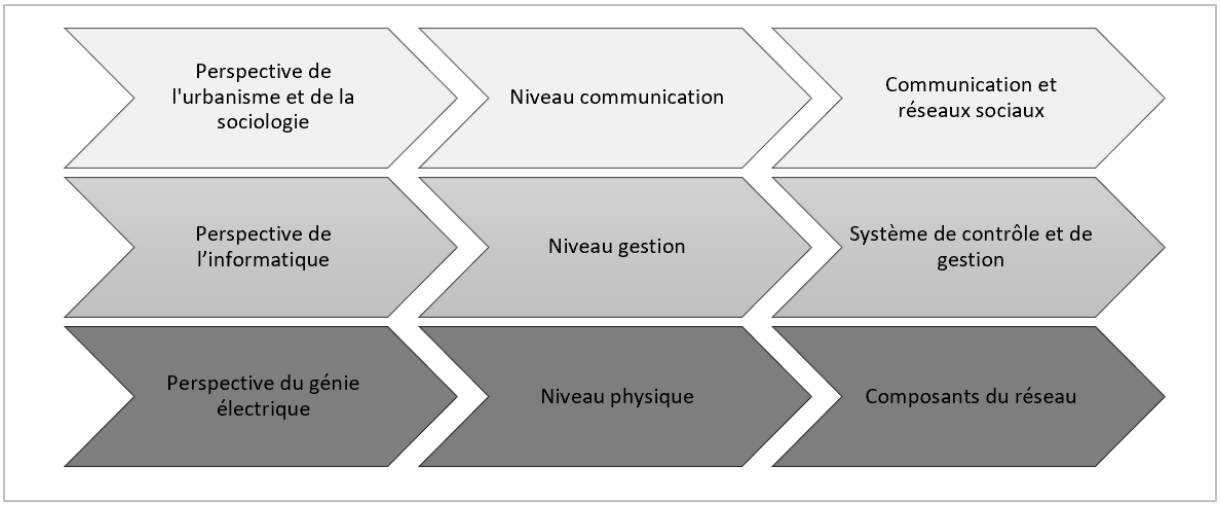


Figure 2-9 : Modèle simplifié d'architecture de *smart grid* à trois niveaux

Notre architecture à trois niveaux superposés est une mise à jour du concept de base de FAZA et al. (2009). Elle tient compte des principes du modèle du *NIST* (2014). Elle met en évidence l'importance de la communication et de la gestion comme dans les modèles précédents

[GWAC, 2011] et finalement rend possible l'intégration de la production renouvelable contrairement aux modèles primaires. Ce modèle vise à avoir les caractéristiques suivantes :

- Interopérabilité (localisation et connexion)
- Flexibilité (extensibilité et évolutivité)
- Visibilité (ouverture et pair-à-pair)
- Facilité d'utilisation (rapport coût-efficacité et efficience)
- Résistance (moins de vulnérabilité en termes de risque, sécurité et vie privée).
- Intégrité (normalisation et universalité)

Les trois niveaux considérés du modèle d'architecture de *smart grid* proposé dans ce travail de recherche sont expliquées plus en détail ci-dessous :

Niveau physique :

Tous les composants physiques du *grid* et les participants au *smart grid* appartiennent à ce niveau. Cela inclut les nouvelles technologies et les nouveaux équipements en plus du réseau électrique traditionnel notamment : les systèmes de production d'électricité, les équipements de Ressources Energétiques Distribuées (RED), les systèmes de transport d'électricité, l'infrastructure physique (par exemple, connexions de communication câblées ou sans fil, routeurs, commutateurs et serveurs), les équipements de distribution, les sous-stations, les dispositifs de contrôle (par exemple, ordinateurs et télécommandes), les dispositifs de stockage d'énergie (par exemple, batteries ou autres systèmes de stockage), les véhicules électriques (VE), les véhicules électriques hybrides rechargeables (VEHR), les chargeurs, les équipements de communication (par exemple, compteurs ou autres infrastructures communicantes), les bâtiments, leurs équipements électriques (par exemple, chauffage et appareils électriques domestiques/industriels) et les consommateurs et/ou producteurs individuels (Figure 2-10).

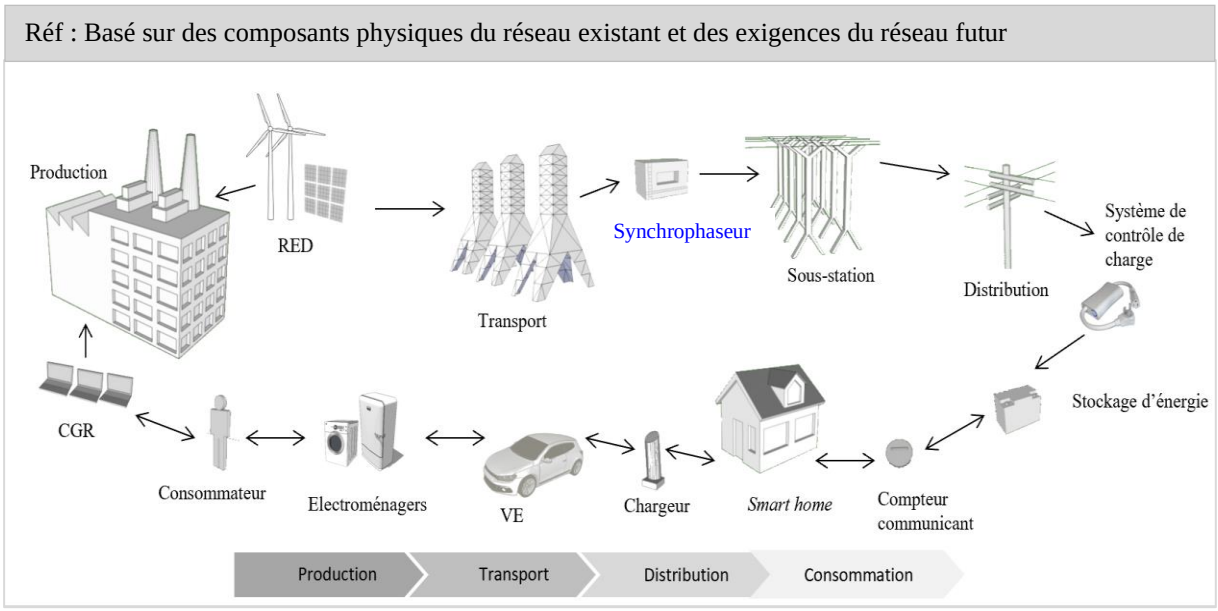


Figure 2-10 : Niveau physique du modèle d'architecture de *smart grid* proposé

Niveau gestion :

Le deuxième niveau du modèle d'architecture de *smart grid* est constitué de systèmes de contrôle des communications et de technologies de gestion. Ce niveau vient s'ajouter au réseau électrique traditionnel et doit soutenir les opérations des infrastructures TIC existantes, gérer les complexités de l'infrastructure et accueillir de nouvelles applications.

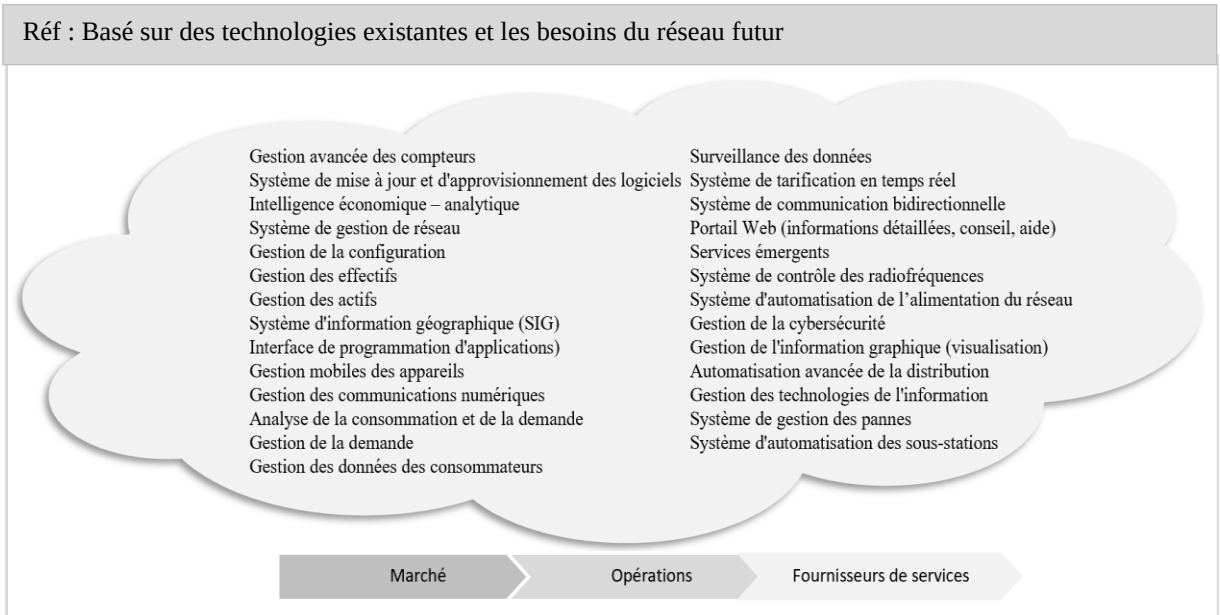


Figure 2-11 : Niveau gestion du modèle d'architecture de *smart grid* proposé

Le niveau gestion de l'architecture de *smart grid*, comprend diverses plates-formes informatiques, des systèmes opérationnels, des applications et des services commerciaux et permet d'exécuter diverses fonctions automatisées en utilisant les nouvelles TIC (Figure 2-11).

Le défi concernant cette couche est qu'elle doit être résistante aux cyberattaques et aux attaques physiques. La sécurité dans cette couche concerne la protection des données numériques. Certaines des mesures de sécurité et des applications visant à protéger les SG, leurs informations et leurs utilisateurs mentionnées par VERIZON ENTREPRISE (2013) sont les suivantes : 1) Le cryptage ; 2)L' authentification ; 3) Le contrôle de la sécurité des applications et les techniques de validation des données ; 4) Les correctifs de sécurité ; et 5) La suppression des logiciels malveillants.

Niveau communication :

L'électricité n'est pas stockable en grandes quantités en tant que telle et sans être convertie en une autre forme d'énergie stockable [ERDMANN, 2015]. Les services publics doivent donc prévoir la quantité d'électricité nécessaire et produire, importer et/ou stocker suffisamment pour répondre à cette demande. Ceci détermine l'importance du troisième niveau du modèle de l'architecture de *smart grid* qui est dédié à la communication et qui permet aux consommateurs-producteurs ou aux « Prosommateurs » d'être connectés entre eux et/ou aux autorités (Figure 2-12). Une combinaison de modèles de réseaux sociaux traditionnels et de concepts d'Architecture Orientée Services (AOS) peut conduire à la création de cette couche [SKOPIK, 2014] qui rend la production et la consommation optimisées.

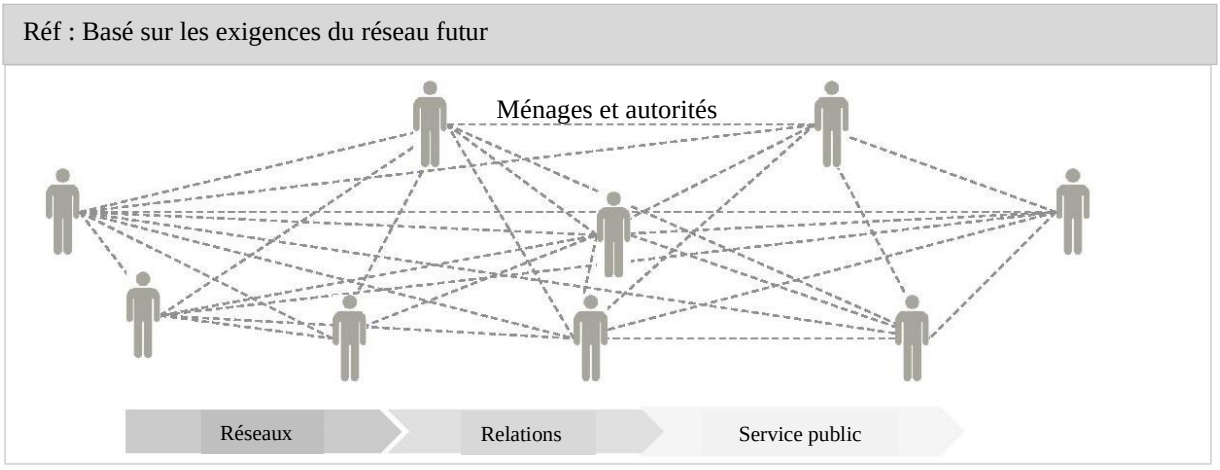


Figure 2-12 : Niveau communication du modèle d'architecture de *smart grid* proposé

De nombreuses questions et défis liés à la mise en œuvre du *smart grid* - déjà abordés dans la section précédente - sont directement liés à ce niveau et nécessitent davantage d'études et d'analyses. Ces préoccupations concernent les sujets suivants que nous ne développerons pas dans cette thèse : 1) La visibilité des données générées par des consommateurs ; 2) Le

marketing et le marché de l'électricité ; 3) La gestion de la pointe de la consommation électrique ; et 4) La vie privée des consommateurs.

2.5.2 Modèle du *smart grid*

Afin de développer le *smart grid* et de voir comment il contribue à la gestion de la demande dans le secteur résidentiel, nous pouvons simuler la consommation/demande d'électricité résidentielle. Pour ce faire, on doit comprendre les caractéristiques de consommation des bâtiments dans une zone sélectionnée (ville ou quartier). Comme les caractéristiques de la consommation et de la production d'électricité dans le secteur résidentiel sont complexes et interdépendantes, il est impératif d'utiliser des modèles complets pour évaluer les impacts socio-économiques de l'adoption du *smart grid* et pour trouver son échelle de mise en œuvre optimale.

En l'absence de compteurs individuels dans les bâtiments collectifs, il peut être particulièrement compliqué de trouver la relation entre la consommation d'énergie de chaque ménage et ses dépenses énergétiques réelles [LEVINSON & NIEMANN, 2004]. Même avec des compteurs individuels et des informations sur la facturation des services publics pour tous les logements, il est toujours utile de créer un modèle. Sans informations supplémentaires sur les factures, il est difficile d'établir une corrélation entre les logements et leurs occupants. Cette difficulté est aussi en raison de la grande diversité des logements et des caractéristiques de leurs occupants. De plus, certaines études montrent que la variation temporelle de la consommation d'électricité est trop importante pour qu'elle puisse être indiquée sur une facture mensuelle [MASIELLO & PARKER, 1992], comme dans le cas des appareils électroménagers qui sont utilisés une ou deux fois par an.

L'autre défi concernant les factures est celui des loyers tout compris (loyer de l'appartement, factures d'électricité, de gaz, de téléphone, d'internet et des charges tout compris) ou des factures forfaitaires (eau, électricité et gaz compris) qui rendent difficile pour les ménages de réaliser leur consommation réelle d'électricité et plus compliquée pour un usage final spécifique de l'électricité comme les appareils électriques. Dans une enquête de RISCH & SALMON (2014), environ 44 % des ménages utilisant le même type de système de chauffage n'ont pas pu indiquer leurs dépenses énergétiques réelles dans l'enquête parce que leur facture d'énergie était combinée à d'autres charges communes (par exemple, gaz, dépenses pour l'ascenseur, nettoyage des espaces communs ou jardinage). Bien qu'il soit possible d'installer

des sous-compteurs pour chaque ménage afin d'analyser leur consommation ou leur production détaillée, en raison de problèmes de confidentialité concernant les occupants et des coûts de collecte des données, la modélisation semble être une solution plus accessible. De plus, la modélisation permet d'effectuer des analyses et des simulations supplémentaires sur le modèle créé.

Comme les logements ne sont pas homogènes et que le comportement de leurs occupants face à la consommation et production d'énergie est assez imprévisible, estimer la consommation et/ou la production totale d'électricité d'un territoire et optimiser l'efficacité énergétique de chaque logement est très compliqué et ne peut être réalisé qu'en étudiant la combinaison de plusieurs variables telles que les informations sur les bâtiments, les conditions climatiques et environnementales et l'analyse comportementale des occupants. Pour identifier les meilleures stratégies d'efficacité énergétique, il est important de savoir comment l'interaction entre ces variables, y compris les technologies d'efficacité énergétique, les caractéristiques sociodémographiques, les conditions environnementales et le comportement humain, affecte les décisions individuelles concernant la consommation et/ou la production et crée des modèles associés.

Les techniques de modélisation de la consommation électrique peuvent être utilisées à différentes échelles. À des macro-échelles (régionales ou nationales), les modèles énergétiques peuvent servir à déterminer les besoins globaux d'approvisionnement en énergie. À micro-échelle, la modélisation est utile pour ajouter un logement individuel au *smart grid* ou pour analyser l'évolution de la consommation d'électricité en ajoutant ou en supprimant des technologies dans un seul logement. Les modèles électriques sont un sujet d'intérêt pour de nombreuses parties prenantes, notamment les services publics, les consommateurs, les décideurs politiques et les fabricants d'appareils [CARLSON et al., 2013] et peuvent aider à la prise de décision et à la création de politiques et de codes de construction. Ils peuvent être utilisés pour définir les priorités des exigences de la politique énergétique de l'UE. Ils peuvent également faciliter l'adoption de technologies et la quantification de l'offre. Ces modèles peuvent être utiles aux gestionnaires de réseaux de transport d'électricité pour étudier la Réponse à la Demande (RD), équilibrer l'offre et la demande en temps [presque] réel et définir les transformateurs et la taille du stockage ; aux fabricants d'appareils pour concevoir des appareils connectés ; aux gestionnaires de réseaux de distribution pour simuler le réseau de distribution, différencier les tarifs et gérer les véhicules électriques et aux agrégateurs pour offrir des services de RD [ARDAKANIAN et al., 2011 ; TORRITI, 2014].

Un modèle énergétique reflète les changements structurels de la demande énergétique d'un pays à moyen et long terme. Cela se fait au moyen d'une analyse détaillée des caractéristiques sociales, économiques et technologiques du pays concerné. Cette approche prend notamment en compte l'évolution des besoins sociaux de la population, tels que la demande de chauffage, d'éclairage, de transport, de climatisation, et ce en fonction de la répartition de la population entre zones urbaines et rurales ; les politiques industrielles du pays (comme le développement axé sur certains types d'industries) ; et les politiques générales du pays en matière de transport et de logement par exemple. Elle tient aussi compte du développement technologique ; et l'évolution des marchés potentiels de chaque forme d'énergie finale telle que l'électricité, les combustibles fossiles et le solaire [AIEA ,2006].

Cependant, quelles que soient l'échelle et les techniques de modélisation, il est assez compliqué de créer un modèle de consommation/production d'électricité pour les raisons suivantes :

1. Les variables déterminantes sont nombreuses : un grand nombre de variables telles que les variables individuelles, sociales, économiques et techniques ont des effets sur la consommation d'électricité.

2. Le contexte urbain est hétérogène : sur un territoire, les caractéristiques physiques des bâtiments (telles que taille, géométrie, enveloppe thermique, isolation, matériaux) varient.

3. Le comportement humain est peu prévisible : l'attitude des personnes vis-à-vis de la consommation et de la production d'énergie est complexe et difficile à analyser et constitue l'un des facteurs déterminants à tenir en compte. Ce comportement est également influencé par les connaissances individuelles, l'éducation, les normes de la société, les traditions, les coutumes, le degré d'acceptation du public et de flexibilité sociale, la résistance au changement et les conditions de possibilité d'une cohérence idéologique.

4. Il est difficile de prévoir la température : les différentes zones climatiques et caractéristiques environnementales peuvent nécessiter des équipements électriques différents, créer des modèles de consommation et des capacités de production variés et comme ces caractéristiques sont difficiles à prévoir à long terme en raison du changement climatique, cela rend la modélisation compliquée.

5. L'évolution technologique est rapide : le développement de l'innovation et la pénétration du marché peuvent modifier fréquemment l'équipement de l'usage final. Par conséquent, le modèle énergétique peut avoir besoin d'être constamment mis à jour ou modifié.

6. L'effet rebond peut se produire lors de la prise de mesures d'efficacité énergétique [GILLINGHAM et al., 2014] : les améliorations technologiques en matière d'économie d'énergie peuvent entraîner une plus grande consommation d'énergie (par exemple, certaines consommations des appareils en veille). Elles peuvent aussi rendre un appareil énergivore moins consommateur et par conséquent moins coûteux à utiliser, ce qui peut avoir une influence sur le comportement des consommateurs et conduire à des utilisations plus fréquentes.

7. Il est difficile d'élaborer de futurs scénarios socio-économiques et démographiques : pour créer un modèle durable, il convient de visualiser les futurs changements possibles. La transformation de la structure des ménages, le changement du nombre total de la population et l'augmentation ou la diminution du produit intérieur brut (PIB) annuel sont dus à plusieurs raisons (situations économiques, changements politiques, catastrophes naturelles, guerres, crise sanitaire et autres événements imprévisibles). Les facteurs sous-jacents à ces causes doivent être évalués pour permettre une meilleure estimation de l'avenir. Toutefois, les facteurs imprévisibles peuvent également contribuer à des changements dans le temps et sont difficiles à prendre en considération.

8. Les collectivités locales jouent un rôle important : elles ont une grande influence et une grande responsabilité dans le développement durable de leurs communautés locales et doivent planifier des objectifs à long terme et mettre en œuvre une politique publique pour augmenter l'optimisation du système énergétique. Leur négligence dans la coopération aux études de consommation d'énergie, dans l'établissement de politiques éducatives, dans la promotion de mesures d'efficacité énergétique, dans la description de ce que ces mesures feront (par exemple, déploiement du projet de *smart grid* et encouragement des ménages à participer à des projets expérimentaux) ou dans l'affectation du budget au développement de ces projets peut retarder le processus de modélisation. Mais le niveau de compétence et l'organisation de ces organismes ne sont pas pris en compte dans les études.

9. Il manque des modèles de référence adaptés et les informations nécessaires : de nombreuses études se concentrent sur la mise à niveau des systèmes de chauffage ou climatisation et production d'eau chaude et/ou sur la modernisation de l'enveloppe des bâtiments pour réduire la consommation globale d'électricité et/ou la demande de pointe. Cependant, peu d'études se sont concentrées sur les usages finaux désagrégés dans la consommation d'électricité résidentielle [DIAWUO, 2019] ou la consommation résidentielle et commerciale [MACMACKIN, 2019]. Si SAKAH et al. (2019) analysent une combinaison des usages finaux, dont certains appareils domestiques, nous n'avons trouvé aucune étude exclusivement sur l'utilisation des appareils électriques domestiques et son impact sur la consommation et la demande. Le manque d'informations et de modèles concernant les sujets suivants concernant la consommation et la demande électrique rend la modélisation plus compliquée :

    a) La consommation/production désagrégée en temps réel des ménages (ce que les gens font en termes de consommation d'énergie à tout moment de la journée/année et de quels appareils ou systèmes ils sont équipés) ;

    b) La relation entre les membres du *grid* (producteurs, fournisseurs et consommateurs) ;

    c) Le degré de vérité dans les réponses aux questionnaires (les gens disent qu'ils consomment moins pour ne pas laisser une mauvaise image sociale. Par exemple, ils peuvent rarement répondre par l'affirmative à une question leur demandant s'ils laissent les lumières ou les climatisations allumées en quittant leur résidence) ; et

    d) La consommation des logements secondaires (maisons de week-end, maisons de vacances, pied-à-terre, etc.).

Malgré toutes les complications, il est important de modéliser la charge électrique et de mener des analyses pour mieux comprendre les courbes de charge afin de trouver des solutions pour les aplatir par la suite. Dans la prochaine partie, nous ferons une analyse énergétique et nous explorerons différentes techniques pour la réaliser.

Section 2 : Partie expérimentale

Chapitre 3 : Simulation de consommation électrique pour le *smart grid*

Maintenant que le modèle d'architecture du *smart grid* a été développé pour fournir un cadre pour son application, nous avons besoin de fournir des modèles, méthodes et outils permettant de modéliser le système énergétique actuel. Cette simulation joue un rôle indispensable non seulement dans la gestion de l'énergie, comme la planification adéquate et l'investissement dans le développement d'infrastructures, et l'exploitation du réseau mais également dans le choix des mesures d'efficacité énergétique les plus adaptées.

3.1 Modèles pour l'analyse de consommation électrique : *top-down* et *bottom-up*

Le fournisseur d'électricité mesure la consommation d'électricité de chaque ménage. Par conséquent, les informations sur la consommation totale pour chaque période sont disponibles en analysant les factures d'électricité, comme indiqué par GENJO et al. (2005) et SANQUIST et al. (2012) dans leurs études. Mais pour accéder à la consommation désagrégée comme mentionné dans le chapitre 3, la modélisation est une approche optimisée. Différentes méthodes de modélisation peuvent être en pratique afin d'estimer la consommation électrique résidentielle selon les deux approches : « *top-down* » et « *bottom-up* ».

Ces techniques sont choisies en fonction des résultats requis, du niveau de la collecte des données et de leur disponibilité [SWAN & UGURSAL, 2009]. Les modèles *top-down* sont basés sur une estimation de la consommation électrique totale du secteur résidentiel et d'autres variables pertinentes (telle que les indicateurs macro-économiques) et attribuent cette consommation aux caractéristiques de l'ensemble de ce secteur. En revanche, les modèles *bottom-up* calculent la consommation électrique de maisons individuelles ou de groupes de logements (lotissements, parc de logements ou grand ensemble) et extrapolent ensuite ces résultats pour représenter la région ou le pays.

3.1.1 Consommation d'électricité *top-down*

Les modèles *top-down* utilisent des valeurs antérieures et agrégées concernant la consommation électrique et prennent en compte des changements ou des transitions en cours à

long terme. Ils modulent la consommation énergétique du parc de logements en fonction de variables très agrégées comme [SWAN & UGURSAL, 2009] : 1) les indicateurs macro-économiques tels que le produit intérieur brut (PIB), le taux de chômage, le taux d'inflation, les prix de l'énergie et les revenus ; 2) les indicateurs démographiques tels que le taux de croissance de la population, les taux de construction/démolition de logements, le nombre d'unités dans les bâtiments ; 3) les facteurs technologiques tels que le taux de pénétration du marché, les ventes d'appareils électroménagers, l'importation et l'exportation d'équipements ; et 4) des indicateurs divers tels que les conditions climatiques générales.

Dans le modèle économétrique *top-down*, les coefficients des variables sont interprétés pour créer la consommation moyenne d'électricité des appareils électriques. Les estimations de la consommation moyenne d'électricité pour chaque appareil sont multipliées par le nombre des ménages qui en possèdent. L'avantage de cette approche est sa simplicité due à l'utilisation des valeurs antérieures et des données disponibles. Elle peut avoir comme inconvénient le fait qu'elle est incapable d'identifier et cibler rapidement des volets de de réduction de la consommation d'énergie. Son inconvénient majeur est le fait que cette approche a une durée de vie limitée valable pendant un certain temps en raison de l'évolution des facteurs économiques et démographiques. Ce modèle doit donc être mis à jour régulièrement. Il n'est donc pas la meilleure approche pour l'élaboration des politiques en raison de sa difficulté d'adaptation aux nouvelles technologies. Il y a aussi le problème de l'hétéroscédasticité qui s'explique par le fait que, les ménages peuvent modifier leur stock d'équipements consommateurs d'énergie en remplaçant les vieux appareils par des appareils plus efficaces et en ajoutant de nouvelles technologies pour plus de confort. L'utilisation à long terme du modèle est donc plus compliquée. L'autre inconvénient est que le modèle ne peut pas faire une estimation précise de la consommation d'énergie. En effet, il existe plusieurs modèles de chaque appareil électrique avec des spécifications différentes et cette différence n'est pas pris en compte dans le processus de modélisation.

Cependant, cette approche a plusieurs avantages, principalement le fait qu'elle nécessite peu de détails et d'informations sur la consommation réelle et qu'elle est basée sur des indicateurs macroéconomiques tels que le PIB et la consommation totale. Elle est donc facile à développer. En outre, les paramètres nécessaires pour estimer la consommation des usages finaux sont pris en compte directement, sans être impactés par le comportement des usagers et les aspects techniques [LARSEN & NESBAKKEN, 2004]. Ainsi, les données requises sont gérables, limitées aux facteurs socio-économiques et à la disponibilité des appareils

électriques, et donc faciles à obtenir. Elles sont également évolutives et paramétrables et laissent la possibilité d'ajouter des données d'entrée détaillées à l'avenir.

Une approche *top-down* est généralement utilisée pour les prévisions à court terme, pour l'analyse des stratégies et pour la définition de la fiscalité et des tarifications. Pour la mise en place de *smart grid*, elle peut être utilisée dans des études à l'échelle nationale afin d'attribuer la consommation d'électricité du parc de logements aux caractéristiques de chaque logement [GRANDJEAN et al, 2012].

3.1.2 Consommation d'électricité *bottom-up*

Dans la méthode *bottom-up*, on utilise les données d'entrée provenant d'un niveau hiérarchique plus bas ou une échelle plus petite. On part d'un ensemble de maisons individuelles représentatives, on étend la consommation électrique estimée à une échelle locale, puis on crée des niveaux régionaux et nationaux en étendant les résultats. De nombreuses variables influencent le résultat (par exemple, surface et volume des bâtiments, matériaux de l'enveloppe du bâtiment, température extérieure et intérieure, taux d'occupation des logements et équipements). Cette approche est basée sur deux méthodes distinctes : la statistique et la technique.

La méthode statistique *bottom-up* s'appuie sur des données antérieures et l'analyse d'un usage final particulier et travaille sur les relations entre la consommation électrique de ces usages finaux d'un échantillon de logements. Cette approche prend en compte l'impact du comportement des occupants. Elle peut être divisée en trois méthodes de :

1) régression : c'est une technique de modélisation prédictive avec le but d'étudier la relation entre des variables dépendantes (comme la consommation de chauffage) et des indépendantes (comme la taille de logement) ;

2) analyse de la demande conditionnelle : cette technique multicritère statistique combine les données antérieures comme celles de facturation des fournisseurs avec des informations météorologiques et des données d'enquête auprès des consommateurs et elle est également utilisée pour estimer la demande électrique [TIEDEMANN, 2007] ; et

3) réseau de neurones (*neural network*) : Il s'agit d'une méthode de prévision de l'électricité et il est composé des variables (nœuds) qui sont interconnectés (par

exemple, consommation de chauffage, d'eau-chaude sanitaire des appareils électriques).

La méthode technique *bottom-up* repose sur la consommation électrique des usages finaux en fonction de la puissance nominale, de la fréquence d'utilisation des équipements, etc. On peut distinguer trois méthodes de :

1) Distribution : Cette approche pourrait fournir une distribution spatiale des unités de consommations (des logements) en utilisant le système d'information géographique (SIG) par exemple ;

2) Archétypes : La consommation d'électricité à l'échelle nationale dans cette technique est créée à l'aide de quelques archétypes de bâtiments. Le nombre d'archétypes pourrait être défini en fonction de différentes facteurs (géométrique, thermique, opérationnel) des bâtiments ; et

3) Echantillonnage : dans cette technique, un échantillon de bâtiments représentatifs est étudié

L'avantage d'une approche *bottom-up* est que le niveau élevé de détails lui donne la possibilité de modéliser plus précisément. On peut utiliser des indicateurs nationaux et régionaux tels que le revenu et les prix de l'énergie et ainsi bénéficier des avantages d'une approche *top-down*. Contrairement à cette dernière, en utilisant l'approche *bottom-up*, on peut identifier les domaines à améliorer (par exemple, le potentiel d'une rénovation énergétique pour réaliser des économies d'énergie). Une fois le modèle créé, il peut être développé dans les échelles plus grandes comme le niveau national. Le modèle *bottom-up*, se concentre sur les usages finaux, il peut donc facilement être appliqué à d'autres catégories et d'autre cas (comme d'autres types d'énergies finales ou d'autres usages finaux). Il a également la flexibilité et la capacité d'intégrer de nouvelles technologies sans données antérieures disponibles et est donc plus pratique pour l'intégration des applications du *smart grid* et la mise en place de compteurs communicants par exemple. Grâce à l'utilisation des factures d'électricité, les informations sont plus fiables et plus explicites. Ce modèle peut avoir des impacts sur le changement de comportement des occupants.

L'inconvénient de cette approche est la complexité de calcul, la quantité des données d'entrée requises et la difficulté de relier la consommation électrique de chaque ménage à son

bâtiment. Le comportement des occupants qui a un impact significatif sur la consommation électrique des logements est particulièrement compliqué à estimer. Par conséquent, les modèles *bottom-up* sont plus adaptés dans le cadre d'une estimation de la demande de chauffage dans des climats extrêmement chauds ou de climatisation dans des climats extrêmement froids pour lesquels le comportement des individus est moins important [LARSEN & NESBAKKEN, 2004].

Dans ce type de modélisation, l'acceptation et la participation des publics sont importantes et compliquées à obtenir. Les coefficients n'ont toujours pas de signification physique et sont principalement basés sur des informations théoriques. Les catégories d'usage final sont interconnectées d'une manière telle que la suppression de certaines d'entre elles peut réduire la fiabilité des résultats finaux. En outre, la relation entre les catégories peut être mal décrite dans ces modèles. Ils sont difficiles à ajuster et sont moins ouverts à des modifications futures (par exemple, dans des cas d'évolution des prix).

Cette technique peut être utilisée pour catégoriser globalement le parc de logements en fonction de leurs variables. Il est possible d'élaborer des définitions d'archétype pour chaque catégorie de logement et d'utiliser ensuite les descriptions comme données d'entrée pour la modélisation électrique. Les archétypes (logements individuels) peuvent être élargis afin d'être représentatifs du parc immobilier national en multipliant les résultats par le nombre de maisons qui correspondent à cette description par exemple. Cette approche peut donc être considérée comme étant plus rapide à mettre en place en comparaison avec celle de type *top-down*. Elle est généralement utilisée dans le but d'évaluer les impacts des nouvelles technologies et aussi d'intégrer la production décentralisée telle que la production solaire ou éolienne. Elle peut également servir dans les études basées au niveau de l'habitation individuelle visant à établir des relations entre les caractéristiques des ménages et la consommation d'électricité, qui sont ensuite étendues à l'ensemble du parc de logements [MCLOUGHLIN et al. 2012].

Les méthodes statistiques de régression et économétriques sont souvent utilisées pour étudier l'influence des facteurs socio-économiques, du logement et des appareils sur la consommation domestique d'électricité. La méthode statistique de régression peut être considérée comme une méthode d'analyse à la fois *top-down* et *bottom-up* et ce, parce que les variables peuvent être étudiées à l'échelle nationale ou à l'échelle d'un bâtiment individuel. Cette méthode est particulièrement utile pour l'analyse de grands ensembles de données.

Le Tableau 3-1, présente une liste de certaines études utilisant des approches *top-down*, *bottom-up* ou les deux pour élaborer un modèle de consommation/demande d'électricité résidentielle :

Tableau 3-1 : Exemples d'approches de modélisation des usages finaux de l'électricité résidentielle utilisées dans des études précédemment

Réf : N/A	
Approche	**Exemple d'étude**
Top-down	HALVORSEN (1975), HIRST (1978), HOUTHAKKER (1980), DUBIN & MCFADDEN (1984), SCHIPPER (1987), HAAS & SCHIPPER (1998), BALTAGI (2002), LARSEN & NESBAKKEN (2004), KAMERSCHEN & PORTER (2004), BLÁZQUEZ et al. (2013)
Bottom-up	AIGNER et al. (1984), CAVES et al. (1987), GOLDFARB & HUSS (1988), LJONES et al. (1992), CAPASSO et al. (1994), LAFRANCE & PERRON (1994), HSIAO et al. (1995), AYDINALP et al. (2003), LINS et al. (2003), TSO & YAU (2007), SWAN & UGURSAL (2009), MCLOUGHLIN et al. (2012), SANQUIST et al. (2012), BEDIR (2013), PAPACHRISTOS (2015), JONES et al. (2015)
Top-down & *Bottom-up*	PARTI & PARTI (1980), FILIPPINI & PACHAURI (2004), DRUCKMAN & JACKSON (2008), WIESMANN et al. (2011), ZHOU & TENG (2013)

3.2 Techniques de modélisation de consommation/demande électrique

La plupart des modèles de demande/consommation d'énergie a été réalisée sur la base de l'influence des caractéristiques des logements et des occupants sur le modèle de consommation résidentiel [MCLOUGHLIN et al. 2012]. En d'autres termes, les modèles de consommation d'énergie dépendent de la corrélation entre la consommation d'énergie et divers facteurs tels que le nombre d'occupants, le revenu du ménage, la surface de plancher, les modèles énergétiques, les facteurs climatiques et les indicateurs d'efficacité énergétique [KELLY, 2011] qui varient en fonction du contexte de la recherche. À titre d'exemple, FRANCISCO et al. (2006) ont analysé la relation entre le revenu familial et la consommation d'électricité au Brésil et ont confirmé que le revenu et la situation financière plus élevés induisent une consommation électrique plus importantes. Selon DRUCKMAN & JACKSON (2008), une augmentation des revenus entraîne une amélioration du confort et du niveau de loisirs et donc une expansion des modes de consommation. SILVA et al. (2014) ont constaté la même augmentation dans un exemple brésilien, dans lequel les ménages ayant un revenu plus élevé consomment plus d'électricité. KARANFIL & LI (2014) ont étudié à plus grande échelle la relation entre l'électricité et la croissance économique. Le niveau financier des ménages n'est qu'un exemple parmi d'autres des facteurs qui peuvent influencer la consommation d'électricité. Il existe également plusieurs autres facteurs dont la corrélation avec la consommation d'électricité a été étudiée précédemment pour créer un modèle de consommation/demande d'électricité. Ces facteurs seront examinés plus en détail dans ce chapitre.

Néanmoins, tous les travaux étudiés qui ont analysé l'usage final de l'électricité présentent certaines similitudes méthodologiques et consistent principalement en trois étapes de collecte, de traitement et d'analyse des données.

Collecte de données :

Plusieurs approches sont en pratique pour collecter les données nécessaires concernant la consommation (1) à travers des sondages, (2) des méthodes d'enquête, y compris (2a) des enquêtes téléphoniques, (2b) des informations statistiques sur les institutions et des enquêtes nationales, (3) le sous-comptage ou d'autres techniques de surveillance des ménages, (4) les techniques d'échantillonnage et même une combinaison de plusieurs approches (Tableau 3-2).

Tableau 3-2 : Différentes techniques pour collecter les données de consommation énergétique

Réf : N/A	
Technique pour collecter les données	**Exemples d'étude**
(1)	GRAM-HANSSEN et al. (2004), TSO & YAU (2007)
(2a)	NDIAYE & GABRIEL (2011)
(2b)	Nielsen (1993), GRAM-HANSSEN et al. (2004), YOHANIS et al. (2008), LEAHY & LYONS (2010), WIESMANN et al. (2011), BROUNEN et al. (2012), MCLOUGHLIN et al. (2012), SANQUIST et al. (2012), WYATT (2013), CARLSON et al. (2013) et HAMILTON et al. (2013)
(3)	LJONES et al. (1992), GRAM-HANSSEN et al. (2004), YOHANIS et al. (2008), GENJO et al. (2005), NDIAYE & GABRIEL (2011), MCLOUGHLIN et al. (2012), PARKER (2003), BARTUSCH et al. (2012), BAKER & RYLATT (2008), KAVOUSIAN et al. (2013), ARDAKANIAN et al. (2011)
(4)	CRAMER et al. (1985), HALVORSEN & LARSEN (2001), TSO & YAU (2003), BARTIAUX & GRAM-HANSSEN (2005), TSO & YAU (2007), SUMMERFIELD et al. (2007), SANTAMOURIS et al. (2007), BAKER & RYLATT (2008), LOUW et al. (2008), NDIAYE & GABRIEL (2011), BARTUSCH et al. (2012), CARTER et al. (2012), KAVOUSIAN et al. (2013)
(5)	SAKAH et al. (2019)

Un exemple est donné dans l'étude de SILVA et al. (2014) dans laquelle les auteurs ont combiné différentes méthodes de collecte de données. Ils ont recueilli des données à partir d'un petit échantillon composé de soixante maisons choisies au hasard par le biais d'entretiens, d'enquêtes et de deux semaines d'utilisation des équipements de surveillance (tels que des sous-compteurs communicants) en été et en hiver et ont utilisé des équations mathématiques pour estimer la consommation des appareils à forte consommation d'électricité. Bien que dans cet exemple et dans d'autres exemples de sélection aléatoire, les échantillons ne représentent souvent pas l'ensemble de la population en raison de leur insuffisance par rapport au nombre total, le schéma de consommation total (des appareils électriques aux systèmes de chauffage ou de refroidissement) reste utile pour :

- Évaluer la performance thermique des bâtiments par des analyses thermo-énergétiques et des études sur le comportement des occupants ;
- Trouver l'équipement électrique ayant la plus forte consommation ;
- Trouver les équipements électriques qui ont un besoin urgent d'être remplacés en raison de leur inefficacité ;
- Calculer les futures économies d'énergie possibles en cas de remplacement d'équipement et/ou de modernisation énergétique ;
- Etudier la possibilité d'ajouter des systèmes mécaniques tels que de nouveaux systèmes de climatisation, de chauffage et de production d'eau chaude aux bâtiments existants ; et
- Simuler la taille des systèmes décentralisés de production d'énergie (panneaux photovoltaïques, systèmes éoliens, etc.).

Traitement des données :

Avant toute analyse, il est nécessaire de traiter les données collectées. Certaines données peuvent être manquantes, incomplètes, incorrectes, mal classées ou dupliquées, soit à cause d'erreurs dans les dispositifs de surveillance ou de collecte, soit à cause d'erreurs des ménages ou des enquêteurs. Les questions ou le suivi peuvent se référer à une période spécifique de l'année (par exemple, un mois froid et un mois chaud de l'année), alors que tous les appareils ne sont pas forcément utilisés pendant cette période en raison de leur variation temporelle. Il se peut aussi que la température du mois étudié ne correspond pas à la saison froide ou chaude habituelle, ne permettant pas l'utilisation de certains appareils. Par conséquent, pour l'annualisation, il est nécessaire de mettre à l'échelle les données pour l'ensemble de l'année. Des ajustements doivent être effectués pour tenir compte de la variation temporelle et pour respecter le temps d'utilisation de chaque appareil.

Souvent, des études statistiques, de régression ou économétriques sont utilisées pour traiter les données au moyen de techniques statistiques et de la modélisation des modélisation d'équations structurelles (MES) pour ajuster les données, comme les études réalisées par TIWARI (2000), BARTIAUX & GRAM-HANSSEN (2005), BAKER & RYLATT (2008), BROUNEN et al. (2012) et KAVOUSIAN et al. (2013).

Analyse des données :

Pour analyser les données, différentes méthodes sont possibles. Une journée de consommation type peut être créée et ensuite généralisée pour toute l'année. Les résultats sont présentables sous forme graphique afin de montrer la courbe de demande d'électricité et notamment son pic. Cela donne la possibilité de comparer l'analyse avec des scénarios futurs et de trouver les points d'amélioration potentiels. Les analyses peuvent être étudiées en variation quotidienne, hebdomadaire, mensuelle et annuelle à l'échelle du quartier ou celle de la ville pour permettre une meilleure compréhension de la demande.

Outre leurs similitudes, la différence la plus significative entre ces travaux est la méthode de prévision du mode d'utilisation des appareils et des équipements électriques, y compris leur durée d'utilisation et leur consommation moyenne. WOOD & NEWBOROUGH (2003) catégorisent le schéma de consommation d'énergie en trois situations : prévisible, modérément prévisible et imprévisible et décrivent la plupart des consommations locales d'un logement comme étant imprévisibles. Cela confirme une fois de plus la complication de la modélisation et la nécessité d'une approche plus sophistiquée.

Les données concernant la consommation totale d'électricité peuvent être collectées à partir des factures d'électricité fournies par les fournisseurs ; sous une forme désagrégée et plus précise, elles peuvent être collectées par le biais de sous-compteurs ; et de manière moins précise, à partir d'entretiens, de questionnaires et d'enquêtes. Dans les cas plus complexes où une telle possibilité n'existe pas, les données sont simulées ou partiellement simulées sur la base des données collectées existantes. En outre, la simulation permet de procéder à des analyses plus approfondies. Ce type de simulation a été mis en pratique dans différentes études en utilisant trois techniques principales :

1. Méthode de Monte-Carlo et processus stochastique :

   CAPASSO et al. (1994), DOUCET et al. (2001), ROBERT & CASELLA (2004), YAO & STEEMERS (2005), PAATERO & LUND (2006), KROESE et al. (2011) et REN et al. (2013) ont utilisé une application générant de façon aléatoire la probabilité d'utiliser un appareil tout au long de la journée et ensuite ils ont généralisé les résultats pour l'ensemble de l'année. La méthode de Monte-Carlo est utilisée pour estimer la probabilité qu'un appareil spécifique soit utilisé pendant une journée dans le parc de logements selon une distribution de probabilité donnée (par exemple, la proportion

d'utilisation d'un appareil spécifique pendant 24 heures). À chaque intervalle de temps, un nombre aléatoire (uniforme de 0 à 1) est relevé et utilisé avec la proportion d'utilisation d'un appareil spécifique pour déterminer l'utilisation de cet appareil à l'intervalle de temps actuel. Ce processus est effectué pour chaque heure pendant toute une année et génère 365 profils de charge quotidiens. Des simulations suffisantes avec différents nombres aléatoires sont effectuées pour générer les probabilités d'utilisation selon des critères qui limitent la consommation énergétique annuelle moyenne dans des bandes de tolérance autour des valeurs statistiques nationales. Cet outil pourrait fournir un aperçu et une analyse des impacts du comportement humain sur la consommation totale d'électricité et sur la demande de période de pointe d'un parc de logements. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour améliorer la précision du modèle énergétique en tenant compte de l'adaptation des occupants au confort thermique lorsqu'ils vivent dans des conditions de température extérieure plus ou moins élevée [REN et al., 2013] ;

2. Technique de chaîne de Markov :

WIDÉN et al. (2009a), WIDÉN et al. (2009b), WIDÉN & WÄCKELGÅRD (2010), MCLOUGHLIN et al. (2010), RICHARDSON et al. (2010), ARDAKANIAN et al. (2011), WILKE et al. (2013) ont créé des profils de consommation des ménages. Pour cela, ils ont simulé les habitudes d'utilisation de l'électricité par chaque ménage et ensuite calculé la probabilité d'utilisation de chaque appareil en fonction de l'appareil utilisé précédemment. En d'autres termes, dans cette technique, la prédiction de la future consommation est uniquement basée sur un événement actuel et non sur celui du passé.

3. Profils d'occupation active et d'activité quotidienne :

SHIMODA et al. (2004) établissent des profils de charge électrique résidentielle pour différents types d'habitations et de caractéristiques des ménages à une heure d'intervalle. Leur étude, qui est basée sur un environnement urbain au Japon, montre que le temps d'utilisation des appareils par les occupants du logement, l'efficacité des appareils, la température extérieure et les caractéristiques thermiques du logement affectent les profils de consommation d'électricité résidentielle. YAO & STEEMERS (2005) ont développé un modèle basé sur cinq scénarios de modèles d'occupation. Ils ont utilisé un logiciel dynamique pour générer des profils de charge de chauffage

domestique pour différents types d'habitations en fonction des modèles d'occupation, de la possession ou non des appareils et leur puissance. Leur étude distingue les déterminants comportementaux (ceux qui sont en lien avec le comportement humain) de la consommation d'électricité résidentielle (qui sont associés à la base hebdomadaire, quotidienne ou horaire lorsque des appareils spécifiques sont utilisés) et les déterminants physiques (qui sont liés à des variables immuables comme la taille du logement). RICHARDSON & THOMSON (2008), TORRITI (2012), LÓPEZ-RODRÍGUEZ et al. (2013) et SANTIAGO et al. (2014) ont utilisé les enquêtes nationales sur l'utilisation du temps et ont observé le temps consacré à chaque activité. SANTIAGO et al. (2014) ont créé le modèle de consommation des logements espagnols en utilisant la méthode d'occupation active et ont dérivé des données des enquêtes sur l'emploi du temps. TORRITI (2014) a mentionné plusieurs avantages et inconvénients concernant cette technique :

- Les petits échantillons correspondent moins à la population totale. Par conséquent, les enquêtes nationales sur l'emploi du temps sont plus fiables que les méthodes d'échantillonnage ;
- Les ensembles de données prennent des jours typiques, alors que certaines charges de pointe sont liées à des jours non typiques (jours fériés, événements publics, jours les plus froids/les plus chauds de l'année, etc.) ;
- Ces enquêtes ne sont pas menées très fréquemment ;
- Les profils d'emploi du temps sont assez similaires dans les différents pays ;
- L'établissement du profil d'activité quotidienne devient plus compliqué à mesure que le nombre d'occupants augmente.

En plus des principales techniques mentionnées ci-dessus, d'autres méthodes ou la combinaison de plusieurs techniques sont utilisées pour créer des profils de charge de consommation. Par exemple, CARLSON et al. (2013) ont défini quatre scénarios de consommation pour analyser les données moyennes de la consommation d'électricité des ménages. Mais l'inconvénient de la définition de scénarios de consommation moyenne est qu'ils ont surestimé le nombre d'appareils contribuant à une charge électrique spécifique qui n'est pas convenable pour l'élaboration des politiques et la prise de décision.

VORGER (2014) a étudié les facteurs sociodémographiques influents sur la consommation d'électricité résidentielle et a supposé les caractéristiques du reste du ménage (âge, sexe, etc.) à partir des données concernant la personne de référence. Il a créé des profils de consommation des individus à partir de l'activité des occupants, généré des scénarios et associé plusieurs profils individuels pour développer le modèle pour différents ménages (ménages composés d'un, deux ou plusieurs personnes). En raison de la complication du modèle, la synchronisation entre les occupants est négligée. Cependant, il est plus probable qu'un couple mange, sorte, regarde la télévision ou dorme en même temps, alors que chaque personne individuellement peut passer son temps différemment. Dans son modèle pour les appareils électroménagers, les ménages sont supposés avoir plusieurs appareils selon la base de données du budget des ménages (Budget de famille 2006) publiée par l'INSEE et les probabilités d'utilisation de ces appareils sont liées au moment d'activité des occupants du logement.

Dans notre recherche, en raison de la disponibilité limitée des données et de l'impossibilité d'utiliser des sous-compteurs pour des raisons financières, une technique d'enquête aléatoire est utilisée (Annexe I) pour créer des types et les statistiques d'enquête nationales sont utilisées pour dériver l'occupation active et les activités quotidiennes des ménages afin de faire des simulations de profil de charge électrique. Cette approche est appliquée sur une étude de cas et sera développée dans la section suivante.

3.3 Simulation de consommation/demande électrique à l'échelle d'une ville

Comme mentionné précédemment, la demande énergétique résidentielle dépend de plusieurs conditions socio-économiques et climatiques [ISAAC & VAN VUUREN, 2009] et. [KRIGGER & DORSI, 2009]. Ces conditions varient d'un espace à un autre. Elles diffèrent également en fonction de l'heure, du jour, du mois et de l'année, ce qui signifie qu'elles sont affectées par des facteurs spatiaux et temporels [ZHU et al. 2013]. La consommation d'énergie dans les bâtiments résidentiels dépend également des activités menées par les occupants du logement [BIN & DOWLATABADI, 2005]. En d'autres termes, la demande totale d'énergie est la somme de la demande de chaque logement composé d'un/plusieurs occupant(s) sur chaque zone (quartier, ville, territoire, pays) avec des variations spatio-temporelles.

Ainsi, en raison de la prolifération des ensembles de données qui sont à la fois spatialement et temporellement indexés et de la collecte de données à travers les deux facteurs de temps et

d’espace et afin de formaliser la variation de la demande d’énergie dans le temps et dans l’espace, une analyse spatio-temporelle est proposée dans cette partie (Chapitre 4). Les caractéristiques de consommation du secteur résidentiel peuvent être étudiées en détail en réponse au changement climatique, aux prix élevés de l’énergie et à la forte demande/offre d’énergie par exemple afin de promouvoir l’économie d’énergie, l’efficacité énergétique, la mise en œuvre de nouvelles technologies et l’intégration de ressources énergétiques renouvelables décentralisées. Par conséquent, la simulation électrique est censée refléter :

1. La réduction potentielle de la consommation et/ou la demande au sein des ménages ;

2. L’effet de la gestion de la charge sur la demande en période de pointe et, par conséquent, sur la réduction globale de la consommation d’électricité ; et

3. L’importance des occupants d’un logement et une analyse comportementale sur la consommation/production électrique.

Bien choisir l’étude de cas permettra de créer un modèle qui pourra être adopté à plus grande échelle ou à d’autres cas similaires plus facilement. C’est notamment le cas lorsque les principales caractéristiques du site représentent des valeurs nationales telles que le climat, la géographie et les caractéristiques démographiques des consommateurs. Cependant, les valeurs du site ne peuvent pas correspondre exactement et complétement à celles de l’échelle nationale. Mais le fait de répondre aux deux questions suivantes peut aider à évaluer le site choisi :

1. Quelles sont les principales variables présentes dans les différentes villes de France qui ont un impact sur les profils de charge, les modes de consommation d’électricité et l’application du *smart grid* ?

2. Pouvons-nous utiliser les résultats de cette étude de cas pour une ville similaire ? Est-il possible d'étendre les résultats à l'échelle nationale ?

Le *Tableau 3-3* montre les principales variables du réseau électrique en France susceptibles d’influencer les résultats de l’application du *smart grid*.

Nous avons ainsi choisi la ville de Tours comme étude de cas pour une analyse énergétique approfondie.

Tableau 3-3 : Variables influençant l'application du *smart grid* en France

Réf : Basé sur DEWHA (2009)

Variables	Dimensions	Importance	Éléments requis :
Caractéristiques du réseau	Topologie du réseau (maillée ou radiale) Densité de consommateurs Utilisation de la ligne liaison aérienne/ souterrainne Âge de l'infrastructure Pénétration de la production décentralisée Zone verte ou zone industrielle	• La tension du réseau diffère le courbe de charge locale • Une utilisation plus importante offre de meilleures possibilités de gestion des actifs • Les coûts de déploiement et la technologie varient considérablement • Différences de fiabilité • Différenciation des investissements en capital • Coût haut de la modernisation • Besoin de plus qu'un représentant pour tester les niveaux de pénétration futurs • Les coûts de déploiement varient considérablement	• Section à la fois radiale et maillée incluse • Densités de lignes variées • Mélange de lignes à forte et faible utilisation • Une section de chaque liaison • Infrastructures anciennes et nouvelles incluses • Forte pénétration dans plusieurs zones locales • Une section de chaque zone
Caractéristiques climatiques	Climat Topographie	• Demande de pointe • Principaux moteurs de la consommation d'énergie et comportement des consommateurs • Pressions sur le réseau • Efficacité des technologies de communication • Coût du déploiement	• Représentation d'un pic d'hiver et d'un pic d'été • Des topographies variées (par exemple, des collines et des terrains plats).
Caractéristiques des consommateurs	Type de consommateur Parc immobilier et mix énergétique Facteurs démographiques	• Comprendre le comportement des consommateurs par segment • La signification statistique requiert une taille d'échantillon suffisante • Modifier l'efficacité énergétique et la consommation • Influences potentielles sur le comportement	• Une variation suffisante pour fournir un échantillon représentatif de la base de consommateurs français.

À la fin de cette partie, nous discuterons de l'échelle d'application du *smart grid*, dans laquelle les résultats sont plus pertinents pour les statistiques réelles et pour lesquelles l'adoption du *smart grid* semble donc plus optimisée.

3.4 Contexte et méthodes

3.4.1 Contextualisation

Une approche typique pour analyser la demande totale d'électricité, précédemment testée par la Communauté de l'Energie, de l'Environnement et du Développement (COMMEND) et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), consiste à désagréger la structure des données de la demande en quatre niveaux hiérarchiques représentant les secteurs, les sous-secteurs, les usages finaux et les appareils. Cette décomposition permet d'identifier les secteurs où il existe une demande importante et de hiérarchiser les stratégies de réduction de la demande en fonction du secteur. En France, l'énergie est consommée par quatre secteurs différents : l'agriculture (2%), l'industrie (28%), les transports (2%) et le bâtiment (68%) selon l'INSEE 2018. Le secteur du bâtiment est le plus grand consommateur d'électricité et sa consommation augmente de plus en plus (Figure 3-1).

Réf : SOeS – INSEE (2011)

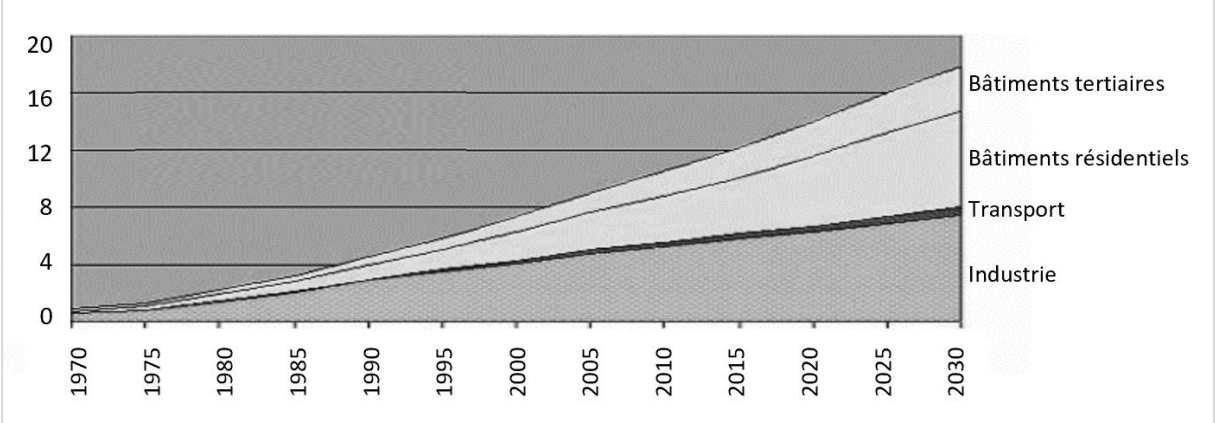


Figure 3-1 : Evolution de la demande d'électricité dans différents secteurs en France (horizon 2030) en GWh/an

La demande électrique des bâtiments résidentiels et tertiaires est calculée de la même manière. Cependant, les paramètres du scénario et les équations associées à des bâtiments résidentiels sont notamment d'ordre démographique alors que ceux des bâtiments tertiaires sont plutôt d'ordre économique [AIEA ,2006]. De plus, les bâtiments tertiaires ont souvent une gestion plus centralisée notamment ceux abritant des activités tertiaires du secteur public et par conséquent sont soumis à des niveaux élevés de réglementation. C'est pourquoi, leur gestion de la charge et la mise en œuvre des stratégies de réduction de la consommation d'énergie sont mieux coordonnées. C'est le cas pour d'autres secteurs (agriculture, industrie et transport) également [SWAN & UGURSAL, 2009]. Au contraire, le secteur résidentiel est plus

compliqué et plus intéressant à étudier, car les usagers individuels ont des comportements variés en matière de consommation/production d'énergie. Ces bâtiments sont moins accessibles aux responsables de service public pour des raisons de confidentialité, vie privée des individus et de dispositifs de comptage avancé coûteux, et sont constitués d'une variété de structures, de tailles, de géométries, de matériaux, d'enveloppes thermiques et d'isolants. Cette recherche se concentre sur le secteur résidentiel qui est à fort potentiel d'amélioration.

Tableau 3-4: Demande totale d'énergie désagrégée en secteurs, sous-secteurs, sous-utilisations et dispositifs

Réf : Basé sur une division du MTE & AIEA (2006)			
Secteurs	**Sous-secteurs**	**Usages finaux**	**Dispositifs**
Agriculture	Agriculture, pêche, sylviculture, élevage, etc.	Électricité pour usages spécifiques, usages thermiques, carburants, etc.	Eclairage, électrolyse, chauffage, production de l'eau chaude, production de vapeur, fourneau, systèmes de chaleur directe, etc.
Transport	Passagers, fret	Transport aérien, terrestre, spatial, ferroviaire, par câble, par pipeline, , etc.	Voiture, bus, avion, bateau, camion, train, tramway, etc.
Industrie	Construction, exploitation minière, fabrication, etc.	Électricité pour usages spécifiques, usages thermiques, carburants, etc.	Eclairage, électrolyse, chauffage, production de l'eau chaude, production de vapeur, fourneau, systèmes de chaleur directe, etc.
Bâtiment	Résidentiel : logement collectif, logement individuel	Production de l'eau chaude, Système de chauffage/climatisation, Appareils électriques, Éclairage, cuisson	Réfrigérateur, télévision, ordinateur, plaques de cuisson, lampes, etc.
	Tertiaire : culturels, éducatifs, administratifs, bureaux, religieux, militaires, commerciaux et financiers, etc.	Eau chaude, Système de chauffage/refroidissement des locaux, Appareils électriques, Éclairage, cuisson, force motrice	Réfrigérateur, ordinateur, portables, systèmes audio, lampes, etc.

Le Tableau 3-4 montre la répartition des consommateurs totaux d'énergie en secteurs, sous-secteurs, usages finaux et appareils. Cette recherche est focalisée sur le secteur du bâtiment, la fonction résidentielle en tant que sous-secteur et les appareils électriques en tant qu'usage final. Cette division varie en fonction du contexte et, par conséquent, la catégorisation schématique peut être modifiée et travaillée avec plus de détails pour d'autres pays et dans d'autres secteurs. Par exemple, dans les pays en développement où les activités agricoles sont

plus nombreuses, le secteur agricole peut avoir plusieurs sous-secteurs notamment la sylviculture. En outre, ce tableau est conçu pour l'analyse de la demande d'électricité et, moyennant des modifications supplémentaires, il peut être adapté à d'autres formes d'énergie finale.

Le secteur des bâtiments résidentiels est divisé en sous-secteurs de logement individuel et collectif et comporte cinq catégories d'usage final indépendants les uns des autres et qui peuvent également être étudiées séparément (Figure 3-2). Chaque catégorie d'usage final affecte la consommation électrique différemment et avec des variables propres à elle. La consommation finale bien évidemment comprend les pertes et les inefficacités.

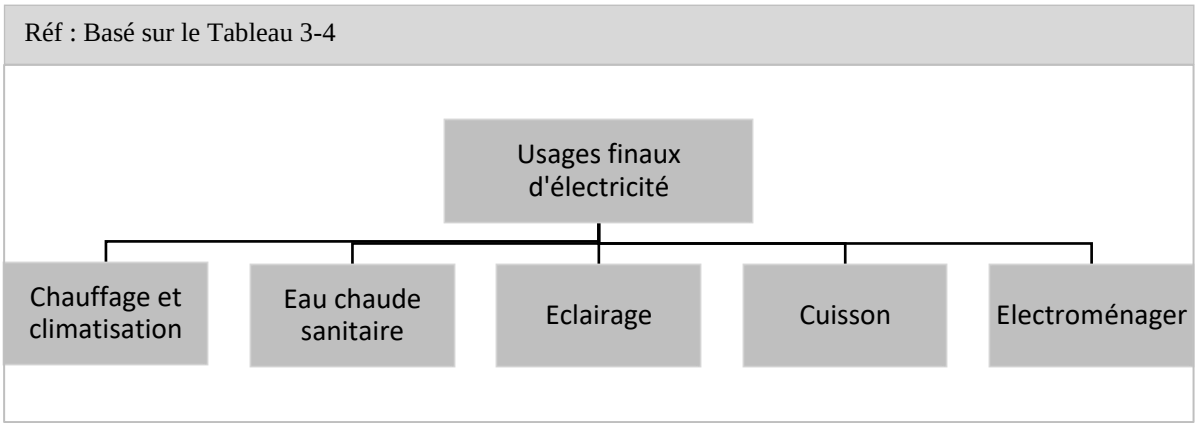


Figure 3-2 : Cinq usages finaux d'électricité dans le secteur résidentiel

Ces cinq usages finaux et leurs méthodes d'estimation sont décrits plus en détail en Annexe II. Contrairement aux autres usages finaux de l'électricité, il n'existe pas d'équation spécifique pour déterminer le nombre d'appareils électriques dans les bâtiments résidentiels.

Selon le bilan énergétique du RTE FRANCE (2017), la répartition de consommation totale des usages de l'électricité domestique est comme suite (Figure 3-3).

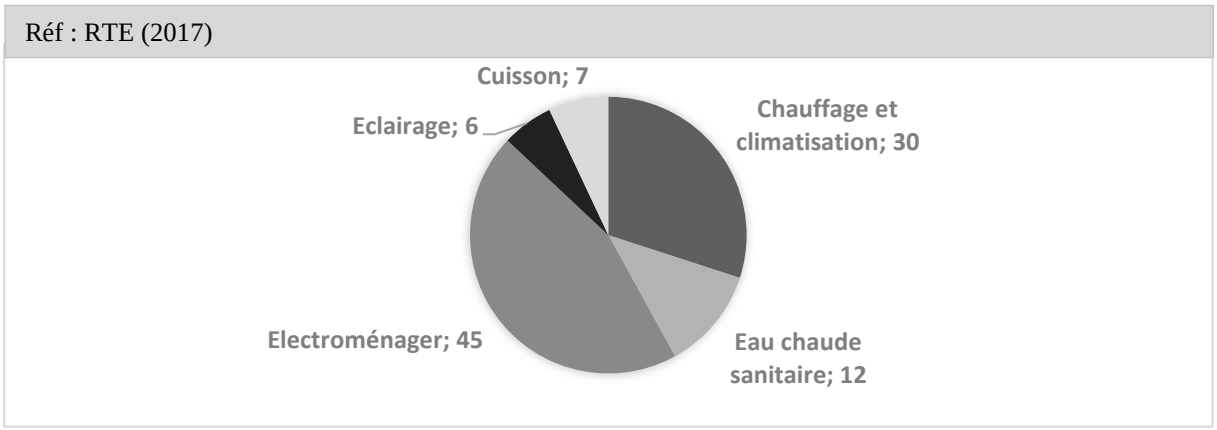


Figure 3-3 : Consommation d'énergie du secteur résidentiel en France par usage final en pourcentage en 2017

Comme le montre la Figure 3-4, la consommation totale d'électricité des ménages Français et correspondant à l'eau chaude et au chauffage a diminué respectivement de 0,7 % et de 1,4 % par an en moyenne entre 1990 et 2010 grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et des systèmes mécaniques et à la sensibilisation du public aux questions environnementales. Toutefois, les autres usages finaux se comportent différemment. Par exemple, la consommation d'appareils spécifiques (y compris les appareils électriques, l'éclairage et tout appareil fonctionnant exclusivement à l'électricité,) a augmenté de 43 % au cours de la même période soit une augmentation de 2,2 % par an en moyenne.

Réf : CEREN(2013)

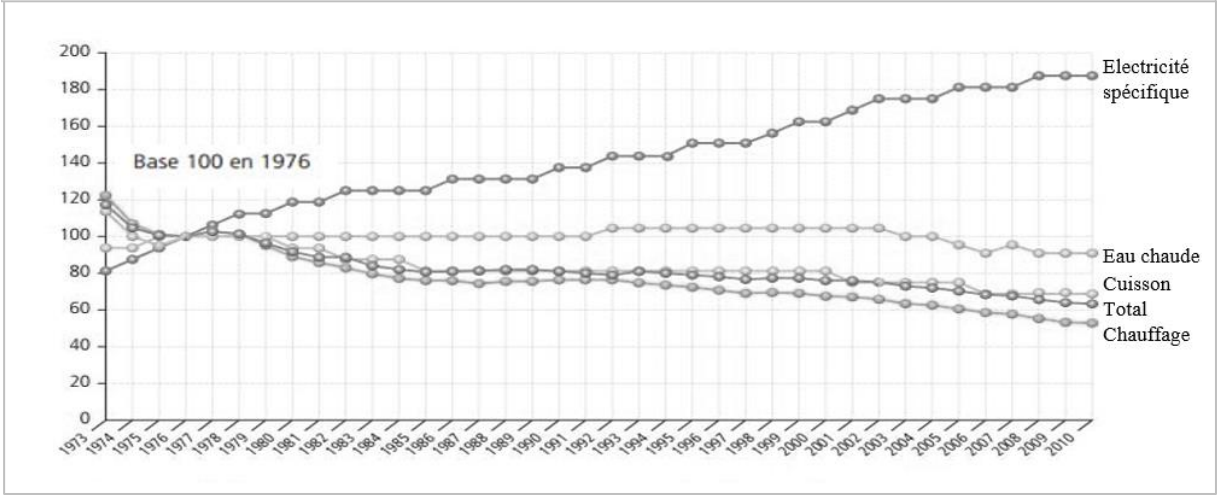


Figure 3-4 : Evolution des différents usages finaux résidentiels d'électricité de 1973 à 2010

Entre 1985 et 2006, la surface des logements a augmenté en moyenne de 9 m^2 en France. Plus précisément, nous constatons 17 m^2 d'augmentation pour les ménages dont la personne de référence a plus de 50 ans et 10 m^2 de réduction pour les moins de 30 ans [INSEE, 2015]. La croissance rapide de l'utilisation des appareils électriques s'explique donc en partie par l'augmentation de la surface des logements mais surtout par l'évolution de nouvelles technologies, la création de nouveaux appareils et le changement de mode de vie qui conduit à des logements plus équipés et plus confortables.

3.4.2 Méthodologie

La modélisation énergétique en mettant l'accent sur les appareils électriques est importante pour les acteurs suivants :

1. Pour les décideurs politiques : ce modèle peut montrer la demande d'électricité pour chaque appareil. Il est donc plus facile d'identifier les appareils prioritaires pour les mesures d'efficacité et de développer de nouvelles stratégies de réduction de la consommation. En outre, il est essentiel d'observer la part de la consommation inactive (mode veille et mode arrêt) dans la consommation totale d'électricité et de prendre rapidement des décisions à l'égard des fabricants d'appareils électriques afin de réduire cette perte énergétique.

2. Pour les fournisseurs : il est plus pratique de prévoir la courbe de charge. Ils peuvent donc mieux développer des stratégies de gestion de la demande. Cela peut également révéler l'importance du comportement des occupants des logements dans cette gestion.

3. Pour les collectivités locales : il est possible de surveiller le secteur résidentiel afin de définir des priorités et de prendre des mesures environnementales. C'est un moyen d'acquérir certaines connaissances sans mettre en danger la vie privée du public et, sans installer des compteurs communicants avec ses coûts associés. De plus, il est important d'étudier les appareils électriques et d'identifier les conditions de leur utilisation car leur puissance nominale ou estimée (W) multiplié par leur temps d'utilisation (h) ne correspond pas toujours à sa consommation réelle (Wh), ce qui est dû au comportement des individus, au vieillissement des appareils et ses consommations inactives.

4. Pour les fabricants des appareils électriques : il est plus intéressant de connaître la fréquence d'utilisation des appareils, leurs cycles et leur dépendance à l'égard de divers facteurs afin d'optimiser la production ainsi que de prendre des décisions concernant les nouvelles technologies et d'améliorer les futurs appareils.

5. Pour les organisations concernées par la prévision des futures politiques énergétiques : il est important de disposer d'un modèle afin d'optimiser des approvisionnements d'énergies, faire face à l'insécurité énergétique et lutter contre le changement climatique.

6. Pour les organismes de normalisation : il est nécessaire de coordonner leurs valeurs avec la réalité et de voir comment ces appareils fonctionnent pour contribuer aux normes techniques ou industrielles.

7. Pour les consommateurs : il est important de comprendre comment ils peuvent consommer l'électricité de façon optimisée et comment ils peuvent contribuer à sa réduction.

8. Pour les campagnes de sensibilisation : il s'agit d'un outil d'aide pour améliorer les connaissances du public en matière de performance énergétique.

La nature et le niveau de la demande électrique sont fonction de plusieurs facteurs déterminants, notamment le nombre d'occupants du logement, le nombre d'appareils électriques utilisés par les ménages, les priorités locales pour le développement d'un secteur économique particulier, l'évolution de l'efficacité de certains types d'équipements et l'émergence de nouvelles technologies ou formes d'énergie [FARZANEH, 2019]. L'identification de ces facteurs est importante pour la modélisation de la demande. En outre, elle peut déboucher sur des politiques des économies d'électricité [ZHANG et al., 2012]. Ces facteurs sont dérivés de notre mode de vie et peuvent être divisés en catégories sociales, économiques, technologiques, environnementales et comportementales [WEBER & PERRELS, 2000] (Tableau 3-5). En général, ils affectent les habitations, les personnes et leurs appareils électriques. La compréhension de ces facteurs déterminants permet d'évaluer les différentes catégories de demande d'énergie pour le système énergétique urbain [FARZANEH et al. 2014].

Tableau 3-5: Facteurs déterminant la demande d'énergie dans les différents scénarios

Réf : Basé sur les facteurs mentionnés			
Scénarios	**Logements**	**Personnes / Société**	**Équipement**
Social	Fonction	Âge/genre/nationalité État de santé Type/taille du ménage Taux de croissance de la population Normes sociales	Temps d'utilisation Durée de l'utilisation
Economique	Taille/type de logement Propriété Disponibilité du mobilier Abordabilité Autres caractéristiques Problèmes	Situation professionnelle Situation économique Revenus Factures d'énergie PIB annuel Taux de chômage	Nombre/type
Technologique	Isolations Évolutions technologiques Production d'énergie renouvelable		Consommation Puissance nominale Mode veille Efficacité
Environnemental	Localisation		Climat Température extérieure
Comportemental	Maisons intelligentes	Niveau de confort souhaité Niveau d'éducation	Dispositifs intelligents

Ces variables contribuent au processus de décision des occupants du logement et peuvent entraîner un changement de leur comportement. La Figure 3-5 montre la relation entre la demande électrique et ces facteurs et révèle comment ils influencent la prise de décision.

Réf : Basé sur des facteurs déterminants de la demande d'électricité

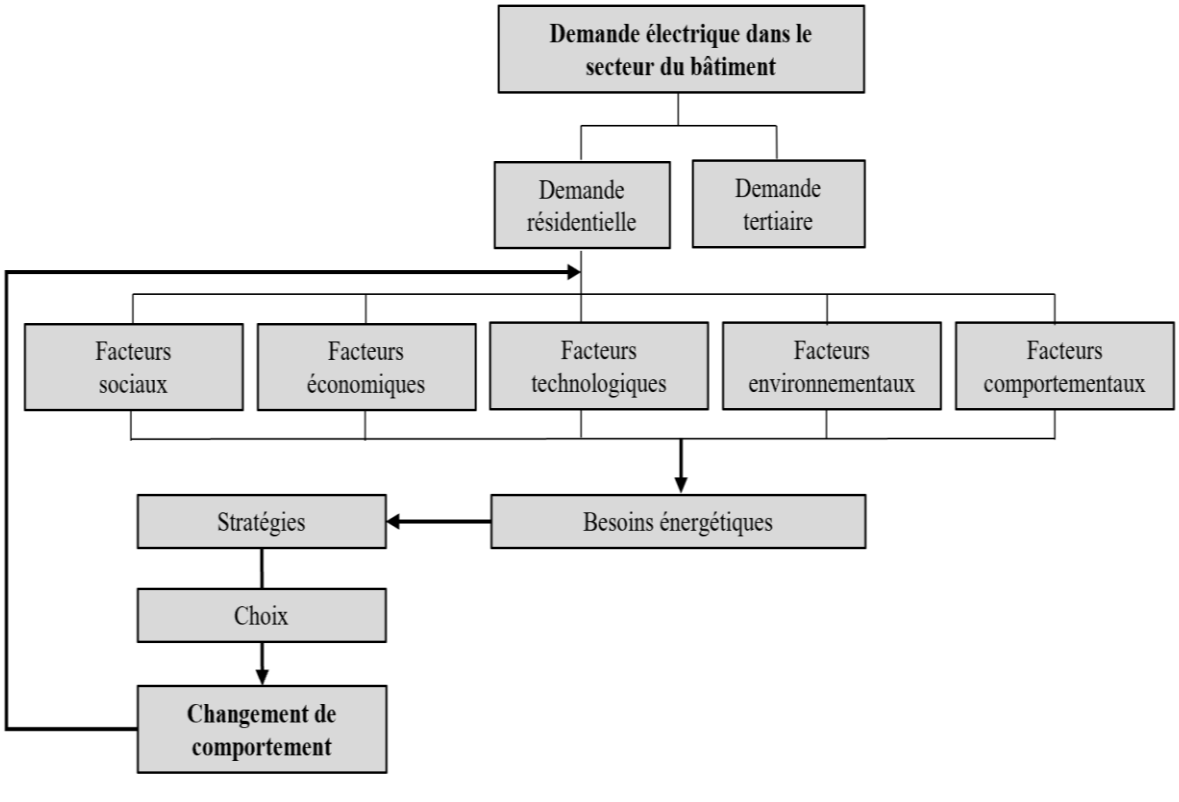


Figure 3-5 : La relation entre la demande d'énergie et ses facteurs déterminants via le changement de comportement dans le secteur résidentiel

Pour identifier les paramètres qui affectent la consommation d'électricité, la toute première étape consiste à recueillir des données primaires. En plus des dispositifs de surveillance (tels que les installations et la technologie de sous-comptage) mentionnés précédemment, différentes techniques de collecte de données existent en France :

1. Les enquêtes destinées aux ménages comprenant des entretiens et des questionnaires ;

2. Les enquêtes nationales et les informations publiées par le gouvernement ou les autorités locales comme celles de l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) ;

3. Les informations sur l'efficacité énergétique et les détails de la consommation électrique des usages finaux à partir des spécifications techniques des fabricants publiées dans leurs manuels (comme les instructions de différentes marques des électroménagers) ou des sites web de sociétés de distribution et de vente d'appareils électriques ou d'autres vendeurs d'appareils électroniques ;

4. Les informations agrégées publiées par l'autorité de transport d'électricité (Réseau de transport d'électricité - RTE) ; et

5. Les factures d'électricité émises par les fournisseurs du marché de l'électricité pour les consommateurs.

Dans cette recherche, nous utilisons d'abord une analyse à grande échelle au moyen de données de l'INSEE. En supposant qu'il y ait les mêmes valeurs dans chaque territoire, nous pouvons ensuite utiliser le résultat de l'analyse pour une zone urbaine plus petite si nécessaire. Des enquêtes sur le logement (Annexe I) sont également réalisées pour compléter l'ensemble des données nécessaires. Certaines informations manquantes sont collectées auprès des fabricants d'appareils électriques. Enfin, les informations publiées par RTE sont utilisées pour la vérification.

3.4.3 Feuille de route

Pour mieux comprendre la méthode de modélisation de la demande d'électricité utilisée dans cette recherche pour les appareils électriques dans le secteur résidentiel, une feuille de route est fournie à l'avance (Figure 3-6). Ce processus est réalisé en 11 étapes (Tableau 3-6) et est présenté en détail dans le chapitre suivant.

Réf : Sur la base des descriptions suivantes

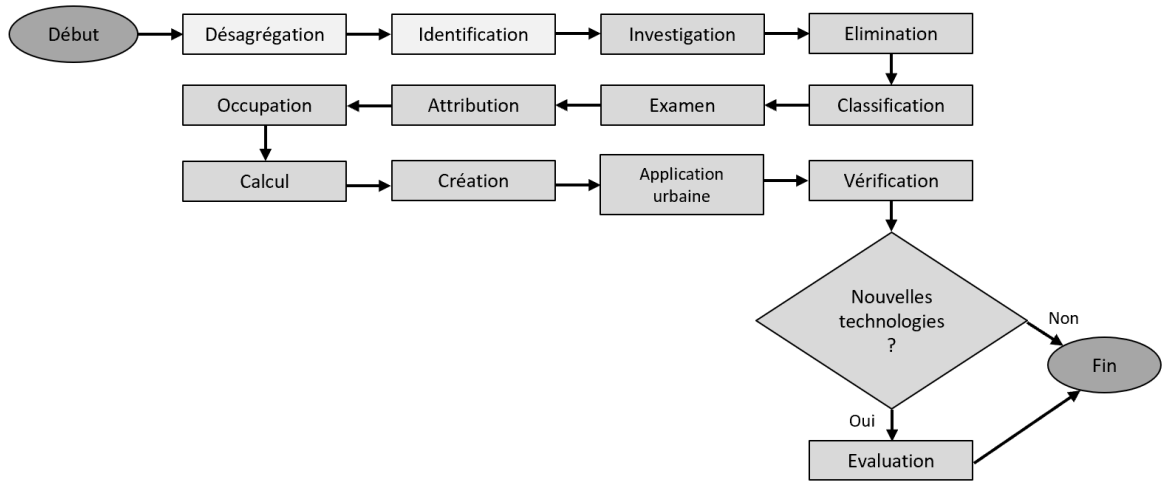


Figure 3-6 : Organigramme de programmation de la feuille de route pour la modélisation de la demande d'électricité

Tableau 3-6: Étapes de modélisation de la demande d'électricité pour un usage final

Réf : Sur la base des descriptions suivantes

Étapes	Actions	Description	Objectif
1	Investigation	Etudier indépendamment chaque paramètre influent et analyser leurs effets sur la consommation d'électricité	Déterminer des variables influentes
2	Elimination	Supprimer des variables d'entrée ayant un effet négligeable sur le modèle et recherche des variables les plus efficaces pour établir des profils	Réduire le nombre de variables
3	Classification	Définir une typologie de profils	Transformer les variables en types
4	Examen	Saisir des données statistiques à l'échelle urbaine et suppression des types avec des valeurs insignifiantes	Réduire le nombre de types
5	Attribution	Définir des appareils électriques pour chaque type en tenant compte d'une enquête réalisée premièrement et de l'analyse statistique	Déterminer les appareils utilisés par chaque type
6	Occupation	Prendre en compte de la variation temporelle dans le modèle en considérant les activités des occupants des logements	Trouver le temps d'utilisation de chaque appareil
7	Calcul	Etablir la relation mathématique entre la demande électrique et les variables spatio-temporelles	Calculer la consommation/demande de chaque type
8	Création	Définir du modèle de consommation pour chaque type et chaque catégorie	Créer un profil de charge pour chaque type
9	Application urbaine	Généralisation du profil de charge grâce aux données urbaines	Généraliser les résultats à l'échelle de la ville en passant par les quartiers
10	Vérification	Comparer des données totales basées sur une simulation désagrégée avec les données totales existantes publiées par les fournisseurs	Vérifier l'exactitude des résultats
11	Evolution	Elaborer de scénarios futurs de développement socio-économique et technologique	Etudier la possibilité de mettre à jour les résultats à l'avenir

Chapitre 4 : Analyse et gestion de la demande d'électricité pour le *smart grid*

Les principales analyses ci-dessous sont réalisées dans ce chapitre :

- Analyse spatio-temporelle de la demande d'électricité : elle vise à montrer la demande d'électricité de plusieurs ménages dans des localisations différentes avec des variations horaires, saisonnières, etc. ;

- Gestion de la charge de la demande d'électricité : elle met à jour l'analyse précédente toute en déplaçant la charge de pointe vers les périodes creuses afin d'aplatir la courbe de charge et de réduire la demande/consommation. Il est également utile de comparer le premier scénario avec le deuxième pour voir comment le *smart grid* contribue à l'écrêtement des pics. ; et

- Analyse de production d'électricité (comparaison de l'offre et de la demande) : qui permet d'optimiser le système électrique.

Pour faire ces analyses, on peut définir les algorithmes impliqués. Ces algorithmes peuvent ensuite être informatisés par le programme de manipulation mathématique MATLAB ou un logiciel plus généralisé de Microsoft Excel. Les techniques de simulation peuvent fournir une courbe de charge qui change en fonction du temps et du lieu. Les cellules liées permettent de procéder facilement à des changements et des modifications ultérieurs et transforment l'analyse à un modèle plus paramétrable et modifiable dans le temps.

La section qui suivra (cette section et la première section du chapitre 4) a fait l'objet d'un article dans la revue scientifique de « *Sustainable Cities and Society* » [FALAKI et al. 2021]. L'étude de cas, la méthodologie, les informations et le texte sont le plus souvent similaires. Cependant, les descriptions sont développées de façon plus pédagogique et plus détaillée dans cette recherche. Les analyses prennent en compte l'ensemble des usages finaux contrairement à l'article qui se concentre sur les appareils électroménagers (Annexe III).

4.1 Analyse spatio-temporelle pour la demande d'usage final des appareils électroménagers : étude de cas de Tours (France)

Une analyse spatio-temporelle de demande peut illustrer les domaines dans lesquels l'application des mesures d'efficacité énergétique peut être appliquée. Après avoir identifié les variables socio-économiques ayant un impact sur la demande d'électricité, grâce à des techniques de modélisation à micro- et macro-échelle, nous avons simulé le profil de charge des ménages concernant des appareils électriques, sur la base d'une enquête auprès de 54 ménages et de statistiques nationales concernant l'activité quotidienne des Français.

4.1.1 Étape 1 : Investigation

Etudier indépendamment chaque paramètre influent et analyser leurs effets sur la consommation d'électricité :

Tous les paramètres déterminants de la demande d'électricité peuvent être divisés en trois catégories : a) logements ; b) occupants ; et c) équipements. Chaque catégorie a plusieurs dimensions. Premièrement, toutes ces dimensions sont analysées, y compris celles qui n'influencent pas les appareils électriques et qui sont hors du cadre de cette étude. Elles sont répertoriées afin de créer une référence complète pour les études futures sur tous les usages finaux (y compris le système de production de l'eau chaude, le chauffage/ la climatisation, l'éclairage ou la cuisson). Certains de ces paramètres sont liés ou dépendants des autres paramètres.

a) Logement :

Un logement est une structure, une maison ou un appartement servant de foyer et de lieu de vie pour un ménage. Comme l'indique cette définition de l'INSEE, les maisons secondaires et les mobil-homes sont également considérés comme des logements mais les maisons de retraite, les résidences universitaires, les prisons, les hôpitaux, etc. sont exclus de cette définition et leur consommation d'électricité est calculée comme des bâtiments tertiaires. Plusieurs facteurs concernant un logement impactent l'utilisation des équipements électriques et la consommation d'électricité.

1. Taille (m^2) et type : YOHANIS et al. (2008) ont constaté un niveau de consommation plus élevé pour les ménages possédant plus de pièces dans leur logement et ont indiqué que la consommation totale d'énergie est proportionnelle à la taille du logement. GRAM-HANSSEN et al. (2004), après avoir présenté une analyse de régression pour 8500 maisons, ont indiqué que le nombre d'occupants du logement, le revenu du ménage et la taille du logement sont les variables qui impactent le plus la consommation d'électricité y compris celle des appareils électriques. Par conséquent, nous pouvons conclure que les logements de grande taille ont potentiellement plus d'appareils électriques (pour la taille des logements en France, voir l'Annexe IV, les Tableaux IV-1 & IV-2 et la Figure IV-1).

2. Âge du bâti : la date de construction est un indicateur de nombreux facteurs tels que la présence ou non de l'isolation et l'utilisation ou non de matériaux plus durables pour les bâtiments non-rénovés. Par conséquent ces informations sont déterminantes pour bien estimer la consommation des systèmes de chauffage et de climatisation. Certaines études montrent que les bâtiments plus récents ont tendance à consommer moins d'énergie [VAAGE, 2000 ; REHDANZ, 2007 et SANTIN et al., 2009]. Au contraire, CHONG (2012) mentionne que les bâtiments plus anciens consomment moins d'énergie en ce qui concerne les systèmes de chauffage et de climatisation en comparaison avec les bâtiments plus récents. Cela peut s'expliquer par le fait qu'ils ont été construits avec des matériaux plus naturels et durables. Cependant, aucun effet direct n'est trouvé sur la relation entre l'âge du bâtiment et l'utilisation d'appareils électroménagers.

3. Localisation : La demande totale électrique résidentielle est également influencée par le climat, la température extérieure moyenne et le degré jour unifié (DJU) [NESBAKKEN, 1999 ; VAAGE, 2000 et MEIER & REHDANZ, 2010]. Elle varie donc en fonction des différentes zones climatiques et a une relation directe avec les conditions météorologiques. L'augmentation ou la diminution de la température entraîne une utilisation plus ou moins importante des systèmes de chauffage ou de climatisation. Cependant, on ne trouve pas de relation directe dans la littérature sur la relation entre l'emplacement d'un logement et les appareils électriques utilisés. Même si, dans les zones montagneuses plus froides de France (T1), l'utilisation d'appareils tels que le sèche-linge et l'appareil à fondue/raclette peut être plus courante (pour les zones climatiques en France, voir l'Annexe IV, la Figure IV-2).

4. Fonctionnalité : Les logements peuvent être divisés en trois grandes catégories selon leur fonctionnalité :

❑ Principal : c'est le logement principal d'un ménage qui est habituellement (plus de la moitié de l'année) et principalement occupé par le ménage.

❑ Temporaire : Il existe deux types de résidences temporaires. Bien que la distinction entre les deux soit parfois difficile. C'est pourquoi, dans certaines statistiques, elles peuvent être classées comme une seule et même catégorie.

- Secondaire : Il s'agit d'une résidence temporaire occupée par le ou les propriétaires ou locataires pendant de courtes périodes, pendant les vacances, les week-ends, les jours fériés, les temps libres, etc. selon une définition de l'INSEE. Les logements meublés en location de courte durée entrent dans cette catégorie.

- Occasionnel : Il s'agit d'une pièce ou d'un logement indépendant utilisé à des fins professionnelles ou occasionnelles comme un pied-à-terre.

❑ Vacant : Il s'agit d'un logement inoccupé en cours de restauration, de rénovation, de vente ou de location.

Les résidences principales sont peut-être plus équipées en appareils électriques que les logements temporaires, mais aucune étude n'a confirmé cette hypothèse. Cependant, dans ce travail, le champ d'application des travaux est limité aux résidences principales qui représentent le pourcentage le plus élevé du total des logements en France avec environ 84% (Figure IV-3 en Annexe IV).

5. Type de bâtiment : L'une des caractéristiques physiques des bâtiments résidentiels qui les rend physiquement distincts est leur caractère collectif ou individuel. Le type de bâtiment dépend de son accès, de sa parcelle, du nombre de ménages qu'il abrite et de sa proximité avec des autres bâtiments. Tous les logements appartiennent à deux types de bâtiments :

❑ Individuel : Il est défini comme une maison séparée ou un ensemble de maisons séparées et il accueille un seul ménage. Il est à noter que dans cette

définition, un ménage composé d'un couple et de ses parents vivant ensemble est considéré comme un seul ménage (explications complémentaires dans la partie sur la composition du ménage).

- Maison individuelle (villa) : Ce type de logement individuel ne partage pas son terrain et ses installations mécaniques avec d'autres bâtiments et est situé sur une parcelle individuelle avec un seul accès (Figure 4-1).

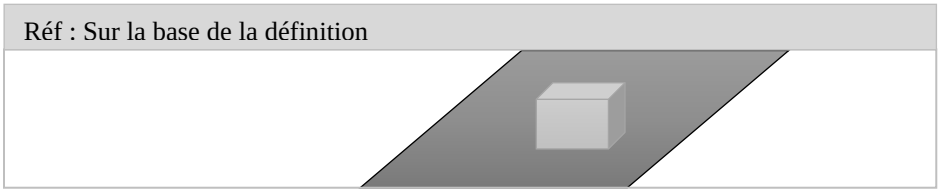


Figure 4-1 : Bâtiment individuel – Maison individuelle

- Ensemble de maisons individuelles : Ce type d'habitation est un ensemble de maisons séparées dans une parcelle. Elles peuvent partager des systèmes de production d'eau chaude, de chauffage ou de climatisation ou avoir des systèmes et des compteurs individuels (Figure 4-2).

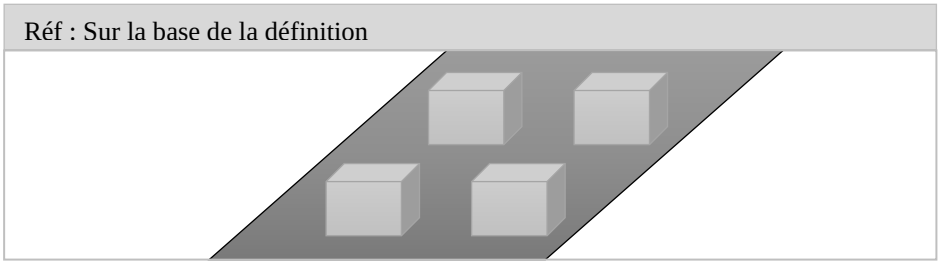


Figure 4-2 : Bâtiment individuel – Ensemble de maisons individuelles

❑ Collectif : Plusieurs unités d'habitation reliées entre elles au moins d'un côté (verticalement ou horizontalement) ou un ensemble de bâtiments similaires est constitué de plusieurs étages et les unités qui accueillent plusieurs ménages sont appelées des logements collectifs.

- Maison mitoyenne (maison de ville) : Elle correspond à un bâtiment comportant un logement et une entrée, qui est occupé par un ménage et qui est relié par les côtés à des maisons similaires, souvent sur des parcelles séparées (Figure 4-3).

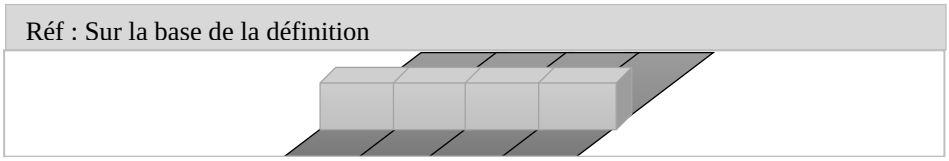


Figure 4-3 : Bâtiment collectif – Maison mitoyenne

• Appartement : Il est une unité d'habitation dans un immeuble avec plusieurs étages. L'immeuble est souvent accessible par une entrée commune pour tous les appartements. Ces logements sont souvent dotés d'un système énergétique central avec des compteurs électriques séparés ou communs pour chaque appartement (Figure 4-4).

Réf : Sur la base de la définition

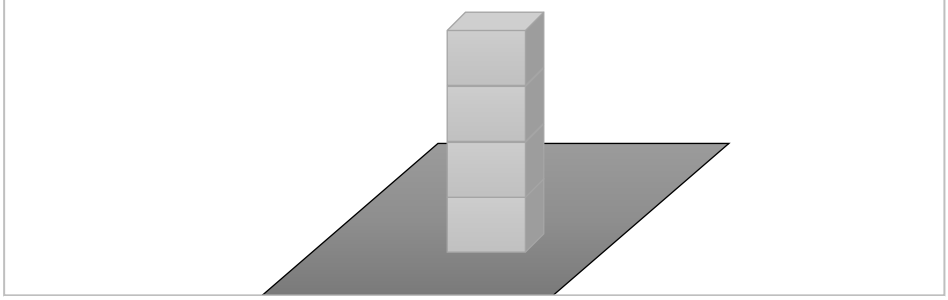


Figure 4-4 : Bâtiment collectif – Appartement

RISCH & SALMON (2014) affirment que la consommation finale d'énergie en France est nettement plus élevée pour les maisons que pour les appartements : 201 kWh/m² par an pour les maisons contre 178 kWh/m² pour les appartements. Ces résultats se situent dans la fourchette de ce qui est couramment calculé par l'Agence Nationale de l'Habitat (ANAH) et incluent toutes les usages finaux. Les bâtiments collectifs dotés d'un système du chauffage et de l'eau collectifs enregistrent une consommation d'énergie nettement plus élevée en moyenne que les bâtiments collectifs ou les logements individuels utilisant un système de chauffage individuel. Cela peut s'expliquer par le niveau plus élevé d'énergie utilisée lorsque l'énergie est un bien public. Dans ce cas, la motivation à réduire la consommation est plus faible. Mais en ce qui concerne les appareils électriques, aucune relation directe n'est trouvée entre le type de bâtiment et l'utilisation des appareils électriques.

6. Statut de propriété : Les occupants d'un logement peuvent être soit propriétaires, soit locataires. Les opinions sur la relation entre le statut de propriétaire et la consommation d'énergie sont variées selon l'étude. Certains chercheurs, comme LEVINSON & NIEMANN (2004) et REHDANZ (2007), estiment que les locataires consomment plus d'énergie que les propriétaires. C'est particulièrement le cas lorsque les coûts énergétiques sont inclus dans le loyer mensuel. Par conséquent, les locataires sont moins sensibilisés à la réalisation des économies d'énergie et à l'utilisation des mesures d'efficacité énergétique [RISCH & SALMON, 2014]. VAAGE (2000) et TWEREFOU &

ABENEY (2020) indiquent que les propriétaires consomment plus ou de façon moins efficace que les locataires. Cela repose sur l'hypothèse que les propriétaires auraient tendance à acheter plus de meubles et d'équipements, y compris des appareils électriques, mais aucune étude ne l'a prouvé. MEIER & REHDANZ (2010) estiment qu'il n'y a pas de relation entre le statut de propriétaire et la consommation d'énergie.

7. Disponibilité du mobilier lors de la vente ou de la location : Les logements peuvent être achetés ou loués meublés, non meublés ou partiellement meublés (par exemple, avec cuisine équipée) (pour le statut de propriétaire en France, voir Figure IV-4 en Annexe IV). Aucune relation directe n'a été établie entre la disponibilité du mobilier et la consommation d'énergie dans les différentes recherches. Cependant, il se peut que les locataires soient moins motivés à acheter de nouveaux appareils électriques pour les logements loués meublés. En effet, les personnes qui choisissent ce type de logement peuvent avoir besoin d'un logement temporaire et sont donc moins incitées à ajouter des équipements.

8. Le caractère abordable : En termes d'accessibilité financière, les logements peuvent être catégorisés en deux types :

- ❑ Logement social : Il est accessible avec un plafond de revenus et est souvent la propriété du gouvernement ou d'organisations sociales.

- ❑ Logement privé : Il appartient souvent à des propriétaires privés et ses conditions d'attribution sont différentes de celles d'un logement social.

Les maisons louées appartenant aux propriétaires privés présentent un profil de charge plus élevé que les logements sociaux loués par des ménages avec des revenus plus faibles [YOHANIS et al., 2008]. Ceci est dû à la situation financière du ménage occupant ces logements. Les occupants des logements sociaux ont souvent un pouvoir d'achat moins important pour acheter des appareils électriques et également pour payer leurs factures d'électricité. Par conséquent, ils essaient de maintenir une demande aussi basse que possible. En ce qui concerne d'autres usages finaux de l'électricité comme le chauffage, leur consommation peut être moins efficace que celle des logements privés en raison de la qualité de ces logements qui est plus basse afin de les rendre accessibles aux personnes à faibles revenus. La difficulté financière des occupants du logement à

effectuer des travaux de rénovation et l'insuffisance de budget gouvernemental pour l'exécution de ces projets sont également d'autres impactant l'inefficacité énergétique.

9. Autres caractéristiques : D'autres caractéristiques telles que le nombre d'étages, le fait d'avoir un jardin, etc. peuvent avoir des effets sur la consommation d'énergie. Les maisons ou appartements de différents niveaux tels que les duplex, les triplex, etc. augmentent la probabilité d'avoir deux ou plusieurs appareils électriques (par exemple un téléviseur et un téléphone à chaque étage). Ceux qui ont un jardin peuvent aussi être équipés de matériel de jardinage électrique.

10. Défauts du logement : Les problèmes de logement, tels que le suroccupation, la petite taille, l'humidité, le bruit, le manque d'isolation, l'absence de salle de bain, de toilettes, de l'eau chaude sanitaire et de système de chauffage/climatisation, s'expliquent par l'absence de revenus suffisants pour entretenir et réparer le logement. Les indicateurs liés aux problèmes de logement font partie de la liste des indicateurs recommandés par le rapport « Niveau de vie et inégalités sociales » du Conseil National de l'Information Statistique de France (CNIS) publié par l'INSEE. Ce rapport révèle qu'au moins 53 % des logements en France en 2010 sont concernés au moins par un de ces problèmes (pour les problèmes de logement en France, voir Figure IV-5 en Annexe IV). Ces défauts ont des effets sur la demande d'électricité et sont généralement liées au niveau de vie financier des occupants du logement et affectent leur pouvoir d'achat, y compris leur budget pour acheter des appareils électriques. Nous pouvons donc conclure que les ménages vivant dans des logements présentant des problèmes ont moins d'appareils électriques. D'autre part, les problèmes tels que le manque d'isolation ont une influence directe sur la consommation d'électricité liée aux systèmes de chauffage et rendent la consommation plus importante comme dans le cas des logements sociaux.

b) Occupants du logement :

Les caractéristiques des occupants des logements et par conséquent leur comportement vis-à-vis de la consommation d'énergie varient d'une personne à l'autre. Cette variation a des dimensions économiques, sociales et psychologiques et dépend de leur attitude en matière de bénéfice économique (par exemple, économies d'énergie et bénéfices de production) et de confort (par exemple, niveau de vie). Les caractéristiques les plus importantes qui pourraient affecter la consommation peuvent être classées comme suit :

1. Genre : les différences entre les hommes et les femmes peuvent conduire à des modes de consommation d'électricité différents. RÄTY & CARLSSON-KANYAMA (2010) ont constaté que les hommes sont plus nombreux à préférer manger au restaurant, tandis que les femmes préfèrent cuisiner à la maison, ce qui peut entraîner une plus grande utilisation des appareils électriques liés à la cuisine, tels que les micro-ondes, les plaques de cuisson et autres petits électroménagers de cuisine chez les femmes. En outre, les hommes sont plus nombreux à être équipés d'appareils mécaniques tels que perceuse électrique, scie, etc.

D'après la même étude, la consommation totale d'énergie des hommes célibataires est plus élevée que celle des femmes célibataires. Cela pourrait être à nouveau lié à l'inégalité en matière d'emploi et s'expliquer dans une certaine mesure par le niveau de vie financière des individus et leur pouvoir d'achat. Selon BARREN & NORRIS (1976), les femmes sont plus nombreuses que les hommes à occuper des emplois non qualifiés, à avoir des contrats de courte durée, à être moins bien rémunérées et à effectuer des travaux non qualifiés offrant moins de perspectives, elles sont donc plus susceptibles d'être licenciées et souffrent donc d'une baisse du marché du travail et d'un moindre pouvoir d'achat. Cette constatation pourrait ne pas correspondre tout à fait à la situation actuelle mais les femmes en France en 2018 sont, en moyenne, payées 16,8% en moins que les hommes pour des postes à temps plein selon l'OBSERVATOIRE DES INEGALITES_ (2019).

2. Les groupes ethniques : la consommation électrique par habitant est différente d'un pays à l'autre. Cela s'explique en partie par la consommation d'électricité pour le chauffage et la climatisation. Les habitants des pays où le climat est extrêmement chaud ou froid ont tendance à consommer plus d'électricité. Cependant, différents groupes ethniques vivant dans la même zone climatique peuvent avoir des modes de consommation différents en raison d'habitudes et d'exigences de confort variées, ce qui montre l'importance de l'étude des ethnies dans l'analyse de la consommation d'énergie. Cette différence peut s'expliquer par des différences de race, de pratiques culturelles, de traditions et de comportements habituels [OCDE, 2002].

Par exemple, les Français sont plus nombreux à posséder des appareils électriques tels que des appareils à fondue, à crêpe et à raclette que les étrangers vivant en France

d'après une enquête réalisée sur 54 ménages (Annexe I). Par conséquent, une étude de cas peut ne pas être applicable dans le monde entier et chaque cas doit être étudié.

3. L'âge : l'âge de tous les occupants du logement a des effets sur la consommation électrique du ménage. Les personnes âgées de plus de 65 ans occupent généralement leur logement pendant la journée, ont une faible consommation pendant la nuit et une consommation maximale pendant la journée. Les personnes de moins de 40 ans ont une faible consommation pendant la journée en raison de leur absence de leur logement à cause de leurs activités et leur consommation est maximale le soir. Les personnes âgées de 50 à 65 ans, souvent en raison d'une meilleure situation financière, occupent un logement plus grand avec leur famille et disposent donc d'une vaste gamme d'appareils électriques. Ces ménages sont donc les plus consommateurs et ceux de plus de 65 ans les moins consommateurs selon l'étude de YOHANIS et al. (2008).

Dans la plupart des études de l'INSEE, l'analyse se fait en fonction de l'âge de la personne de référence. C'est la personne avec les revenus les plus élevés qui a plus de poids pour les décisions du ménage concernant la consommation, l'achat, etc. Cette personne oriente souvent le comportement et le choix du ménage et a plus d'influence sur la consommation. Cependant, l'âge de tous les occupants influence le mode de consommation. Les différents groupes d'âge peuvent avoir des besoins variés ainsi qu'un pouvoir d'achat différent en matière d'appareils électriques.

4. Situation d'emploi : l'emploi des occupants du logement a des effets sur leur revenu et donc sur leur pouvoir d'achat d'appareils électriques. Il influence également leurs horaires d'activité. Par exemple, les retraités et les chômeurs sont plus susceptibles de rester chez eux pendant la journée et donc de consommer de l'électricité. Cette situation a également des répercussions sur les demandes en heures de pointe. Les personnes ayant un emploi rentrent le plus souvent chez elles le soir et commencent à consommer de l'électricité relativement à la même heure, ce qui crée une demande de pointe soudaine tous les soirs de la semaine à la même heure.

5. Niveau d'étude : AUNE et al. (2002) ont réalisé deux études et n'ont pas établi de corrélations directes entre la consommation d'énergie et l'éducation. Cependant, le niveau d'étude du référant de ménage est important pour la sensibilisation des ménages

au sujet d'énergie [TEWATHIA, 2014] et a des effets sur le comportement des ménages en matière de décisions relatives à l'efficacité énergétique.

6. État de santé : certaines maladies nécessitent l'utilisation d'équipements électriques médicaux spéciaux qui contribuent à l'augmentation de la consommation totale d'électricité. Un exemple est le lève-personne électrique qui permet de transférer la personne à mobilité réduite avec un minimum d'effort. L'ioniseur ou le purificateur d'air, le ventilateur, la pompe à perfusion et le concentrateur d'oxygène sont des exemples d'équipements médicaux électriques utilisés à domicile. En outre, il n'y a pas de relation directe établie entre le fait d'avoir un handicap ou un problème de santé et la consommation d'électricité.

7. Composition et taille du ménage : le nombre d'adultes et d'enfants dans un logement et la relation entre les membres du ménage ont une influence importante sur la consommation d'électricité. Chaque ménage est représenté par la somme de tous les occupants d'un logement principal (qu'ils soient unis par un lien de parenté ou pas). En d'autres termes, le mot « ménage » peut être différent de la famille traditionnelle dont les membres entretiennent une relation inter-individuelle. Il peut également s'agir de ménages non familiaux ou d'une personne vivant seule.

Les personnes vivant dans des communautés telles que les dortoirs, les maisons de retraite, et les prisons, ainsi que les personnes vivant dans des maisons mobiles, les sans-abris et les marins sont exclues de cette définition. Les individus appartiennent souvent à l'un des ménages suivants :

- ❑ Couple : Ce ménage est formé de deux personnes vivant ensemble et qui sont souvent unies par le mariage, le concubinage, l'engagement de cohabitation ou le pacte civil de solidarité (PACS).

- ❑ Famille : Il est composé d'un couple et d'un ou plusieurs enfants nés ou adoptés par eux.

- ❑ Monoparental : Il s'agit d'un des parents vivant avec un ou plusieurs de ses enfants nés ou adoptés.

- ❑ Complexe : Il existe deux types de ménages complexes :

- Familial : Il s'agit souvent d'une famille élargie qui comprend plusieurs générations, comme les parents et les enfants d'un couple qui vivent ensemble dans un logement en raison de préférences culturelles ou pour réduire de réduction le coût de subsistance. Elle peut également être composée d'autres membres de la famille tels que les tantes, les oncles, les cousins, etc. qui se joignent à la famille pour vivre ensemble ;

- Non-familial : Il s'agit d'un ménage composé de personnes qui ne se connaissent pas nécessairement très bien, qui vivent ensemble et partagent des chambres ou des logements avec des espaces de couchage généralement séparés, souvent pour partager les coûts financiers, comme dans le cas des étudiants, des jeunes professionnels et autres colocations ou d'un ménage avec un membre du foyer**,** une personne non apparentée au sein du ménage pour fournir un service tel que la garde d'enfants, les soins infirmiers, le placement au pair ou l'assistance en échange de la libre résidence dans le ménage et de la réception de nourriture et/ou de certaines allocations. Dans un ménage non familial et complexe, un accord est souvent signé entre les membres ou entre le membre du foyer et la personne référente.

❑ Membre-unique : Le logement est occupé par une personne vivant seule.

Selon l'enquête d'AUSTRALIAN BUREAU OF STATISTICS (2012) sur la consommation d'énergie des ménages en Australie sur la relation entre le type de ménages et leurs dépenses énergétiques, respectivement les ménages complexes, les ménages monoparentaux, les familles, les couples et ceux avec un membre-unique sont les plus grands consommateurs d'électricité dans le secteur résidentiel.

Une analyse de GRAM-HANSSEN (2011) confirme que le nombre de personnes dans le ménage est un déterminant important de la quantité de la consommation d'électricité. Cependant, elle montre également que l'efficacité énergétique est meilleure lorsque davantage de personnes vivent ensemble. Par conséquent, bien que la consommation totale des ménages plus grands soit plus élevée que celle des ménages plus petits, la consommation moyenne par personne diminue à mesure que le nombre d'occupants du logement augmente.

Le nombre d'occupants du logement, n'est pas le seul déterminant de la consommation électrique. La différence de consommation d'un ménage monoparental et celui d'une famille peut s'expliquer également par leur situation financière. Deux parents actifs dans une famille par rapport à un dans un ménage monoparental se traduit souvent par des revenus plus élevés pour la famille. Cela montre l'importance du type ou composition de ménage en plus de sa taille.

En outre, un ménage composé de deux personnes peut avoir des structures différentes : couple, monoparental ou complexe. Les différents modes de consommation de chaque ménage soulignent l'importance du type de ménage sur le sujet.

8. Niveau financier : CARLSSON-KANYAMA & LINDEN (2007) ont constaté que le niveau de vie a des répercussions sur le type de logement acheté ou loué par le ménage, ce qui peut influencer le mode de vie des membres de la famille et donc les habitudes de consommation d'électricité. MCMICHAEL (2007) a également déclaré que plus les ménages ont des revenus importants, plus leur logement est grand et donc plus ils sont susceptibles de consommer davantage de l'électricité.

Outre la situation financière des ménages, les prix de l'énergie sont également déterminants pour la consommation d'énergie. De nombreuses études ont porté sur l'impact des prix de l'énergie sur la consommation d'énergie [PARTI & PARTI, 1980 ; DUBIN & MCFADDEN, 1984 ; NESBAKKEN, 1999 et HALVORSEN & LARSEN, 2001]. Ces études montrent que plus le prix de l'électricité est bas, plus les gens ont tendance à consommer davantage.

c) Appareils électriques :

La consommation d'électricité est fonction de la totalité des appareils et de leur utilisation [PETERSEN, 1982]. Le modèle de DUBIN & MCFADDEN (1984) suit une approche structurelle où la consommation d'électricité du ménage et le choix des appareils sont des décisions interdépendantes provenant de la même fonction d'utilité. Pour calculer la consommation électrique annuelle de chaque appareil électrique par kWh, il faut connaître puissance de l'appareil et nombre d'heure et de jour de son utilisation.

Cependant, pour déterminer la demande d'électricité, il est également important de connaître le temps d'utilisation des appareils. Par conséquent, pour estimer la consommation/demande

d'électricité des appareils électriques dans les bâtiments résidentiels, il est nécessaire de connaître les principaux paramètres suivants :

- ❑ Type d'appareil (consommation, efficacité, etc.) ;
- ❑ Nombre d'appareils ; et
- ❑ Temps (heure et durée) d'utilisation de chaque appareil.

La variété du type d'appareils électriques et leur utilisation semi-aléatoire par les occupants du logement rendent compliqué l'estimation du besoin en électricité domestique, et en particulier pour des intervalles de temps courts comme une heure ou moins. Cependant, la compréhension globale de la consommation d'électricité domestique est nécessaire pour la conception et la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique et de production d'électricité décentralisée [FIRTH et al., 2008]. Par conséquent, pour estimer la consommation/demande d'électricité des appareils électriques, il faut d'abord connaître les trois paramètres cités ci-dessus pour chaque appareil électrique.

Plusieurs facteurs concernant les appareils électroménagers les plus utilisés sont recueillis pour une analyse ultérieure. Ces données sont collectées à partir de nombreuses références. Les références, les approches et la procédure de collecte des données varient en fonction de la disponibilité des données sur chaque appareil électrique. Ces facteurs et ces références sont présentés dans le Tableau V-1 en Annexe V. Ces informations sont une représentation de la technologie actuelle et les évolutions futures peuvent affecter la puissance en veille et l'électricité consommée par les appareils pendant son fonctionnement. En outre, l'évolution du mode de vie peut également entraîner une modification de la fréquence d'utilisation.

Le Tableau V-1 permet de suivre la manière dont ces données sont enregistrées. Il est préparé de façon paramétrable afin de permettre une modification facile des données d'entrée à l'avenir afin de réaliser des ajustements futurs ou des mises à jour des données actuelles. Certains des appareils électroménagers classés selon leur emplacement ou leur fonction sont énumérés dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1: Quelques appareils électroménagers

Réf : Site des fabricants/fournisseurs					
Cuisine/appareils de cuisson :					
1	Blender	**13**	Cuiseurs à œufs	**25**	Mixeur
2	Barbecue/grille-viande	**14**	Appareil à fondue	**26**	Extractreur de jus
3	Distributeur de bière	**15**	Broyeurs des déchets alimentaires	**27**	Crêpière
4	Machine à pain	**16**	Congélateur	**28**	Machine à pop-corn
5	Ouvre-boîtes	**17**	Machine à hot-dogs	**29**	Appareil à raclette
6	Moulin à café	**18**	Machine à glace	**30**	Réfrigérateur
7	Machine à café	**19**	Presse-agrumes/centrifugeuse	**31**	Cuiseur de riz
8	Machine à barbe à papa	**20**	Bouilloire/chauffe-eau	**32**	Croque-monsieur / gaufrier
9	Friteuse	**21**	Couteau / trancheuse	**33**	Cuiseur vapeur
10	Lave-vaisselle	**22**	Hotte de cuisine	**34**	Théière
11	Appareil à beignets et à cupcakes	**23**	Hachoir à viande	**35**	Grille-pain
12	Batteur à œufs	**24**	Micro-ondes	**36**	Yaourtière
Magasin/entretien/nettoyage des appareils :					
37	Réveil	**44**	Fer à repasser	**51**	Séche-linge
38	Balai à tapis	**45**	Tondeuse à gazon	**52**	Aspirateur
39	Désodorisant	**46**	Radio	**53**	Vaporisateur/humidificateur
40	Perceuse	**47**	Scie	**54**	Lave-linge
41	Polisseur de sol	**48**	Tournevis	**55**	déshumidificateur
42	Désinsectiseur	**49**	Machine à coudre		
43	Interphone	**50**	Cireur de chaussures		
Salon/appareils de divertissement :					
56	Aquarium	**60**	Amplificateur de guitare	**64**	Consoles de jeux vidéo
57	Système audio/HiFi	**61**	Home cinéma	**65**	Casques
58	Routeur	**62**	Clavier/Piano	**66**	Décodeur/boîtier TV
59	Lecteur DVD /CD	**63**	Télévision		
Appareils de salle de bains/santé-beauté :					
67	Épilateur	**70**	Appareil de massage	**73**	Tapis de course
68	Sèche-cheveux	**71**	Rasoir/tondeuse		
69	Coiffeur (lisseur/fer à boucler)	**72**	Brosse à dents		
Appareils de bureau :					
74	Répondeur téléphonique	**77**	Haut-parleurs	**80**	Imprimante/scanner/copieur
75	Chargeur (téléphone)	**78**	ordinateur portable	**81**	Téléphone
76	Processeur	**79**	Télécopieur	**82**	Tablette

La consommation moyenne d'un appareil peut varier dans chaque référence (Tableau V-2). Cette variation est due aux différences en ce qui concerne la taille, le modèle, l'âge, la capacité, la fonction, l'efficacité, la performance et la technologie entre les appareils produits par de nombreux fabricants (par exemple, un téléviseur à tube cathodique de 30 pouces fabriqué en 2007 n'a pas la même consommation qu'un téléviseur avec un écran à cristaux liquides (*LCD*) de 46 pouces fabriqué plus récemment). Des informations plus précises sur les variétés différentes de ces appareils ainsi que sur certains appareils électriques moins courants figurent dans le Tableau V-3 en Annexe V. La durée et/ou le cycle d'utilisation mentionnés dans les Tableaux V-2 et V-3 sont des valeurs moyennes et comprennent tous les types de

personnes, indépendamment de leur profession, de leur niveau d'éducation ou financier, ou d'autres facteurs. Par exemple, une machine à laver effectue en moyenne 220 cycles de lessive et chaque dure 40 minutes. Ces valeurs pourraient être plus importantes pour une famille avec plusieurs enfants par rapport un ménage composé d'un membre unique.

4.1.2 Étape 2. Élimination

Supprimer des variables d'entrée ayant un effet négligeable sur le modèle et recherche des variables les plus efficaces pour établir des profils :

Pour une évaluation de la consommation d'électricité, la catégorisation ainsi que l'identification des paramètres ont une importance décisive. Cette sélection peut être basée sur une modélisation mathématique telle que la régression linéaire. Cependant, la sélection n'est pas une tâche simple puisque les analyses basées sur des données statistiques sont sensibles aux corrélations entre les différents paramètres mesurés. Pour améliorer l'analyse, les méthodes multicritères telles que l'analyse en composantes principales (ACP) constituent une aide précieuse [OLOFSSON et al., 2004].

En utilisant l'ACP sur des paramètres interdépendants et affectants sur la consommation/demande électrique tels que la taille du logement et le revenu de l'occupant du logement, nous pouvons omettre l'ensemble de données qui contribuent le moins à la variation. L'ACP, en tant que procédure multicritère par suppression des axes les moins significatifs, maximise la variance et en décrit la majeure partie. Essentiellement, un ensemble de variables corrélées est transformé en un nouvel ensemble de variables non corrélées qui sont classés selon leur impact. Les nouvelles variables non corrélées, ou composantes principales sont des combinaisons linéaires des variables originales, et la dernière de ces variables peut être supprimée avec un impact minimal sur la variation [OLOFSSON et al., 2004]. L'ACP peut donc être utilisée dans cette recherche pour réduire la dimensionnalité d'un ensemble de données tout en conservant le maximum d'informations.

Toutefois, il est seulement possible de vérifier la relation ou la corrélation entre les données quantitatives telles que la taille du logement et le niveau financier. Cette méthode ne fonctionne donc pas pour les données qualitatives (par exemple, le sexe, le groupe ethnique et les conditions de santé). Cependant, l'étude de tous les paramètres dans les sections précédentes a montré qu'il existe très peu de relation entre la consommation d'électricité des

appareils électriques et les paramètres qualitatifs mentionnés précédemment (sauf pour le genre des occupants du logement et le type de ménage). Par conséquent, nous commençons par étudier la relation entre les paramètres quantitatifs (la taille du logement, l'âge des occupants du logement, la taille du ménage et le niveau financier du ménage), ainsi que la relation entre ces variables et le nombre d'appareils électroménagers que possèdent les ménages.

Différentes méthodes d'enquête peuvent être utilisées pour recueillir des données quantitatives et qualitatives sur les ménages, leurs logements et leurs appareils électriques. En raison du manque de financement et d'accès aux compteurs communicants et de la complexité du système administratif français concernant le traitement des données personnelles notamment la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés sur l'utilisation des données collectées par les fournisseurs d'électricité et aussi au niveau européen, le règlement UE 2016/679 du Parlement Européen et du Conseil du 27 avril 2016 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données, et abrogeant la directive 95/46/CE dit règlement général sur la protection des données (RGPD), un ensemble de questions est préparé en ligne et distribué de manière aléatoire à 24 personnes volontaires vivant dans la zone d'étude de cas (taux de réponse de 100 %). Ce questionnaire se composait de trois sections principales : 1) informations sur le membre du ménage qui répond aux questions et informations sur son ménage ; 2) caractéristiques du logement ; et 3) appareils électriques possédés et utilisés par le ménage (à choisir dans une liste de 82 appareils comme indiqué dans le Tableau 4-1).

L'objectif de ce questionnaire est de trouver la relation entre le type d'appareils électriques utilisés par les ménages avec les caractéristiques du logement (taille, âge, type, emplacement du bâtiment, etc.) et les caractéristiques du ménage (type de ménage, âge, revenu, niveau d'étude, activité, etc.) valables pour chaque échantillon d'étude. Ainsi, pour maximiser la diversité des réponses et pour élargir la population de l'échantillon précédent, une approche d'échantillonnage aléatoire est choisie. Une enquête en ligne en libre accès a permis d'obtenir 30 réponses supplémentaires au questionnaire mentionné précédemment, provenant de différents endroits en France. Le total de 54 réponses reflète toutes les tranches d'âge, les types de ménages, les types de logements, etc. déjà représentés dans les statistiques nationales

françaises et, en raison de contraintes de temps, une population plus importante n'a pas été étudiée. Les résultats détaillés de cette enquête sont présentés dans l'annexe I.

La valeur moyenne et l'écart-type des variables les plus influentes sur la demande d'électricité selon l'enquête figurent dans le Tableau 4-2.

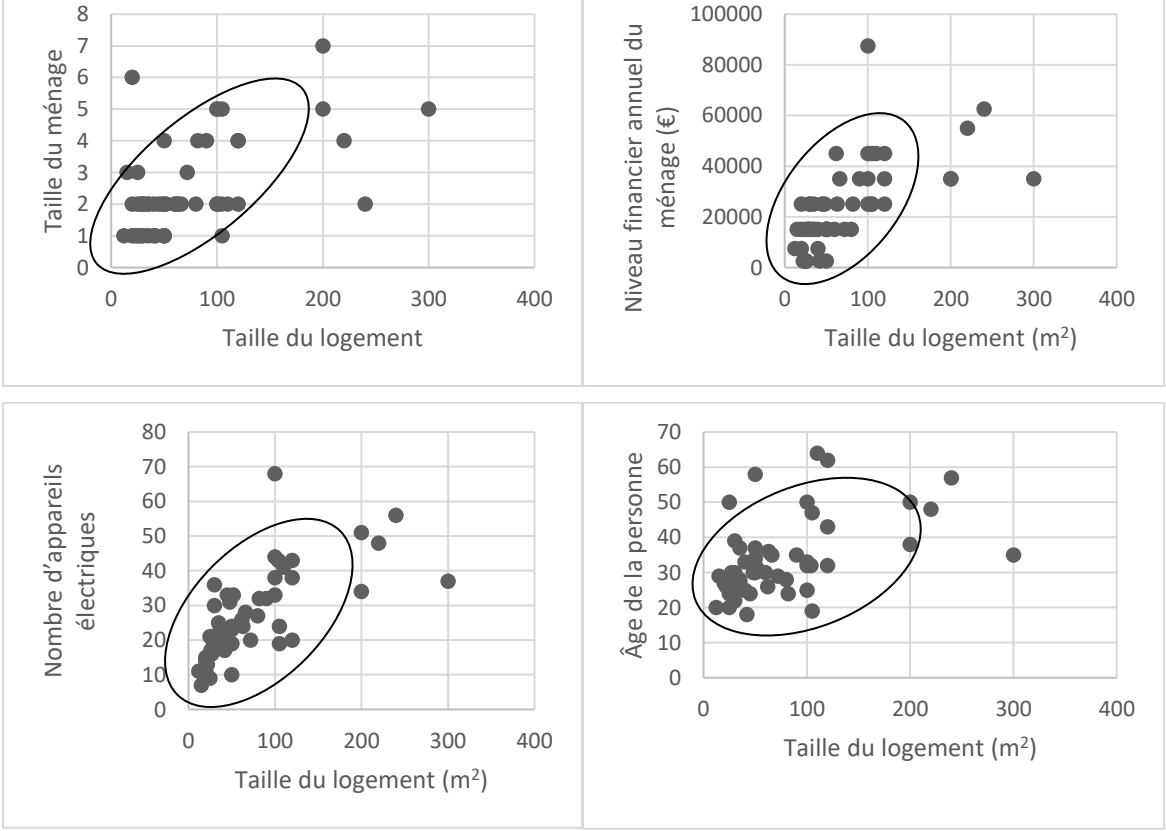
Tableau 4-2 : Valeur moyenne et écart-type des variables les plus influentes sur la demande d'électricité

Réf : Calculé sur la base des résultats de l'enquête

Variables	Données	Par :	Min	Max	Moyenne	Écart-type
X1	Taille du logement	m²	12	300	72,72	61,23
X2	Âge de la personne	Années	18	64	33,43	10,87
X3	Taille du ménage	Nombre de personnes	1	7	2,46	1,48
X4	Niveau financier annuel	Euros	2500	78499,5	23749,56	16588,38
N	Nombre d'appareils électriques	Nombre d'appareils	7	68	26,63	12,62

La sensibilité entre les variables doit être étudiée et analysée afin de voir si le changement de l'une d'entre elles peut affecter les autres ou s'accompagner d'un changement dans les autres. On peut ensuite tirer une conclusion raisonnable et éliminer des variables insignifiantes. Voici des représentations graphiques de l'interrelation entre ces variables (Figure 4-5).

Réf : Crée sur la base de l'enquête et le Tableau 4-2



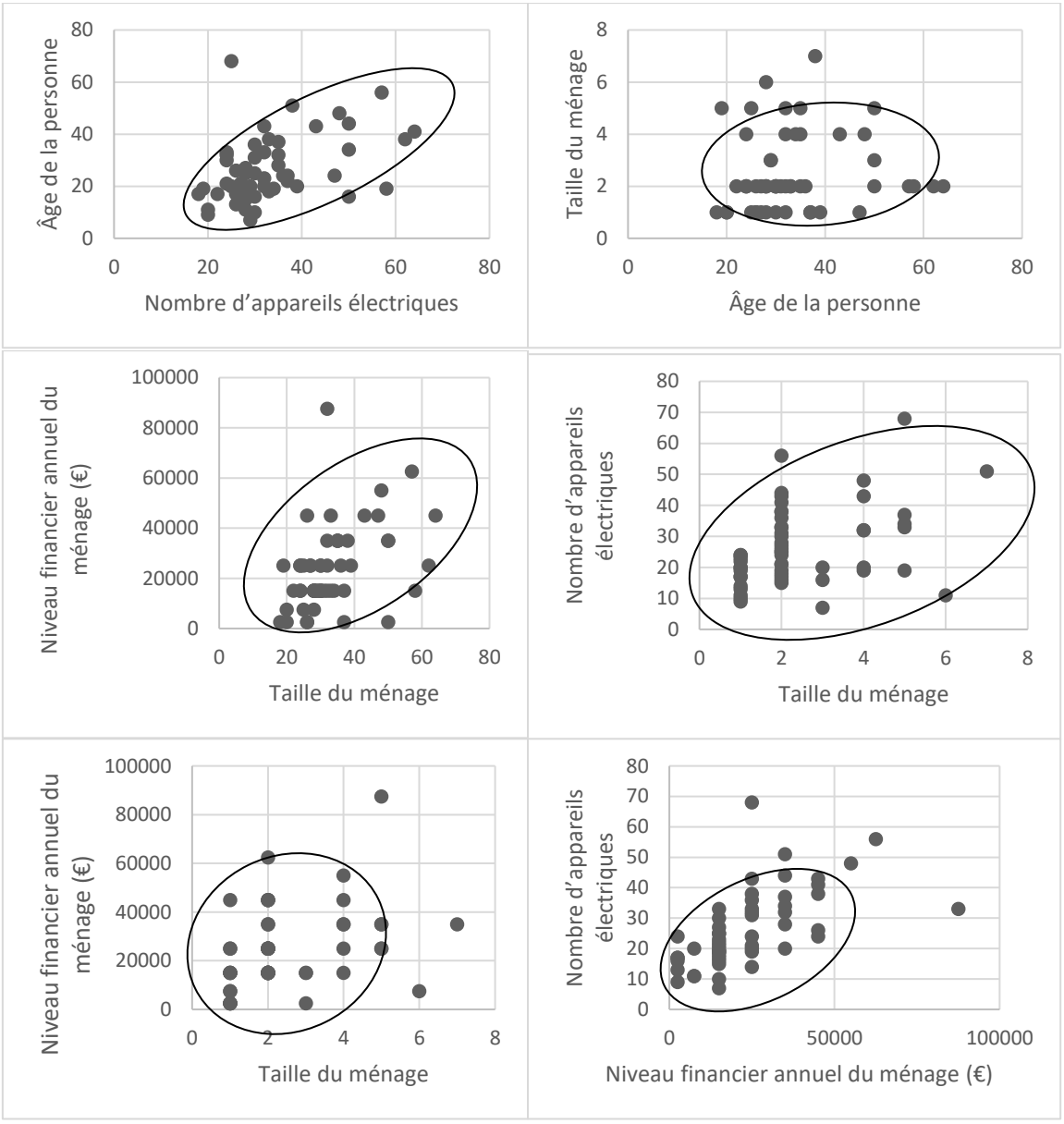


Figure 4-5 *:* Corrélations entre les variables étudiées

Ces graphiques montrent que toutes les paires de variables analysées sont positivement corrélées. Cependant, pour interpréter cela de manière plus précise et trouver l'intensité de la corrélation, le nombre de variables doit être réduit par la technique de réduction des données de l'ACP précédemment évoquée. En utilisant l'Equation 1, nous pouvons calculer la corrélation entre chaque paire de variables de X et Y.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2(y_i-\bar{y})^2}} \quad (1)$$

où :

x et y sont les variables.

$\bar{x}$ et $\bar{y}$ sont les moyennes arithmétiques pour x et y.

Les corrélations r_{xy} entre ces variables se trouvent dans le tableau 4. Ce sont respectivement la taille du logement (X1), le niveau financier (X4), l'âge de la personne (X2) et la taille du ménage (X3) qui contribuent le plus à l'augmentation du nombre d'appareils électriques que chaque ménage possède. La taille du logement (X1) est corrélée au niveau financier des ménages (X4Y4) avec le coefficient de corrélation le plus élevé (0,6964) par rapport aux autres variables, ce qui signifie que plus le niveau financier est élevé, plus le logement est grand. Grâce à la matrice d'entrée présentée dans le Tableau 4-3, nous pouvons identifier les variables responsables de la variation du nombre d'appareils électriques. Finalement, les variables qui ont déjà été prises en compte en raison de leur multi-colinéarité peuvent être supprimées.

Tableau 4-3 : Matrice de corrélation pour les variables étudiées influençant la demande électrique

Réf : Calculé en utilisant l'Equation 1

	Taille du logement (Y1)	Âge de la personne (Y2)	Taille du ménage (Y3)	Niveau financier annuel du ménage (Y4)
Taille du logement (X1)	1.000000000	0.488733327	0.546429620	0.639449166
Âge de la personne (X2)	0.488733327	1.000000000	0.091018335	0.422255729
Taille du ménage (X3)	0.546429620	0.091018335	1.000000000	0.388256237
Niveau financier annuel du ménage (X4)	0.639449166	0.422255729	0.388256237	1.000000000

Le déterminant de la matrice est égal à 0,286 à partir duquel la valeur propre, les vecteurs propres et la variance de chaque variable peuvent être calculés (Tableau 4-4).

Tableau 4-4 : Calcul des valeurs propres initiales de l'ACP pour les variables étudiées influençant la demande électrique

Réf : Calculé sur la base du Tableau 4-3

	X1	X2	X3	X4
Valeur propre	2.330331575	0.912629659	0.285127848	0.471910918
Vecteurs propres	0.590010960 0.417967981 0.428966055 0.541459100	0.051460671 -0.708861170 0.7005560344 -0.063897152	0.801594953 -0.310657282 -0.401970403 -0.315210057	-0.081758161 -0.475721202 -0.404503553 0.776776555
Variance	3749.22327	118.060447	2.17784766	275174481.2

Chaque valeur propre divisée par la somme des valeurs propres (variance totale) donne un nombre qui explique le taux de variation dont chaque variable est responsable. La somme de ce nombre et le numéro successif indique la variation totale courante. À titre d'exemple, 81,07 % de la variation est explicable par la première et la deuxième variables (Tableau 4-5). Par conséquent, malgré la suppression de la troisième et de la quatrième composantes, 81,07 % de la variation est maintenu. Cela suppose que les deux premières composantes (taille du logement et âge des occupants du logement) expliquent une variation suffisante et présentent en même temps des corrélations élevées avec X3 (0,55) et X4 (0,64), ce qui signifie que leur élimination n'affecte pas beaucoup les résultats. Ainsi, X1 et X2 sont considérés comme des composantes principales.

Tableau 4-5 : Calcul de la proportion cumulative pour l'ACP

Réf : Calculé sur la base du Tableau 4-4

Numéro de la composante	**Nom de la variable**	**Proportion de la variance (valeur propre/ variance totale)**	**Proportion cumulée de la variance**
1st	X1	58.25 %	58.25 %
2nd	X2	22.82 %	81.07 %
3rd	X4	11.80 %	92.87 %
4th	X3	7.13 %	100 %

4.1.3 Étape 3. Classification

Définir une typologie de profils :

Les variables quantitatives et qualitatives qui affectent la consommation d'électricité des appareils électriques et leurs catégories possibles peuvent être résumées dans le Tableau 4-6.

Tableau 4-6: Variables déterminantes de la consommation d'électricité d'usage final des appareils électriques

Réf : Basé sur l'enquête (Annexe I) et le Tableau 4-5

Variables quantitatives	Âge des occupants (<25, 25 < <65, >65)	Taille du logement (<40, 40< <100, >100)	Taille du ménage (1, 2, 3,...)
Variables qualitatives	Genre des occupants (M, F)	Activité (active, inactive)	Type de ménage (membre-unique, mono-parental, couple, famille, complexe)

Pour avoir une analyse plus précise, nous prenons en considération le type de ménage. Cette variable contient intrinsèquement la taille du ménage. Un ménage composé de deux personnes

peut avoir plusieurs structures (par exemple, un ménage monoparental composé d'un père et d'un enfant, un couple composé de deux adultes, etc.) qui, selon l'enquête, n'ont pas le même profil de demande d'électricité.

Ainsi, cinq facteurs sont choisis comme étant prépondérants dans détermination de la consommation d'électricité résidentielle liée aux appareils électriques. En divisant chaque facteur par toutes les catégories et en les multipliant les uns par les autres, on obtient divers scénarios de ces situations et différentes possibilités pour chaque scénario. Ces catégories sont basées sur les données existantes provenant des résultats du recensement de la population et de la situation d'activité/emploi des individus (étudiant, employé, retraité, etc.) (voir le Tableau 4-7, pour un Tableau plus détaillé voir Annexe VI, Tableau VI-1).

Tableau 4-7: Différents types et possibilités de profils de consommateurs

Réf : INSEE RP2010 et Tableau 4-6		
N°	**Types**	**Possibilités**
Légende : Âge de la personne de référence (Y : jeune, MA : âge moyen, O : plus âgé) Type de ménage (Membre-unique : SM, Couple : C, Famille : F, Monoparental : MP, Complexe : CO) Taille du logement (S : petit, M : moyen, L : grand) Occupation/activité (A : actif, I : inactif) Individu (M : homme adulte, F : femme adulte, C : enfant)		
1 à 45	Âge de la personne + type du ménage + taille du logement Activité / non-activité de chaque membre du ménage	

4.1.4 Étape 4. Examen

Saisir des données statistiques à l'échelle urbaine et suppression des types avec des valeurs insignifiantes :

La combinaison de ces variables crée de nombreux types qui n'ont pas toujours des représentants à l'échelle urbaine. Par conséquent, nous pouvons vérifier ces chiffres avec les statistiques nationales pour éliminer à nouveau ceux qui ne sont pas très courants. Les quartiers dans cette étude sont basés sur la division IRIS (Ilots Regroupés pour l'Information Statistique) afin d'avoir une homogénéité en termes de nombre d'habitants (Figure 4-6).

Le Tableau 4-8 indique un pourcentage de la taille des logements, de l'âge des individus membres des ménages et du différents types de ménage provenant du Recensement de la population en France (2010) publié par l'INSEE pour 22 quartiers de la ville de Tours.

Réf : Plan d'assemblage Grands Quartiers Tours 37621 – IRIS 2000, INSEE

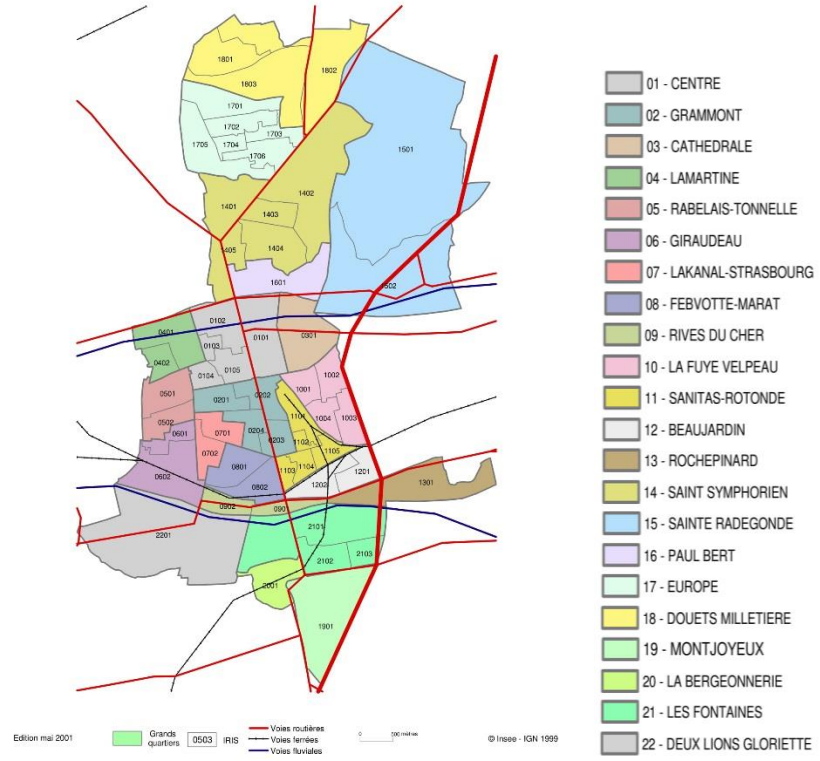


Figure 4-6 : 22 quartiers de Tours

Tableau 4-8 : Analyse statistique sur la taille des logements, l'âge des personnes de référence et le type de ménages dans 22 quartiers de Tours en pourcentage

Réf : INSEE – RP2010

District N° IRIS	Petits logements	Logement moyen	Grand logement	Jeune personne	Personne d'âge moyen	Personne âgée	Ménages members-uniques	Ménages en couple	Ménages familiaux	Ménages monoparen taux	Ménages complexes	Nombre total de ménages
1	39	49	12	34	46	20	67	16	7	5	5	7842
2	30	49	21	26	47	27	56	20	14	4	5	6538
3	33	47	20	31	51	18	57	19	15	4	4	2069
4	32	63	5	25	50	24	61	16	11	8	4	3206
5	32	58	10	31	44	25	58	20	11	7	4	3147
6	25	72	4	21	50	29	50	18	17	14	2	2363
7	27	50	23	21	49	30	55	20	15	6	5	2870
8	13	70	17	19	55	26	45	24	19	8	4	2788
9	2	86	12	12	42	47	43	27	16	10	5	2162
10	27	61	13	20	50	30	57	22	12	5	4	5378
11	31	66	3	21	46	34	53	12	18	14	3	5318
12	9	81	9	11	51	38	43	23	19	10	4	2027
13	15	80	5	10	45	46	49	21	18	10	2	972
14	14	73	14	15	51	33	48	25	16	9	3	6663
15	13	61	26	19	57	24	35	29	26	8	3	2907
16	30	51	19	33	51	16	59	24	11	4	2	1485
17	12	81	7	13	49	39	44	26	17	12	2	5139
18	5	78	17	16	54	31	28	35	27	9	1	1439
19	49	47	4	48	34	18	70	14	10	4	2	1822
20	44	55	1	29	41	30	58	20	12	7	2	971
21	17	83	3	14	54	32	56	17	15	10	2	4017
22	48	48	3	50	40	10	71	17	5	3	4	1081

Grâce à cette base de données, les petits logements sont désignés comme ceux qui ont une surface inférieure à 40 m^2, les moyens entre 40 et 100 m^2 et les grands ont de 100 m^2 et plus de surface. La personne de référence considérée comme jeune appartient à une catégorie d'âge de 15 à 24 ans, la personne d'âge moyen est de 25 à 65 ans et la catégorie dite âgée est de 65 ans et plus. Pour cette catégorisation, l'activité ou l'inactivité est prise en compte. Par exemple, sur le nombre total de ménages vivant dans le quartier Centre, 67 % appartiennent à la catégorie des ménages à membre-unique, 16 % sont des couples sans enfants, 7 % sont des familles (couples avec enfants), 5 % sont des ménages complexes et 5 % sont des ménages monoparentaux. En termes d'âge, les personnes d'âge moyen avec 46 % sont majoritaires et les ménages plus jeunes et plus âgés avec respectivement 34 % et 20 % se situent en deuxième et troisième position (à noter que c'est l'âge de la personne de référence dans le ménage qui est souvent considérée dans les études comme une personne chargée des décisions et de l'éducation des autres membres du ménage). En termes de taille du logement, 49 % du nombre total de logements ont une superficie comprise entre 40 et 100 m^2, 39 % ont une superficie inférieure à 40 m^2 et seulement 12 % ont une superficie de 100 m^2 ou plus dans ce quartier (Tableau 4-8).

Le pourcentage de chaque type dans chaque quartier peut être estimé sur la base des variables les plus efficaces déterminées par l'ACP. Les résultats montrent la proportion de chaque type dans chaque quartier. Par exemple, 37,6 % des ménages vivant dans le quartier « Les Fontaines » (n° 21) ont entre 25 et 65 ans et vivent seuls dans un logement de 40 à 100 m^2, 6,8 % sont dans la même catégorie d'âge et vivent dans un logement de moins de 40 m^2, 6,5 % ont moins de 25 ans et vivent dans un logement de 40 à 100 m^2 et 1,2 % dans la même catégorie d'âge et vivent dans un logement de moins de 40 m^2 et enfin 0,1 % dans des logements de plus de 100 m^2 (Tableau 4-9).

Ce dernier n'est lié qu'aux ménages à membre-unique vivant aux Fontaines. On considère donc que la probabilité de trouver certains des types dans le quartier est nulle ou proche de zéro pour cet échantillon. À ce stade, nous éliminons ces types afin de réduire le nombre de scénarios. 9 types tels qu'énumérées dans le Tableau 4-10 sont éliminées pour cette étude de cas.

Tableau 4-9 : Pourcentage de types de consommations existants par quartier à Tours

Réf : Calculé sur la base des tableau précédentes

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	N/T
8,9	4,4	5,8	4,9	5,8	2,5	3,1	1,1	0,1	3,1	3,4	0,5	0,7	1,0	0,9	5,9	0,7	0,2	22,7	7,3	1,2	16,9	1
11,2	7,2	8,3	9,6	10,4	7,5	5,8	6,0	4,4	7,0	7,3	3,9	4,0	5,2	4,1	10,0	4,7	3,5	21,8	9,2	6,5	16,9	2
2,7	3,1	3,5	0,7	1,8	0,4	2,6	1,4	0,6	1,4	0,3	0,4	0,2	0,9	1,8	3,7	0,4	0,8	1,9	0,2	0,1	1,5	3
16,0	11,5	12,1	13,3	11,7	8,8	11,0	4,3	0,6	11,2	12,5	3,5	6,1	5,0	3,4	9,6	4,3	1,1	9,3	17,0	6,8	16,7	4
20,1	18,7	17,2	26,2	21,2	26,5	20,3	23,2	28,6	25,2	26,6	28,1	32,4	26,0	16,1	16,3	28,9	17,7	8,9	21,2	37,6	16,7	5
4,9	8,0	7,3	2,1	3,7	1,5	9,4	5,6	4,0	4,9	1,2	3,1	2,1	4,6	6,8	6,1	2,5	3,9	0,8	0,4	0,9	1,4	6
1,3	1,0	0,9	1,4	1,1	0,6	0,7	0,4	0,1	1,2	0,5	0,4	0,6	0,7	0,3	2,3	0,3	0,1	2,4	1,0	0,4	0,4	7
1,6	1,7	1,4	2,7	2,0	1,8	1,4	2,2	4,1	2,8	1,1	3,2	3,1	3,5	1,3	4,0	2,1	0,6	2,3	1,3	2,3	0,4	8
0,4	0,7	0,6	0,2	0,3	0,1	0,6	0,5	0,6	0,6	0,1	0,3	0,2	0,6	0,6	1,5	0,2	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	9
2,2	1,6	2,0	1,2	2,0	0,9	1,1	0,6	0,1	1,2	0,8	0,2	0,3	0,5	0,7	2,4	0,4	0,3	4,6	2,6	0,3	4,1	10
2,7	2,6	2,8	2,5	3,5	2,7	2,1	3,2	2,7	2,7	1,7	2,1	1,7	2,7	3,4	4,0	2,7	4,4	4,3	3,2	2,0	4,1	11
0,7	1,1	1,2	0,2	0,6	0,1	0,9	0,8	0,4	0,5	0,1	0,2	0,1	0,5	1,4	1,5	0,2	1,0	0,4	0,1	0,0	0,3	12
3,9	4,2	4,1	3,4	4,0	3,1	3,9	2,3	0,4	4,3	2,9	1,9	2,6	2,6	2,8	3,8	2,5	1,5	1,9	6,1	2,0	4,0	13
4,9	6,8	5,8	6,7	7,2	9,3	7,3	12,7	17,6	9,7	6,1	15,0	13,9	13,4	13,2	6,5	16,9	22,4	1,8	7,5	11,3	4,0	14
1,2	2,9	2,5	0,5	1,2	0,5	3,4	3,1	2,5	1,9	0,3	1,7	0,9	2,4	5,6	2,4	1,5	4,9	0,2	0,1	0,3	0,4	15
0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,2	0,0	0,5	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,9	0,2	0,1	0,5	0,4	0,1	0,1	16
0,4	0,6	0,4	0,7	0,7	0,6	0,5	1,2	2,5	1,1	0,2	1,7	1,3	1,8	1,1	1,5	1,3	0,8	0,4	0,4	0,7	0,1	17
0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2	0,3	0,4	0,2	0,0	0,2	0,1	0,3	0,4	0,6	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	18
0,9	1,1	1,6	0,9	1,1	0,8	0,8	0,5	0,0	0,6	1,2	0,2	0,3	0,3	0,6	1,1	0,3	0,2	3,1	1,5	0,3	1,2	19
1,1	1,8	2,2	1,7	2,0	2,5	1,6	2,5	1,6	1,4	2,5	1,7	1,4	1,7	3,0	1,8	1,8	3,3	3,0	2,0	1,7	1,2	20
0,3	0,8	1,0	0,1	0,3	0,1	0,7	0,6	0,2	0,3	0,1	0,2	0,1	0,3	1,3	0,7	0,2	0,7	0,3	0,0	0,0	0,1	21
1,6	2,9	3,2	2,3	2,2	3,0	3,0	1,8	0,2	2,3	4,2	1,5	2,3	1,7	2,5	1,8	1,6	1,0	1,3	3,5	1,8	1,2	22
2,0	4,7	4,6	4,6	4,0	8,8	5,4	9,6	10,6	5,2	8,9	12,5	11,9	8,7	11,7	2,9	11,0	16,7	1,2	4,3	9,8	1,2	23
0,5	2,0	1,9	0,4	0,7	0,5	2,5	2,3	1,5	1,0	0,4	1,4	0,7	1,5	5,0	1,1	1,0	3,7	0,1	0,1	0,2	0,1	24
0,1	**0,3**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**0,0**	**0,3**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**0,2**	**0,4**	**0,1**	**0,1**	**0,3**	**0,2**	**0,1**	**0,0**	25
0,2	0,4	0,4	0,5	0,4	0,6	0,4	0,9	1,5	0,6	0,3	1,4	1,1	1,2	0,9	0,7	0,8	0,6	0,3	0,3	0,6	0,0	26
0,0	**0,2**	**0,1**	**0,0**	**0,1**	**0,0**	**0,1**	**0,2**	**0,2**	**0,1**	**0,0**	**0,1**	**0,1**	**0,2**	**0,4**	**0,3**	**0,1**	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	27
0,7	0,4	0,4	0,7	0,7	0,7	0,3	0,2	0,0	0,3	0,9	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,2	0,1	1,3	0,9	0,2	0,6	28
0,8	0,6	0,6	1,3	1,3	2,1	0,6	1,0	1,0	0,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,9	0,7	1,2	1,1	1,2	1,2	1,2	0,6	29
0,2	**0,2**	**0,2**	**0,1**	**0,2**	**0,1**	**0,3**	**0,3**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,0**	**0,2**	**0,4**	**0,3**	**0,1**	**0,3**	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**0,1**	30
1,2	0,9	0,8	1,8	1,4	2,5	1,1	0,8	0,1	1,1	3,3	0,8	1,1	1,0	0,8	0,7	1,1	0,4	0,5	2,3	1,2	0,6	31
1,5	1,5	1,2	3,5	2,6	7,3	2,2	4,1	6,5	2,4	7,1	6,8	6,4	5,1	3,5	1,2	7,7	5,8	0,5	2,8	6,9	0,6	32
0,4	0,6	0,5	0,3	0,4	0,4	1,0	1,0	0,9	0,5	0,3	0,7	0,4	0,9	1,5	0,5	0,7	1,3	0,1	0,0	0,2	0,1	33
0,1	**0,1**	**0,0**	**0,2**	**0,1**	**0,2**	**0,1**	**0,1**	**0,0**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,0**	**0,2**	**0,1**	**0,1**	**0,0**	34
0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,5	0,1	0,4	0,9	0,3	0,3	0,7	0,7	0,7	0,3	0,3	0,6	0,2	0,1	0,2	0,4	0,0	35
0,0	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,0**	**0,1**	**0,0**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	36
0,6	0,4	0,4	0,3	0,4	0,1	0,3	0,1	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,7	0,3	0,0	1,1	37
0,8	0,6	0,6	0,7	0,8	0,0	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,2	0,1	0,6	0,4	0,3	1,1	38
0,2	**0,3**	**0,3**	**0,1**	**0,1**	**0,4**	**0,2**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	39
1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	0,4	0,9	0,4	0,1	0,7	0,7	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,0	0,3	0,7	0,2	1,0	40
1,5	1,7	1,3	1,9	1,6	1,3	1,7	2,2	3,1	1,5	1,4	2,4	1,0	1,5	1,2	0,6	1,1	0,4	0,3	0,9	1,6	1,0	41
0,4	0,7	0,5	0,2	0,3	0,1	0,8	0,5	0,4	0,3	0,1	0,2	0,0	0,3	0,5	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	42
0,1	**0,1**	**0,0**	**0,1**	**0,1**	**0,0**	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	43
0,1	**0,2**	**0,1**	**0,2**	**0,2**	**0,1**	**0,1**	**0,2**	**0,5**	**0,2**	**0,1**	**0,3**	**0,1**	**0,2**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,0**	**0,1**	**0,1**	**0,1**	**0,0**	44
0,0	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	45
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	Total

Tableau 4-10: Types éliminés

Réf : sur la base du Tableau 4-9

Type	Description	Pourcentage maximal totale possible de la population à Tours
T25	Famille / personne de référence a plus de 65 ans / logement de moins de 40 m2	0.9%
T27	Famille / personne de référence a plus de 65 ans / logement de plus de 100 m2	0.5%
T30	Monoparentaux / personne de référence a moins de 25 ans / logement de plus de 100 m2	0.2%
T34	Monoparentaux / personne de référence a moins de 65 ans / logement de moins de 40 m2	0.5%
T36	Monoparentaux / personne de référence a moins de 65 ans / logement de plus de 100 m2	0.2%
T39	Complexe / personne de référence de moins de 25 ans / logement de plus de 100 m2	0.1%
T43	Complexe / personne de référence de plus de 65 ans / logement de moins de 40 m2	0.2%
T44	Complexe / personne de référence de plus de 65 ans / logement entre 40 et 100 m2	0.6%
T45	Complexe / personne de référence de plus de 65 ans / logement de plus de 100 m2	0.1%

4.1.5 Étape 5. Attribution

Définir des appareils électriques pour chaque type en tenant compte de l'enquête et de l'analyse statistique :

Afin de définir des profils de consommation, nous avons besoin de savoir quels sont les appareils les plus utilisés dans les ménages. L'enquête menée précédemment permet d'estimer le pourcentage de ménages qui possèdent chaque appareil et donc de déterminer les appareils les plus utilisés (Tableau 4-11).

Tableau 4-11: Les appareils électriques les plus possédés dans l'échantillon étudié

Réf : Basé sur l'enquête (Annexe I)			
Ordinateur personnel (PC)	Ordinateur portable (L)	Routeur (M)	Tablette (T)
Imprimante/Scanner/Photocopieur (P)	Lecteur DVD/Vidéo/Blu-ray (DVD)	Appareil à raclette (RM)	Téléphone portable (MO)
Boîtier de télévision (TVB)	Système audio (A)	Home cinéma (HC)	Télévision (TV)
Téléphone (TE)	Fax (F)	Réfrigérateur (R)	Congélateur (FR)
Robot pâtissier multifonctions (MF)	Mixeur(MI)	Blender (B)	Batteur (E)
Couteau électrique (K)	Hotte de cuisine (H)	Micro-ondes (MW)	Cuiseur de riz (RC)
Friteuse (DF)	Appareil à fondue (FM)	Haut-parleurs (S)	Crêpière (C)
Croque-monsieur / gaufrier (SW)	Lave-vaisselle (DW)	Machine à café (CM)	Bouilloire (W)
Extractreur de jus d'orange (O)	Grille-pain (TO)	Sèche-cheveux (HD)	Rasoir/Epilateur (RE)
Coiffeur (lisseur/fer à boucler)	Perceuse (D)	Radio/Alarme (RA)	Aspirateur (V)
Machine à laver (WM)	Séche-linge (TD)	Fer à repasser (I)	Brosse à dents (TB)

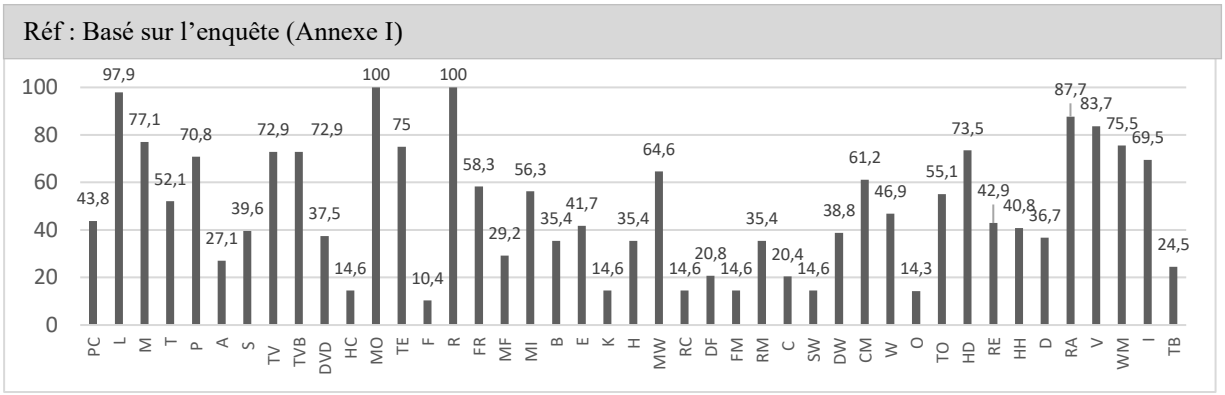
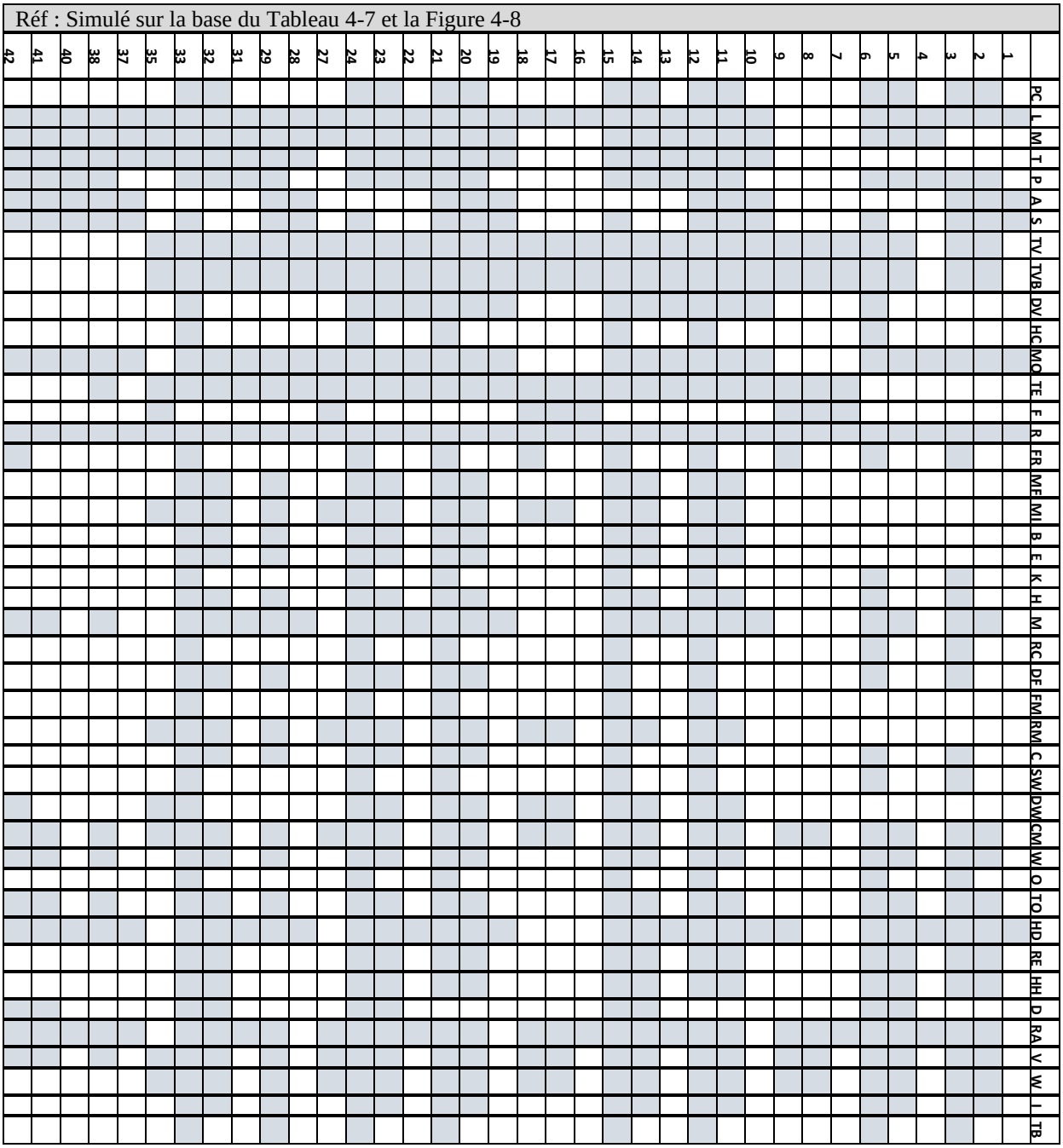


Figure 4-7 : Pourcentage d'appareils électriques possédés par les ménages

Par exemple, comme l'illustre la Figure 4-7, 100 % de la population étudiée possède des téléphones portables et des réfrigérateurs et seulement 10,4 % de la population possède un télécopieur. Ainsi, les appareils divers qui sont moins couramment possédés sont retirés de ce tableau et en comparant des ménages similaires et leurs appareils similaires, on peut attribuer des appareils divers à chacune des types tout en respectant la proportion de ménages qui les possèdent (Tableau 4-12).

Tableau 4-12 : Simulation de la répartition des appareils électriques entre les types de ménages

Réf : Simulé sur la base du Tableau 4-7 et la Figure 4-8



4.1.6 Étape 6. Occupation

Prendre en compte de la variation temporelle dans le modèle en considérant les activités des occupants des logements :

La durée moyenne d'utilisation de chaque appareil électrique à différentes échelles temporelles est estimée selon l'emploi du temps moyen des Français (population de plus de

15 ans) en France métropolitaine selon l'INSEE (2010). Il s'agit d'une journée moyenne dans laquelle les samedis, les dimanches, les jours fériés et les jours passés en dehors des résidences principales (par exemple, vacances à l'étranger ou dans d'autres villes) sont également inclus. Ainsi, en le multipliant par 7, on obtient une moyenne hebdomadaire et par 365, une moyenne annuelle du temps consacré à chaque activité. Par exemple, les étudiants consacrent 11 heures et 49 minutes de leur journée à des activités physiologiques qui comprennent le sommeil, l'alimentation, les soins personnels et de toilette (Tableau 4-13).

Tableau 4-13 : Emploi du temps des Français en fonction de leur profession et de leur sexe en France métropolitaine

Réf : INSEE, enquête Emploi du temps 2009-2010

	Étudiant (e)		Employé (e)		Interpreneur(euse)		Chômeur(euse)		Femme au foyer	Retraité(e)	
	H	F	H	F	H	F	H	F	F	H	F
Temps physiologique :	11:49	12:10	11:09	11:23	10:59	11:28	11:57	12:07	12:09	12:18	12:24
• **Dormir**	9:10	8:59	8:05	8:15	7:54	8:17	8:45	8:47	8:49	8:38	8:49
• **Soins personnels et toilette**	0:49	1:08	0:53	1:03	0:51	1:02	0:56	1:11	1:03	1:07	1:12
• **Repas**	1:50	2:03	2:11	2:05	2:14	2:09	2:16	2:09	2:17	2:33	2:23
Travail et étude :	4:48	4:42	5:50	4:48	7:35	5:01	0:49	0:21	0:04	0:12	0:04
• **Travail professionnel**	0:33	0:24	5:03	4:07	6:48	4:35	0:38	0:13	0:02	0:10	0:03
• **Transport vers/depuis le travail/l'école**	0:31	0:26	0:45	0:37	0:47	0:24	0:09	0:03	0:01	0:01	0:00
• **Formation**	3:40	3:49	0:01	0:02	0:00	0:00	0:00	0:01	0:00	0:00	0:00
Travail domestique :	0:50	1:27	2:06	3:27	1:27	3:28	3:23	4:56	5:38	3:31	4:25
• **Ménage et cuisine**	0:40	1:11	1:11	2:36	0:52	2:37	2:16	3:54	4:16	1:56	3:47
• **Garde enfants/soins aux personnes âgées**	0:03	0:07	0:19	0:37	0:12	0:33	0:17	0:46	1:04	0:08	0:12
• **Bricolage**	0:05	0:02	0:22	0:05	0:13	0:04	0:34	0:04	0:03	0:38	0:04
• **Jardinage et soins aux animaux**	0:02	0:07	0:14	0:09	0:10	0:14	0:16	0:12	0:15	0:49	0:22
Temps libre :	4:35	3:19	3:28	2:48	2:38	2:22	5:34	4:07	4:18	6:03	5:15
• **Télévision**	1:27	1:19	1:52	1:27	1:23	1:10	2:39	2:22	2:38	3:07	2:53
• **Lecture**	0:08	0:10	0:09	0:14	0:10	0:18	0:09	0:12	0:16	0:39	0:36
• **Marche/course à pied**	0:09	0:18	0:10	0:12	0:10	0:10	0:25	0:19	0:18	0:30	0:24
• **Internet/Jeux**	1:47	0:52	0:33	0:18	0:13	0:11	1:06	0:38	0:21	0:36	0:27
• **Sports et activité**	0:30	0:09	0:14	0:07	0:10	0:07	0:19	0:05	0:04	0:10	0:04
Temps social (à l'exclusion de l'heure des repas) :	1:12	1:24	0:43	0:45	0:42	0:46	1:04	1:13	0:54	0:55	1:01
• **Téléphone, mail**	0:22	0:39	0:16	0:19	0:15	0:21	0:20	0:23	0:17	0:16	0:20
• **Visites**	0:48	0:42	0:24	0:24	0:19	0:19	0:38	0:46	0:30	0:28	0:34
Autres temps de transport (à l'exception du trajet entre l'école et le travail)	0:46	0:58	0:44	0:49	0:38	0:55	1:13	1:16	0:56	1:00	0:50
Total	24 h	24 h	24 h	24 h	24 h	24 h	24 h	24 h	24 h	24 h	24 h

De nombreuses informations sont tirées du Tableau 4-13. Par exemple, le temps de sommeil, le nombre de jours de travail, le nombre de jours fériés et quelques hypothèses permettent

d'estimer le temps de sommeil en fonction du type de jour. D'autre part, le temps consacré au transport vers et depuis le lieu de travail ou étude, à la préparation de soi et à l'alimentation sont spécifiés dans le tableau. Par conséquent, le fait de connaître le début et la fin d'une journée de travail peut permettre de calculer l'heure approximative à laquelle les personnes se réveillent pendant la semaine et, ainsi, la durée de leur sommeil est estimée. Certaines activités qui se déroulent nécessairement en dehors de la résidence principale des individus sont également mentionnées, telles que les visites, le jogging, le transport vers des lieux autres que le travail ou l'école, etc. Ces chiffres ont permis de calculer le temps moyen passé à la maison pour chaque catégorie de population en fonction de leur genre et de leur activité professionnelle (étudiant, employé, entrepreneur/employeur indépendant, chômeur, femme au foyer et retraité), ce qui est nécessaire pour estimer le temps d'utilisation des appareils qui dépendent de l'occupation du logement ou de leur présence. Ces données sont donc divisées en deux catégories d'actifs et d'inactifs selon les besoins de cette recherche.

Les activités intéressantes du point de vue de la modélisation sont celles qui sont effectuées par des appareils électriques. Le Tableau VI-1 présenté en Annexe VII est dérivé des informations ci-dessus, dans lequel les activités accomplies par des appareils électriques sont choisies. Les occupants sont également classés en fonction de leur genre et de leur activité. Le temps moyen consacré à chaque activité est ensuite calculé.

Certaines de ces activités sont réalisées nécessairement par l'utilisation de l'électricité, comme regarder la télévision et envoyer des courriels électroniques. Mais pour d'autres, l'utilisation d'appareils électriques n'est pas nécessaire, ce qui complique la modélisation. Ainsi, le défi consiste à trouver le temps consacré à chaque appareil électrique. Par exemple, un homme actif passe en moyenne 51 minutes par jour à faire sa toilette et à se préparer, mais le temps d'utilisation de son rasoir électrique peut être de 5 minutes par jour. Au contraire, il consacre 54 minutes par jour à la cuisine et au nettoyage mais le temps d'utilisation de son cuiseur à riz, de sa machine à laver, de son aspirateur et de sa machine à café peut dépasser 54 minutes car ses activités peuvent se chevaucher et plusieurs activités n'ont pas besoin de sa présence.

En outre, certaines activités ne sont pas calculées dans les 54 minutes. Par exemple, le temps de fonctionnement de la machine à laver n'est pas certainement noté dans le temps de travail domestique de la personne, car elle note probablement le temps qu'elle passe à mettre le linge sale dans la machine à laver et à enlever le linge propre en comme activité. De plus, il est

possible de cuisiner lorsque la télévision est allumée. La personne donc ne noterait pas les deux activités lorsqu'elle répond à des enquêtes nationales telles que celle présentée dans le Tableau 4-13, qui est basée sur un programme de 24 heures. Elle ignore donc les activités qui se chevauchent. En d'autres termes, pendant 24 heures, il est possible de consommer beaucoup plus de l'électricité que cette durée de 24 heures.

Par conséquent, ces informations peuvent être résumées dans le Tableau 4-14 pour chaque individu (homme actif, femme active, homme inactif et femme inactive). Certains des appareils électriques qui pourraient être utilisés pour chaque activité sont mentionnés dans ce Tableau.

Tableau 4-14 : Temps moyen quotidien consacré par les Français à différentes activités

Réf : Simulé sur la base du Tableau 4-13

Activité	**Pourcentage d'utilisation d'appareils électriques**	**Appareil électrique susceptible d'être utilisé**	**Homme actif**	**Femme active**	**Homme inactif**	**Femme inactive**
Soin personnel & toilette	N/A	HD, HH, RE, TB	51 min	64 min	62 min	71 min
Ménage & cuisine	N/A	MF, MI, B, E, K, H, MW, RC, DF, FM, RM, C, SW, DW, CM, W, O, TO, V, WM, I	54 min	128 min	126 min	239 min
Bricolage	N/A	D	13 min	4 min	36 min	4 min
Jardinage & soins aux animaux	N/A	-	9 min	10 min	33 min	16 min
Télévision	100%	TV, TVB, DV, HC	94 min	79 min	173 min	158 min
Internet & jeux	100%	PC, L, M, T, P, S, A -	54 min	27 min	51 min	29 min
Téléphone & mail	100%	PC, L, M, T, MO, TE, F	18 min	26 min	18 min	20 min

Bien que le temps d'utilisation pour chaque occupant du logement soit mentionné dans le tableau ci-dessus, mais en considérant les ménages comme un ensemble des individus, ce temps change et devient plus compliqué à analyser. Par exemple, pour un ménage composé de plusieurs personnes, certaines des activités sont effectuées par une seule personne ou sont partagées. Une personne fait la cuisine au sein d'un couple ou les deux regardent la télévision en même temps. Si le temps de cuisson pour deux personnes est presque le même que pour une personne, nous pouvons alors choisir le temps le plus important passé par chaque personne comme temps consacré par le ménage à l'activité de cuisson/nettoyage (bien que, techniquement, ce temps puisse être un peu plus élevé pour deux personnes).

Dans d'autres activités, telles que l'utilisation d'Internet ou du téléphone, chaque personne utilise des appareils séparément. Ainsi, le temps d'utilisation est la somme du temps passé par chaque personne. Cette hypothèse simple souligne l'importance de considérer le type de ménage comme une variable qui affecte la consommation d'électricité. Les chiffres du tableau

ci-dessus indiquent une moyenne et dépendent de la catégorie à laquelle appartiennent les personnes actives et inactives. À titre d'exemple, le temps consacré à la cuisine et au nettoyage par un homme actif est de 54 minutes en moyenne, ce qui peut être inférieur pour un homme actif vivant en couple avec une femme inactive par rapport à un homme actif séparé vivant avec ses enfants. On doit donc prendre en compte la synchronisation entre les membres du ménage.

Dans ce modèle afin de réduire la complexité, le temps de chaque activité est égal pour toutes les personnes indépendamment de leur type de ménage. Le problème qui se pose ici est que les différents types n'ont pas le même temps d'utilisation des appareils électriques. Pour résoudre ce problème, on peut calculer le taux d'occupation du logement. Ce taux signifie que plus les personnes passent de temps dans leur logement, plus elles sont susceptibles d'utiliser des appareils électriques.

Tableau 4-15 : Durée moyenne des activités quotidiennes des Français par minute en France métropolitaine

Réf : Basé sur le Tableau 4-13

	Homme actif	Femme active	Homme inactif	Femme inactive
Temps physiologique	**679**	**692**	**728**	**734**
-dormir	503	510	522	528
-soins personnels	51	64	62	69
-Manger	125	126	145	137
-petit déjeuner	25	25	29	27
-déjeuner	50	50	58	55
-dîner	50	50	58	55
Temps professionnel	**364**	**290**	**31**	**10**
-travail	248	182	25	7
-transport	41	29	5	0
-Formation	75	79	1	3
Temps domestique	**88**	**167**	**207**	**300**
-nettoyage/cuisine	54	128	126	239
-garde des enfants	11	26	13	41
-bricolage	13	4	36	4
-jardinage/soins aux animaux	9	10	33	16
Temps libre	**214**	**170**	**349**	**273**
-télévision	101	85	186	167
-Lecture	15	20	36	29
-marche/course à pied	16	19	39	28
-Internet	58	33	63	37
-sports/activités	24	13	26	12
Temps social	**52**	**58**	**60**	**63**
-Téléphone/courriel électronique	20	28	22	23
-visites	33	30	38	40
-autres transports	43	54	67	61
Temps total	**1440**	**1440**	**1440**	**1440**
Temps passé à l'extérieur (à l'exclusion du temps au travail et à l'école)	115	117	169	141
Temps d'occupation	407	472	719	761

À partir du Tableau 4-13, nous pouvons tout d'abord calculer le temps que chaque personne passe hors de son logement et, par conséquent, son temps d'occupation est déterminé (Tableau 4-15). Toutefois, il s'agit du temps d'occupation pour une journée moyenne (JM). Sachant que les jours fériés, les week-ends et les jours spéciaux sont également pris en compte dans la création de ce Tableau, il est plus réaliste de créer différents profils de journées en utilisant des hypothèses simples plutôt que de généraliser ces informations pour chaque jour. Ainsi, basées sur différentes enquêtes en ligne et sur l'emploi du temps des Français, les hypothèses ci-dessous sont utilisées pour créer des moyennes de jours de semaine, de week-ends/jours fériés et de vacances pour chaque individu. On suppose qu'en général :

- ❑ L'emploi du temps des Français à l'échelle de la ville ou du quartier est similaire à l'échelle nationale. Cependant, certaines des activités dans les grandes villes sont différentes de celles des petites villes (par exemple, les personnes plus actives ont tendance à revenir du travail pour déjeuner à la maison dans les petites villes par rapport aux grandes villes en raison des difficultés de transport et des longues distances entre le travail et le domicile [SIDLER, 1999].

- ❑ Chaque année, les ménages passent 240 jours ouvrés (JO) (jours de la semaine sauf les weekends et les jours fériés), 110 jours de week-ends (WD) et jours fériés (JF) dans leur résidence principale et 15 jours de vacances en dehors de ce logement.

- ❑ Les personnes actives sont absentes de leur résidence principale de 9h00 à 17h00 pendant la semaine car elles sont au travail ou à l'école et, sur cette base, on calcule l'heure à laquelle elles quittent leur domicile (9h00 moins le temps de transport vers le travail) et l'heure à laquelle elles arrivent chez elles (17h00 plus le temps de transport vers la maison).

- ❑ Les hommes et les femmes actifs dorment trois heures de plus par jour, les week-ends, les jours fériés et les vacances. Ils dorment 30 minutes plus tard et se réveillent 3h30 plus tard que les jours de semaine.

- ❑ Le temps consacré au petit-déjeuner et au dîner en semaine pour les personnes actives est respectivement de 12 et 30 minutes et, le week-end, de 24 et 60 minutes pour le petit-déjeuner et le dîner et de 60 minutes pour le déjeuner (dans cette recherche, on suppose que les personnes actives déjeunent en dehors de leur lieu de

résidence pendant la semaine). Le temps consacré au petit-déjeuner, au déjeuner et au dîner pour les personnes inactives pendant la semaine ou le week-end est respectivement de 24, 60 et 60 minutes.

❑ L'heure moyenne à laquelle des personnes inactives dorment est environ 22h30.

❑ Les personnes qui travaillent pendant la semaine, ne travaillent pas le week-end, les jours fériés et les vacances.

❑ Le temps moyen d'absence par jour des individus est égal au temps qu'ils consacrent au jogging, à la marche, aux sports, aux activités, aux visites et au transport vers des lieux autres que leur travail ou leur école. Ce dernier est exclu car nous avons déjà cette information (Tableau 4-15). On considère que chaque personne passe 15 jours par an en dehors de sa résidence principale pour les vacances (par exemple, la 6e et la 32e semaine de l'année). Dans cette hypothèse, il existe 110 samedis, dimanches et jours fériés, sauf ceux déjà comptés une fois dans les jours de vacances et 240 jours de travail pour les personnes actives. Le temps d'absence est ensuite réparti proportionnellement entre les jours ouvrables et non ouvrables, puis divisé au hasard entre les heures où les personnes ne dorment pas ou ne sont pas au travail ou à l'école.

Ces hypothèses sont basées sur la majorité des réponses aux enquêtes en ligne et excluent les exceptions et les cas tels que :

- Les équipes de nuit, les personnes travaillant le week-end, etc.
- Les cas d'urgence ou exceptionnels qui nécessitent l'utilisation d'appareils électriques en dehors des heures considérées
- Les situations et les restrictions telles que les crises économiques, environnementales, sanitaire, etc.

Grâce aux hypothèses précédentes et à l'emploi du temps des Français, le Tableau 4-16 est créé.

Tableau 4-16 : Activité quotidienne des Français en journées moyennes (JM), jours ouvrés (JO) et week-ends/jours fériés (WE/JF) en France métropolitaine

Réf : Estimé sur la base du Tableau 4-15

	Homme actif			Femme active			Homme inactif			Femme inactive		
	JM	JO	WE/JF	JM	JM	JO	WE/JF	JM	JM	JO	WE/JF	JM
Dormir en moyenne (min)	503	441	621	510	448	628	522	522	522	528	528	528
Réveil		6:33	10:03		6:20	9:50		8:46	8:46		8:42	8:42
Soins personnels (min)	51	41	71	64	58	76	62	62	62	69	69	69
Prendre le petit-déjeuner		7:13	10:50		7:02	10:35		10:00	10:00		9:56	9:56
Quitter la maison pour travailler		8:14	N/A		8:23	N/A		N/A	N/A		N/A	N/A
Transport au/du travail (min)	41	62	0	29	44	0	5	0	0	0	0	0
Arrivée à la maison après le travail		18:43	N/A		16:59	N/A		N/A	N/A		N/A	N/A
Dîner		19:36	19:00		19:44	21:08		20:00	20:00		19:08	19:08
Dormir		23:12	23:42		22:52	23:22		00:04	00:04		23:52	23:52
Temps d'absence (sauf temps de travail/formation) (min/jour)	115	30	120	117	30	126	169	115	115	141	86	86
Durée d'occupation	407	415	699	472	521	685	719	803	803	761	826	826

Le temps d'absence pendant la semaine ou les week-ends et les jours fériés, est réparti de manière aléatoire. En appliquant la même méthode à d'autres ménages composés de plusieurs personnes, il est possible de créer un tableau pour différentes compositions d'individus. Toutefois, comme indiqué précédemment, il est important de coordonner certaines activités entre les occupants d'un même logement (par exemple, un couple peut dormir en même temps ou sortir ensemble le week-end). En utilisant le temps d'occupation de chaque journée type pour chaque composition d'individus, le Taux d'Occupation Actif (TOA) peut être calculé (Tableau 4-17).

Tableau 4-17 : Taux d'occupation des différentes compositions individuelles en fonction de leurs activités

Réf : Calculé sur la base du Tableau 4-16

	Homme actif (AM)	Femme active (AF)	Homme inactive (IM)	Femme inactive (IF)	Homme et Femme actifs (AFM)	Homme et Femme inactifs (IFM)	Homme inactif et femme active (IM-AF)	Femme inactive et homme actif (IF-AM)
JO	29%	36%	56%	57%	32%	57%	44%	43%
WE/JF	49%	48%	56%	57%	48%	57%	52%	53%

Pour connaître le temps approximatif pendant lequel les occupants du logement utilisent un appareil, plusieurs méthodes peuvent être appliquées. Demander à différents ménages de noter leur consommation (heure de début et de fin d'utilisation de chaque appareil) pendant

plusieurs semaines à différentes saisons est une approche compliquée car ils peuvent oublier de noter spécialement les activités qui se chevauchent ou les appareils qui fonctionnent sans Dépendance Active de l'Occupation (DAO) (par exemple, lave-vaisselle et machine à laver). Ces enquêtes ne sont pas toujours fiables car les ménages peuvent noter leur temps d'utilisation avec une réduction pour ne pas être jugés pour surconsommation. L'installation des sous-compteurs qui fournissent toutefois des informations plus précises, reste la solution la plus coûteuse et doit être acceptée par le public. C'est pourquoi, dans cette recherche, nous répartissons les activités au cours de l'année en fonction de l'occupation active des membres des ménages et de la probabilité de démarrage de chaque activité.

En considérant le TOA, la consommation annuelle d'un appareil peut conduire à son temps d'utilisation quotidien (selon le type de jour). Chaque année est divisée en plusieurs jours : 240 jours de travail, 50 samedis, 50 dimanches, 10 jours fériés et 15 jours de vacances hors de la résidence principale. La nature de chaque appareil et leur cycle d'utilisation peuvent déterminer le type de jour où l'appareil est utilisé. Cette méthodologie permet de déterminer le type de jour d'utilisation de chaque appareil afin de respecter approximativement la consommation totale annuelle de chaque appareil. Dans l'étape suivante, cette méthode est expliquée en détail pour tous les appareils étudiés dans le cadre de cette recherche.

Les graphiques ci-dessous sont créées selon les hypothèses mentionnées précédemment pour les jours de semaine et les week-ends et les jours fériés. Le temps d'absence des individus de leur logement est distribué de manière aléatoire. Chaque couleur représente un nombre d'occupants du logement (Figure 4-8).

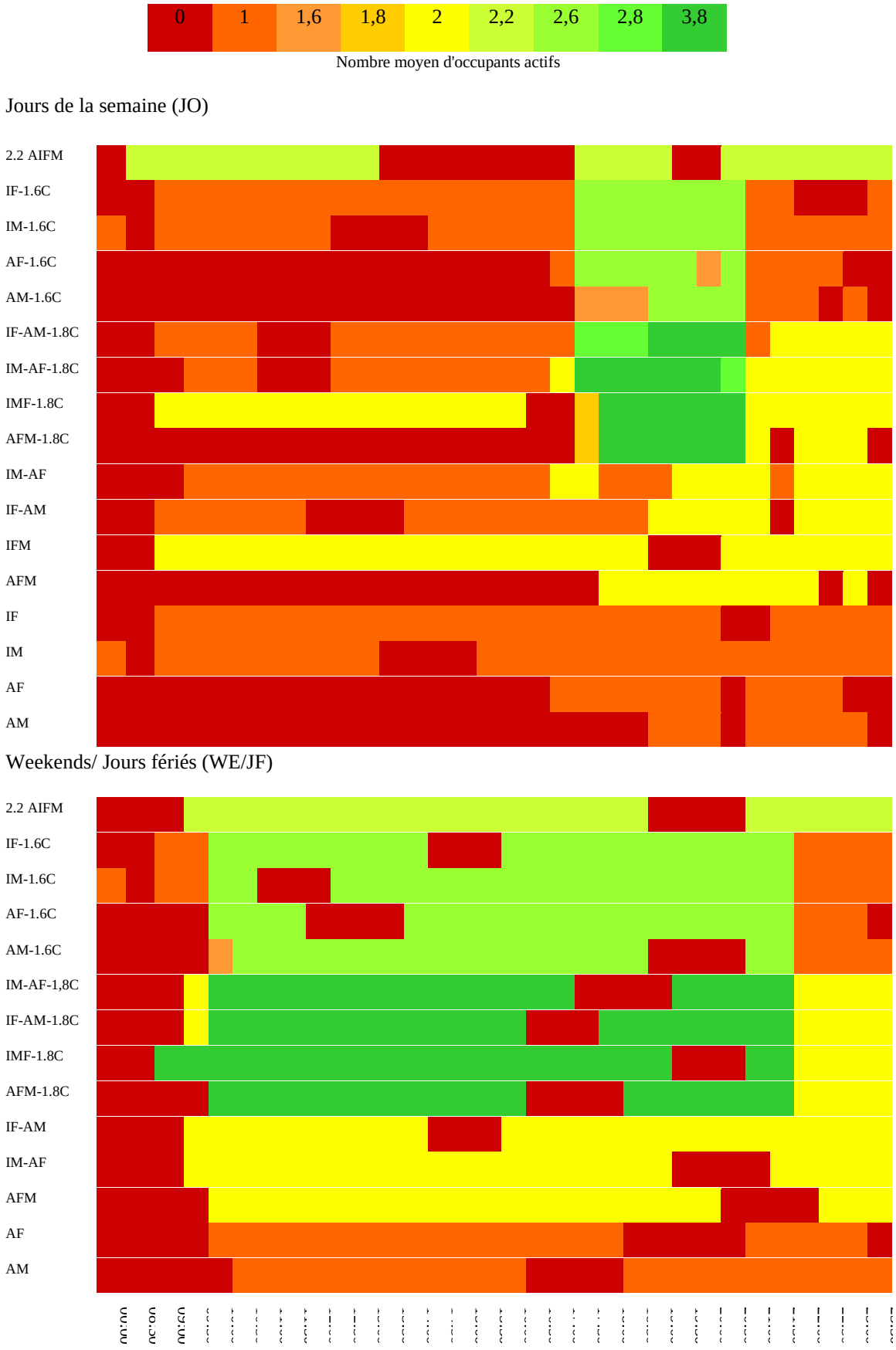


Figure 4-8 : Profil d'occupation quotidien (variation temporelle) des ménages

En plus des variations de type de jour, il existe également une variation entre les saisons chaudes et froides (Figure 4-9) qui est créée en utilisant les températures moyennes de la ville de Tours en 2014 dans laquelle les semaines les plus froides sont marquées en bleu plus foncé et les semaines les plus chaudes en rouge plus foncé.

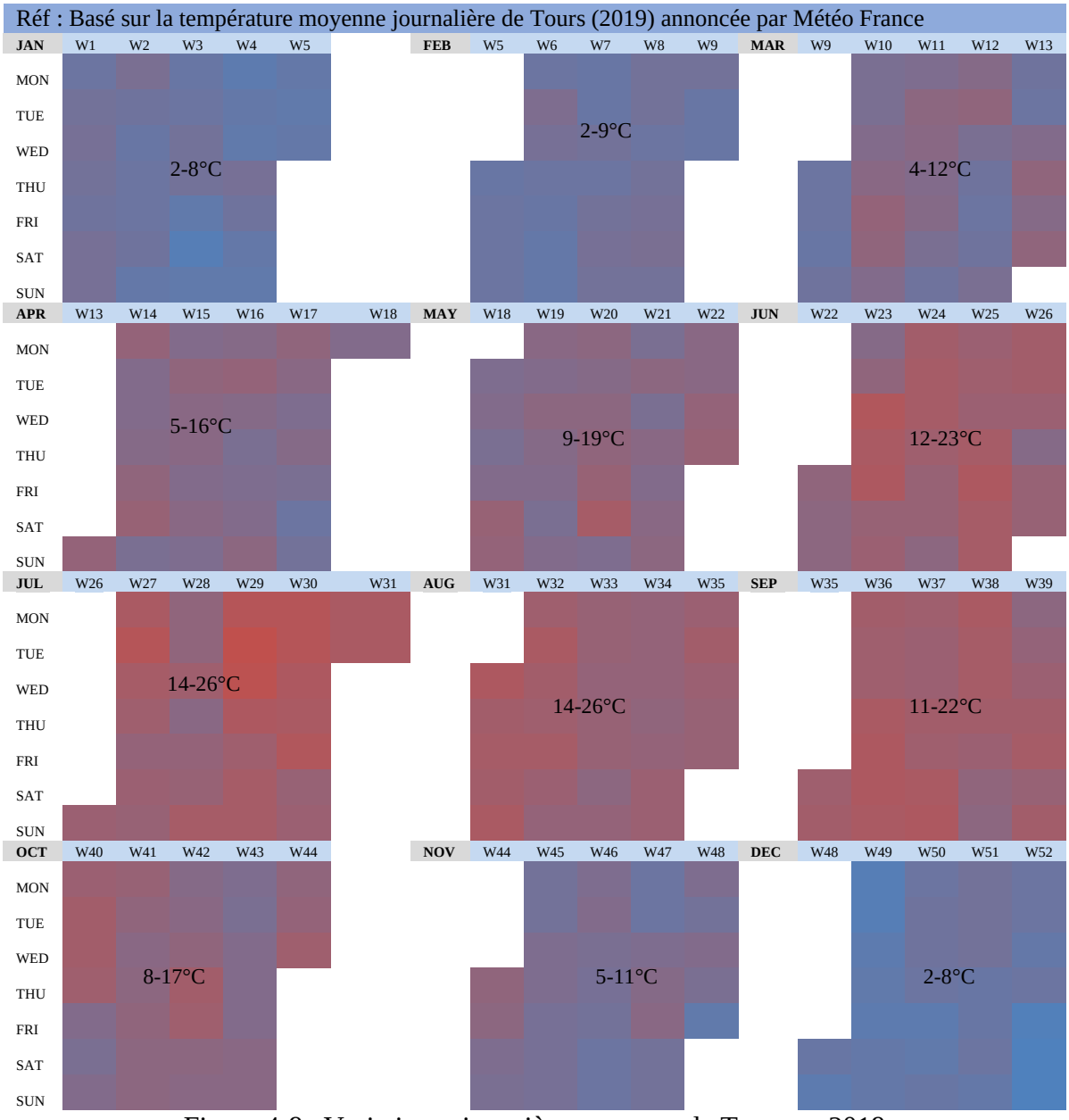


Figure 4-9 : Variation saisonnière moyenne de Tours en 2019

4.1.7 Étape 7. Calcul

Etablir la relation mathématique entre la demande électrique et les variables spatio-temporelles :

Avant de procéder à tout calcul, certaines actions ont été effectuées lors des étapes précédentes. Ces actions sont énumérées ci-dessous :

1. Création d'une liste d'appareils électriques utilisés plus fréquemment selon l'enquête ;

2. Recueil du plus grand nombre possible d'informations existantes dans la littérature concernant ces appareils et de leur mode d'utilisation (par exemple, le nombre de cycles par an que les appareils effectuent à partir de statistiques ou d'enquêtes nationales) ; et

3. Définition des appareils qui utilisent de l'électricité dans le cadre de chaque activité (par exemple, le lave-linge pendant l'activité de ménage et le sèche-cheveux pendant l'activité de toilettage) pour chaque type de ménage (Tableau VII-1 en Annexe VII).

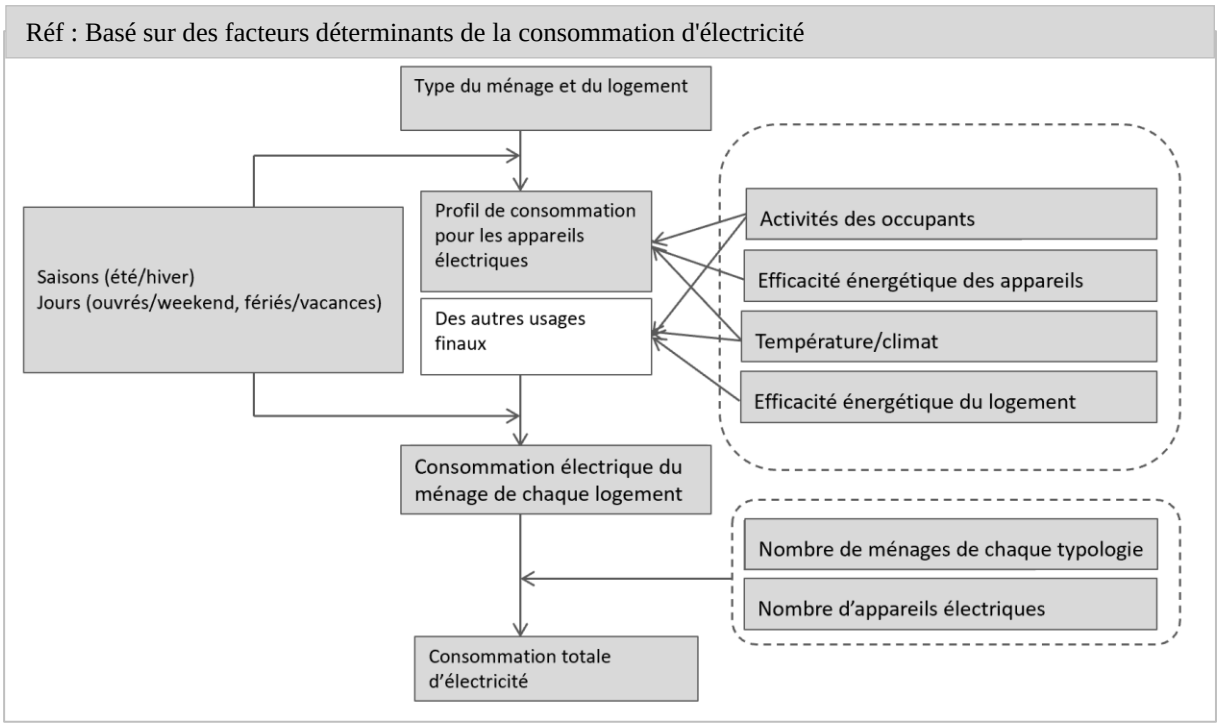


Figure 4-10 : Variables déterminantes de la consommation électrique résidentielle

La demande totale d'électricité résidentielle dépend de plusieurs variables (Figure 4-10). La méthodologie pour développer la consommation/demande annuelle d'électricité peut être simplifiée en cinq étapes :

a) Collecter une base de données sur chaque appareil électrique ;

b) Calculer plusieurs valeurs à partir des données de base :

La demande moyenne d'énergie par cycle est calculée comme suit (Equation 2) :

$$CED_a = CL_a \times CP_a \quad (2)$$

avec :

CED_a = Demande électrique moyenne du cycle de l'appareil en mode actif (kWh)
CL_a = Durée moyenne du cycle de l'appareil en mode actif (h)
CP_a = Puissance moyenne du cycle de l'appareil en mode actif (kW)

La durée annuelle de fonctionnement de l'appareil peut être exprimée comme (Equation 3) :

$$T_a = CL_a \times NC_a \quad (3)$$

avec :

T_a = temps annuel pendant lequel l'appareil fonctionne (heure)
NC_a = nombre de cycles annuels

Le nombre de minutes par an pendant lesquelles un appareil peut commencer à fonctionner (possibilité de commencement d'une activité) est calculé en utilisant l'Equation 4 :

$$M = 365 \times 24 \times 60 - T_a \quad (4)$$

avec :

M = nombre de minutes par an pendant lesquelles une activité peut être lancée

Le temps moyen entre chaque démarrage est exprimé en (Equation 5) :

$$MBS = M \div NC_a \quad (5)$$

avec :

MBS = temps moyen entre les événements de départ (m)

La probabilité que chaque appareil soit utilisé est indiquée en utilisant l'Equation 6 :

$$AP = \left(\frac{T_a}{525600}\right) \times 100 \quad (6)$$

avec :

AP = probabilité moyenne d'activité (%)

Le calibrage scalaire est calculé comme suit (Equation 7) :

$$SC = \left(\frac{1}{MBS\ x\ AP}\right) \times 100 \quad (7)$$

avec :

SC = calibration scalaire

La consommation électrique unitaire annuelle de l'appareil électrique en fonctionnement est exprimée en Equation 8 :

$$UEC_a = CED_a \times NC_a \quad (8)$$

avec :

UEC_a = consommation électrique unitaire annuelle de l'appareil en mode actif (kWh)

Le temps pendant lequel chaque appareil ne fonctionne pas peut être calculé en utilisant l'Equation 9 :

$$T_s = (365 \times 24) - T_a \quad (9)$$

avec :

T_s = durée annuelle pendant laquelle l'appareil ne fonctionne pas (h)

La puissance annuelle en veille de l'appareil électrique est calculée comme suit (Equation 10) :

$$UEC_s = T_s \times P_s \quad (10)$$

avec :

UEC_s = consommation électrique unitaire annuelle de l'appareil en mode veille (kWh)
P_s = puissance en veille de l'appareil (kW)

La consommation totale d'un appareil électrique par an est égale à sa puissance active et inactive totale et est exprimée comme (Equation 11) :

$$UEC_T = UEC_a + UEC_s \quad (11)$$

avec :

UEC_T = consommation électrique unitaire annuelle totale de l'appareil (kWh)

La demande électrique totale moyenne par logement [en tenant compte de la propriété] est présentée en Equation 12 :

$$DPD_T = PD \times UEC_T \quad (12)$$

avec :

DPD_T = demande totale par logement (kWh/an)
PD = proportion de logements équipés de cet appareil
UEC_T = consommation électrique unitaire annuelle totale de l'appareil (kWh)

Calcul de la consommation électrique unitaire de chaque appareil pour toute l'année dans différents modes de fonctionnement (actif, veille, arrêt) à l'aide de l'Equation 13 :

$$EC = \sum_{m=1}^{t} P_{m,i} T_{m,i} \quad (13)$$

avec :

P = puissance (kW)
T = temps (h)

c) Faire la somme de tous les appareils d'un type de ménage par intervalles d'une minute pour créer la consommation du type par minute pour différents types de jours (pour les jours de semaine froids et chauds, les samedis froids, les samedis chauds, les dimanches froids, les dimanches chauds, les jours fériés froids, les jours fériés chauds et les vacances le cas échéant) ;

d) Multiplier la consommation de chaque type par le nombre de ménages du même type dans chaque quartier ; et

e) Faire la somme des consommations totales pour créer la consommation totale annuelle du quartier.

Les résultats de ce calcul sont présentés dans l'Annexe VII (Tableau VII-2).

4.1.8 Étape 8. Création

Définir du modèle de consommation pour chaque type et chaque catégorie :

Différents appareils électriques sont attribués à chaque type et, en raison de l'occupation active de chaque catégorie, des profils de consommation associés sont créés. Ensuite, on peut établir les profils de charge qui présentent des variations horaires, quotidiennes, hebdomadaires et saisonnières. Pour réaliser ces profils, nous pouvons procéder de façon suivante :

1. Trouver le ratio du temps passé par chaque type d'individu sur chaque activité (ce qui signifie que pour un ménage qui consacre plus de temps à une activité telle que la cuisine, il est plus probable qu'il utilise plus d'appareils électriques de cuisson) ;

2. Multiplier ce nombre par le nombre total de minutes par an de fonctionnement de l'appareil pour obtenir l'utilisation annuelle de chaque appareil pour chaque type de ménage ;

3. Appliquer le taux d'occupation actif (calculé à l'étape précédente) en fonction du type de jour (semaine, week-end/jours fériés) à la durée de fonctionnement annuelle de chaque appareil pour obtenir le temps d'utilisation de l'appareil dans ce type de jour (par exemple si l'appareil est utilisé dans un type de jour tel que les jours fériés, ce nombre doit être divisé par le nombre de jour de ce type par an, en l'occurrence 10) ;

4. Créer un profil d'occupation active quotidienne par intervalle d'une minute pour chaque ménage à partir des informations tirées des statistiques et des enquêtes nationales (la raison pour laquelle on a choisi des intervalles plus courts plutôt qu'un intervalle de 15 minutes comme dans les modèles précédents, est que de nombreux appareils énergivores comme le fer à repasser peuvent être utilisés pendant moins de 15 minutes et donc être ignorés dans certaines analyses) ;

5. Trouver la possibilité de produire chaque événement (nombre de minutes possibles pour démarrer chaque appareil) en partant de l'appareil le plus consommateur et en rendant le modèle plus pratique pour enlever/ajouter des appareils secondaires ;

6. Mettre en place une application pour choisir une cellule (minute) aléatoire pour démarrer un appareil (si la cellule sélectionnée est en dehors de l'occupation active et des cellules possibles, l'action peut être répétée jusqu'à ce qu'elle soit dans les minutes possibles) ;

7. Répéter l'étape précédente pour les autres appareils en tenant compte de la synchronisation, des éventuelles activités simultanées et du nombre d'occupation active pour les différents types de jours

8. Présenter les résultats de chaque type pour chaque type de jour.

Le Tableau VII-3, concernant les minutes annuelles moyennes d'utilisation de chaque appareil électrique pour diverses compositions de ménages est présenté en Annexe VII. En suivant cette méthodologie, le profil de charge de chaque type de ménage peut être créé.

À titre d'exemple, le profil de charge du type de ménage 12 (couple avec la personne de référence de moins de 25 ans vivant dans un logement plus de 100 m^2) pour l'homme actif et la femme active dans différents types de jours présenté dans la Figure 4-11. D'après cette étude, la consommation annuelle d'électricité concernant les appareils électriques pour ce type et cette catégorie de ménage est estimée à 2779 kWh/an et la demande maximale dans le cadre de cet usage final est estimée à 9012 W. Le nombre de membres du ménage dans cet exemple est de 2 personnes, ce qui donne une consommation électrique de 1389 kWh par personne et par an.

L'estimation de la consommation d'électricité annuelle totale concernant les appareils électriques pour deux partenaires actifs est de 4002 kWh par an et donc de 2001 kWh par an par personne et la demande maximale est de 5755 W. Pour un couple composé d'une personne active et d'une personne inactive, la consommation est de 3275 et 3873 kWh par an respectivement pour le couple femme active/homme inactif et le couple femme inactive/homme actif. Ainsi, la consommation moyenne par personne pour le premier couple est de 1637 kWh par an et pour le deuxième est de 1936 kWh par an. Leur demande maximale est respectivement de 4499 W et 8683 W.

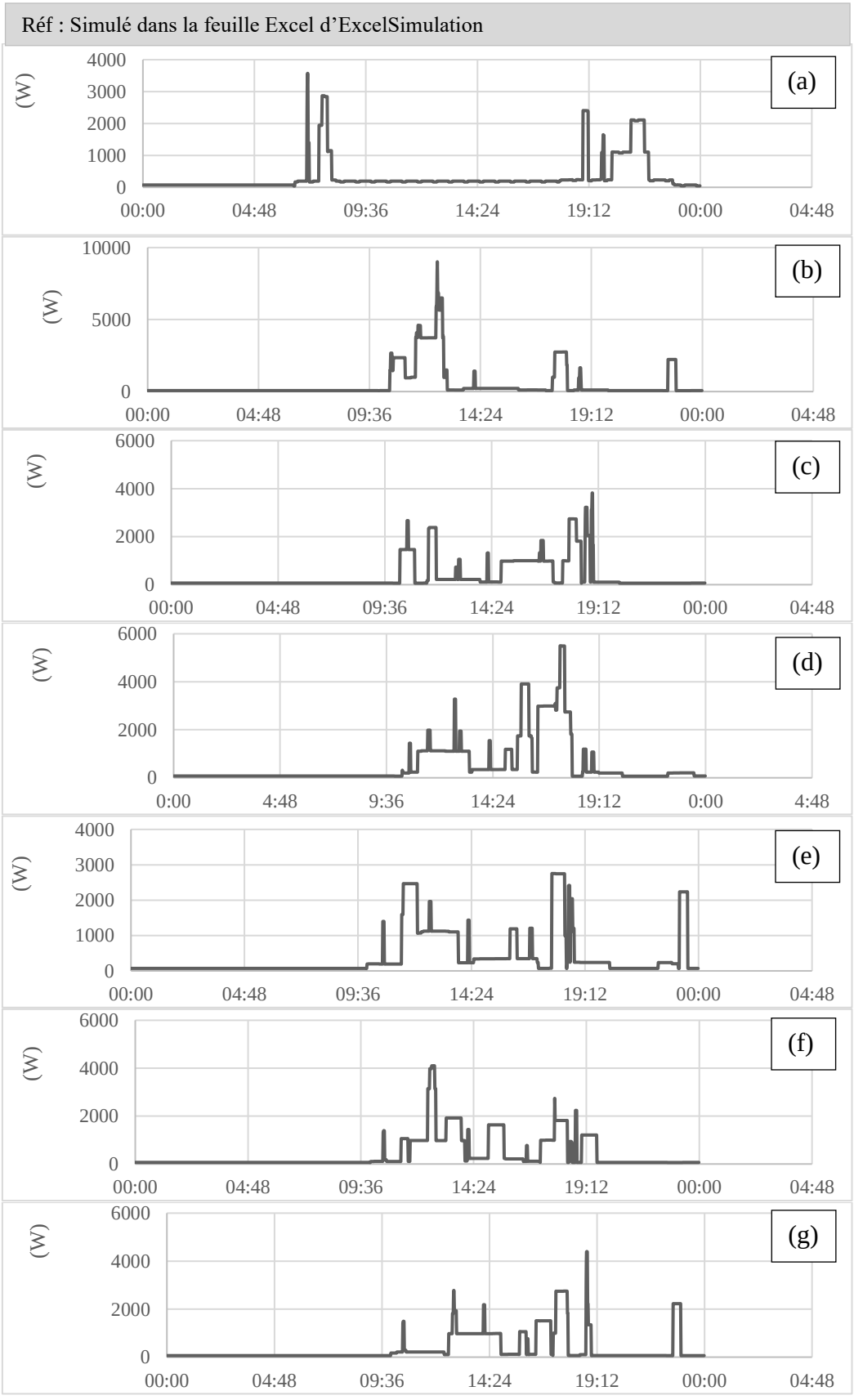


Figure 4-11 : Profil de charge journalière pour T12 AFM (femme et homme actif) pour : (a) Jours de semaine été/hiver ; (b) Samedis d'hiver ; (c Samedis d'été ; (d) Dimanche d'hiver ; (e) Dimanche d'été (f) Jours fériés d'hiver ; (g) Jours fériés d'été

Cette simulation peut être analysée à différentes échelles de temps par exemple pour T12 couple composé de deux personnes actives dont la personne référence est moins de 25 ans vivant dans un logement de plus de 100 m^2 (quotidienne, hebdomadaire et mensuelle) afin de permettre une meilleure compréhension du comportement d'un ménage vis-à-vis des appareils électriques en tenant compte de deux semaines de vacances aléatoires à l'extérieur du logement (Figure 4-12).

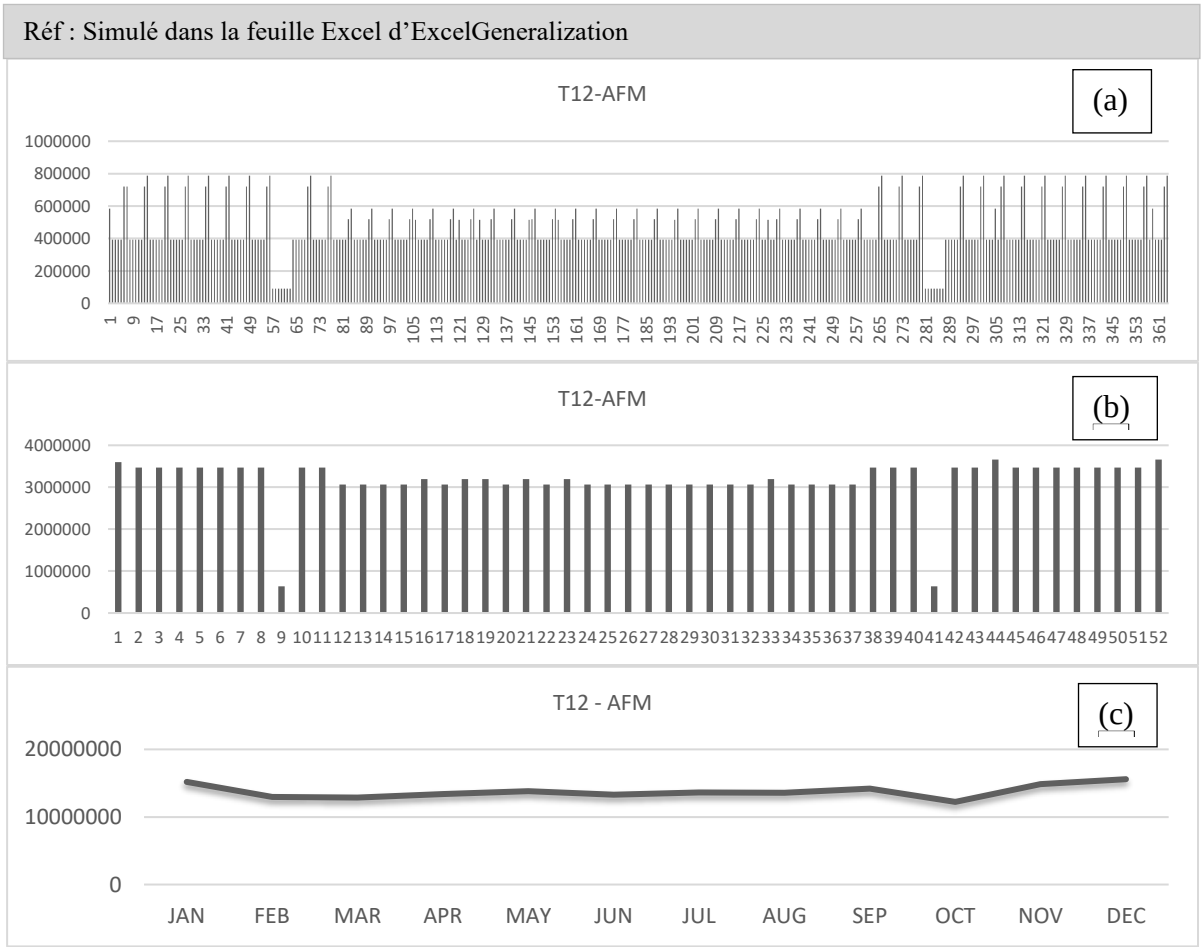


Figure 4-12 : Profil de charge totale pour T12 AFM kWh. Sur une base : (a) quotidienne ; (b) hebdomadaire ; (c) mensuelle

Les résultats de la simulation de la consommation annuelle et de la demande maximale des différents types de ménages et de leurs catégories en fonction de l'activité/inactivité des membres adultes du ménage sont présentés dans le Tableau 4-18.

Tableau 4-18 : Consommation annuelle et demande maximale des différents ménages

Réf : ExcelGeneralization sheet

Type	Catégorie	Consommation annuelle par ménage (kWh/an)	Consommation annuelle par personne (kWh/an)	Demande maximale
T 1	AM	576	576	1787
	AF	596	596	1788
	IM	608	608	1791
	IF	565	565	1787
T 2	AM	939	939	3516
	AF	1147	1147	3733
	IM	1298	1298	3393
	IF	1548	1548	3728
T 3	AM	1216	1216	3143
	AF	1452	1452	4128
	IM	1639	1639	5372
	IF	1979	1979	6727
T 4	AM	487	487	1782
	AF	515	515	1782
	IM	529	529	1782
	IF	509	509	1782
T 5	AM	1168	1168	2725
	AF	1424	1424	3178
	IM	1575	1575	2728
	IF	1902	1902	4128
T 6	AM	1790	1790	3261
	AF	2011	2011	4386
	IM	2632	2632	5221
	IF	2931	2931	6397
T 7	IM	354	354	148
	IF	337	337	148
T 8	IM	525	525	1432
	IF	639	639	2726
T 9	IM	791	791	1782
	IF	932	932	2636
T 10	AFM	825	412	1835
	IFM	969	484	1808
	IMAF	910	455	1841
	IFAM	919	459	1800
T 11	AFM	1222	611	4487
	IFM	1620	810	5479
	IMAF	1244	622	5131
	IFAM	1866	933	6075
T 12	AFM	2732	1366	8985
	IFM	3957	1978	5761
	IMAF	3230	1615	4505
	IFAM	3827	1913	8683
T 13	AFM	520	260	1770
	IFM	664	332	1766
	IMAF	598	299	1770
	IFAM	615	307	1762
T 14	AFM	1934	967	4991
	IFM	2755	1377	7164
	IMAF	2011	1005	5479
	IFAM	2662	1331	5954
T 15	AFM	1624	812	5233
	IFM	2599	1299	6616
	IMAF	2018	1009	5151
	IFAM	2743	1371	10003
T 16	IFM	371	185	189
T 17	IFM	1336	668	4140
T 18	IFM	1804	902	3769
T 19	AFM+1.8C	822	216	1798
	IFM+1.8C	974	256	1798
	IMAF+1.8C	910	239	1798
	IFAM+1.8C	916	241	1798

T 20	AFM+1.8C	1229	324	5117
	IFM+1.8C	2179	574	6275
	IMAF+1.8C	1210	318	4735
	IFAM+1.8C	1815	478	6076
T 21	AFM+1.8C	1890	497	5896
	IFM+1.8C	2319	610	5287
	IMAF+1.8C	2072	545	4920
	IFAM+1.8C	2039	537	7088
T 22	AFM+1.8C	812	214	1793
	IFM+1.8C	950	250	1797
	IMAF+1.8C	899	237	1793
	IFAM+1.8C	843	222	1793
T 23	AFM+1.8C	1087	286	5479
	IFM+1.8C	1597	420	5479
	IMAF+1.8C	1082	285	5469
	IFAM+1.8C	2135	562	7131
T 24	AFM+1.8C	1816	478	5981
	IFM+1.8C	2432	640	6278
	IMAF+1.8C	2027	533	4692
	IFAM+1.8C	2519	663	7508
T 26	IFM+1.8C	802	211	2751
T 28	AM+1.6C	700	269	1793
	AF+1.6C	736	283	1793
	IM+1.6C	846	325	1793
	IF+1.6C	840	323	1793
T 29	AM+1.6C	959	369	5016
	AF+1.6C	1206	464	3510
	IM+1.6C	1271	489	3728
	IF+1.6C	1668	641	4727
T 31	AM+1.6C	620	238	1788
	AF+1.6C	668	257	1788
	IM+1.6C	756	291	1788
	IF+1.6C	764	294	1788
T 32	AM+1.6C	1047	403	2450
	AF+1.6C	1230	473	5319
	IM+1.6C	1368	526	4136
	IF+1.6C	1713	659	4308
T 33	AM+1.6C	2086	802	4579
	AF+1.6C	2413	928	4716
	IM+1.6C	3034	1167	6403
	IF+1.6C	3597	1384	6576
T 35	IM+1.6C	883	340	2904
	IF+1.6C	1251	481	2819
T 37	2.2AIFM	887	403	1791
T 38	2.2AIFM	1410	641	3058
T 40	2.2AIFM	1277	580	3192
T 41	2.2AIFM	1634	743	3397
T 42	2.2AIFM	2367	1076	4148

4.1.9 Étape 9. Application urbaine

Généraliser le profil de charge grâce aux données urbaines :

Afin de généraliser le profil de charge à l'échelle des quartiers, nous prenons en compte les statistiques nationales du recensement de la population de 2010 publiées par l'INSEE.

Tableau 4-19 : Type de ménage auquel appartiennent les individus en France en 2010

Réf : INSEE-DGFiP-Cnaf-Cnav-CCMSA, enquête Revenus fiscaux et sociaux 2010

Type de ménage auquel appartiennent les individus :	Population	Ménages
Individus appartenant à un ménage dont la référente a moins de 65 ans :	49 659 000	
• **Ménage avec un seul membre**	5 428 000	
•**Hommes inactifs**	601 000	601 000
•**Hommes actifs**	2 352 000	2 352 000
•**Femmes inactives**	681 000	681 000
•**Femmes actives**	1 794 000	1 794 000
• **Ménage monoparental**	5 310 000	
•**Pères inactifs**	173 360	66 677
•**Pères actifs**	614 640	236 400
•**Mères inactives**	1 015 000	390 385
•**Mères actives**	3 507 000	1 348 846
• **Couples**	37 195 000	
•**Couples inactifs**	507 008	253 504
•**Familles inactives**	2 158 992	568 156
•**Hommes inactifs, femmes actives sans enfants**	400 507	200 253
•**Hommes inactifs, femmes actives avec enfants**	1 840 493	484 340
•**Hommes actifs, femmes inactives sans enfants**	1 185 000	592 500
•**Hommes actifs, femmes inactives avec enfants**	5 432 000	1 429 474
•**Couples actifs**	4 882 000	2 441 000
•**Familles actives**	20 789 000	5 470 789
• **Ménages complexes**	1 726 000	784 545
Individus appartenant à un ménage dont la référente est âgé de 65 ans ou plus :	11 248 000	
• **Membres masculins vivant seul**	1 734 240	1 734 240
• **Membres féminins vivant seul**	1 878 760	1 878 760
• **familles**	5 474 455	1 440 646
• **Couples**	1 216 545	608 273
• **Hommes de ménage monoparental**	394 790	151 842
• **Femmes de ménage monoparental**	427 690	164 496
• **Complexe**	121 520	55 236
Total	60 907 000	24 943 818 (2.44 p per household)

Pour connaître le nombre de ménages de chaque type dans chaque quartier, nous trouvons d'abord leur ratio à l'échelle nationale car les informations détaillées comme celles indiquées dans le Tableau 4-19, y compris les activités des ménages et leur composition, ne sont pas disponibles à l'échelle de la ville et celle du quartier. Par exemple, les informations nécessaires concernant un ménage composé d'un couple dont la personne de référence est active sont inconnues. Selon les statistiques, la personne de référence est la personne qui a le revenu plus élevé et qui est souvent responsable décisionnel du ménage. Par conséquent, le genre de cette personne et l'activité de l'autre personne du couple ne sont pas révélés à l'échelle urbaine.

Selon l'INSEE (RP2014), la structure des ménages en termes de type à l'échelle locale et nationale n'est pas tout à fait identique pour la zone d'étude malgré les similitudes de certains types de ménage (Tableau 4-20).

Tableau 4-20 : Pourcentage du type de ménages à Tours et en France en 2016

Réf : INSEE (RP2014)

Type de ménage	Personne de référence <25 ans (%)		Personne de référence 25-65 ans (%)		Personne de référence >65 ans (%)	
	Tours	France	Tours	France	Tours	France
Membre-unique	27	9	47	53	26	38
Complexe	43	16	49	68	8	16
Monoparental	2	2	91	88	7	10
Couple (avec ou sans enfants)	4	2	77	80	19	18

Cependant, nous supposons donc que la répartition du type de population dans la ville de Tours et ses quartiers est similaire à celle de l'échelle nationale. Cette hypothèse est due au manque d'information nécessaire sur les ménages à l'échelle locale, mais aussi à la similarité de l'activité et du taux de chômage à l'échelle nationale et locale publiée par l'INSEE dans les RP2012 et RP2017 (Tableau 4-21).

Tableau 4-21 : Taux d'activité et de chômage à Tours et en France en 2017

Réf : INSEE (RP2012 et RP2017)

	Tours	France
Total des emplois en 2017	82 603	26 412 162
Pourcentage d'emplois dont des emplois salariés en 2017	90,4	86,8
Variation totale de l'emploi entre 2012 et 2017	0,7	0,1
Taux d'activité entre 15 et 64 ans en 2017	69,8	74,0
Taux de chômage entre 15 et 64 ans en 2017	18,5	13,9

Le nombre des ménages est calculé à l'aide de l'Equation 14 :

$$n = N_h \, x \, A \, x \, D_s \quad (14)$$

avec :

n = nombre de ménages dans chaque quartier

N_h *= nombre de ménages en fonction de leur activité à l'échelle nationale*

A = pourcentage de la catégorie d'âge ;

D_s *= pourcentage de la taille de logement*

À titre d'exemple, le nombre calculé de ménages de chaque catégorie pour le quartier Centre, qui compte 7842 ménages, est présenté dans l'Annexe VII (Tableau VII-4). Dans l'étape précédente, la consommation électrique annuelle de chaque catégorie de chaque type de ménage est calculée. Avec la même méthodologie, il est possible de calculer le nombre de

ménages de chaque catégorie pour chacun des 22 quartiers ainsi que leur consommation annuelle totale et par conséquent pour toute la ville de Tours (Tableau VII-5).

4.1.10 Étape 10. Vérification

Comparer des données totales basées sur une simulation désagrégée avec les données totales existantes publiées par les fournisseurs :

Dans cette simulation qui concerne 130 817 personnes vivant dans 72 202 logements, nous avons obtenu environ 86 GWh/an comme consommation annuelle totale d'électricité des appareils électriques pour toute la ville (Tableau VII-6 en Annexe VII). En d'autres termes, cette consommation est d'environ 0,66 MWh/an par personne. L'occupation moyenne d'un logement est de 1,81 et donc la consommation annuelle moyenne par foyer/logement est d'environ 1195 kWh.

La validation des résultats peut se faire par l'installation de sous-compteurs communicants. Elle reste la seule méthode de désagrégation des données sans être directement intrusive et avec une précision allant de 15 à 60 minutes d'intervalle (Zhao et al., 2020). En l'absence de compteurs et de sous-compteurs communicants capable d'identifier des appareils électriques dans toutes les zones d'étude, les données basées sur une estimation désagrégée peuvent être comparées aux données totales existantes publiées par les fournisseurs afin de vérifier les résultats.

Tableau 4-22 : Consommation totale d'électricité à différentes échelles

Réf : (1) eCO2mix RTE énergie ; (2) Observatoire régional de l'énergie et des gaz à effet de serre en région Centre ; (3) Calculé sur la base de (1) et (2) ; et (4) Agence France énergie

		Consommation annuelle définitive 2015	**Résidentiel (tous les usages finaux) (41% du total)**
Echelle du quartier (locale) en moyenne	Centre	N/A	N/A
Echelle urbaine	Tours	N/A	356 GWh [(4)]
Echelle régionale	Centre Val de Loire	18 [(1)] TWh	7362 GWh [(2)]
Echelle nationale	France	476 [(1)] TWh	194684 GWh [(3)]

D'après les données existantes (Tableau 4-22), pour 134978 personnes dans 80905 logements de la ville de Tours, 356408 MWh (356 GWh) d'électricité sont consommés annuellement pour tous les usages finaux (appareils électriques, eau chaude, chauffage, etc.), soit environ 2,64 MWh par personne par an et 4404 kWh par foyer/logement par an.

Par conséquent, dans cet exemple, les appareils électriques estimés représentent environ 25 % de la consommation totale mentionnée par les fournisseurs. Cependant, la part des appareils électriques représente 20 % de la consommation totale (éclairage compris) selon le CEREMA (2014) pour la même période que les statistiques démographiques.

Cette différence peut s'expliquer par des erreurs et des incertitudes dans l'analyse (suite aux hypothèses adoptées), par une différence de structure entre l'échelle nationale et urbaine, par l'évolution rapide des technologies et par la non prise en compte de certains types et exceptions. Il existe également d'autres facteurs importants tels que le type d'énergie finale, qui varie d'un ménage à l'autre. Certains logements utilisent le gaz au lieu de l'électricité pour les systèmes de chauffage/climatisation, l'eau chaude et les équipements de cuisine. Ainsi, même si les résultats sont légèrement surestimés, nous pouvons considérer que les résultats approximatifs sur l'estimation de la part des appareils électriques et les données existantes valident la méthodologie proposée.

4.1.11 Étape 11. Évolution

Elaborer de scénarios futurs de développement socio-économique et technologique :

La demande électrique doit être estimée en tenant compte des futurs changements structurels affectant le système énergétique urbain. Les changements dans les politiques, les législations et les décisions peuvent également entraîner une modification des facteurs déterminants de la demande d'énergie et, par conséquent, ces facteurs fondamentaux devraient être identifiés et évalués et pris en compte non seulement au début de la formulation et de la rédaction des scénarios de développement, mais également à long terme et pour les horizons futurs. FARZANEH et al. (2014) divisent ces scénarios en deux catégories :

1. Socio-économique : elle décrit les caractéristiques fondamentales de l'évolution sociale et économique du système énergétique urbain, telles que les changements de mode de vie, la croissance démographique et la croissance du PIB.
2. Technologiques : elle affecte le calcul de la demande d'énergie, par exemple, l'efficacité et le potentiel de pénétration de chaque forme d'énergie alternative et des nouvelles technologies telles que les équipements et les applications de *smart grid*.

Les urbanistes peuvent faire des hypothèses sur l'évolution possible des modèles de développement social, économique et technologique du système énergétique local. Les

modèles peuvent être anticipés à partir des tendances actuelles et des objectifs gouvernementaux. Ainsi, ils doivent refléter les changements structurels de la demande énergétique d'un pays à moyen et long terme. Cela se fait au moyen d'une analyse détaillée des caractéristiques sociales, économiques et technologiques du territoire donné dans le passé ; afin de pouvoir refléter les changements possibles à l'avenir. Cette approche prend notamment en compte l'évolution des besoins sociaux de la population, tels que la demande de chauffage, d'éclairage, de transport, de climatisation, et ce en fonction de la répartition de la population entre les zones urbaines et rurales ; les politiques industrielles du pays (développement axé sur certains types d'industries) ; et les politiques du pays (exigences organisationnelles) concernant le transport, le logement, etc. ainsi que le développement technologique et l'évolution des marchés potentiels pour différentes formes d'énergie [AIEA , 2006]. En outre, les facteurs environnementaux jouent également un rôle important dans la production et la consommation d'électricité (Tableau 4-23).

Tableau 4-23: Scénarios futurs dans la modélisation de la demande énergétique

Soure : Basé sur FARZANEH et al. (2014) et AIEA (2006)	
Scénarios futurs	**Différents aspects**
Social	-Changement de la population (âge) -Changement dans la structure du ménage -Guerres -Risque humain (terrorisme, etc.) -Changement de comportement -Mondialisation de la société
Technologique	-Progrès par l'innovation -Risque (piratage, etc.) -Questions opérationnelles
Économique	-Changement économique (variation du PIB) -Mondialisation de l'économie -IDH change -Questions financières -Effet rebond -Libéralisation du marché
Environnemental	-Changement climatique - Risques naturels - Pollutions et questions environnementales
Organisationnel	-Changement de politique -Normalisation - Risque juridique -Politiques gouvernementales -Privatisation

Ces scénarios d'avenir devraient promouvoir :

1. Une contribution du modèle aux objectifs et exigences nationaux en identifiant les domaines prioritaires en matière de recherche et développement ;

2. Une approche multidisciplinaire de la modélisation ;

3. Une coopération entre les différentes dimensions de la science (sociale, économique, environnementale) ;

4. Une approche holistique à différentes échelles spatio-temporelles et dans des conditions socio-économiques différentes

5. Une solution intégrée à une multitude des problèmes par la création des mécanismes scientifiquement coordonnés.

L'élaboration de scénarios futurs n'entre pas dans le cadre de cette recherche. Par conséquent, nous n'abordons pas les facteurs sous-jacents des scénarios futurs mais plutôt certains de ces facteurs les plus déterminants tels que l'évolution de la population et des ménages. Toutefois, pour les travaux futurs, il est plus intéressant d'étudier tous les sujets de manière approfondie avant tout processus de modélisation et de développer des perspectives d'avenir à la fin du processus.

Tableau 4-24 : Evolution de la population en France de 1990 à 2070 (scénario central)

Réf : INSEE, estimations de population, statistiques de l'état civil jusqu'en 2010 et projections de population 2013-2070 (France hors Mayotte jusqu'en 2012, France y compris Mayotte à partir de 2013)

Année	Population au 1er janvier	0-19 ans	20-59 ans	60-64 ans	65-74 ans	75 ans et plus	Accroissement naturel	Migration
1990	57 996 000	27,9%	53,2%	5,1%	7,1%	6,7%	258 700	77 000
2000	60 508 000	25,8%	53,9%	4,5%	8,7%	7,1%	266 800	72 000
2010	64 613 000	24,8%	52,6%	6,0%	7,8%	8,8%	281 600	39 000
2013	65 779 000	24,6%	51,6%	6,3%	8,5%	9,0%	245 400	70 000
2020	67 819 000	24,4%	49,4%	6,1%	10,8%	9,3%	195 100	70 000
2025	69 093 000	23,7%	48,3%	6,2%	11,0%	10,8%	172 100	70 000
2030	70 281 000	23,0%	47,4%	6,2%	11,2%	12,2%	162 200	70 000
2035	71 418 000	22,4%	46,5%	6,2%	11,4%	13,5%	147 200	70 000
2040	72 451 000	22,3%	46,1%	5,6%	11,5%	14,6%	117 600	70 000
2050	74 025 000	22,3%	44,9%	5,7%	10,8%	16,4%	59 900	70 000
2060	75 210 000	21,7%	44,9%	5,5%	10,7%	17,2%	42 800	70 000
2070	76 448 000	21,3%	44,2%	5,8%	10,8%	17,9%	68 200	70 000

En termes de population en France, l'INSEE indique que si le même taux d'évolution démographique se poursuit à l'avenir, au ^{1er} janvier 2070, la population sera de 76,5 millions de personnes, soit 10,7 millions de plus qu'en 2013, notamment composée de personnes âgées de 65 ans ou plus. Jusqu'en 2040, la population des personnes âgées de 65 ans ou plus augmentera indépendamment des hypothèses sur la fécondité, les immigrations ou l'espérance de vie. Par la suite, l'évolution sera plus modérée (25-34 % de la population dépassera cet âge

en 2070). Le nombre d'habitants à l'horizon 2070 dépend de différents facteurs, notamment ceux liés à l'immigration et à la fécondité. Cependant, la structure de l'âge de la population est plus indépendante de ces facteurs. En 2070, il y aura plus d'une personne de 65 ans ou plus pour deux personnes âgées de 20 à 64 ans (Tableau 4-24 ; Figures 4-13 & 4-14).

Réf : Insee, estimations de population et projections de population 2013-2070 (France hors Mayotte jusqu'en 2012, France y compris Mayotte à partir de 2013

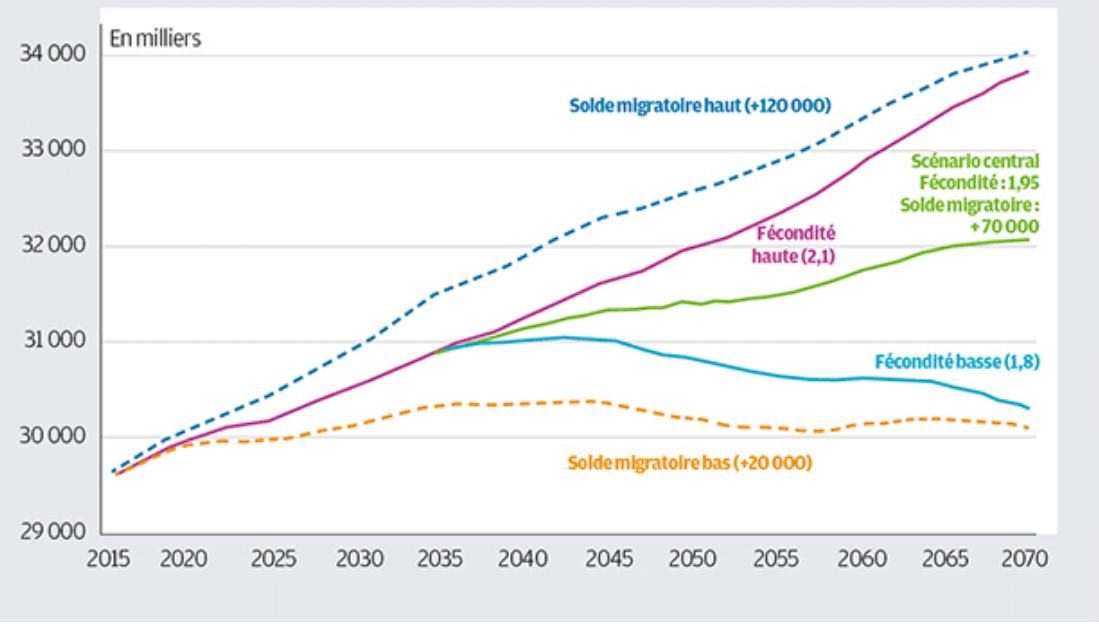


Figure 4-13 : Évolution de la population en France de 1990 à 2070

Réf : Bilan démographique 2005 et projection de population, Insee.

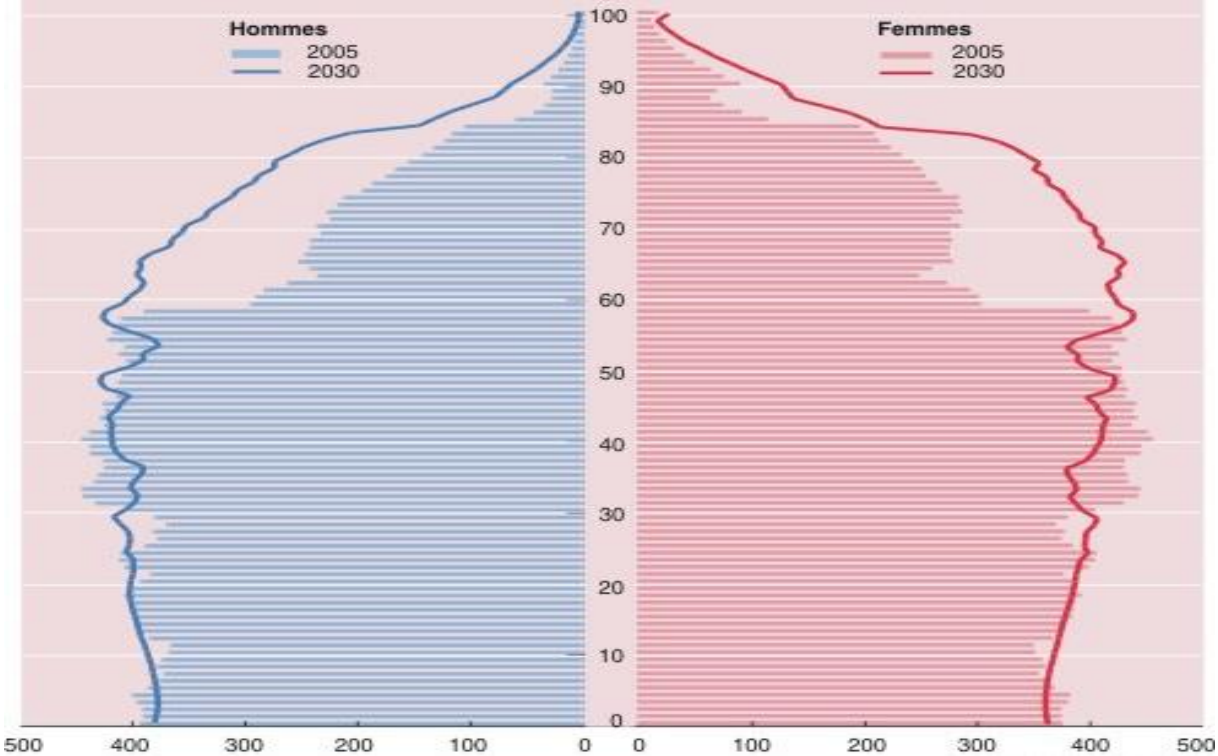


Figure 4-14 : Pyramide des âges (en milliers) en 2005 et 2030 en France

Au cours des dernières années, de 1975 à 2005, le nombre de ménages par rapport à la population a augmenté plus rapidement. Le taux de croissance de la population est de 0,48 % alors que ce taux pour le nombre de ménages est de 1,24 %. On peut donc dire que le nombre moyen de personnes par ménage a diminué avec un taux de -0,74% (Tableau 4-25).

Tableau 4-25 : Évolution de la structure des ménages de 1975 à 2005 en France

Réf : recensements 1975 à 1990, estimations à partir du recensement 1999, de Sitadel et de l'enquête annuelle de recensement 2005, INSEE et SESP

Année	1975	1982	1990	1999	2005
Populations (en milliers)	52 599	54 296	56 652	58 492	60 702
Nombre de ménages (en milliers)	17 745	19 589	21 542	23 776	25 689
Nombre moyen de personnes par ménage	2,88	2,70	2,57	2,40	2,31

Dans les ménages dont la personne de référence est d'âge moyen, les enfants quitteront le logement familial avec l'intention de vivre dans des logements séparés. Ainsi, davantage de ménages seront créés. En outre, le comportement de cohabitation change au cours de la période. L'institution de la famille s'est transformée au cours des dernières décennies en raison de la prolifération des divorces, des remariages, des familles recomposées et des ménages monoparentaux (Figure 4-15).

Réf : recensement 1982, enquête annuelle de recensement 2005 et projection, INSEE

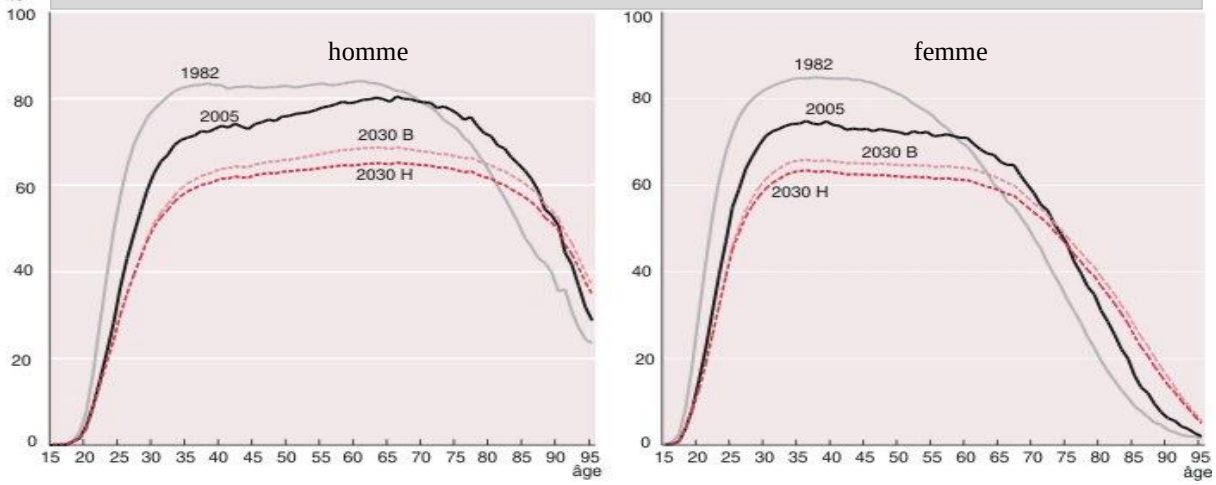


Figure 4-15 *:* Proportion d'individus vivant en couple selon leur âge et leur sexe

Les personnes âgées vivent moins avec leurs enfants qu'auparavant et, grâce à l'amélioration des allocations, elles peuvent vivre dans des logements indépendants. Ce sont quelques-uns des facteurs qui expliquent l'augmentation du nombre de ménages. De plus, le type de ménage a changé de 1990 à 2005 et, en supposant différents scénarios, ce changement se poursuit comme le montre la Figure 4-16.

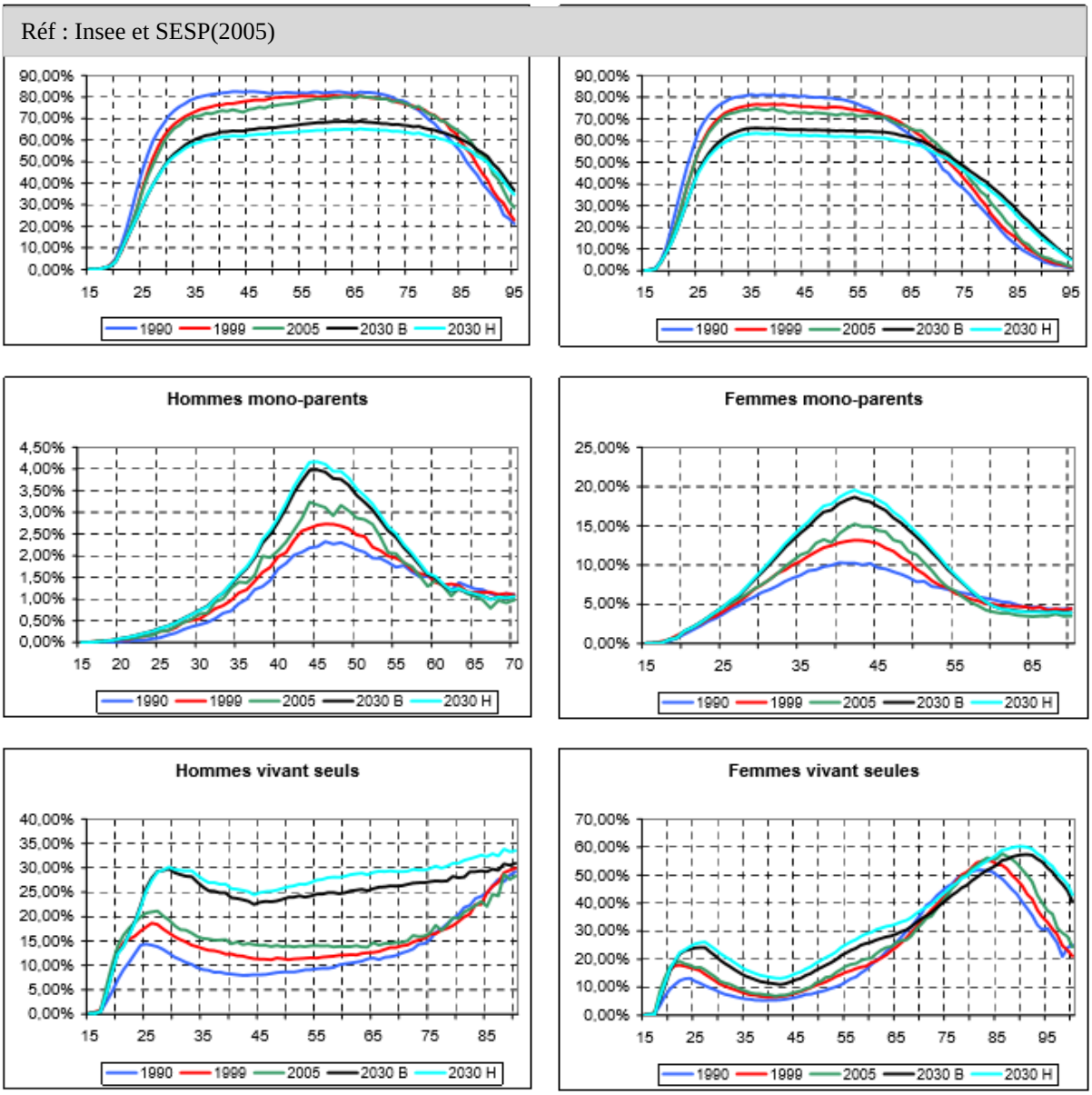


Figure 4-16 : Estimation de l'évolution des différents types de ménages jusqu'en 2030 en France métropolitaine

Ces estimations futures permettent de déterminer l'évolution du nombre de types dans des horizons futurs et donc de recalculer la demande d'électricité.

4.2 Stratégies de réduction de la charge électrique

La première étape pour réduire la consommation/demande d'électricité liée aux appareils électroménagers consiste à comprendre quand et pour combien de temps chaque appareil fonctionne, puis à identifier les plus grands consommateurs et le moment où la demande est la plus forte. Cela a été fait par une estimation dans la section précédente. À ce stade, plusieurs

stratégies peuvent être mises en place pour obtenir un système électrique plus efficace dans lequel la demande correspond mieux à l'offre.

Une stratégie commune consiste à contrôler (arrêter/démarrer) l'offre, c'est-à-dire l'activité des centrales de production, afin de l'adapter à la demande. L'inconvénient est qu'il est assez coûteux et long d'arrêter et de redémarrer les centrales électriques fonctionnant avec des ressources non renouvelables. L'autre défi est la taille et la capacité des équipements qui doivent supporter les conditions de charge de pointe qui se produisent pendant une fraction de la durée de vie du système [NEWSHAM, G. & BOWKER, 2010]. Les stratégies de gestion de la demande pourraient être considérées comme des alternatives plus pratiques aux modifications de l'offre.

La plupart de ces stratégies sont liées à des avantages économiques et monétaires et sont associées à l'eau chaude, à la climatisation, au système de chauffage et à ce type d'équipement. Ces mesures économiques comprennent le remplacement des anciens équipements inefficaces par des appareils plus récents et moins consommateurs. Toutefois, d'autres solutions peuvent également être appliquées pour réduire la consommation et/ou la demande.

Deux problèmes principaux du réseau sont abordés en chapitre 1. L'un est la demande de pointe d'électricité. Les pics dans la courbe du profil de charge posent des problèmes à la fois aux consommateurs et aussi aux fournisseurs. L'autre est la consommation inactive. Différentes méthodes sont utilisées par les services publics à l'égard des consommateurs pour éliminer la consommation inactive, réduire les pics et aplatir la courbe de charge électrique (Figure 4-17).

Réf : KOOL (2011)

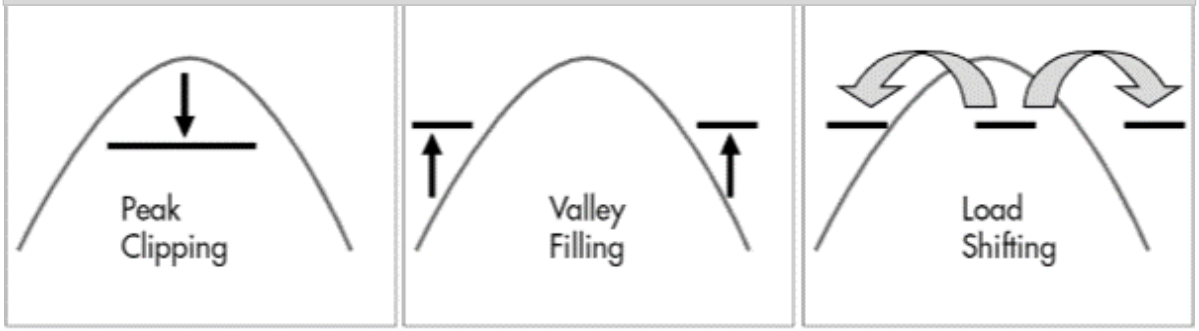


Figure 4-17 : Techniques de gestion des pics de charge

La gestion de la charge aussi appelé l'effacement de consommation électrique a pour but de créer plus d'équilibre entre l'offre et la demande. Deux techniques principales pour gérer cette charge : La Maîtrise de la Demande en Electricité (MDE) et la Réponse à la Demande (RD) : il s'agit de méthode des modifications de la demande. Ces expressions sont utilisées dans diverses études comme celle de STRBAC (2008) de manière différente ou même interchangeable. Ainsi, pour éviter toute confusion, les définitions suivantes sont proposées dans cette recherche :

- MDE : La méthode de gestion de la charge exécutée par les services publics est appelée la Maîtrise de la Demande, qui est un programme de gestion obligatoire.

- RD : La méthode de gestion de la charge exécutée par les consommateurs est appelée Réponse à la Demande qui est une réponse personnalisée facultative à un signal ou à un dispositif.

La Maîtrise de la Demande en Electricité (MDE) a pour objectif de réduire la consommation électrique et d'améliorer l'efficacité globale de l'utilisation de l'électricité. Les méthodes de la MDE couramment utilisées par les services publics sont les suivantes : la réduction de la charge, le déplacement de la charge de pointe et les pratiques d'exploitation facilitant une utilisation efficace de l'électricité [EURELECTRIC, 2011]. Ils comprennent la mise en œuvre des politiques et le développement des techniques de contrôle de la demande d'électricité. Les responsables de service public pourraient contrôler directement la demande électrique de certains équipements en imposant des coupures de courtes périodes (par exemple, pour le système de chauffage/climatisation) ou proposer de nouveaux systèmes de tarification (par exemple, le prix réduit les nuits pour le système de production d'eau chaude fonctionnant dans cette plage horaire).

Elle peut être réalisée directement par les compagnies d'électricité ou les services publics et sans intervention des consommateurs sous la forme d'un report du démarrage d'un appareil pour réduire ou effacer la charge de pointe en échange de compensations financières, d'une réduction de la facture d'électricité, de récompenses ou d'offres. La MDE est une approche *top-down*. Cette méthode est plus appropriée pour le système de production d'eau chaude, la climatisation et le chauffage. Par exemple, le système de production d'eau chaude sanitaire peut fonctionner pendant la période creuse la nuit afin de fournir de l'eau chaude pendant la journée.

Au contraire, la Réponse à la Demande (RD) est définie par la participation active des consommateurs et constitue donc une approche *bottom-up*. Dans cette méthode, la tarification en temps réel, les tarifs de nuit (en heures creuses) et les signaux d'incitation/dissuasion tarifaires (envoyés par les services publics aux consommateurs) permettent aux ménages de prendre de meilleures décisions. Le but est de convaincre les consommateurs de modifier leurs propres profils et, par conséquent, un déplacement de la charge. Cette méthode est souvent proposée pour optimiser la consommation des appareils électriques domestiques car contrairement aux autres usages finaux le temps d'utilisation est important pour les consommateurs Elle peut également prendre la forme de programmes de subventions visant à encourager les consommateurs à remplacer leurs appareils moins efficaces par des appareils plus durables [BRENNAN, 1998].

Certaines actions qui peuvent être entreprises dans le secteur résidentiel pour l'usage final des appareils électriques afin d'atteindre les objectifs de réduction de charge par la DR sont les suivantes :

a) Éviter autant que possible l'utilisation simultanée des appareils et faire démarrer les appareils les uns après les autres, le cas échéant (par exemple, faire démarrer le lave-linge après la fin du cycle du lave-vaisselle) ;

b) Reporter certaines activités non urgentes, programmables aux heures creuses notamment pour les appareils sans indépendance d'occupation (par exemple, faire fonctionner la machine à laver la nuit) ;

c) Brancher tous les appareils du même type (ex. systèmes vidéo ou audio) avec télécommande et affichage numérique (par exemple, télévision, lecteur DVD, etc.) sur une multiprise de courant et la débrancher lorsque l'occupant du logement n'est pas présent ou pendant la nuit ;

d) Éteindre les appareils consommant de l'énergie en mode veille (ex. ordinateur) lorsqu'ils ne sont pas utilisés pendant une longue période ;

e) Retirer les chargeurs de l'appareil après la fin du processus de recharge et éviter de surcharger les appareils

f) Débrancher le chargeur ou certains appareils à puissance inactive lorsqu'ils ne sont pas utilisés.

Ces actions peuvent être réalisées par les occupants du logement pour obtenir une consommation et une demande plus faibles à l'échelle individuelle. Avec le développement de maisons intelligentes et de villes intelligentes (avec la capacité d'automatisation, de surveillance et de communication plus élevées et aussi l'intelligence artificielle) à l'échelle des quartiers et celle des villes, les avantages des mesures d'efficacité énergétique vont être maximisés.

L'analyse de la demande d'électricité permet d'estimer les effets potentiels des techniques de gestion de la charge sur le profil de charge des ménages à différentes échelles. Plusieurs actions peuvent être effectuées par les services publics et les consommateurs pour réduire la consommation simulée et la demande maximale. Ce scénario d'estimation de la gestion de la charge peut être comparé avec le modèle de demande d'électricité primaire pour révéler l'efficacité de cette méthode.

En général, plusieurs itérations doivent être réalisées afin de parvenir à une réduction satisfaisante de la demande de pointe sans porter atteinte au confort des habitants ou à la qualité du service énergétique fourni.

Nous avons appliqué les actions mentionnées ci-dessus, ainsi que le déplacement de certaines utilisations dans le même créneau d'activité avec l'intention d'obtenir une interaction minimale entre les activités et une réduction maximale de la demande. Les résultats de la gestion de la charge pour le quartier Centre de Tours et pour la ville entière sont présentés dans l'Annexe VII (Tableaux VII-7 & VII-8).

Dans cette simulation, les mêmes appareils électriques sont utilisés et le même temps est consacré à chaque activité. Seul le temps d'utilisation de l'appareil est modifié et la consommation en veille est éliminée tant que possible. Ainsi, le remplacement des appareils à faible rendement et la mise à niveau vers des appareils qui consomment moins en fonctionnement comme en veille ne sont pas pris en compte. Cependant, en raison de la paramétrabilité de cette analyse, les caractéristiques des appareils peuvent être modifiés à tout moment pour permettre des mises à niveau ultérieures. Cette estimation est réalisée de la même manière que le modèle de demande d'électricité et l'étape 10 de la modélisation de la demande est répétée après avoir appliqué les stratégies de gestion de la charge pour créer ce scénario pour tous les quartiers et par conséquent pour toute la ville de Tours. La consommation annuelle et la demande maximale après gestion de la charge sont présentées en

Annexe VII (Tableau VII-9). Les impacts des techniques potentielles de gestion de la charge par rapport au scénario primaire montrent non seulement une réduction de la consommation totale mais aussi une courbe de charge de la demande plus lisse avec une répartition plus équilibrée des charges sur le tableau dans les 24 heures (Figure 4-18).

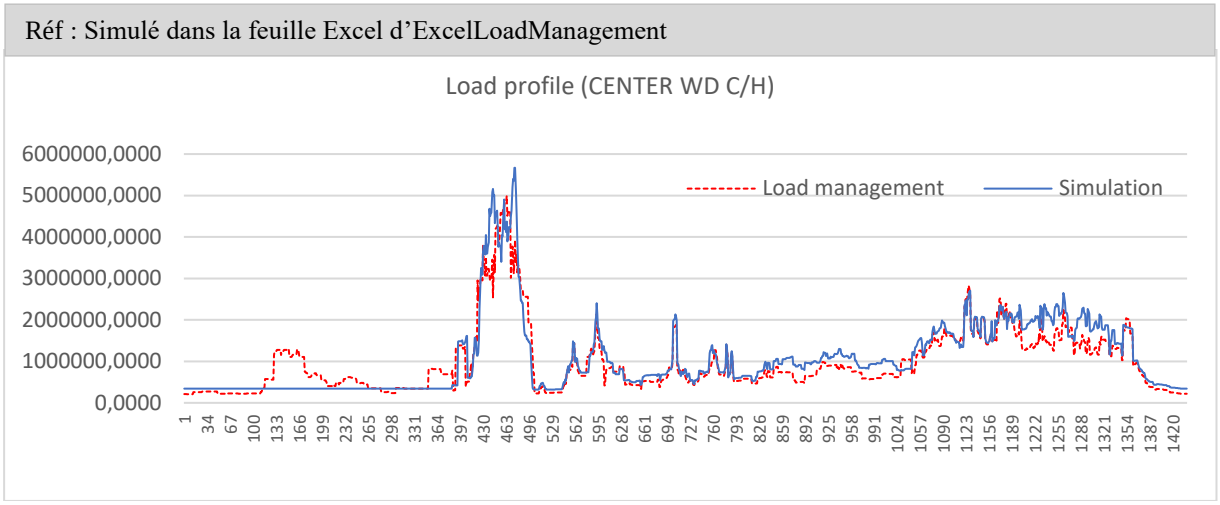


Figure 4-18 : Scénarios de simulation de la demande d'électricité et de la gestion de la charge pour le quartier Centre de Tours

4.3 Modèle de production électrique (MPE)

Pour l'estimation de la production annuelle d'électricité, il convient d'identifier les paramètres les plus influents dans la production électrique. Les corrélations entre les paramètres technologiques et climatiques et les potentiels de production d'énergie dans différents endroits à l'échelle nationale doivent être étudiés. Des ensembles de données devraient être constitués pour l'analyse statistique des différentes centrales électriques possibles. La modélisation de la production d'énergie n'entre pas dans le cadre de ce travail de recherche. Néanmoins, pour évaluer l'efficacité du *smart grid*, il est nécessaire de comparer la consommation (demande) avec la production (offre).

L'étude des données antérieures détaillées sur la consommation électrique à l'échelle régionale et nationale publiées par RTE permet de mieux comprendre l'importance de l'application du *smart grid* à plus grande échelle tant pour la consommation que pour la production pour l'optimisation du système. Cette année d'étude est choisie à titre d'exemple car c'est une année où aucune crise économique, environnementale ou sanitaire particulière ne s'est produite. Pour un mois froid dans la région Centre-Val de Loire en France, la demande la plus élevée est de 4 GW contre 10,9 GW de production et donc l'électricité excédentaire est transférée vers les autres régions comme l'Ile-de-France qui, pour la même période,

consomme 14,2 GW alors que son offre est d'environ 2,4 GW pour un jour et une heure choisis (Figure 4-19).

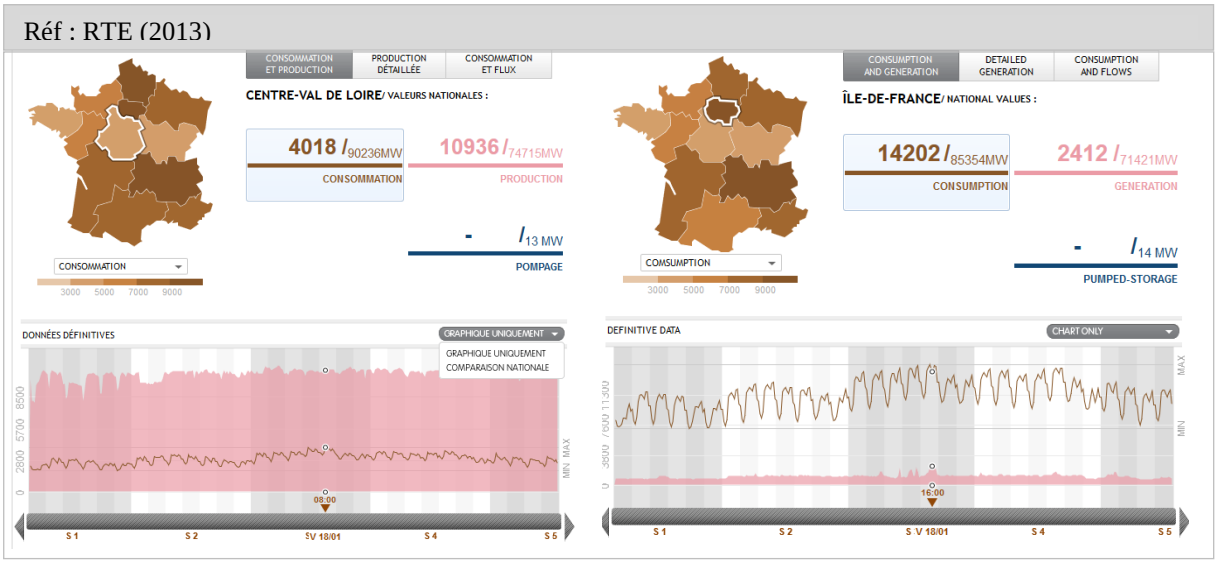


Figure 4-19 : Consommation et production d'électricité dans les régions Centre-Val de Loire et Ile-de-France lors d'une journée de saison froide

La même analyse peut être faite pour un mois chaud. Comme tous les usages finaux tels que les systèmes de chauffage et de climatisation sont inclus dans la consommation, les effets de la température sont plus impressionnants pendant les saisons froides en raison des systèmes de chauffage et entraînent une augmentation importante de la consommation. Pour une saison chaude dans la région Centre-Val de Loire, la consommation de toutes les catégories d'usages finaux à un moment donné dans une journée de ce mois est de 1,7 GW et la production est de 6,4 GW. En région Ile-de-France, il y a 0,1 GW de production pour 5,8 GW de demande. La pénurie est donc compensée par les exportations des autres régions (Figure 4-20).

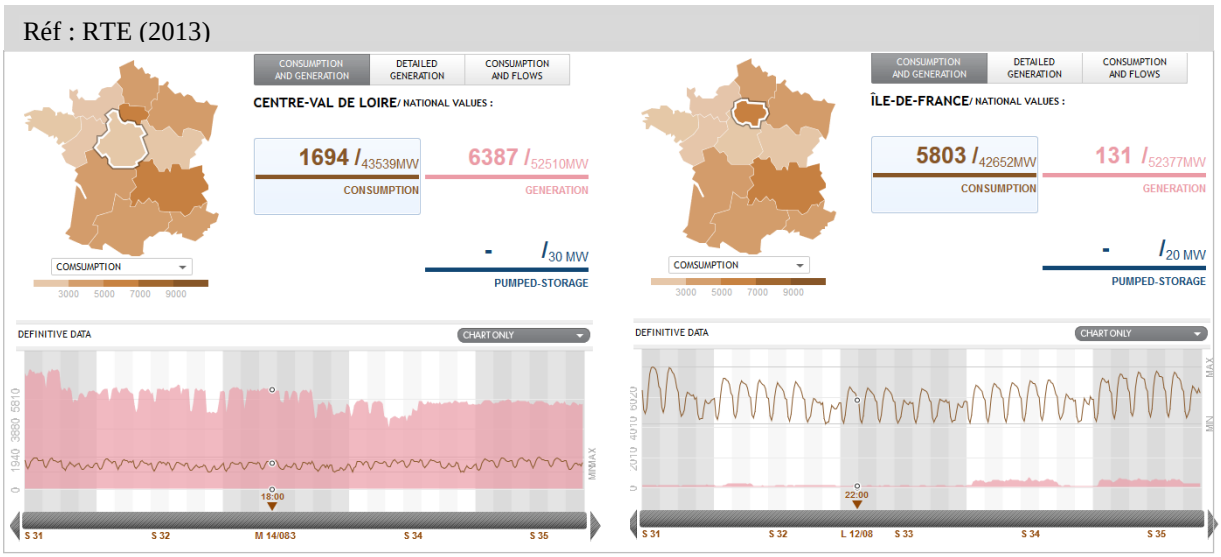


Figure 4-20 : Consommation et production d'électricité dans les régions Centre-Val de Loire et Ile-de-France lors d'une journée de saison chaude

En région Centre-Val de Loire, lors d'une journée d'été choisie (jeudi, 1er août 2013), la production maximale est à 8 heures du matin et équivaut à 7,7 GW dont la part des ressources renouvelables est d'environ 3 %. La consommation à cette heure de la journée est mentionnée à environ 1,8 GW. Selon la même analyse pour une journée d'hiver donnée (samedi, 7 décembre 2013), la production maximale est à 9h45 et environ 10 GW dont 3% de production renouvelable (26% de production renouvelable à l'échelle nationale) (Figure 4-21).

Réf : RTE (2013)

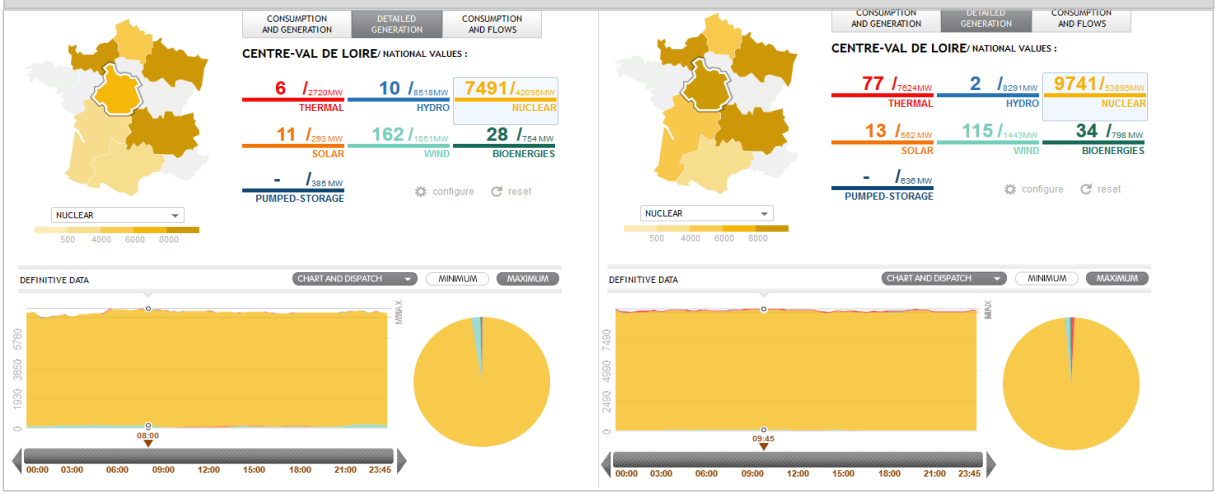


Figure 4-21 : Production maximale d'électricité lors d'une journée chaude (figure de gauche) et froide (figure de droite) dans la région CVL

Pour la même période la ville de Tours compte 134 978 habitants et est située en région Centre-Val de Loire qui abrite une population de 2 538 000 habitants. La demande électrique maximale pour les logements de cette ville est estimée précédemment dans cette recherche à 8985 W qui appartiennent à un ménage composé de deux adultes actifs de moins de 25 ans vivant dans un logement de plus de 100 m^2. On compte 255 ménages de ce type, ce qui crée une demande de 3,3 GW. Cependant, ce n'est pas la demande maximale de la ville. La somme de la demande de tous les types à l'échelle de la ville est la suivante :

Réf : Simulé dans la feuille Excel d'ExcelSimulation

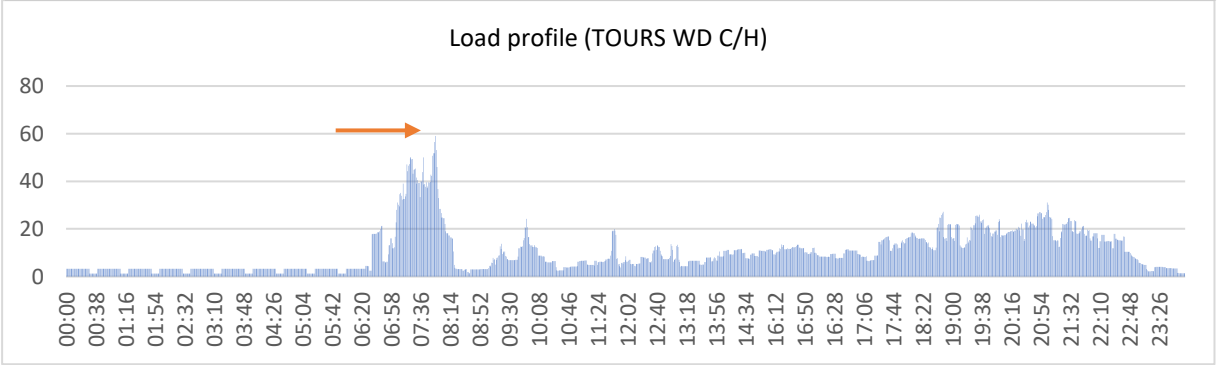


Figure 4-22 : Profil de charge électrique et demande maximale de la ville de Tours pour un jour de semaine typique

La demande maximale pour la ville de Tours est d'environ 59 MW pour un jour de semaine typique à 7h55 (Figure 4-22). En supposant que la proportion de types de ménages dans la région est la même qu'à l'échelle de la ville et que la demande augmente avec le nombre de la population et des ménages, cette demande est 18,8 fois plus élevée en région Centre-Val de Loire en comparant avec celle de Tours et équivaut à 1,1 GW ou 1109 MW. En supposant que les appareils électriques consomment 25 % de la consommation totale d'électricité des ménages, la demande totale maximale pour la région passe à 4 436 MW. Cette méthode de mise à l'échelle des résultats permet une vérification approximative des données.

Après la simulation de gestion de la charge, la demande maximale pour la ville de Tours diminue à 48 MW (Figure 4-23). En utilisant la méthode de mise à l'échelle ci-dessus, la demande régionale d'appareils électriques après application des stratégies de gestion de la charge sera de 0,9 GW ou 902 MW et pour les usages finaux totaux de 3608 MW. La consommation électrique annuelle de Tours après gestion de la charge est estimée à 73 GWh et donc pour la région Centre-Val de Loire cette consommation est estimée à 1372 GWh par an pour les appareils électriques (hors autres usages finaux). En supposant que les appareils électriques consomment 25 % de l'électricité totale, la consommation annuelle totale du secteur résidentiel de la région s'élève à 5488 GWh. Par conséquent, la gestion de la charge permet de réduire la consommation de 25 % par an.

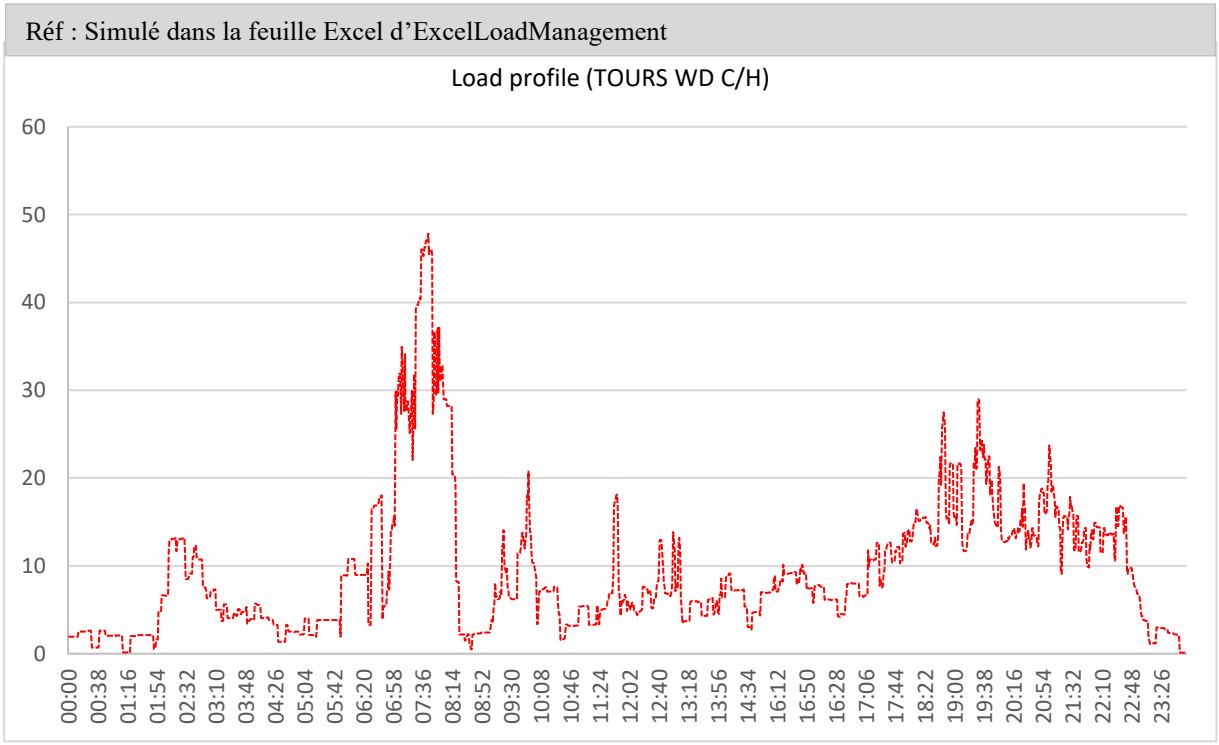


Figure 4-23 : Profil de charge électrique et demande maximale de la ville de Tours pour un jour de semaine typique après la gestion de la charge

Pour comparer la demande future avec l'offre, il est nécessaire d'analyser la capacité de production distribuée et d'énergie renouvelable de la ville de Tours et de la région Centre-Val de Loire. En France, les technologies des énergies renouvelables peuvent être divisées en quatre grandes catégories :

Tableau 4-26 : Types d'énergies renouvelables en France et leur capacité de production actuelle

Réf : RTE France (2017)

Category	Sub-categories (energy technology)	Generation capacity (MW)	Annual production (GWh)
Solar	Solar PV, solar hot water, concentrated solar power	222	247
Hydropower	Hydro power, ocean waves	92	100
Wind	Wind power	969	1523
Bio	Wood, plants, waste, ethanol, bio-diesel, biogas	75	321
Total		1358	2191

La capacité maximale existante de chacun des systèmes d'énergie renouvelable et leur production annuelle jusqu'en 2017 est mentionnée dans le Tableau 4-26. Cela représente une production annuelle de 2191 GWh à partir de ressources d'énergie renouvelables.

Selon RTE FRANCE (2017), les projets en développements permettent d'atteindre environ 300 MW d'énergie solaire, 1432 MW d'énergie éolienne et 6 MW de capacité de bioénergie. Cette capacité de production pourrait conduire à une production annuelle d'électricité de 2648 GWh (Tableau 4-27). Cette estimation est faite sur la base du Tableau 4-26 et de la Figure 4-24. Cependant, elle dépend de la disponibilité des ressources et des conditions météorologiques en raison de l'intermittence de certaines ressources d'énergie renouvelable

Tableau 4-27 : Types d'énergies renouvelables en France et leur capacité de production supplémentaire à l'avenir

Réf : Estimation basée sur la Figure 4-24 & le Tableau 4-26

Catégories	Capacité de production (MW)	Production annuelle (GWh)
Solaire	300	371
Eolienne	1432	2251
Bio	6	26
Totale	1738	2648

Réf : RTE FRANCE (2017)

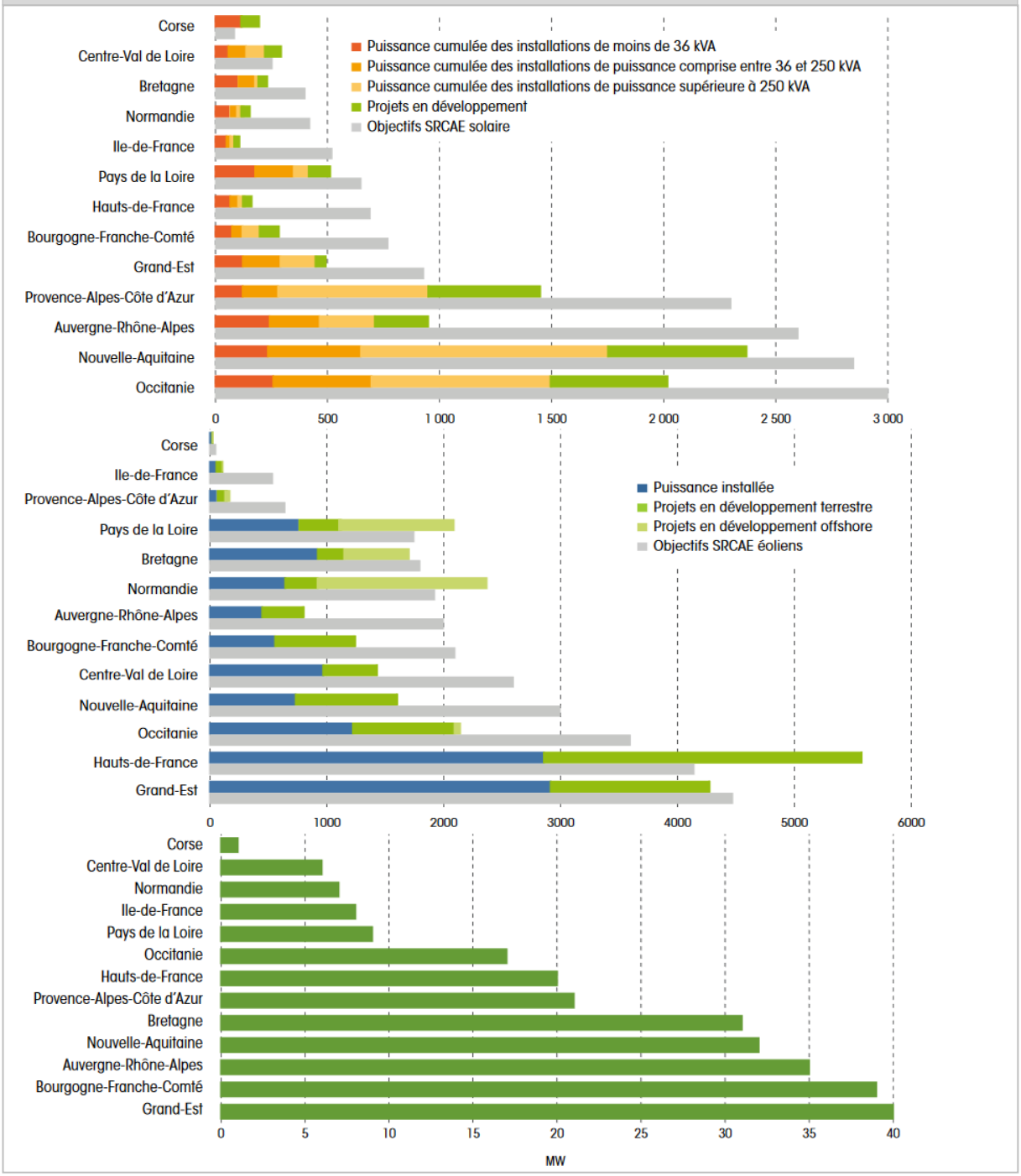


Figure 4-24 : Capacité actuelle d'énergie renouvelable et capacité des futurs projets de développement en France par région

Ainsi, il y aura une consommation annuelle de 5488 GWh pour la région Centre-Val de Loire en tenant compte des stratégies de gestion de la charge appliquées par les ménages et les services publics, 4839 GWh de production électrique à partir de ressources énergétiques renouvelables et par conséquent 649 GWh de production non renouvelable (dans ce cas le nucléaire).

4.4 Échelle de l'application du *smart grid*

Plusieurs raisons expliquent l'importance de l'échelle du projet *smart grid*. Par conséquent, plusieurs aspects doivent être étudiés avant de choisir la taille de projet :

1. Aspects financiers (coûts et bénéfices)
2. Faisabilité du projet
3. Assurance (fiabilité et sécurité)
4. Évolutivité (possibilité de futures extensions et de création de *super-grid*)
5. Capacité de production renouvelable ou décentralisée

Dans un projet de *smart grid*, la disponibilité de l'électricité dépend non seulement de la disponibilité des ressources énergétiques renouvelables (par exemple le vent, le soleil, les marées, la chaleur de la Terre, etc.), mais aussi de la quantité de la demande elle-même et de la capacité de stockage. Il a pour objectif de rationaliser la consommation et créer un équilibre entre la demande et l'offre et peut être réalisé à différentes échelles : nationale, régionale et locale.

Le *smart grid* à l'échelle nationale encourage la production d'électricité à partir de ressources énergétiques renouvelables sur l'ensemble du territoire et tente de pallier la nature intermittente de ces ressources et à leur manque de fiabilité car la varie selon capacité de système de production énergétique les caractéristiques climatiques et géographiques de chaque région. Toutes les régions ne peuvent pas accueillir un parc éolien ou des panneaux solaires. Le *smart grid* à l'échelle nationale ou le *super-grid* à plus grande échelle (tels que les réseaux européens ou intercontinentaux) avec une variété de zones climatiques permettent à de grandes centrales renouvelables dans différentes zones de concurrencer les combustibles fossiles et le nucléaire, en leur permettant d'agir en accord et de manière complémentaire.

L'échelle régionale permet aux petits producteurs locaux d'énergie renouvelable de se connecter plus facilement au réseau. Les défis du *smart grid* se situent principalement au niveau régional. La conception des futures centrales électriques à l'échelle régionale dépend non seulement de la demande, mais aussi du taux de participation public à la production à l'échelle locale, qui n'est pas toujours facilement défini. En outre, le coût de la mise à niveau

et de la connexion des centrales électriques à l'échelle régionale est assez important. Le manque d'expérience dans l'exploitation en temps réel de systèmes de production d'électricité distribués à l'échelle régionale pourrait rendre l'exploitation à cette échelle plus difficile.

L'échelle locale permet à tous les consommateurs de gérer leur demande et de participer à l'approvisionnement en alimentant le réseau. En outre, le contrôle des appareils électriques, l'élimination des pics de demande et de la consommation inactive et la réduction de la demande totale par la Réponse à la Demande (RD) se produisent à cette échelle d'application du *smart grid*. Les voitures individuelles peuvent participer à l'optimisation du réseau en proposant leurs batteries comme systèmes de stockage électrique aux heures de pointe. La production et la consommation d'électricité à l'échelle locale (échelle entre le quartier et celle de la ville) évitent l'utilisation de lignes de transmission à longue distance et, par conséquent, les pertes d'énergie le long des lignes et les coûts liés à l'entretien de ces lignes.

Conclusions, analyse critique et perspectives

Résumé des résultats

L'importance des interactions et de la communication dans les villes conduit aujourd'hui à observer les villes comme des couches d'infrastructures urbaines au lieu d'avoir un point de vue spatial. L'une des couches d'infrastructure urbaine les plus importantes est le réseau électrique qui permet le fonctionnement des autres couches d'infrastructure telles que le transport, la construction et les télécommunications, et son importance augmente avec l'évolution des nouvelles technologies.

Ainsi, le *smart grid* est proposé comme une mise à niveau du réseau traditionnel en utilisant les technologies de l'information et de la communication dans le but d'équilibrer la consommation et la production, de réduire la demande de pointe et d'optimiser l'ensemble du système. Les réseaux électriques actuellement utilisés sont développés selon différentes topologies : radial, maillé et en boucle. Le *smart grid* est une amélioration des topologies précédentes qui permet un flux bidirectionnel de l'électricité entre le fournisseur et les consommateurs. Ce système optimise la consommation et la production et, contrairement aux réseaux précédents, est plus fiable et plus efficace en cas de problème électrique.

Le réseau actuel, avec des problèmes tels que les coupures de courant, les problèmes liés à la tension, le manque de différents éléments (notamment la sécurité, la fiabilité, la capacité de production décentralisée et le stockage), les complications dues à la structure du marché de l'électricité et les problèmes techniques, a montré quelques difficultés à répondre efficacement à la demande croissante d'électricité et à s'adapter à la production renouvelable et à l'intégration du système Technologies de l'information et de la communication (TIC) et à l’exigence de mise à niveau du réseau.

Un s*mart grid* présentant des caractéristiques telles que la tarification en temps réel, le stockage de l'énergie et la capacité de production décentralisée, le comptage et les services automatisés peut fournir aux consommateurs une électricité plus efficace, plus propre et plus sûre de manière participative. Ces éléments et plusieurs autres présentent des avantages connexes pour les consommateurs, les services publics et la société en général. Pour transformer le réseau actuel en *smart grid*, trois éléments principaux doivent être ajoutés : lignes de transmission principales à très haute tension ; réseau numérique avec de nouveaux transformateurs et de nouveaux compteurs communicants de façon bidirectionnelle ; et système de surveillance de la transmission en temps réel.

Toutefois, l'avancement des projets *smart grid* est ralenti en raison de plusieurs complications de procédure et des défis techniques. En outre, l'évaluation des coûts du *smart grid*, pourtant nécessaire au démarrage du projet, est particulièrement compliquée en raison de l'évolution rapide des technologies interconnectées, de l'augmentation de la production, du manque de fiabilité des opérations, de la grande ampleur des travaux et de la diversité des parties prenantes. Afin de lancer la mise en œuvre d'un projet de *smart grid*, une analyse comparative est réalisée pour permettre une comparaison entre les pratiques communes. En Europe, deux types de projets de *smart grid* sont généralement en cours, axés soit sur le réseau, soit sur les usages finaux.

En France, en particulier, divers projets ayant les mêmes objectifs principaux sont en cours dans différents quartiers, villes et régions. Ils utilisent des compteurs communicants, des affichages domestiques, des moniteurs, des solutions de réseautage social, des jeux informatifs, des systèmes de contrôle à distance, des interruptions forcées, etc. dans les bâtiments résidentiels. D'autres projets développent des véhicules électriques avec un concept de véhicule vers réseau *(V2G)*, des stations de recharge, de l'éclairage urbain renouvelable, des solutions de stockage dans les batteries ou l'intégration de microgénérateurs. Il existe également des projets sur les conditions générales du réseau dans les secteurs de la production et de la transmission et qui tentent d'améliorer leur stabilité et leur efficacité. Ces projets se présentent sous la forme d'expériences ou de tests menés au sein de ménages volontaires et visent à analyser et à corriger le comportement des consommateurs en matière de consommation d'électricité.

En général, deux approches, l'une *top-down* et l'autre *bottom-up*, peuvent être utilisées pour l'exécution du *smart grid*. La première approche est axée sur les services publics, tandis que la seconde repose sur la prise de décision des ménages. La principale différence entre les deux réside dans le niveau de contrôle de la transparence du système et des données. Cela crée une différence entre la gestion de la demande par les autorités et la Réponse à la Demande (RD) de l'utilisateur par le biais de nouvelles technologies qui peuvent affecter l'efficacité du réseau. Pour mieux choisir l'approche, il faut étudier divers aspects tels que la vie privée des consommateurs, le contrôle, les coûts d'extensibilité, les cyber-risques et les technologies requises. En outre, le développement du *smart grid* crée plusieurs complications concernant les parties prenantes, la normalisation, les données, les échanges, les tarifs et l'intégration des véhicules électriques, qui doivent être traitées à l'avance.

Le développement d'un modèle d'architecture de *smart grid*, nous permet de mieux comprendre le cadre d'un *smart grid*, ses acteurs, ses défis et de choisir une approche appropriée. L'étude des modèles d'architecture précédents permet d'identifier les domaines, couches, zones et éléments nécessaires au bon fonctionnement du réseau et met en évidence l'importance des études pluridisciplinaires pour la mise en place du *smart grid*. Par conséquent, pour faciliter la compréhension et prendre en compte la multi-dimensionnalité des modèles, le modèle est défini avec trois niveaux : 1) physique (composants du *grid*) ; 2) gestion (ligne principale et systèmes de gestion du *grid*) ; et 3) communication (réseaux sociaux et communications) qui permet la participation et des organisations des consommateurs et permet la communication entre eux.

Malgré toutes les difficultés de modélisation dues à la présence de nombreuses variables, au contexte urbain hétérogène, au comportement humain plus ou moins imprévisible, à la complexité des prévisions, à l'évolution rapide des technologies, à l'effet rebond, à la difficulté de prendre en compte les futurs scénarios démographiques et socio-économiques, au rôle important des autorités et au manque de modèles de référence, il est nécessaire de développer des modèles de charge électrique, ce qui représente la première exigence pour la mise en œuvre de *smart grid*. Premièrement, une analyse spatio-temporelle de la demande d'électricité est réalisée et décrite dans ce manuscrit. Par la suite, différentes techniques ont permis de réduire la charge électrique ainsi que la consommation globale. Ce scénario a ensuite été comparé avec la capacité de production.

Dans différentes études, la modélisation de la demande d'électricité est créée à l'aide d'approches *top-down*, *bottom-up* ou relevant en même temps des deux. En cas de complication dans la collecte de données complètes, les données sont simulées sur la base de celles existantes en utilisant trois méthodes : 1) méthode de Monte-Carlo et processus stochastique ; 2) technique de la chaîne de Markov ; et 3) profils d'occupation active et de charge quotidienne.

La première étape avant toute analyse énergétique visant à réduire la consommation/demande d'électricité est de déterminer comment et quand chaque appareil fonctionne, puis d'identifier les plus grands consommateurs et le moment où la demande est la plus élevée. Pour cette raison, une analyse spatio-temporelle à haute résolution temporelle (par minute) a été réalisée pour créer des profils de charge résidentiels dans le contexte urbain de Tours à différentes échelles et pour simuler sa

demande d'électricité liée à l'usage final des appareils électriques. Pour cela, nous serons en mesure de répartir la consommation totale d'électricité sur plusieurs usages finaux et se concentrer sur les appareils électriques résidentiels.

Pour la mise en œuvre de cette analyse spatio-temporelle de la demande d'électricité liée aux appareils électriques dans le secteur résidentiel de la ville de Tours - après la division du total des utilisateurs d'énergie en plus petits segments et l'identification des paramètres déterminants sur la demande d'électricité - les étapes suivantes ont été suivies : 1) Investigation :Etudier indépendamment chaque paramètre influent et analyser leurs effets sur la consommation d'électricité ; 2) Élimination :Supprimer des variables d'entrée ayant un effet négligeable sur le modèle et recherche des variables les plus efficaces pour établir des profils; 3) Classification :Définir des différents types de profils ; 4) Examen : Saisir des données statistiques à l'échelle urbaine et suppression des types avec des valeurs insignifiantes ; 5) Attribution : Définir des appareils électriques pour chaque type en tenant compte d'une enquête réalisée premièrement et de l'analyse statistique ; 6) Occupation :Prendre en compte de la variation temporelle dans le modèle en considérant les activités des occupants des logements; 7) Calcul : Etablir la relation mathématique entre la demande électrique et les variables spatio-temporelles ; 8) Création : Définir un modèle de consommation pour chaque type et chaque catégorie ; 9) Application urbaine :Généralisation du profil de charge grâce aux données urbaines ; 10) Vérification : Comparer des données totales basées sur une simulation désagrégée avec les données totales existantes publiées par les fournisseurs ; et 11) Évolution : Elaborer de scénarios futurs de développement socio-économique et technologique.

La combinaison d'une enquête par sondage auprès de 54 ménages et de statistiques sociodémographiques nationales a permis de déterminer les facteurs d'influence sur la possession d'appareils électriques par les ménages et la relation entre ces ménages, leur logement et leur type et utilisation d'appareils électriques.

Dans cette étude, la taille du logement, l'âge de la personne de référence du ménage, le revenu annuel total du ménage et la taille du ménage (nombre de personnes occupant le logement) sont les facteurs les plus responsables du nombre d'appareils électriques utilisés dans le logement. La fréquence d'utilisation ainsi que le temps d'utilisation de la plupart de ces appareils dépendent de l'occupation active des membres du ménage.

En termes d'appareils électriques pour cette étude de cas, le type « des jeunes couples avec enfants vivant dans les plus grands logements » utilise un maximum d'appareils électriques, ce qui est probablement lié à leur pouvoir d'achat et à leur style de vie et aux préférences en matière de technologies et d'appareils électroménagers. En revanche, le type « des jeunes vivant seuls » utilise le minimum d'appareils électriques.

Par ailleurs, la consommation annuelle la plus faible d'usage final des appareils électriques est celle d'une femme âgée vivant dans un petit logement et la plus élevée est celle d'un jeune couple composé d'un homme actif et une femme inactive vivant dans un grand logement. La demande maximale entre tous ces types appartient à un couple d'âge moyen logé dans un grand logement et le minimum revient à une personne âgée vivant dans un petit logement (selon l'âge de personne et la taille de logement présentés dans la section 4.1.3).

En outre, les résultats montrent que plus le nombre de personnes adultes vivant ensemble dans le même logement augmente, en particulier dans le cas des ménages complexes (qui ne sont généralement pas des membres d'une même famille partageant le même logement), plus la consommation moyenne par personne est réduite par rapport au profil de consommation créé par un ménage composé d'une seule personne. En d'autres termes, la consommation d'énergie par personne est plus efficace lorsque plusieurs personnes partagent le même logement.

Deux techniques principales de réduction de la charge électrique sont utilisées pour gérer la charge électrique : La Maîtrise de la Demande en Electricité (MDE) et la Réponse à la Demande (RD). L'application de ces techniques conduit à la création d'un modèle de gestion de la charge qui peut être comparé avec le scénario précédent pour voir la contribution du *smart grid* dans la gestion de demande en période de pointe et la réduction de la consommation globale d'électricité. La généralisation de la demande d'électricité avec des estimations d'autres usages finaux permet de comparer la demande et l'offre totales à l'échelle régionale et locale. L'évaluation des futures capacités de production d'énergie renouvelable permet de savoir si la production pourrait être suffisante pour répondre à la demande maximale. Cette recherche montre que, bien que le *smart grid* puisse être mis en œuvre à différentes échelles, l'échelle locale présente plus d'avantages en permettant aux consommateurs de participer à l'approvisionnement en alimentant le réseau. En outre, le contrôle des appareils électriques, l'élimination de la demande de pointe et de la consommation inactive et la réduction de la demande totale par la RD se produisent à cette échelle d'application du *smart grid.* Les voitures individuelles peuvent participer à

l'optimisation du réseau en proposant leurs batteries comme systèmes de stockage électrique aux heures de pointe. La production et la consommation d'électricité à l'échelle du quartier et de la ville réduisent les lignes de transmission à longue distance, les pertes d'énergie associées et les coûts liés à l'entretien de ces lignes.

Nous n'avons pas pu faire d'études comparatives avec des exemples similaires, en raison de la nouveauté de cette analyse. Cependant, il existe des similitudes en termes de morphologie urbaine et de caractéristiques des bâtiments dans de nombreuses villes françaises et européennes [SUN, 2013]. Par conséquent, la méthodologie peut être applicable à d'autres études de cas présentant des caractéristiques similaires. À plus petite échelle, les villes françaises de taille approximativement identique présentent des similitudes et des niveaux d'homogénéité en termes de structure, d'organisation hiérarchique, d'activités de la population [PUMAIN & SAINT-JULIEN, 2017 et SUN, 2013].

En raison de la variété des types et de la complexité de la prédiction du comportement des occupants en matière de consommation et/ou de demande d'électricité, il peut être intéressant pour les fournisseurs d'utiliser l'analyse de la demande spatio-temporelle pour des scénarios d'aplatissement de la courbe de pointe ainsi que pour fournir une quantité d'électricité optimisée à l'échelle locale.

Les modèles énergétiques sont globalement un sujet d'intérêt pour de nombreux acteurs, notamment les services publics, les consommateurs, les décideurs et les fabricants d'appareils et peuvent aider à la prise de décision et à la création de politiques et de codes de construction ou de fabrication. Ils peuvent être utilisés pour définir les priorités des exigences de la politique énergétique de l'UE. Ils peuvent également faciliter les adoptions de technologies, les créations de nouveaux codes et la quantification de l'offre. Elles peuvent être utiles aux gestionnaires de réseaux de transport afin d'étudier la RD, d'équilibrer la demande et l'offre en temps (presque) réel et de définir la taille des transformateurs et du stockage ; aux fabricants d'appareils afin de concevoir des appareils connectés ; aux gestionnaires de réseaux de distribution afin de simuler les besoins, de différencier les tarifs et de gérer les charges et aux agrégateurs de participer à la demande afin d'offrir des services de gestion de demande.

L'estimation de la demande d'appareils électriques peut être un outil d'aide à la décision constructif pour les mesures d'engagement énergétique et environnemental pour des quartiers similaires (par exemple, dans le cœur historique de villes ayant des caractéristiques

constructives et sociodémographiques similaires). Les décideurs politiques et les acteurs du secteur de l'énergie peuvent tirer profit de ces informations pour équilibrer l'offre et la demande d'électricité et optimiser le système électrique. Une décision politique relative à l'approvisionnement en électricité a un impact direct sur les coûts économiques et environnementaux de la production d'électricité.

Une autre implication politique de cette étude concerne les appareils électriques. L'analyse spatio-temporelle permet de reconnaître les appareils électriques les plus possédés et les plus utilisés au sein des ménages. Cette dernière est due non seulement à la puissance nominale de l'appareil mais aussi à sa durée et à sa fréquence d'utilisation ainsi qu'à l'identification de sa consommation totale en mode veille et inactif. Par conséquent, l'estimation de la demande serait d'une importance significative pour la mise en œuvre des mesures de réduction de la consommation imposées aux fabricants d'appareils électriques. Cela peut conduire au développement d'appareils et de normes plus efficaces sur le plan énergétique. L'élimination de la consommation inactive peut être réalisée par un changement de comportement des membres du ménage. Cette simulation met donc en évidence les informations nécessaires pour fournir aux ménages une base éducative leur permettant de corriger leurs mauvaises habitudes en matière de consommation d'électricité.

Les principaux objectifs de ces travaux de thèse sont en général : l'évolution des nouvelles stratégies de développement du *smart grid* pour optimiser la demande d'électricité dans chaque territoire et une estimation d'impact de la gestion distribuée de l'énergie sur cette demande. À cette fin, un ensemble d'analyses énergétiques qui fournissent un cadre systématique pour adresser ces questions – couvrant les aspects sociaux, économiques, techniques et environnementaux – a été développé afin d'estimer le stock d'appareils électriques des ménages et leur fréquence d'utilisation dans différentes échelles urbaines. Cette thèse met en évidence la contribution du *smart grid* à l'optimisation de la consommation d'énergie par la gestion de la charge. Cependant, il est difficile d'indiquer avec certitude que l'une ou l'autre des approches de gouvernance du *smart grid* (*top-down* ou *bottom-up*) ou une combinaison des approaches peut mieux aplatir la courbe électrique quotidienne et contribuer à la gestion de sa charge.

Analyse critique

Bien que cette recherche ait été soigneusement préparée, diverses limites doivent être explicitées, afin de mieux comprendre et justifier les décisions prises au cours du processus de recherche et de suggérer des solutions possibles pour surmonter ces problèmes dans les travaux futurs. La plupart de ces limites sont relatives au niveau de précision des données. Puisque l'utilisation d'estimations et d'hypothèses entraîne des incertitudes et des erreurs inévitables. En outre, il n'y a pas d'hétérogénéité dans les ménages et le comportement des membres du ménage concernant les mesures de consommation/production est imprévisible. Les limites générales du champ de validité de cette recherche et notamment des résultats concernent :

- Les variables : en raison de la complexité de la consommation/production d'électricité, un nombre important de variables sont impliquées et simplifiées dans l'analyse. Il est impossible de réduire le nombre de variables sans perte d'information. Cependant, en utilisant l'analyse en composantes principales (ACP) dans ce travail de recherche, on essaie de conserver autant d'informations que possible. En plus du nombre de variables, le nombre d'informations diverses sur chaque article (appareils électriques) est indéterminé. Pour un même appareil électrique, il existe plusieurs puissances nominales, consommations horaires, puissances de veille, rendements, etc. en raison de la variété de taille, de modèle, de fabricant, d'âge de l'appareil, de prix et d'autres facteurs.

- La base de données : il n'y a pas beaucoup de sources fiables et précises disponibles concernant les informations primaires sur la consommation électrique des appareils (par exemple, le nombre et le type d'appareils électriques que les ménages possèdent, leur temps et la fréquence d'utilisation). De plus, chaque source a utilisé une méthodologie différente pour obtenir sa base de données ou des données généralisées à partir d'un très petit nombre d'échantillons. C'est la raison pour laquelle, il est compliqué de combiner ces données. Bien que les sources obsolètes aient été exclues de cette recherche, toutes les sources ne datent pas de la même période (par exemple, les études plus anciennes définissent les appareils avec des consommations plus importantes en fonctionnement et une consommation nulle en veille, alors que les études récentes montrent des appareils avec une consommation moins importante en fonctionnement et plus importante en veille). Ces problèmes ont pu affecter la fiabilité de la base de données et donc la qualité des résultats. Cependant, des programmes

paramétrables permettent des mises à jour futures en cas de disponibilité de données plus précises.

- L’échantillonnage : l'échantillon aléatoire utilisée pour déterminer les participants à l'enquête ne représente pas nécessairement l'ensemble de la population en raison de son insuffisance par rapport au nombre total de la population. Une comparaison avec les valeurs moyennes des données nationales (par exemple, le genre, le type de ménage, l'activité de la personne de référence, etc.) a été effectuée et a révélé des résultats assez similaires. Cependant, une taille d'échantillon plus importante permet une meilleure représentativité de l'ensemble de la population. En outre, dans la méthode d'échantillonnage aléatoire, les échantillons sont choisis de manière totalement aléatoire et ont les mêmes chances que les autres échantillons d'être choisis pour répondre à l'enquête. Mais dans cette recherche, une enquête en ligne a d'abord été créée et a permis plusieurs réponses aléatoires, puis des copies papier de l'enquête ont été distribuées à des volontaires choisis au hasard. Cela réduit l'égalité des échantillons et favorise ceux qui ont déjà accès à l'Internet et donc, dans cet exemple, utilisent des appareils électriques tels qu'un ordinateur portable, un ordinateur personnel, un modem, etc. Ce problème pourrait être résolu en distribuant des copies de l'enquête (par exemple, parmi les personnes du quartier ou de la ville) et en comparant les résultats reçus aux valeurs moyennes.

- Les tendances du marché : les tendances du marché des appareils électriques ont été déduites à partir de l'analyse des données disponibles sur les moteurs de recherche et les vendeurs en ligne (Annexe V). Les niveaux inférieurs de technologie peuvent alors être déterminés en fonction du pourcentage d'appareils électriques durables de l'INSEE. La difficulté est d'attribuer des technologies différentes à des types de ménages différents. Il est impératif d'étudier les facteurs sous-jacents qui ont un impact sur le processus de décision des ménages concernant l'achat d'appareils électriques (nouvelles tendances ou anciens modèles) et le remplacement de leurs appareils moins efficaces par des technologies plus récentes.

Ces limites peuvent entraîner des imprécisions, des inexactitudes et des erreurs. Même si les erreurs peuvent perturber les analyses, cette analyse critique vise à montrer qu'il existe des moyens de les minimiser et que la prise de conscience de ce problème est bénéfique pour

aborder les limitations dans les études futures. Certains de ces problèmes concernant les hypothèses utilisées pour l'analyse sont développés ci-dessous :

- Lors de l'analyse de la demande d'électricité, des erreurs ont pu se produire en raison de la création de types. Ces types sont créés en prenant en compte les variables qui influent le plus sur la consommation électrique. Les ménages sont divisés en fonction de leur type (unipersonnel, couple, famille, monoparental et complexe). Chaque ménage vit dans un type de logement (petit, moyen, grand) et appartient à une catégorie d'âge. Tous les membres adultes du ménage sont considérés comme actifs (travaillant pendant les jours et heures de travail en dehors de leur résidence principale) ou inactifs (restant principalement à la maison et sortant pour leurs loisirs). La demande d'électricité peut être sous-estimée ou surestimée car la demande des personnes suivantes ne sont pas prises en compte : 1) Les enfants de parents séparés qui vivent en partie dans la résidence de chacun des parents ; 2) Les étudiants qui vivent en partie dans un dortoir ou un type de résidence dans la ville où ils étudient et en partie dans la maison de leurs parents ; 3) Les personnes qui sont souvent en voyage d'affaires ou qui ont des résidences secondaires ; 4) Les personnes qui travaillent le week-end, la nuit, à temps partiel, en intérim, en mission, etc. 5) Les personnes qui sont actives mais qui travaillent plus ou moins longtemps que le temps de travail habituel ou les indépendants qui travaillent à domicile ou ceux qui font du télétravail ;

Les cas d'urgence ou exceptionnels qui nécessitent l'utilisation d'appareils électriques en dehors des heures considérées ou les conditions exceptionnelles (par exemple crise sanitaire) qui modifient les activités des ménages et leurs temps d'occupation du logement pourraient également impacter cette analyse. En outre, l'utilisation de la base de données existante au lieu d'utiliser des approches de mesure conduit à une surestimation de la consommation d'énergie ou à une sous-estimation du nombre de cycles.

- Cette étude ne prend pas en compte la durée de vie des appareils. De plus, un appareil pourrait être ajouté, éliminé ou remplacé au cours d'une année par le ménage. L'analyse est réalisée à partir de la puissance des nouveaux appareils (en watts) ou de la meilleure technologie disponible (MTD) alors que certains ménages ont des appareils plus anciens avec une technologie ou une puissance différente. Nous pouvons supposer comme dans l'étude de PAPACHRISTOS (2015) que la MTD utilisée dans cette recherche est devenue

la moyenne dans le secteur du logement français actuellement, car il est particulièrement compliqué d'identifier les facteurs qui influencent le choix des appareils électriques dans les ménages. De plus, dans la gestion de la charge électrique, la demande modifiée (remplacement des activités afin d'obtenir moins de charges de pointe) est comparée à la demande d'électricité. Ainsi, il est moins important que la consommation de l'appareil ne soit pas précise puisque le même appareil va être discuté dans les deux scénarios. Cependant, cela devient particulièrement important dans l'estimation de la demande électrique pour un logement à l'échelle individuelle.

- Le temps que les gens consacrent à chaque activité (par exemple, cuisine/nettoyage/soins personnels, etc.) ne peut pas être utilisé directement pour calculer la consommation de chaque appareil. Par exemple, 50 minutes de cuisson ne signifient pas 50 minutes d'utilisation des appareils électriques en raison du chevauchement de leur utilisation. En supposant qu'un ménage possède 10 appareils électriques de cuisson, le temps d'utilisation de tous ces appareils peut atteindre 500 minutes, car tous les appareils peuvent être utilisés éventuellement en même temps mais le temps de cuisson ne peut pas dépasser 50 minutes. C'est toute la difficulté de choisir la durée d'utilisation correcte de chaque appareil qui, dans cet exemple, est comprise entre 0 et 50 minutes et n'est pas la division de 50 minutes entre les 10 appareils. Ce fait révèle une fois de plus l'importance des études de demande de pointe. Ce problème est traité en intégrant le taux d'occupation dans cette recherche. Ce taux varie en semaine et le week-end en raison de certaines hypothèses.

- Comme indiqué précédemment, un même appareil peut avoir une puissance nominale et une consommation différente. Une télévision de 40 pouces fabriquée par différents fabricants ou par le même mais avec des technologies différentes ou de différentes années (CRT, LCD, PDP) peut avoir des consommations variées. Cette variation existe dans la plupart des appareils électriques et est encore plus perceptible lorsque l'appareil a un volume ou une taille différente (par exemple, un réfrigérateur de 200 litres contre 350 litres, une télévision de 32 pouces contre 40 pouces). Dans cette recherche, une consommation moyenne est prise en compte. Puisqu'il s'agit de comparer avec la simulation du scénario de gestion de la charge ne devient pas problématique, mais dans les plus petites échelles lors de l'étude d'un bâtiment individuel ou d'un petit bloc résidentiel, il est signifiant de prendre cette variation en considération.

- Sur de nombreux appareils, c'est la puissance de sortie qui est indiquée et non l'entrée. Cela signifie que par exemple, un lecteur audio de 30 watts peut nécessiter 50 watts pour produire 30 watts de son (en supposant que le volume soit augmenté), et qu'un four à micro-ondes de 900 watts peut consommer 1400 watts en raison de l'inefficacité et de la perte d'énergie de l'appareil. Ce facteur n'est pas pris en compte dans nos études.

- La consommation de chaque appareil électrique ne dépend pas seulement de sa taille, de son année de fabrication, de sa technologie, de son prix et des autres facteurs. Elle varie également en fonction de son mode d'utilisation (par exemple, le programme du lave-linge : froid ou 60°, express ou long, etc.) Il en va de même pour les consommations en veille. La consommation électrique des ordinateurs portables et personnels varie également d'un modèle à l'autre et dépend de nombreux facteurs, dont certains peuvent être résumés comme suit : 1) l'unique utilisation de la batterie ; 2) le fait que la batterie soit chargée pendant son utilisation ; 3) la taille de l'écran ; 4) les paramètres de la mise en veille ; 5) la luminosité et la résolution de l'écran ; 6) les paramètres du disque dur ; 7) l'activation ou la désactivation du Wi-Fi ; 8) le processeur en fonctionnement ; 9) les programmes utilisés ; et 10) le nombre d'opérations. Une valeur moyenne est prise en compte dans cette étude.

- De nombreux fabricants industriels présentent la consommation des appareils électriques tels que le lave-linge et le lave-vaisselle par cycle ou par consommation annuelle. Or, l'électricité consommée en un instant mesuré est inférieure à la consommation nominale annoncée dans le cahier des charges du fabricant. Il est donc imprécis de convertir l'unité de kWh/an en W. C'est notamment le cas des équipements de froid (réfrigérateur et congélateur) qui fonctionnent apparemment en permanence. Mais ils fonctionnent selon des cycles qui n'ont pas été étudiés en profondeur dans la littérature et qui varient selon le modèle. Les cycles trouvés dans la littérature sont différents les uns des autres. La consommation réelle d'énergie contrôlée par un wattmètre dans chaque cycle est dans une certaine mesure supérieure à la consommation mentionnée par les fabricants. Cela pourrait être expliqué par les raisons suivantes : 1) les aliments chauds mis dans le réfrigérateur ; 2) le réfrigérateur placé près du four, du chauffage, de la cheminée ou en exposition directe au soleil ; 3) la porte laissée ouverte pendant une longue période ; 4) le joint de la porte non scellé ; 5) le distributeur d'eau et

la machine à glaçons dans les réfrigérateurs équipés de ce système ; et 6) des températures plus basses que nécessaire.

- L'utilisation de certains appareils a des variations saisonnières et peut être plus élevée pendant la période hivernale. Par exemple, pour les machines à laver, les sèche-linge et les lave-vaisselle, il faut moins d'efforts pour chauffer l'eau pendant les saisons estivales. En revanche, il est plus rapide et pratique de sécher le linge en utilisant un sèche-linge pendant l'hiver. La variation saisonnière se montre aussi dans les vieux appareils tels que les réfrigérateurs et les congélateurs qui consomment plus pendant les saisons chaudes afin de maintenir la température ajustée à l'intérieur de l'équipement. Ce fait nécessite une étude plus approfondie pour trouver un coefficient de saisonnalité afin d'obtenir une analyse plus précise.

- Certains appareils ont des variétés de modèles. Par exemple, il existe deux types de micro-ondes : Le classique (généralement utilisé pour décongeler ou chauffer les aliments) et le four à micro-ondes (une combinaison de micro-ondes classique et de four, souvent utilisé pour la cuisson). Il existe également deux types de fers à repasser : Le fer à repasser classique et le fer à vapeur (avec un plus grand réservoir d'eau et une plus importante consommation). Ces deux types ont des consommations, des temps et des fréquences d'utilisation différents. Dans cette recherche, les micro-ondes et les fers à repasser classiques sont pris en considération car il est difficile de déterminer les types d'appareil que possèdent les ménages.

- Pour les appareils qui peuvent être utilisés tout en étant chargés, comme les ordinateurs portables, les téléphones mobiles, les tablettes, certains rasoirs, etc., dans ce travail de recherche, le temps d'utilisation est le temps pendant lequel l'appareil est branché. La consommation de ces appareils varie si l'appareil est simplement en train d'être chargé et n'est pas utilisé, par rapport aux moments où il est utilisé pendant la charge. Il est assez compliqué de déterminer le temps de charge de l'appareil et s'il se charge pendant ce temps.

- Certains appareils tels que les ordinateurs portables, les ordinateurs personnels, les machines à café à capsule, les décodeurs, etc., lorsqu'ils sont complètement éteints ou débranchés, ont besoin de plus de temps/énergie pour redémarrer. Cela n'a pas été pris en compte dans notre analyse.

Certaines limitations concernant les appareils électriques et leurs consommations peuvent être traitées en utilisant des informations plus détaillées concernant la consommation de chaque appareil et en les introduisant dans un modèle dynamique et paramétrable.

Orientations et perspectives

L'objectif de ce travail de recherche était de montrer si le *smart grid* contribue à l'optimisation énergétique malgré les contradictions existantes dans les approches *top-down* et *bottom-up* de la mise en œuvre du réseau. Afin d'effectuer une comparaison entre le système électrique actuel et le *smart grid* en termes de consommation et de demande, une simulation de la demande actuelle était nécessaire. Pour plusieurs raisons mentionnées précédemment, les délimitations sont établies au sein des usages finaux de la consommation électrique, ce qui exclut de cette étude le système de chauffage/climatisation, l'éclairage, l'eau chaude et les appareils de cuisson. Bien que ces usages finaux ne fassent pas partie du champ de travail de cette recherche, de nombreuses études initiales ont été réalisées concernant l'efficacité de plusieurs facteurs sur la consommation d'énergie y compris ceux qui ont été éliminés de cette recherche. Les études futures dans ces domaines sont essentielles pour analyser l'impact de l'adoption du *smart grid* sur la réduction de la consommation/demande totale d'énergie dans les bâtiments résidentiels.

Une autre délimitation dans cette recherche a été faite par le choix des bâtiments résidentiels. Ce choix permet d'étudier le comportement humain en matière de consommation d'énergie et les stratégies qu'il peut adopter pour corriger ses mauvaises habitudes et ainsi obtenir un système énergétique plus optimisé dans une approche *bottom-up*. Des études supplémentaires peuvent être réalisées pour d'autres types de bâtiments (bureaux, bâtiments industriels, etc.), les logements de vacances/temporaires et d'autres infrastructures (transport, industrie et agriculture). La nécessité de développer des scénarios futurs d'évolutions socioéconomiques et technologiques qui affectent le système énergétique est légèrement discutée. Un examen plus approfondi de ces scénarios pourrait être utile avant la conception de tout projet de smart grid. Le modèle de production d'électricité peut également être créé en tenant compte du potentiel de production décentralisée d'énergie solaire et éolienne.

D'autres questions restent également sans réponse en raison des limites de cette recherche : 1) Quelle est la probabilité d'occurrence des problèmes et des risques dans le réseau actuel et dans quelle mesure le *smart grid* peut réduire cette probabilité ? 2) Quel est le montant de

l'investissement nécessaire pour un projet local de *smart grid* ? Quelle approche peut être choisie pour une Analyse Coûts-Avantages (ACA) du *smart grid* ? 3) Comment le *smart grid* affecte-t-il les opportunités d'emploi ? 4) Quel est le risque sanitaire des radiations de radiofréquence des compteurs communicants ? En plus de ces questions, il est toujours possible d'améliorer les éléments mentionnés dans la section d'analyse critique.

Bibliographie

Ouvrages publiés

[1] BATTY, M. *The new science of cities*, USA: MIT Press, 2013

[2] BOLLEN, HJ M. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, IEEE Press. New York, 1999

[3] FARZANEH, H. *Energy Systems Modeling*. Springer Singapore, 2019

[4] KAZIBWE W E. & SENDAULA, M H. *Electrical Power Quality Control Techniques*. Springer. New York, 1993

[5] ROBERT, C. & CASELLA, G. *Monte Carlo Statistical Methods*. Springer, 2004

[6] SIOSHANSI, F P. *Smart Grid: Integrating Renewable, Distributed & Efficient Energy*. Academic Press, 2012

[7] SULLIVANT, J. *Strategies for protecting national critical infrastructure assets: a focus on problem-solving*. New Jersey: John Wiley & sons, 2007

[8] TOFFLER, A. *The Third Wave*. USA: Bantam Books, 1980

Livres numériques

[9] FAZA, A.; MCMILLIN, B. & SEDIGH, S. *Reliability Analysis for the Advanced Electric Power Grid: From Cyber Control and Communication to Physical Manifestations of Failure*. Berlin: Springer, January 2009

[10] HEMMENT, D. & TOWNSEND, A. *Smart citizens*. Manchester: Future Everything, 2013

[11] KROESE, D P.; TAIMRE, T. & BETEV, Z I. *Handbook of Monte Carlo Methods*. *Wiley Series in Probability and Statistics*, 2011

Chapitres de livres publiés

[12] BARREN, R D. & NORRIS, G M. *"Sexual Divisions and the dual Labour Market". Dependence and Exploitation in Work and Marriage*, Ed. D. LEONARD; S. ALLEN & M. SANTIROCCO. Longman, London, 1976, 47-69 p.

[13] BAYLISS, C R. & HARDY, B J. *Chapter 27 - Smart Grids, Transmission and Distribution Electrical Engineering (Fourth Edition)*. Newnes, Oxford, 2012, 1059-1074 p.

[14] DOUCET, A.; DE FREITAS, N. & GORDON, N. *Chapter 1-An introduction to sequential Monte Carlo methods: Sequential Monte Carlo methods in practice*. Springer, 2001, 3-14 p.

[15] FELDER, F. *Chapter 4 - The equity implications of smart grid: questioning the size and distribution of smart grid costs and benefits*, In: FEREIDOON P. SIOSHANSI, Editor(s), Smart Grid, Academic Press, Boston, 2012, 85-100 p.

[16] FLICK, T. & MOREHOUSE, J. *Smart Grid: What Is It?, Securing the Smart Grid,* Boston : Syngress, 2011, 1-18 p.

[17] SAMAD, T. & KILICCOTE, S. *Smart grid technologies and applications for the industrial sector.* Computers & Chemical Engineering, Volume 47, 20 December 2012, 76–84 p.

[18] SAUER, W P. *Reactive power and voltage control issues in electric power systems*. Springer Science & Business Media, 2006

[19] MAH, D.; HILLS, P.; LI, V. & BALME, R. *Smart Grids: The Regulatory Challenges*. *Smart Grid Applications and Developments*. Green Energy and Technology. London, 2014, 115-140 p.

Rapports publiés

[20] ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). *Energie et Climat : Chiffres clés*, France, 2009

[21] AIEA (Agence international de l'énergie atomique). *Model for analysis of energy demand (MAED-2),* Austria, 2006

[22] AUNE, M T.; BERKER, T. & SØRENSEN, K. *Needs, Roles and Participation: A Review of Social Science Studies of Users in Technological Design, A report within the Research Program, Smart Energy-Efficient Buildings at NTNU and SINTEF*. Trondheim, NTNU, 2002

[23] CALWELL, C. & REEDER, T. Power Supplies: A Hidden Opportunity for Energy Savings. Natural Resources Defense Council (NRDC), USA, 2002

[24] CEN-CENELEC-ETSI. *Smart grid reference architecture,* November 2012

[25] CEREMA. *Consommation d'énergie dans les bâtiments – chiffres clés 2013,* 2014

[26] CEREN (Le Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'Energie); *Données statistiques du CEREN*, France, 2013

[27] Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts (DEWHA). Smart grid smart city: A new direction for a new energy era, Australia, 2009

[28] DOE (US DEPARTMENT OF ENERGY). Smart grid system report, 2009

[29] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). *Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid: A Preliminary Estimate of the Investment Requirements and the Resultant Benefits of a Fully Functioning Smart Grid*, USA, 2011.

[30] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). *Program on Technology Innovation: Integrated Generation Technology Options*, California, 2013.

[31] EURELECTRIC. Eurelectric views on Demand-Side Participation, Belgium,2011.

[32] EUROPEAN COMMISSION. *European smartgrids technology platform: vision and strategy for Europe's electricity networks of the future*. Belgium, 2006.

[33] EUROPEAN COMMISSION (EUROSTAT). *Manuals and guidelines Manual for statistics on energy consumption in households*, Luxembourg, 2013.

[34] GLOBALDATA. *Smart grid policy handbook 2013 - major government policies, regulations and incentives*. 2013

[35] GWAC. *Smart grid interoperability maturity model beta version*, December 2011

[36] LAPLANTE, P. & STATE, P. *Stakeholder analysis for smart grid systems.* Reliability society, 2010

[37] MCNAMARA, W. *Smart Grid Revolution Should Lead to Job Creation Boom*. KEMA Automation Insight, 2009

[38] MERCERON, S. & THEULIERE, M. *Les dépenses d'énergie des ménages depuis 29 ans : une part en moyenne stable dans le budget, des inégalités accrues*. INSEE, France, 2010

[39] MERT, W.; SUSCHEK-BERGER, J. & TRITTHART, W. *Consumer acceptance of smart appliances.* Vienna, 2008

[40] MILLER, J. *Smart grid activities.* National Energy Technology Laboratory, USA, 2009

[41] NEMA. *Standardizing the Classification of Intelligence Levels and Performance of Electricity Supply Chains*. 2009

[42] NIST (National Institute of Standards and Technology). *Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards Release 3.0*. 2014

[43] OCDE. *Environmental and health impacts of electricity generation – A comparison of the environmental impacts of hydropower with those of other generation technologies*. The International Energy Agency, 2002

[44] OCDE/AIE. *World energy outlook.* International Energy Agency, 2006

[45] RTE FRANCE, *Panorama de l'électricité renouvelable au 31 mars 2017*, France, 2017

[46] SCE-CISCO-IBM. *Smart Grid Reference Architecture Volume 1: Using Information and Communication Services to Support a Smarter Grid*. July 2011

[47] SIDLER, O. *Consommations de veille des principaux appareils domestiques*. Enertech, France, 2012

[48] SIDLER, O. & PW consulting. *Maîtrise de la demande d'Electricité Etude expérimentale des appareils de cuisson, de froid ménager et de séchage dans 100 logements*. Projet Ecueil, France, 1999

[49] SIEIL. *RAPPORT DE CONTRÔLE DE CONCESSION ÉLECTRICITÉ - DONNÉES 2017*. Edition 2019VERIZON ENTREPRISE, *Secure smart grid's potential*, 2013

[50] VINE, E. *The Human Dimension of Program Evaluation*. Energy Analysis Program, Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California: Berkeley, CA. 1993

[51] WAKEFIELD, W. *Methodological approach for estimating the benefits and costs of smart grid demonstration projects*. Electric power research institute, January 2010

Travaux académiques

[52] BENHASSINE, W. *Le processus de libéralisation des industries électriques et gazières européennes à travers les stratégies de fusion acquisition et d'investissement des firmes : propositions pour une sécurité énergétique renforcée*. Economies et finances. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2009.

[53] BOUCKAERT, S.; ASSOUMOU, E. & MAÏZI, N. *Flattening the load curve with Demand Response solutions: a long-term analysis.* ETSAP workshop, Mines Paristech, Cape town, 2012

[54] BRENNAN, T J. *Demand-Side Management Programs Under Retail Electricity Competition*. resources for the future, Washington, 1998

[55] FEINBERGE, E. *Smart grid optimization. Advanced energy research and technology center, Department of mathematics and statistics, Stony Brook University, New York, 2012*

[56] HAMILTON, C.; DENNISS, R & BAKER, D. *Wasteful consumption in Australia. The Australia Institute, Discussion Paper Number 77, 2005*

[57] JANDA, K. *Exploring the social dimensions of energy use: a review of recent research initiatives. Environmental Change Institute of Oxford University, ECEEE, United Kingdom, 2009*

[58] KARANFIL, F. & LI, Y. *Electricity consumption and economic growth: exploring panel-Specific differences*. IPAG business school working paper series, 2014

[59] KELLY, S. *Do homes that are more energy efficient consume less energy?: a structural equation model for England's residential sector*. EPRG Working Paper, Electricity Policy Research Group, University of Cambridge, 2011

[60] KRIGGER, J. & DORSI, C. *Residential Energy: Upper Saddle River*. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2009

[61] LEQUAY, V. *A bottom-up approach to energy management in a Smart Grid : adaptive and reactive model using a decentralized architecture for a generic user-centered system enabling large scale deployments.* Artificial Intelligence [cs.AI]. Université de Lyon, 2019

[62] RICHARDSON, I. & THOMSON, M. *Domestic active occupancy model – simulation example,* Loughborough University Institutional Repository, 2008

[63] RISCH, A. & SALMON, C. *What matters in Residential Energy Consumption? Evidence from France*. HAL 2014

[64] SUBREMON, H. *Anthropologie des usages de l'énergie dans l'habitat, un état des lieux.* Laboratoire Techniques Territoires et Sociétés, UMR CNRS 8134, 2011

[65] SUN, X. *Comparative Analysis of Urban Morphology: Evaluating Space Syntax and Traditional Morphological Methods.* Geomatics & Land Management, 2013

[66] VORGER, E. *Etude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014

Articles dans des revues publiées

[67] ABDMOULEH, Z.; GASTLI, A. & BEN-BRAHIM, L. *Survey about public perception regarding smart grid, energy efficiency & renewable energies applications in Qatar*. Renewable and Sustainable Energy Reviews (82), Part 1, 2018, 168-175 p.

[68] ACHARJEE, P. *Strategy and implementation of Smart Grids in India*. Energy Strategy Reviews, 1(3), 2013, 193-204 p.

[69] AIGNER, D.; SOROOSHIAN, C. & KERWIN P. *Conditional Demand Analysis for Estimating Residential End-Use Load Profiles*. The Energy Journal, 5(4), 1984, 81-97p.

[70] ALAGOZ, B B.; KAYGUSUZ, A. & KARABIBER, A. *A user-mode distributed energy management architecture for smart grid applications*. Energy, 44(1), 2012, 167-177 p.

[71] ALLEN, B. An integrated approach to Smart House technology for people with disabilities. Medical Engineering & Physics, 18 (3), 1996, 203-206 p.

[72] AL-OMAR, B.; AL-ALI, A R.; AHMED, R. & LANDOLSI, T. *Role of Information and Communication Technologies in the Smart Grid*. Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences (CIS) (3), 2012

[73] ALONSO, M.; AMARÍS, H. & CHINDRIS, M. *A multiobjective Var/Volt Management System in Smartgrids*. Energy Procedia (14), 2012, 1490-1495 p.

[74] ANASTASOPOULOS, M P.; VOULKIDIS, A C.; VASILAKOS, A V. & COTTIS, P G. *A secure network management protocol for SmartGrid BPL networks: Design, implementation and experimental results*. Computer Communications, 31(18), 2008, 4333-4342 p.

[75] ASMUS, P. *Inching our way to a smarter power grid*. Electricity Journal, 19(4), 2006, 52-55 p.

[76] AYDINALP, M.; UGURSAL, V. & FUNG, A S. *Modelling of residential energy consumption at the national level*. International Journal of Energy Research 27(4), 2003, 441-453 p.

[77] BAKER, K J. & RYLATT, R M. *Improving the prediction of UK domestic energy-demand using annual consumption-data*. Applied Energy, 85 (6), 2008, 475-482 p.

[78] BALTAGI, B. *Comparison of forecast performance for homogeneous, heterogeneous and shrinkage estimators: Some empirical evidence from US electricity and natural-gas consumption*. Economics Letters, 76(3), 2002, 375–382 p.

[79] BARTUSCH, C.; ODLARE, M.; WALLIN, F. & WESTER, L. *Exploring variance in residential electricity consumption: household features and building properties*. Applied Energy (92), 2012, 637-643 p.

[80] BEDIR, M.; HASSELAAR, E. & ITARD, L. *Determinants of electricity consumption in Dutch dwellings*. Energy and Buildings (58), 2013, 194-207 p.

[81] BIGGART, N W. & LUTZENHISER, L. *Economic Sociology and the Social Problem of Energy Inefficiency*. American Behavioral Scientist, 50 (8), 2007, 1070-1087 p.

[82] BIN, S. & DOWLATABADI, H. *Consumer lifestyle approach to US energy use and the related CO2 emissions*. Energy Policy, 33(2), 2005, 197-208 p.

[83] BLÁZQUEZ, L.; BOOGEN, N. & FILIPPINI, M. *Residential electricity demand in Spain: New empirical evidence using aggregate data*. Energy Economics, Elsevier, 2013

[84] BROUNEN, D.; KOK, N. & QUIGLEY, J M. *Residential energy use and conservation: economics and demographics.* European Economic Review, 56(5), 2012, 931-945 p.

[85] CAPASSO, A.; GRATTIERI, W.; LAMEDICA, R. & PRUDENZI, A. *A bottom-up approach to residential load modeling*. IEEE, Transactions on Power Systems, 1994, 957-964 p.

[86] CARLSON, D R.; MATTHEWS, H S. & BERGE′S, M. *One size does not fit all: Averaged data on household electricity is inadequate for residential energy policy and decisions*. Energy and Buildings (64), 2013, 132-144 p.

[87] CARLSSON-KANYAMA, A. & LINDEN, A L. *Energy efficiency in residences: Challenges for women and men in the North*. Energy Policy, 2007, 35 (4,) 2163-2172 p.

[88] CARTER, A; CRAIGWELL, R. & MOORE, W. *Price reform and household demand for electricity*. Policy Modelling, 34(2), 2012, 242-252 p.

[89] CAVES, D W.; HERRIGES, J A.; TRAIN, K E. & WINDLE, R J. *A Bayesian Approach to Combining Conditional Demand and Engineering Models of Electricity Usage*. The Review of Economics and Statistics, 69(3), 1987, 438-448 p.

[90] CHONG, H. *Building vintage and electricity use: Old homes use less electricity in hot weather*. European Economic Review, 56(5), 2012, 906-930 p.

[91] COLL-MAYOR, D.; PAGET, M. & LIGHTNER, *E. Future intelligent power grids: Analysis of the vision in the European Union and the United States*. Energy Policy, 35 (4), 2007, 2453-2465 p.

[92] CRAMER, J C.; MILLER, N.; CRAIG, P. & HACKETT, B M. *Social and engineering determinants and their equity implications in residential electricity use Energy*, 10 (12), 1985, 1283-1291 p.

[93] DIAWUO, F.A.; SAKAH, M.; PINA, A.; BAPTISTA, P.C. & SILVA, C.A. *Disaggregation and characterization of residential electricity use: Analysis for Ghana.* Sustainable Cities and Society (48), 2019

[94] DRUCKMAN, A & JACKSON, T. *Household energy consumption in the UK: a highly geographically and socio-economically disaggregated model*. Energy Policy, 36 (8), 2008, 3177-3192 p.

[95] DUBIN, J A. & MCFADDEN, D. An Econometric Analysis of Residential Electric Appliance Holdings and Consumption. Society, 52(2), 1984, 345-362 p.

[96] ERDMANN, G. *Economics of electricity*. EDP Sciences - SIF, Berlin, 2015

[97] FALAKI, F.; MERABTINE, A & MARTOUZET, D. *A Spatio-Temporal Analysis of electric appliance end-use demand in the residential sector: Case study of Tours (France)*, Sustainable Cities and Society, Volume 65, 2021, 102635.

[98] FARZANEH, H.; SUWA, A.; DOLLA, C. & OLIVEIRA J. *Developing a Tool to Analyze Climate Co-benefits of the Urban Energy System.* Procedia Environmental Sciences (20), 2014, 97-105 p.

[99] FILIPPINI, M. & PACHAURI, S. *Elasticities of electricity demand in urban Indian households*. Energy Policy, 32(3), 2004, 429-436 p.

[100] FIRTH, S.; LOMAS, K.; WRIGHT, A. & WALL, A. *Consumption measurements*. Energy and Buildings (40), 2008, 926-936 p.

[101] GALLARDO-LOZANO, J.; MILANÉS-MONTERO, I.; GUERRERO-MARTÍNEZ, M A. & ROMERO-CADAVAL, E. *Electric vehicle battery charger for smart grids*. Electric Power Systems Research (90), 2012, 18-29 p.

[102] GAO, J.; XIAO, Y.; LIU, J.; LIANG, W. & CHEN, P. *A survey of communication/networking in Smart Grids*. Future Generation Computer Systems, 28(2), 2012, 391-404 p.

[103] GEELEN, D.; MUGGE, R.; SILVESTER, S. & BULTERS, A. *The use of apps to promote energy saving: a study of smart meter–related feedback in the Netherlands*. Energy Efficiency (12), 2019, 1635-1660 p.

[104] GENJO, K.; TANABE, S.; MATSUMOTO, S.; HASEGAWA, K. & YOSHINO, H. *Relationship between possession of electric appliances and electricity for lighting and others in Japanese households*. Energy Build, 37 (3), 2005, 259-272 p.

[105] GIORDANO, V. & FULLI, G. *A business case for Smart Grid technologies: A systemic perspective*. Energy Policy (40), 2012, 252-259 p.

[106] GOLDFARB, D L. & HUSS, W R. *Building scenarios for an electric utility*. Long Range Planning, 21(2), 1988, 78-85 p.

[107] GRANDJEAN, A.; ADNOT, J. & BINET, G. *A review and an analysis of the residential electric load curve models*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (9), 2012, 6539-6565 p.

[108] GUNDUZ, M. Z. & DAS, R. *Cyber-security on smart grid: Threats and potential solutions*. Computer Networks (169), 2020, 107094.

[109] HAAS, W R. & SCHIPPER, L. *Residential energy demand in OECD-countries and the role of irreversible efficiency improvements*. Energy Economics, 20(4), 1998, 421-442 p.

[110] HALVORSEN, R. *Residential demand for electric energy*. The Review of Economics and Statistics, 57(1), 1975, 12-18 p.

[111] HALVORSEN, B. & LARSEN, B M. *Norwegian residential electricity demand-a microeconomic assessment of the growth from 1976 to 1993*. Energy Policy, 29(3), 2001, 227-236 p.

[112] HAMILTON, I G.; STEADMAN, P J.; BRUHNS, H.; SUMMERFIELD, A J. & LOWE, R. *Energy efficiency in the British housing stock: energy demand and the Homes Energy Efficiency Database*. Energy Policy (60), 2013, 462-480 p.

[113] HIRST, E. *A model of residential energy use*. Simulation, 30(3), 1978, 69-74 p.

[114] HOUTHAKKER, H. *Residential Electricity Revisited*. Energy, 1(1), 1980, 29-41 p.

[115] HSIAO, C.; MOUNTAIN, C. & ILLMAN, K H. *A Bayesian Integration of End-Use Metering and Conditional-Demand Analysis*. Journal of Business and Economic Statistics, 13(3), 1995, 315-326 p.

[116] ISAAC, M. & VAN VUUREN, D P. *Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change*. Energy Policy, 37(2), 2009; 507-521 p.

[117] JENNINGS, N.; RAMCHURN, S.; ROGERS, A. &VYTELINGUM, P. *Putting the smarts into the smart grid: A grand challenge for artificial intelligence*. Communication of the ACM (55), 2012, 86-97 p.

[118] JONES, R V.; FUERTES, A. & LOMAS, K J. *The socio-economic, dwelling and appliance related factors affecting electricity consumption in domestic buildings*. Renewable and Sustainable Energy Reviews (43), 2015, 901-917 p.

[119] KAMERSCHEN, D R. & PORTER, D V. *The demand for residential, industrial and total electricity, 1973 - 1998*. Energy Economics, 26(1), 2004, 87-100 p.

[120] KAPPAGANTU, R. & DANIEL, S. A. *Challenges and issues of smart grid implementation: A case of Indian scenario*. Journal of Electrical Systems and Information Technology 5 (3), 2018, 453-467 p.

[121] KAVOUSIAN, A.; RAJAGOPAL, R. & FISCHER, M. *Determinants of residential electricity consumption: using smart meter data to examine the effect of climate, building characteristics, appliance stock, and occupants' behavior.* Energy (55), 2013, 184-194 p.

[122] KHEMAKHEM, S.; REKIK, M. & KRICHEN, L. *A flexible control strategy of plug-in electric vehicles operating in seven modes for smoothing load power curves in smart grid*. Energy (118), 2017, 197-208 p.

[123] KOHN, A. *Why incentive plans cannot work*. Harvard business review, 1993

[124] KOSTKOVÁ, K.; OMELINA, L.; KYČINA, P. & JAMRICH, P. *An introduction to load management.* Electric Power Systems Research (95), 2013, 184-191 p.

[125] *Quebec 1979-1989: A Conditional Demand Analysis Evolution of Residential Electricity Demand by End-Use in Quebec*. Energy Studies Review, 6(2), 1994, 164-173 p.

[126] LARSEN, B M. & NESBAKKEN, R. *Household electricity end-use consumption: results from econometric and engineering models*. Energy Economics (26), 2004, 179-200 p.

[127] LEAHY, E. & LYONS, S. *Energy use and appliance ownership in Ireland.* Energy Policy, 38(8), 2010, 4265-4279 p.

[128] LEVINSON, A. & NIEMANN, S. *Energy use by apartment tenants when landlords pay for utilities*. Resource and Energy Economics, 26(1), 2004, 51-75 p.

[129] LI, YU.; LI, YA.; JI, P. & YANG, J. *Development of energy storage industry in China: A technical and economic point of review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2015, 805-812 p.

[130] LINS, M.; DASILVA, A. & ROSA L. *Regional Variations in Energy Consumption of Appliances: Conditional Demand Analysis Applied to Brazilian Households*. Annals of Operations Research, 2003, 235-246 p.

[131] LJONES, A.; NESBAKKEN, R.; SANDBAKKEN, S. & AAHEIM, A. Household Energy Consumption. The Energy Survey 1990, Reports 92/2, Statistics Norway, 1992

[132] LÓPEZ-RODRÍGUEZ, M.; SANTIAGO, I.; TRILLO-MONTERO, D. TORRITI, J. & MORENO-MUNOZ, A. *Analysis and Modeling of Active Occupancy of the Residential Sector in Spain: An Indicator of Residential Electricity Consumption*. Energy Policy 62, 2013, 742–51 p.

[133] LOUW, K.; CONRADIE, B.; HOWELLS, M. & DEKENAH M. *Determinants of electricity demand for newly electrified low-income African households*. Energy Policy, 36(8), 2008, 2812-2818 p.

[134] LUTZENHISER, L. & SHOVE, E. *Contracting knowledge: the organizational limits to interdisciplinary energy efficiency research and development in the US and the UK*. Energy Policy, 27(4), 1999, 217-227 p.

[135] MACMACKIN, N.; MILLER, L. & CARRIVEAU, R. *Modeling and disaggregating hourly effects of weather on sectoral electricity demand*. Energy (188), 2019

[136] MAH, D N.; VAN DER VLEUTEN, J M.; HILLS, P. & TAO, J. *Consumer perceptions of smart grid development: results of a Hong Kong survey and policy implications*. Energy Policy (49), 2012, 204-216 p.

[137] MAHIZHNAN, A. *Smart cities: The Singapore case*. Cities, 16(1), 1999, 13-18 p.

[138] MARVIN, S. & GUY, S. *Smart Metering Technologies and Privatised Utilities*. Local Economy 12(2), 1997, 119-132 p.

[139] MASIELLO, J A. & PARKER, D S. *Factors influencing water heating energy use and peak demand in a large-scale residential monitoring study*. Residential Buildings: Technologies, Design, Performance Analysis, and Building Industry Trends, 1992, 157-170 p.

[140] MCLOUGHLIN, F.; DUFFY, A. & CONLON, M. F. *The Generation of Domestic Electricity Load Profiles through Markov Chain Modelling*. Euro-Asian Journal of Sustainable Energy Development Policy (3), 2010

[141] MCLOUGHLIN, F.; DUFFY, A. & CONLON, M F. *Characterizing domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: an Irish case study.* Energy and Buildings (48), 2012, 240-248 p.

[142] MEIER, H. & REHDANZ, K. *Determinants of residential space heating expenditures in Great Britain*. Energy Economics, 32(5), 2010, 949-959 p.

[143] MORGAN, M. G. & TALUKDAR, S. N. *Electric power load management: Some technical, economic, regulatory and social issues*. Proceedings of the IEEE, 67(2), 1979, 241-312 p.

[144] MRÓWCZYŃSKA, M.; SKIBA, M.; BAZAN-KRZYWOSZAŃSKA, A. & SZTUBECKA. M. Household standards and socio-economic aspects as a factor determining energy consumption in the city. Applied Energy (264), 15 April 2020, 114680.

[145] NARAYANAN, A.; METS, K.; STROBBE, M. & DEVELDER. C. *Feasibility of 100% renewable energy-based electricity production for cities with storage and flexibility*. Renewable Energy (134), April 2019, 698-709 p.

[146] NDIAYE, D. & GABRIEL, K. *Principal Component Analysis of the electricity consumption in residential dwellings*. Energy and Buildings, 43 (2–3), 2011, 446-453 p.

[147] NESBAKKEN, R. *Price sensitivity of residential energy consumption in Norway*. Energy Economics, 21(6), 1999, 493-515 p.

[148] NEWSHAM, G. & BOWKER, B. *The effect of utility time-varying pricing and load control strategies on residential summer peak electricity use: A review*. Energy Policy (38), 2010, 3289-3296 p.

[149] NIELSEN L. *How to get the birds in the bush into your hand: results from a Danish research project on electricity savings.* Energy Policy, 21(11), 1993, 1133-1144 p.

[150] PAATERO, J. V. & LUND, P. D. *A model for generating household electricity load profiles*. International journal of energy research, 30(5), 2006, 273-290 p.

[151] PAPACHRISTOS, G. *Household electricity consumption and CO2 emissions in the Netherlands: A model-based analysis*. Energy and Buildings (86), 2015, 403-414 p.

[152] PARKER, D S. *Research highlights from a large scale residential monitoring study in a hot climate*. Energy Build, 35 (9), 2003, 863–876 p.

[153] PARTI, M. & PARTI, C. *The total and appliance-specific conditional demand for electricity in the household sector*. The Bell Journal of Economics, 11(1), 1980, 309-321 p.

[154] PETERSEN, H C. *Electricity Consumption in Rural vs. Urban Areas*. Western Journal of Agricultural Economics, 1982, 13-18 p.

[155] PORTUGALI, J. *Organization and the City*. Springer, Germany, 2000

[156] PRAVEEN, M. & RAO, G.V.S. *Ensuring the reduction in peak load demands based on load shifting DSM strategy for smart grid applications*. Procedia Computer Science (167), 2020, 2599-2605 p.

[157] PUMAIN, D. & SAINT-JULIEN, T. *Fonctions et hiérarchie des villes françaises*. Annales de géographie, Armand Colin de 1976, HAL 2017, 385-440 p.

[158] RÄTY, R. & CARLSSON-KANYAMA, A. *Energy consumption by gender in some European countries*. Energy policy, 38(1), 2010, 646-649 p.

[159] REHDANZ, K. *Determinants of residential space heating expenditures in Germany*. Energy Economics, 29(2), 2007, 167-182 p.

[160] REN, W.; SONG, J.; YANG, Y. & REN, Y. *Lightweight Privacy-Aware Yet AccounTableau Secure Scheme for SM-SGCC Communications in Smart Grid*. Tsinghua Science and Technology, 16(6), 2011, 640-647 p.

[161] REN, Z.; PAEVERE, P.; GROZEV, G.; EGAN, S. & ANTICEV, J. *Assessment of end-use electricity consumption and peak demand by Townsville's housing stock*. Energy Policy (61), 2013, 888-893 p.

[162] RICHARDSON, I.; THOMSON, M.; INFIELD, D. & CLIFFORD, C. *Domestic electricity use: a high-resolution energy demand model*. Energy and Buildings, 42 (10), 2010, 1878-1887 p.

[163] RUGGIERO, S.; BUSCH, H.; HANSEN, T. & ISAKOVIC, A. *Context and agency in urban community energy initiatives: An analysis of six case studies from the Baltic Sea Region*. Energy Policy (148) Part A, January 2021, 111956

[164] RUIZ-ROMERO, S.; COLMENAR-SANTOS, A.; GILD-ORTEGO, R. & MOLINA-BONILLA A. *Distributed generation: the definitive boost for renewable energy in Spain*. Renewable Energy (53), 2013, 354-364 p.

[165] RYDIN, Y. & TURCU, C. *Revisiting urban energy initiatives in the UK: Declining local capacity in a shifting policy context*. Energy Policy (129), June 2019, 653-660 p.

[166] SAKAH, M.; DE LA RUE DU CAN, S.; DIAWUO, F.A.; SEDZRO, M.D. & KUHN, C. *A study of appliance ownership and electricity consumption determinants in urban Ghanaian households.* Sustainable Cities and Society (44), 2019, 559-581 p.

[167] SANTAMOURIS, M.; KAPSIS, K.; KORRES, D.; LIVADA, I.; PAVLOU, C. & ASSIMAKOPOULOS, M N. *On the relation between the energy and social characteristics of the residential sector*. Energy Build, 39 (8), 2007, 893-905 p.

[168] SANTIAGO, I.; LOPEZ-RODRIGUEZ, M A.; TRILLO-MONTERO, D.; TORRITI, J; & MORENO-MUNOZ, A. *Activities related with electricity consumption in the Spanish residential sector: Variations between days of the week, Autonomous Communities and size of towns*. Energy and Buildings (79) , 2014, 84-97 p.

[169] SANTIN, O.; ITARD, L. & VISSCHER, H. *The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock*. Energy and Buildings, (41)11, 2009, 1223-1232 p.

[170] SANQUIST, T F.; ORR, H.; SHUI, B. & BITTNER, A C. *Lifestyle factors in U.S. residential electricity consumption*. Energy Policy (42), 2012, 354-364 p.

[171] SAPUTRO, N.; AKKAYA, K. & ULUDAG, S. *A survey of routing protocols for smart grid communications*. Computer Networks, 56 (11), 2012, 2742-2771 p.

[172] SCHIPPER, L. *Energy Conservation Policies in the OECD: Did They Make a Difference?* Energy Policy, 15(6), 1987, 538-548 p.

[173] SHIMODA, Y.; FUJII, T.; MORIKAWA, T. & MIZUNO, M. *Residential end-use energy simulation at city scale.* Building and environment, 39(8), 2004, 959-967 p.

[174] SILVA, A S.; LUIZ, F.; MANSUR, A C.; VIEIRA, A S.; SCHAEFER, A. & GHISI, E. *Knowing electricity end-uses to successfully promote energy efficiency in buildings: a case study in low-income houses in Southern Brazil*. Sustainable Energy Planning and Management (2), 2014, 7-18 p.

[175] SKOPIK, F. *The social smart grid: Dealing with constrained energy resources through social coordination.* Journal of Systems and Software (89), 2014, 3-18 p.

[176] STRBAC, G. *Demand side management: Benefits and challenges*. Energy Policy 36, 2008, 4419-4426 p.

[177] SUMMERFIELD, A J.; LOWE, R J.; BRUHNS, H R.; CAEIRO, J A.; STEADMAN, J P. & ORESZCZYN, T. *Milton Keynes Energy Park revisited: changes in internal temperatures and energy usage*. Energy Build, 39 (7), 2007, 783-791 p.

[178] SUN, Q.; GE, X.; LIU, L.; XU, X.; ZHANG, Y.; NIU, R. & ZENG, Y. *Review of Smart Grid Comprehensive Assessment Systems*. Energy Procedia (12), 2011, 219-229 p.

[179] SWAN, L. & UGURSAL, I. *Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques*. Renewable and Sustainable Energy Reviews (13), 2009, 1819-1835 p.

[180] TEWATHIA, N. *Determinants of the Household Electricity Consumption: A Case Study of Delhi*. International Journal of Energy Economics and Policy, 4(3), 2014, 337-348 p.

[181] TIWARI, P. *Architectural, demographic, and economic causes of electricity consumption in Bombay*. Policy Model, 22 (1), 2000, 81-98 p.

[182] TORRITI, J. *Demand Side Management for the European Supergrid: Occupancy variances of European single-person households*. Energy Policy (44), 2012, 199-206 p.

[183] TORRITI, J. *A review of time use models of residential electricity demand*. Renewable and Sustainable Energy Reviews (37), 2014, 265-272 p.

[184] TSO, G K F & YAU K K W. *A study of domestic energy usage patterns in Hong Kong*. Energy, 28 (15), 2003, 1671-1682 p.

[185] TSO, G K F & YAU, K K W. *Predicting electricity energy consumption: A comparison of regression analysis, decision tree and neural networks*. 32 (9), 2007, 1761–1768 p.

[186] TWEREFOU, D.K. & ABENEY, J.O. *Efficiency of household electricity consumption in Ghana*. Energy Policy (144), 2020

[187] USLAR, M.; ROHJANS, S.; NEUREITER, C.; ANDRÉN, F.PL.; VELASQUEZ, J.; STEINBRINK, C.; EFTHYMIOU, V.; MIGLIAVACCA, G.; HORSMANHEIMO, S.; BRUNNER, H. & STRASSER, T. I. *Applying the Smart Grid Architecture Model for Designing and Validating System-of-Systems in the Power and Energy Domain: A European Perspective.* Energies, 12(2), 2019, 258. http://doi.org/10.5281/zenodo.3264883

[188] VAAGE, K. *Heating technology and energy use: a discrete/continuous choice approach to Norwegian household energy demand*. Energy Economics, 22(6), 2000, 649-666 p.

[189] VERBONG, G.; BEEMSTERBOER, S. & SENGERS, F. *Smart grids or smart users? Involving users in developing a low carbon electricity economy*. Energy Policy (52), 2013, 117-125 p.

[190] WEBER, C. & PERRELS, A. *Modelling lifestyle effects on energy demand and related emissions.* Energy Policy, 28 (8), 2000, 549-566 p.

[191] WIDÉN, J.; NILSSON, A. & WÄCKELGÅRD, E. *A combined Markov-chain and bottom-up approach to modelling of domestic lighting demand.* Energy and Buildings, 41(10), 2009a, 1001-1012 p.

[192] WIDÉN, J.; LUNDH, M.; VASSILEVA, I.; DAHLQUIST, E.; ELLEGÅRD, K. & WÄCKELGÅRD, E. *Constructing load profiles for household electricity and hot water from*

time-use data—Modelling approach and validation. Energy and Buildings, 41(7), 2009b, 753-768 p.

[193] WIDÉN, J. & WÄCKELGÅRD, E. *A high-resolution stochastic model of domestic activity patterns and electricity demand*. Applied Energy (87), 2010, 1880-1892 p.

[194] WIESMANN, D.; AZEVEDO, L I.; FERRÃO, P & FERNÁNDEZ, J E. *Residential electricity consumption in Portugal: findings from top-down and bottom-up models*. Energy Policy, 39 (5), 2011, 2772–2779 p.

[195] WILKE, U.; HALDI, F.; SCARTEZZINI, J L. & ROBINSON, D. *A bottom-up stochastic model to predict building occupants' time-dependent activities*. Building and Environment (60), 2013, 254-264 p.

[196] WOLSINK, M. *The research agenda on social acceptance of distributed generation in smart grids: Renewable as common pool resource*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), 2012, 822-835 p.

[197] WOOD, G. & NEWBOROUGH, M. *Dynamic energy-consumption indicators for domestic appliances: environment, behavior and design*. Energy and Buildings (35), 2003, 821-841 p.

[198] WYATT, P. *A dwelling-level investigation into the physical and socio-economic drivers of domestic energy consumption in England*. Energy Policy (60), 2013, 540-549 p.

[199] XU, Y.; YAN, C.; LIU, H.; WANG, J.; YANG, Z. & JIANG, Y. *Smart energy systems: A critical review on design and operation optimization*. Sustainable Cities and Society (62), 2020, 102369.

[200] YAO, R. & STEEMERS, K. *A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK*. Energy and Buildings (37), 2005, 663-671 p.

[201] YOHANIS, Y G.; MONDOL, J D.; WRIGHT, A. & NORTON, B. *Real-life energy use in the UK: how occupancy and dwelling characteristics affect domestic electricity use*. Energy Build, 40 (6), 2008, 1053-1059 p.

[202] ZHANG, J.; YANG, X Y.; SHEN, F.; LI, Y W.; XIAO, H.; QI, H.; PENG, H. & DENG. S H. *Principal Component Analysis of Electricity Consumption Factors in China*. Energy Procedia (16), 2012, 1913-1918 p.

[203] ZHANG, C.; HUANG, Q.; TIAN, J.; CHEN, L.; CAO, Y.; ZHANG, R. *Smart Grid Facing the New Challenge: The Management of Electric Vehicle Charging Loads*. Energy Procedia (12), 2011, 98-103 p.

[204] ZHOU, S. & TENG F. *Estimation of urban residential electricity demand in China using household survey data*. Energy Policy (61), 2013, 394-402 p.

[205] ZHU, D.; TAO, S.; WANG, R.; SHEN, H.; HUANG, Y.; SHEN, G.; WANG, B.; LI, W.; ZHANG, Y.; CHEN, H.; CHEN, Y.; LIU, J.; LI, B.; WANG, X. & LIU, W. *Temporal and spatial trends of residential energy consumption and air pollutant emissions in China*. Applied Energy (106), 2013, 17-2 4 p.

Communications ou présentations lors de congrès ou de conférences

[206] ARDAKANIAN, O.; KESHAV, S. & ROSENBERG, C. *Markovian models for home electricity consumption.* Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM workshop on Green networking, USA, 2011, 31-36 p.

[207] BAYRAM, I. S.; SHAKIR, M. Z.; ABDALLAH, M. & QARAQE, K. *A survey on energy trading in smart grid*. IEEE Global Conference on Signal and Information Processing, 2014

[208] BARTIAUX, F, & GRAM-HANSSEN, K. *Socio-political factors influencing household electricity consumption: a comparison between Denmark and Belgium*. In: Proceedings of the ECEEE 2005 Summer Study, European Council for an Energy Efficient Economy, 2005. 1313-1325 p.

[209] BARKER, S.; MISHRA, A.; IRWIN, D; SHENOY, P. & ALBRECHT, J. *SmartCap: Flattening peak electricity demand in smart homes*, IEEE, 2012. 67-75 p.

[210] CAO, J. & YANG, M. *Energy internet – towards smart grid 2.0*. Fourth international conference on networking and distributed computing (ICNDC), Los Angeles, 2013

[211] FRANCISCO, E. R.; ARANHA, F.; ZAMBALDI, F. & GOLDSZMIDT, R. *Electricity Consumption as a Predictor of Household Income: A Spatial Statistics approach*. VIII Brazilian symposium on geo-informatics, Brazil, 2006, 175-192 p.

[212] GILLINGHAM, K.; RAPSON, D. & WAGNER, G. The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy, Discussion paper, Resources for future, Washington, 2014

[213] GRAM-HANSSEN, K. *Households' energy use – which is the more important: efficient technologies or user practices?* Energy End-Use Efficiency Issues, World renewable energy congress, Sweden, 2011

[214] GRAM-HANSSEN, K.; KOFOD, C. & PETERSEN, K.N. *Different everyday lives: different patterns of electricity use*. In: Proceedings of the ACEEE 2004 Summer Study, American Council for an Energy Efficient Economy; 2004, 74-85 p.

[215] GU, L. & RAUSTAD, R. *Investigate peak demand reduction strategies in a large office building using energy-plus*. 7th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning, China, 2011

[216] HINES, P. *A Scalable Approach to Smart Grid Technology or "A Smarter Smart Grid".* CMU 5th Annual Electricity Conference: Smart Grids, New York, 2009

[217] KAVASSERI, R J. *SCyPES: Socio-Cyber-Physical-Energy Systems*. National workshop on energy cyber-physical systems, 2013

[218] KOOL, R. *Load management with Demand-side management, an overview*. Workshop: IEA Demand Side Management, Johannesburg, 2011

[219] MCMICHAEL, M. *A Social Capital Approach to Household Energy Consumption.* European Council for Energy Efficient Economy (ECEEE), Summer Study, Saving Energy-Just do it! 2007, 1897-1905 p.

[220] OLOFSSON, T.; ANDERSSON, S. & SJÖGREN, J U. *Multivariate Methods for Evaluating Building Energy Efficiency*. Proceedings of the 2004 ACEEE Summer Study of Energy Efficiency in Buildings, 2004, 265-274 p.

[221] TIEDEMANN, K. H. *Using conditional demand analysis to estimate residential energy use and energy savings*. Proceedings of the ECEEE Summer Study, Canada, 2007

Sites web consultés

[222] ANAH https://www.anah.fr/

[223] AMERICAN CANCER SOCIETY, *Smart meter* (2014) https://www.cancer.org/cancer/cancer-causes/radiation-exposure/smart-meters.html

[224] AUSTRALIAN BUREAU OF STATISTICS, *Household Energy Consumption Survey, Australia: Summary of Results* (2012) http://www.abs.gov.au/ausstats/abs@.nsf/Lookup/4670.0main+features100062012

[225] COMMEND. *Final energy demand analysis*. http://www.energycommunity.org/webhelppro/Demand/Final_Energy_Demand_Analysis.htm

[226] COMMISSION EUROPEENNE, *Smart grid regional group of European Commission*. https://ec.europa.eu/energy/topics/infrastructure/projects-common-interest/regional-groups-and-their-role/smart-grid-regional-group_en

[227] CRE. *Commission de Régulation de l'Energie.* http://www.cre.fr

[228] CYBERGEO, *Type of climate in France* (2010) http://cybergeo.revues.org/23155

[229] EMBEDDED (ECKERMANN, B. & HUFF, R.) *Using network standby to lower home/office device power consumption* (2013) http://www.embedded.com/design/real-world-applications/4417452/Using-network-standby-to-lower-home-office-device-power-consumption--Part-1

[230] ENGINEERING TOOLBOX. *Heat Loss from Buildings* (2003) https://www.engineeringtoolbox.com/heat-loss-buildings-d_113.html

[231] ENGINEERING TOOLBOX. *Sizing Domestic Hot Water Heaters* (2005) https://www.engineeringtoolbox.com/hot-water-d_956.html

[232] EUR-LEX, *Directive 2004/8/EC (European Commission)*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/LSU/?uri=CELEX:32004L0008

[233] FORBES (SASSEN, S.). *Open sourcing the neighborhood* http://www.forbes.com/sites/techonomy/2013/11/10/open-sourcing-the-neighborhood/

[234] GLOBAL RESEARCH (PERLINGIERI, S I.) *Radiofrequency Radiation: The Invisible Hazards of "Smart" Meters* (2011) http://www.globalresearch.ca/radiofrequency-radiation-the-invisible-hazards-of-smart-meters/26082

[235] IEA (International Energy Agency). *Key World Energy Statistics* (2018). www.iea.org/textbase/nppdf/free/2011/key_world_energy_stats.pdf

[236] INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques). https://www.INSEE.fr

[237] JRC (Joint Research Center). *Agent Based Modelling for Smart Grids* (2012) http://ses.jrc.ec.europa.eu/agent-based-modelling-smart-grids

[238] JRC (Joint Research Center). *Smart electricity systems and interoperability* (2020) ses.jrc.ec.europa.eu/inventory?field_proj_dev_stage_value=DEMP&field_proj_start_date_value%5Bvalue%5D%5Byear%5D=&field_proj_start_date_value2%5Bvalue%5D%5Byear%5D=&field_proj_countries_involed_tid=france&titleproj=&field_proj_application_value=&order=field_proj_partner&sort=desc

[239] MULTILIGHTING https://www.multilighting.ca/blog/post/how-many-lightbulbs-do-you-need-to-light-a-room/

[240] OBSERVATOIRE DES INEGALITES *Les inégalités de salaires entre les femmes et les hommes : état des lieux* inegalites.fr

[241] RTE FRANCE http://www.rte-france.com/

[242] SMART GRID INFORMATION CLEARINGHOUSE (SGIC) (2013) https://www.sgiclearinghouse.org/

[243] THE HOUSE PLANS GUIDE. *Lighting calculation* (2018) http://www.the-house-plans-guide.com/lighting-calculation.html

[244] TVERBERG, G. *The U. S. electric grid: will it be our undoing?* http://www.resilience.org/stories/2008-05-07/u-s-electric-grid-will-it-be-our-undoing

Annexes

Annexe I : Aperçu de l'enquête et de ses résultats

Les résultats suivants portent sur 54 réponses.

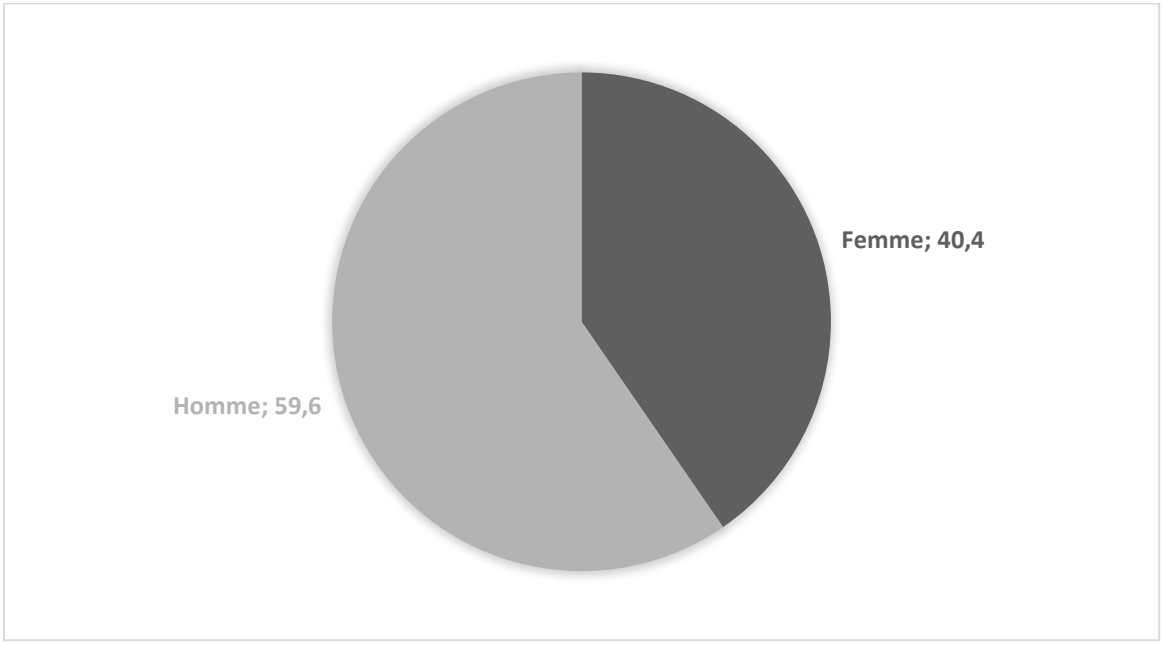


Figure I-1 : Genre des participants à l'enquête

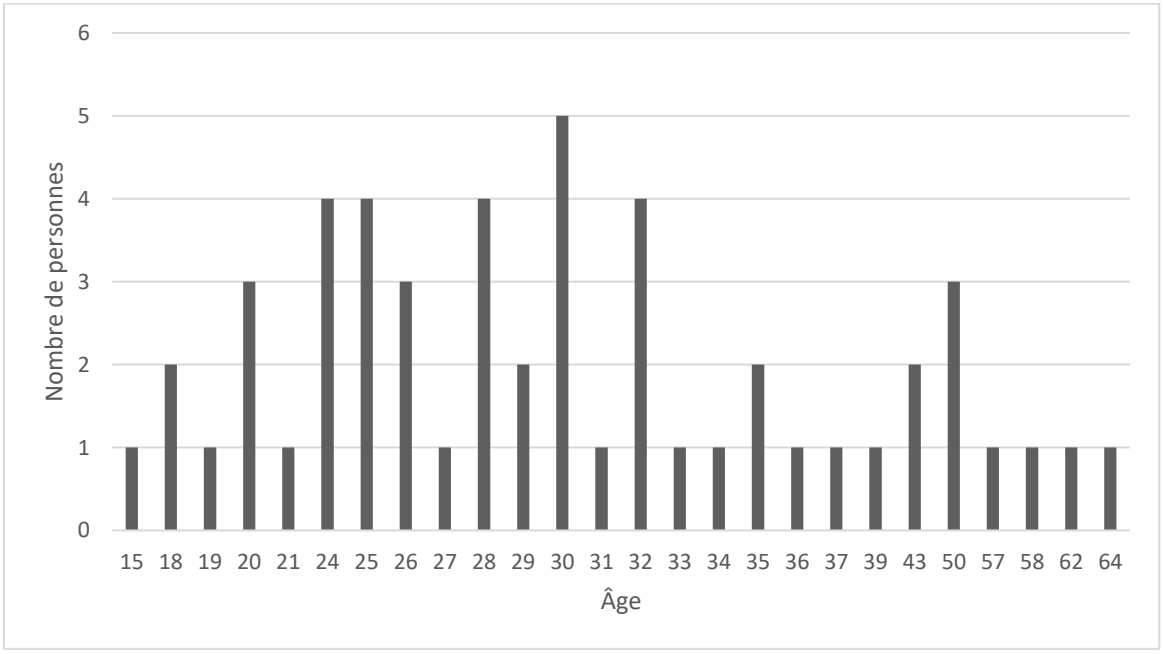


Figure I-2 : Âge des participants à l'enquête

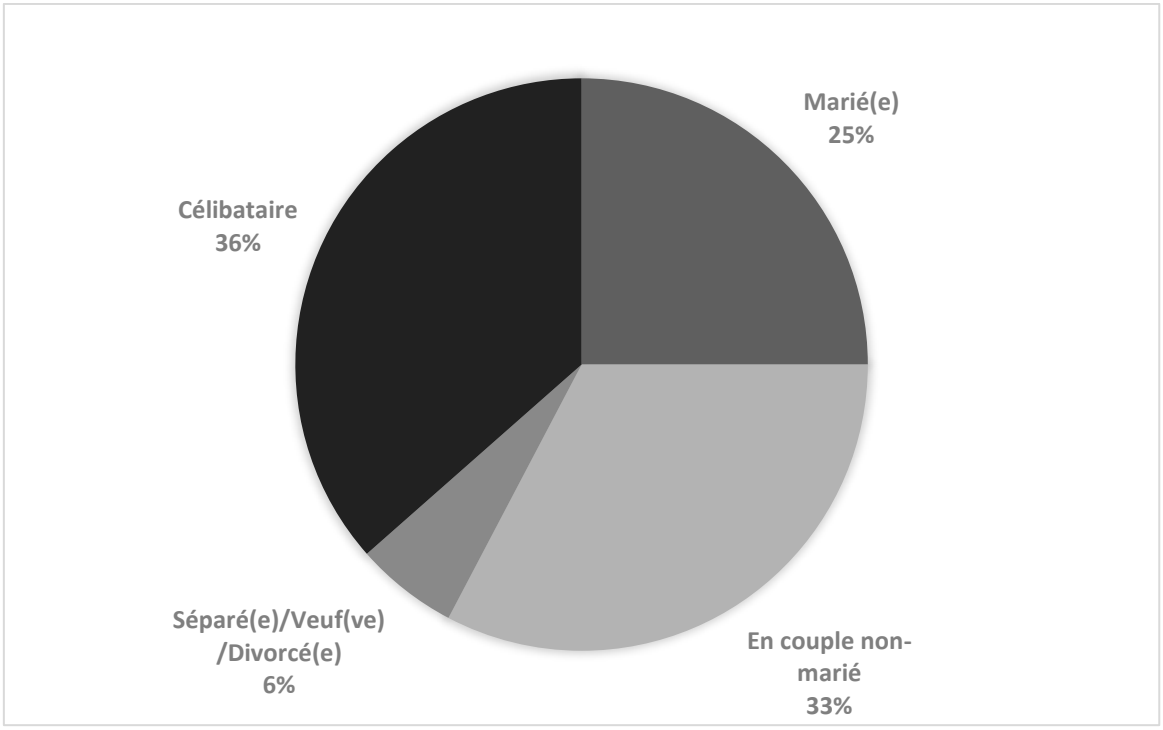


Figure I-3 : Statut familial des participants à l'enquête

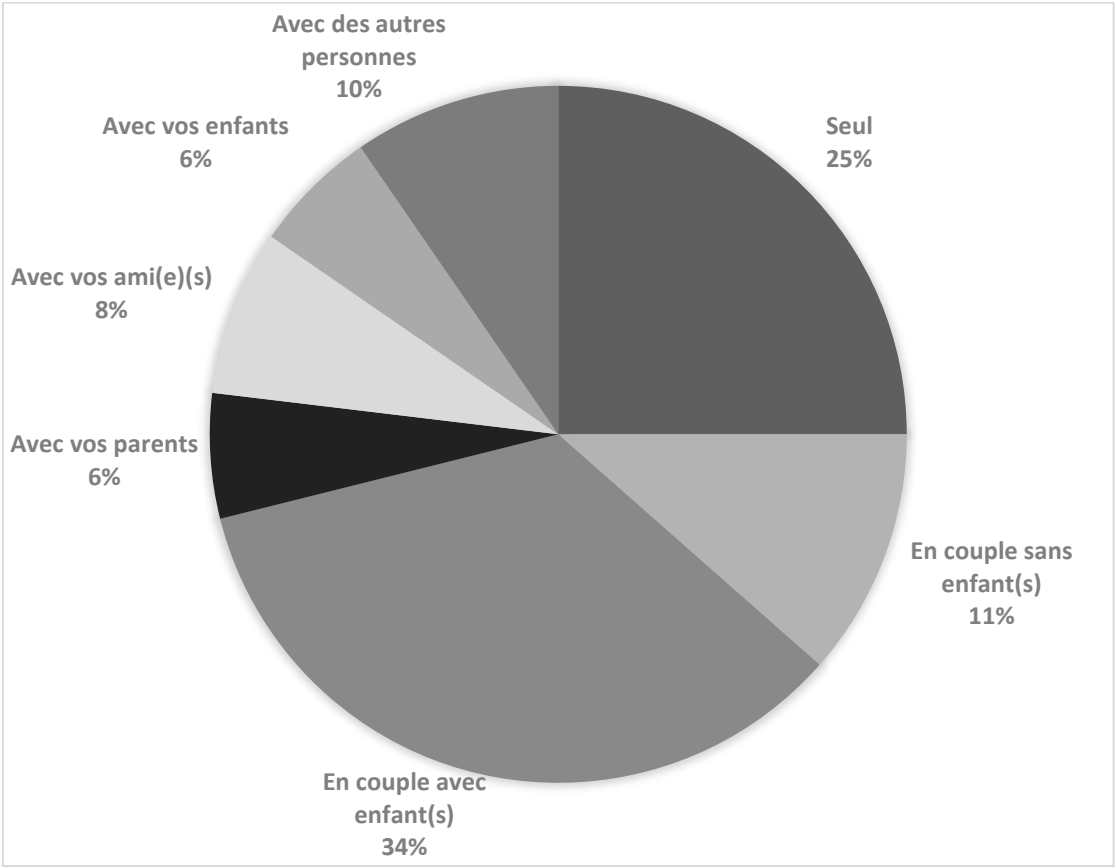


Figure I-4 : Structure de ménage des participants à l'enquête

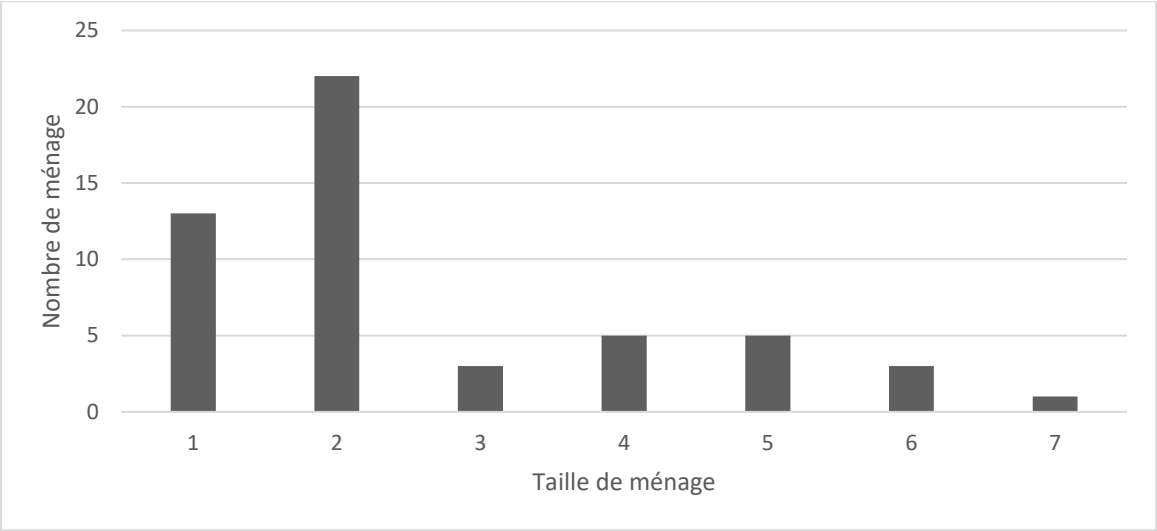


Figure I-5 : Taille de ménage des participants à l'enquête

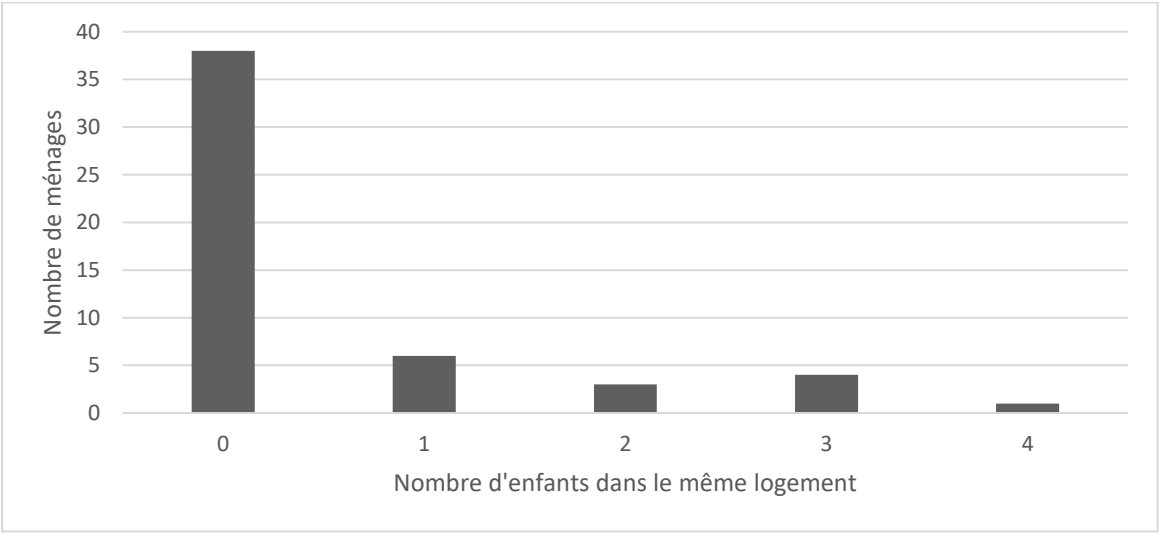


Figure I-6 : Nombre d'enfants (individus moins de 18 ans) vivant dans un même logement

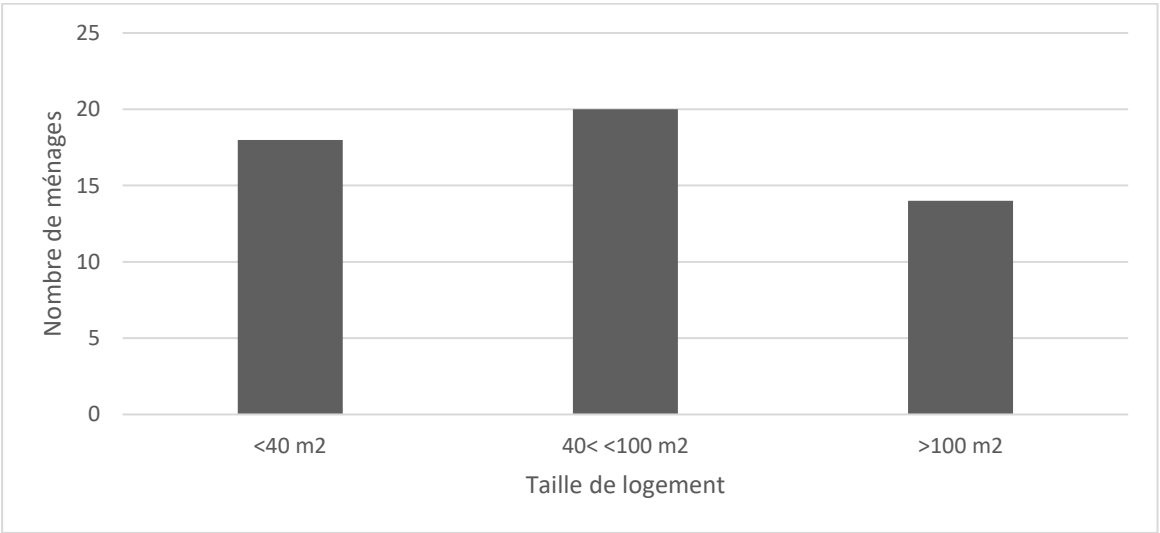


Figure I-7 : Taille de logement des participants à l'enquête

*Appareil supplémentaire au sein des ménages

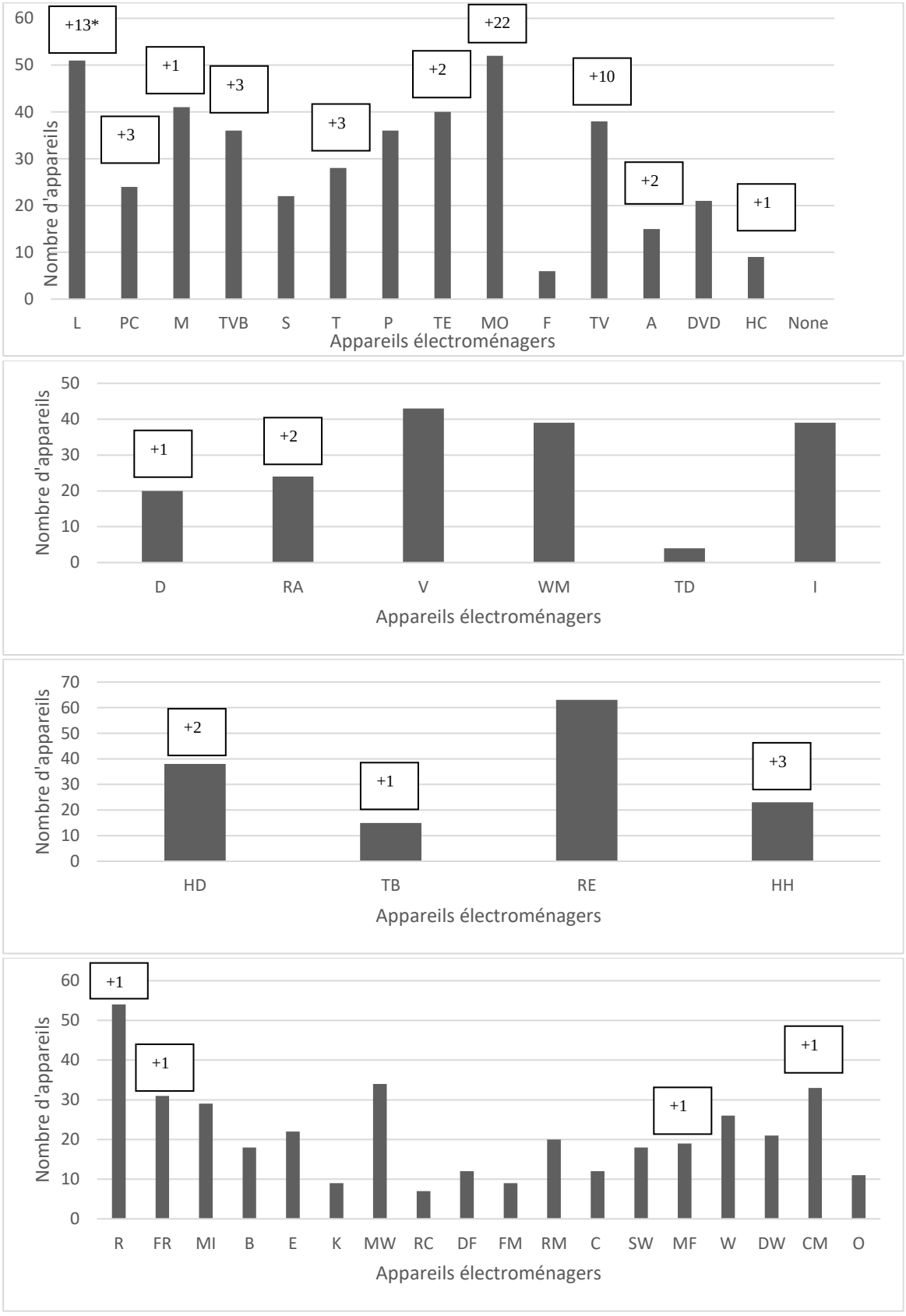


Figure I-8 : Appareils électroménagers possédés par les participants à l'enquête

Table I-1 : Résultats de l'enquête sur différentes variables : taille du logement en m^2 (X1), âge du participant à l'enquête (X2), taille du ménage en nombre (X3), revenu annuel moyen du ménage en milliers d'euros (X4) et nombre d'appareils électriques (N)

Réf ; Enquête											
	X1	**X2**	**X3**	**X4**	**N**		**X1**	**X2**	**X3**	**X4**	**N**
1	60	30	2	15	25	**39**	26	26	1	2.5	17
2	12	20	1	7.5	11	**40**	30	39	1	25	20
3	90	35	4	35	32	**41**	66	35	2	35	28
4	200	38	7	35	51	**42**	27	30	2	15	16
5	50	37	1	2.5	24	**43**	100	25	5	25	68
6	104	32	2	25	43	**44**	48	30	2	25	31
7	30	30	2	25	36	**45**	110	64	2	45	41
8	45	24	2	25	33	**46**	120	43	4	45	43
9	22	26	1	2.5	13	**47**	52	31	2	15	33
10	63	36	2	25	24	**48**	100	50	2	35	44
11	50	30	1	15	10	**49**	30	22	2	15	17
12	29	28	1	15	19	**50**	105	47	1	45	24
13	240	57	2	62.5	56	**51**	35	37	1	15	22
14	42	18	1	2.5	17	**52**	20	27	1	25	14
15	82	24	4	25	32	**53**	100	33	2	45	38
16	120	32	4	35	20	**54**	220	48	4	55	48
17	35	27	2	25	21						
18	62	26	2	45.5	26						
19	25	20	1	2.5	9						
20	20	28	2	15	15						
21	120	62	2	25	38						
22	30	24	2	15	30						
23	50	34	4	15	19						
24	40	33	2	15	18						
25	72	29	3	15	20						
26	300	35	5	35	37						
27	80	28	2	15	27						
28	50	32	1	15	23						
29	40	25	1	7.5	20						
30	105	19	5	25	19						
31	20	28	6	7.5	11						
32	100	32	5	87.5	33						
33	25	24	2	15	21						
34	15	29	3	15	7						
35	25	50	3	2.5	16						
36	50	58	2	15	19						
37	35	28	2	15	25						
38	200	50	5	35	34						

Annexe II : Méthode de calcul/estimation des usages finaux

Chauffage et climatisation : En raison du rayonnement, de la conduction, de la ventilation et des infiltrations d'air provenant des murs, des toits, des fenêtres, des portes et des sols, la température intérieure souhaitée change. Pour compenser ces changements et maintenir le confort thermique intérieur, il est donc nécessaire d'utiliser ces technologies. La consommation électrique nécessaire aux systèmes de chauffage/climatisation dépend principalement de divers facteurs tels que l'efficacité du système, la conductivité thermique, la température extérieure en lien avec celle souhaitée à l'intérieur et la performance thermique du bâtiment (type d'enveloppe, existence et type d'isolation, pourcentage de vitrage, etc.) La taille du système de chauffage ou de climatisation d'un logement est choisie en fonction de la taille et de la hauteur d'une pièce, des isolations, de la taille et du type de portes et de fenêtres, du type et du matériau du sol, de la température extérieure, des locaux adjacents. En d'autres termes, pour connaître la taille du chauffage ou de la climatisation nécessaire pour chauffer ou refroidir une maison, il est nécessaire de faire un calcul des déperditions thermiques. Les calculs suivants sont effectués selon l'ENGINEERING TOOLBOX (2003). La perte de chaleur globale d'un bâtiment peut être calculée à l'aide de l'Equation i :

$$H = H_t + H_v + H_i \qquad (i)$$

avec :

H = déperdition thermique totale par les parois (les murs, les fenêtres, les portes, les plafonds, les planchers, etc.) (W)
H_t = déperdition thermique par la transmission à travers des parois (W)
H_v = déperdition thermique par le renouvellement d'air (la ventilation) (W)
H_i = déperdition thermique par l'infiltration (W)

La perte de chaleur par la transmission à travers des parois peut être calculée de façon suivante (Equation ii) :

$$H_t = A\ U\ (t_i - t_o) \qquad (ii)$$

avec :

A = superficie exposée (m^2)

U = coefficient global de transmission thermique (W/m^2K)
t_i = température de l'air intérieur (^oC)
t_o= température de l'air extérieur (^oC)

Pour les murs et les planchers en contact direct avec le sol, il faut prendre en compte la température du sol (Equation iii) :

$$H_t = A\ U\ (t_i - t_e) \qquad (iii)$$

avec :

t_e= température du sol (^oC)

Le coefficient global de transmission thermique - *U* - peut être calculé en utilisant l'Equation iv :

$$U = 1 / (1 / C_i + x_1 / k_1 + x_2 / k_2 + x_3 / k_3 + ... + 1 / C_o) \qquad (iv)$$

avec:

C_i = coefficient de convection thermique pour les murs intérieures (W/m^2K)
x = épaisseur du matériau (m)
k = conductivité thermique du matériau (W/mK)
C_o= coefficient de convection thermique pour les murs extérieurs (W/m^2K)

La résistance thermique d'un élément de construction s'exprime comme suit (Equation v) :

$$R = x / k \qquad (v)$$

avec :

R = résistance thermique (m^2K/W)

Les points (iv),et (v), se traduisent par l'Equation vi :

$$1 / U = R_i + R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_o \qquad (vi)$$

avec :

R_i = résistance thermique superficielle intérieure de la paroi (m^2K/W)
$R_{1..}$ résistance thermique dans les différentes couches de la paroi/construction (m^2K/W)
R_o = résistance thermique superficielle extérieure (m^2K/W)

Pour les murs et les planchers en contact direct avec le sol, nous pouvons utiliser l'Equation vii :

$$1 / U = R_i + R_1 + R_2 + R_3 + ... + R_o + R_e \quad (vii)$$

avec :

R_e = résistance thermique du sol (m^2K/W)

La perte de chaleur due à la ventilation sans récupération de chaleur peut être exprimée comme suit (Equation viii) :

$$H_v = c_p \rho q_v (t_i - t_o) \qquad (viii)$$

avec :

c_p = chaleur spécifique de l'air (J/kg K)
ρ = masse volumique de l'air (kg/m^3)
q_v = débit volumique de l'air (m^3/s)

La perte de chaleur due à la ventilation avec récupération de chaleur peut être exprimée à l'aide de l'Equation ix:

$$H_v = (1 - \beta/100) c_p \rho q_v (t_i - t_o) \qquad (ix)$$

avec :

β = rendement de récupération thermique (%)

La perte de chaleur causée par l'infiltration peut être calculée comme suit (Equation x):

$$H_i = c_p \rho n V (t_i - t_o) \qquad (x)$$

avec :

n = fraction volume d'air renouvelé par second

V = volume de la pièce (m^3)

1. Eau chaude sanitaire : un équipement est utilisé pour produire de l'eau chaude à l'usage des occupants du logement et des appareils électroménagers pour le nettoyage, le lavage et toutes les autres utilisations domestiques. La quantité d'énergie nécessaire pour chauffer l'eau et la taille du système d'eau chaude dépendent de nombreuses variables telles que du nombre d'occupants du logement, de leur utilisation, du type de système de chauffage et du type de ressource énergétique. Les équations ci-dessous de l'ENGINEERING TOOLBOX (2005) peuvent être utilisées pour estimer la taille du système de production d'eau chaude dans un bâtiments résidentiel.

La puissance de chauffage d'un système d'eau chaude sanitaire est calculée comme suit (Equation xi) :

$$H_{ECS} = c_p \rho q_v (t_i - t_o) \qquad (xi)$$

avec :

c_p = *chaleur spécifique de l'air (J/kg K)*

ρ = *masse volumique de l'eau (kg/m^3)*

q_v = *débit volumique de l'eau (m^3/s)*

t_i : température de l'eau à l'entrée à l'équipement

t_o : température de l'eau à la sortie de l'équipement

2. Éclairage : Le nombre de lampes et d'appareils d'éclairage permettant de fournir un éclairage adéquat dans une seule pièce d'un logement dépend de divers facteurs tels que la quantité de lumière naturelle existante, la taille et le type des fenêtres, le matériau, la couleur et la texture de l'espace intérieur et du mobilier, la taille et la hauteur de la pièce, la fonction de la pièce, son orientation et la zone climatique du lieu. Outre ces facteurs et les formules existantes, l'âge des occupants du logement et leurs préférences personnelles sont également des facteurs importants dans le choix de l'éclairage souhaité. Toutefois, à partir des estimations du Tableau III-1 et d'équations simples telles que l'Equation xii, les flux lumineux peuvent être calculés comme suit :

Tableau II- 1 : Exemples de calcul de l'éclairage domestique pour différentes fonctions/espaces

Réf : THE HOUSE PLANS GUIDE (2018)

Espace/Fonction	Eclairement (lux)
Couloirs	55-75
Salon	110-215
Salle à manger	110-215
Lecture (de base)	215-540
Salle de bain	215-540
Cuisine - éclairage de base	215-540
Cuisine - préparation des aliments	540-1075
Bureau (lecture et écriture)	540-1075
Éclairage général de l'atelier	540-1075
Travail délicat ou détaillé	1075-215

$$lm = e \times A \qquad (xii)$$

avec :

lm = flux lumineux (lumen)

e = éclairement (lux)

A = surface (m^2)

Nous pouvons aussi estimer le nombre et le type d'ampoules qui fournissent l'éclairage nécessaire pour un espace spécifique. La puissance minimale (w) nécessaire par pièce est parfois estimée premièrement par la relation empirique telle que la multiplication de surface de la pièce (m^2) par un facteur qui correspond à une hauteur sous plafond standard d'un logement (par exemple, 1,5 pour 2,4 m d'hauteur selon la société MULTILIGHTING_. Cette estimation est souvent utilisée en conception architecturale pour faire une première estimation informelle. Le facteur de multiplication (1,5) correspond à une hauteur sous plafond de 2,4 m d'un bâtiment résidentiel.

3. Appareils électriques domestiques (électroménagers) : Ce sont des appareils fonctionnant exclusivement à l'électricité, notamment les réfrigérateurs, les téléviseurs, les micro-ondes, etc. (hormis des cuisinières, des plaques de cuissons et des fours qui fonctionnent aussi au gaz) sont des machines électriques qui facilitent les opérations domestiques et augmentent l'autonomie. Ils peuvent être classés soit en fonction de leur emplacement éventuel dans la maison (par exemple, les appareils de cuisine tels que le réfrigérateur), soit selon leur fonction (par exemple, les appareils de lavage tels que le lave-linge et le lave-vaisselle). Les occupants

du logement, en fonction de divers facteurs complexes, de leurs préférences personnelles et de leur mode de vie, utilisent plusieurs de ces appareils de temps en temps, plus fréquemment ou même sans arrêt. Contrairement aux autres usages finaux de l'électricité, il n'existe pas d'équation spécifique pour déterminer le nombre d'appareils électriques dans les bâtiments résidentiels en raison de complexité de ces facteurs.

4. Cuisson : Les plaques de cuissons et les fours sont des appareils électriques utilisés pour cuisiner. Cependant, ils sont séparés du reste des appareils électriques dans cette recherche et dans de nombreuses études par exemple, RTE (2014) et ODYSSEE (2020) car leur taille et leur type sont choisis en fonction du nombre d'occupants et de leurs besoins. D'autant plus que, contrairement aux autres appareils qui fonctionnent toujours à l'électricité, les cuisinières peuvent utiliser d'autres ressources énergétiques tels que le gaz. C'est la raison pour laquelle nous les avons séparées du reste des électroménagers.

Annexe III : Article publié

Sustainable Cities and Society 65 (2021) 102635

Contents lists available at ScienceDirect

Sustainable Cities and Society

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scs

A Spatio-Temporal Analysis of electric appliance end-use demand in the residential sector: Case study of Tours (France)

Farinaz Falaki [a], Abdelatif Merabtine [b,*], Denis Martouzet [a]

[a] Université de Tours, CNRS, UMR 7324 CITERES, IPAPE, 33 allée Ferdinand de Lesseps, 37 200, Tours, France
[b] EPF School of Engineering, 2 rue Fernand Sastre, 10430, Rosières-Prés-Troyes, France

ARTICLE INFO

Keywords:
Urban scale
Spatio-Temporal analysis
Residential electricity demand
Electric appliance
Energy consumption

ABSTRACT

To analyse residential electricity consumption/demand, it is often broken down into five end-uses, namely lighting, hot water, space heating/cooling, cooking, and domestic appliances. Unlike other electricity end-uses, there is no specific method to determine the number of electric appliances in residential buildings, and it is difficult to estimate their pattern of usage due to household behaviour. The increasing demand of domestic appliance use in France in recent decades is attributed to advances in technology, increased dwelling size, and changes in lifestyle and comfort requirements, resulting in increased ownership and frequency of use of these appliances. Therefore, to gain a better understanding of the total demand, it is necessary to determine the variables impacting the ownership and utilisation of electric appliances. This paper provides a spatio-temporal analysis at a local scale, focusing on electric appliances in the residential sector. This analysis can be used to illustrate the areas where the application of energy efficiency measures can be improved. By identifying the socio-economic variables impacting electricity demand through micro- and macro-scale modelling techniques, we simulated the load profile of electric appliances, based on a survey of 54 households and national statistics regarding the daily activity of French people. The results demonstrate that size of dwelling, financial status, age of the reference person in the household, and household size and composition are the main variables determining the number of electric appliances owned by the household. These data are crucial for electricity demand forecasting, Demand Response and Demand-Side Management.

1. Introduction

Electricity plays a key role in modern economies and in the increasing demand of energy services. Due to a rise in household incomes, advances in technology and the Internet of Things (IoTs), electrification of the transport system and the replacement of non-electric heaters by electric ones, and greater use of air conditioning, the demand for electricity is rising globally in all sectors (Iea, 2019a). Between 1974 and 2018, the residential sector was the world's second largest final electricity consumer (Iea, 2020), with a range of socio-economic and environmental consequences. The global CO_2 emissions from the energy sector grew by 1.7 % in 2018, reaching a record of 33.1 gigatonnes (Gt) (Iea, 2019b).

End-use energy efficiency will have the greatest impact on CO_2 reduction by 2030 (Datta, 2019). For example, smart grid applications flatten spikes in electricity demand and reduce overall electricity consumption by applying Demand-Side Management (DSM) strategies (Praveen & Rao, 2020). The DSM functions by disaggregating energy use (Miyasawa, Fujimato, & Hayashi, 2019) and using the data to identify the most energy-efficient strategies. This paper investigates the relationship between energy-efficiency technologies, socio-demographic characteristics, environmental conditions, human behaviour, and other variables that effect individuals' consumption decisions, using micro-scale (bottom-up) or macro-scale (top-down) modelling techniques.

Studies generally disaggregate total residential electricity consumption into five end-uses: 1) lighting, 2) hot water, 3) space heating/cooling, 4) cooking, and 5) domestic appliances. Domestic appliances that exclusively require electricity, including refrigerators, televisions, microwave ovens (excluding cookers and ovens), facilitate household chores and increase efficiency. They can be categorized either by their possible location in the home (e.g. kitchen appliances such as refrigerator, dish washer) or by their function (e.g. entertainment appliances such as television). They represent the largest end-use consumption in

* Corresponding *author.*
E-mail address: abdelatif.merabtine@epf.fr (A. Merabtine).

https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102635
Received 7 May 2020; Received in revised form 7 October 2020; Accepted 24 November 2020
Available online 5 December 2020
2210-6707/© 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

France in the residential sector (45 % of total residential consumption), before space heating/cooling (30 %), domestic hot water (12 %), cooking (7%), and lighting (6%).

Electricity consumption by French households overall and for hot water and space heating decreased by about 15 % and 33 % respectively between 1990 and 2013, and by approximately 0.7 % and 1.4 % per year on average due to improvements in energy efficiency of buildings and systems and increased public awareness of environmental issues. However, other end-uses show a different pattern. For example, the consumption of specific appliances (including electric appliances, lighting and any appliance working exclusively on electricity, and excluding mechanical systems such as heating and cooling systems and hot water) increased by 43 % during the same period. In France, between 1985 and 2006, the surface area of residential buildings increased by 9 m^2 on average, and between 2006 and 2013 house size increased by about 1%. More specifically, surface area increased by 17 m^2 when the head of the household was aged over 50 years, and decreased by 10 m^2 when the reference person was less than 30 years old (INSEE, 2015). Thus, the rapid increase in domestic appliance use can be explained partly by an increase in dwelling size, but mostly by advances in new technologies, the creation of new appliances and changes in lifestyle, leading to better equipped dwellings with higher rates of comfort. Households with multiple occupants with different personal preferences and lifestyle may use several domestic electric appliances occasionally, frequently or even continuously.

Many studies focus on the upgrading of space heating/cooling and hot water systems and/or building envelope retrofitting to reduce overall electricity consumption and/or peak demand. However, few studies have focused on disaggregated end-uses in residential electricity consumption (Diawuo, Sakah, Pina, Baptista, & Silva, 2019) or residential and commercial consumption (Macmackin, Miller, & Carriveau, 2019). While Sakah, De La Rue Du Can, Diawuo, Sedzro, and Kuhn (2019) analyse a combination of end-uses, including some domestic appliances, to the best of our knowledge, no studies have exclusively investigated domestic electric appliance use and its impact on consumption and demand.

Total electricity demand and disaggregated models of different building types are calculated similarly. Zhou, Shi, Shi, Gao, and Wu (2019) created disaggregated demand models for commercial buildings. However, the energy saving potential of this type of building is more complicated to estimate. Moreover, most of these buildings are publicly owned or under centralized management, and any modification of end-use consumption/demand is subject to high levels of policies, rules, and regulations. A joint approach is thus taken to manage load and implement energy reduction strategies. This is also the case for other sectors (agriculture, industry, transportation) (Swan & Ugursal, 2009). Moreover, the occupants of commercial buildings are less motivated to change their behaviour when energy is provided as a public good.

By contrast, there is little in the literature about energy-saving strategies in residential buildings, and more specifically in relation to electric appliances. Alalouch (2019) investigate the characteristics and energy saving capacities of residential buildings in a hot climate. The role of household members in energy consumption and/or saving has not been examined through disaggregated end-use analysis. The residential sector includes a range of structures, sizes, lay-out, materials, thermal envelopes, insulation, etc. Owner-occupiers in this sector show a variety of energy-use behaviours that are inaccessible to suppliers due to privacy issues and costly sub-metering devices.

More importantly, electricity consumption in residential buildings depends on the occupants' activities (Bin & Dowlatabadi, 2005). Total energy demand is the sum of demand of each dwelling with one/several occupant(s) per area (e.g. neighbourhood, city, country), varying in time and space. Thus, the proliferation of datasets are both spatially and temporally indexed. So, to examine the variation of energy demand over time and in different spaces, the present study is based on a Spatio-Temporal Analysis in order to determine the contribution of each end-use in energy demand reduction (Chen et al., 2019). In this way, it contributes to the existing literature by focusing on domestic electric appliance use and identifying patterns of ownership and usage factors, and finally analysing the data at different urban scales.

Survey methods, electricity bill analysis and advanced metering devices can be used to analyse total and aggregated electricity demand. For lighting, hot water, space heating/cooling and cooking, demand can be assessed using various approaches and methodologies. By contrast, for household electric appliances, there is no specific method to determine accurately the number and type of appliances, or the time and frequency of use. The aim of this study is thus to estimate energy demand for this specific end-use by identifying the determining factors related to ownership and patterns of use.

This paper is divided into five sections. Following the introduction and presentation of the background in Section 1, Section 2 provides a review of previous studies. Section 3 describes the 7 stages of the Spatio-Temporal Analysis of electric household appliances in the city of Tours (France) and its neighbourhoods. Section 4 summarizes and discusses the results, and Section 5 presents the conclusions and limitations of the study and discusses directions for future research.

2. Literature review

The majority of energy demand models are based on the correlation between energy consumption and factors such as number of occupants, household income, floor area, energy patterns, climatic factors and energy efficiency indicators (Kelly, 2011). More specifically, other factors related to electricity consumption have been studied to create electricity demand models. However, all the studies reviewed share a number of methodological similarities, and mainly involve the following three steps:

1 Data collection, including interviews (Gram-Hanssen, Kofod, & Petersen, 2004; Tso & Yau, 2007), surveys including by phone (Ndiaye & Gabriel, 2011), data from statistics institutions and national surveys (Gram-Hanssen et al., 2004; Yohanis, Mondol, Wright, & Norton, 2008; Leahy & Lyons, 2010; Wiesmann, Azevedo, Ferrão, & Fernández, 2011; Brounen, Kok, & Quigley, 2012; Mcloughlin, Duffy, & Conlon, 2012; Sanquist, Orr, Shui, & Bittner, 2012; Wyatt, 2013; Carlson, Matthews, & Berge'S, 2013), sub-metering or other household monitoring techniques (Gram-Hanssen et al., 2004; Yohanis et al., 2008; Genjo, Tanabe, Matsumoto, Hasegawa, & Yoshino, 2005; Ndiaye & Gabriel, 2011; Mcloughlin et al., 2012; Parker, 2003; Bartusch, Odlare, Wallin, & Wester, 2012; Baker & Rylatt, 2008; Kavousian, Rajagopal, & Fischer, 2013; Ardakanian, Keshav, & Rosenberg, 2011), sampling techniques (Halvorsen & Larsen, 2001; Tso & Yau, 2003; Bartiaux & Gram-Hanssen, 2005; Tso & Yau, 2007; Summerfield et al., 2007; Santamouris et al., 2007; Baker & Rylatt, 2008; Louw, Conradie, Howells, & Dekenah, 2008; Ndiaye & Gabriel, 2011; Bartusch et al., 2012; Carter, Craigwell, & Moore, 2012; Kavousian et al., 2013), or a combination of several approaches (Sakah et al., 2019).
2 Data processing and adjustments should take into account the temporal variation and the time of use of each appliance. Questions or monitoring might refer to a specific time of the year (e.g. one cold and one hot month of the year), given that the appliances may not all be used during the period under investigation, or the temperature may be abnormal for the season. To obtain an annual estimate, the data therefore needs to be scaled up for the whole year. Statistical, regression or econometric studies often use statistical techniques and Structural Equation Modelling (SEM) to process and adjust the data, as in the studies by Tiwari (2000), Baker and Rylatt (2008), Brounen et al. (2012), and Kavousian et al. (2013).
3 Various methods are used for data analysis. A typical electricity-consumption day is calculated and generalized across the year. The results are presented in graph form, showing an electricity demand

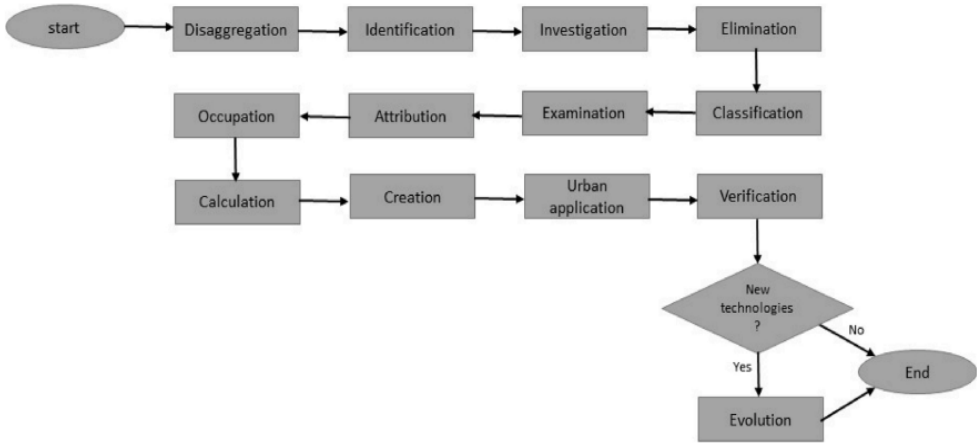


Fig. 1. Flowchart of electricity demand analysis.

curve. This makes it possible to compare the analysis with future scenarios and reveals potential improvement points. To gain a clearer understanding of demand, the analyses show daily, weekly, monthly or annual variations, from neighbourhood to city scale.

Apart from their similarities, the most significant difference between the above-mentioned studies is their method to predict patterns of appliance use, including time of use and average energy consumption.

Overall electricity consumption data can be collected from electricity bills provided by authorities, and disaggregated and more precise information can be gained from sub-meters. Less precise data can be collected from interviews, questionnaires and surveys. When this is not possible, existing data can be used for a total or partial simulation. Simulation can also be used for further analyses, as in a number of studies. Three main techniques are used: (1) Monte-Carlo Method (MCM) and stochastic processes (Capasso, Grattieri, Lamedica, & Prudenzi, 1994; Doucet, De Freitas, & Gordon, 2001; Kroese, Taimre, & Betev, 2011; Paatero & Lund, 2006; Robert & Casella, 2004; Yao & Steemers, 2005; Ren, Paevere, Grozev, Egan, & Anticev, 2013); (2) Markov-Chain technique (Ardakanian et al., 2011; Mcloughlin, Duffy, & Conlon, 2010; Richardson, Thomson, Infield, & Clifford, 2010; Widén, Nilsson, & Wäckelgård, 2009; Widén, Lundh et al., 2009; Widén & Wäckelgård, 2010); and (3) Active occupancy and daily activity profiles (Lopez-Rodriguez, Santiago, Trillo-Montero, Torriti, & Moreno-Munoz, 2013; Richardson & Thomson, 2008; Shimoda, Fujii, Morikawa, & Mizuno, 2004; Santiago, Lopez-Rodriguez, Trillo-Montero, Torriti, & Moreno-Munoz, 2014; Torriti, 2012; Yao & Steemers, 2005, 2014).

Other methods or a combination of several techniques have been used to create consumption load profiles. For instance, Carlson et al. (2013) describe four consumption scenarios to analyse average household electricity consumption. The disadvantage of this method is that it overestimates the number of appliances contributing to a specific energy load, which is not suitable for policy and decision-making.

Vorger (2014) studies the socio-demographic factors influencing residential electricity consumption, and based the characteristics of the rest of the household (age, gender, etc.) on those of the reference person. The author creates consumption profiles based on occupants' activities, generates scenarios and combines individual profiles to develop the model for different types of household (one, two or more occupants). However, this model does not take into account the synchronization between occupants' activities; a couple may eat, go out, watch television or sleep at the same time, whereas singles may spend their time differently. In this model, households are assumed to have several domestic appliances depending on the household budget, and the use of these appliances is likely to be related to the timing of the occupants' activities.

Table 1
Factors determining energy demand in different scenarios.

Scenarios	Dwellings	People / Society	Equipment
Social	Function	Age/ Gender/ Nationality/ Education level/ Health condition/ Household type/ Household size/ Population growth rate/ Social norms	Time of use/ Duration of use
Economic	Dwelling size/ Dwelling type/ Ownership/ Furniture availability/ Affordability/ Features/ Issues	Employment status/ Economic situation/ Incomes/ Energy bills/ Annual GDP/ Unemployment rate	Number/ Type
Technological	Insulations/ Technological evolutions/ Renewable generation		Consumption/ Nominal power/ Standby mode/ Efficiency
Environmental	Location		Climate/ Weather conditions
Behavioural	Domotics/ Home automation	Desired level of comfort/ Culture/ Habits/ Beliefs	Intelligent devices

The present study addresses issues related to the availability of data on ownership and usage of electric appliances. It uses a random survey technique to create typologies, and national survey statistics for data on active occupancy and daily household activities to simulate electricity load profiles for domestic appliance use in the city of Tours (France). The purpose of the study is to fill a gap in the existing literature by identifying the characteristics of household appliance use and hence identify areas for reducing peak demand and overall consumption.

3. Development of Spatio-Temporal Analysis of electric household appliances in Tours

To provide a clear view of the method we used to analyse electricity demand, a roadmap is presented in Fig. 1.

The following steps were used to analyse electricity demand for household appliances in the residential sector, after disaggregation of the demand data into hierarchical levels representing sectors, subsectors, and end-uses focusing on electric appliances.

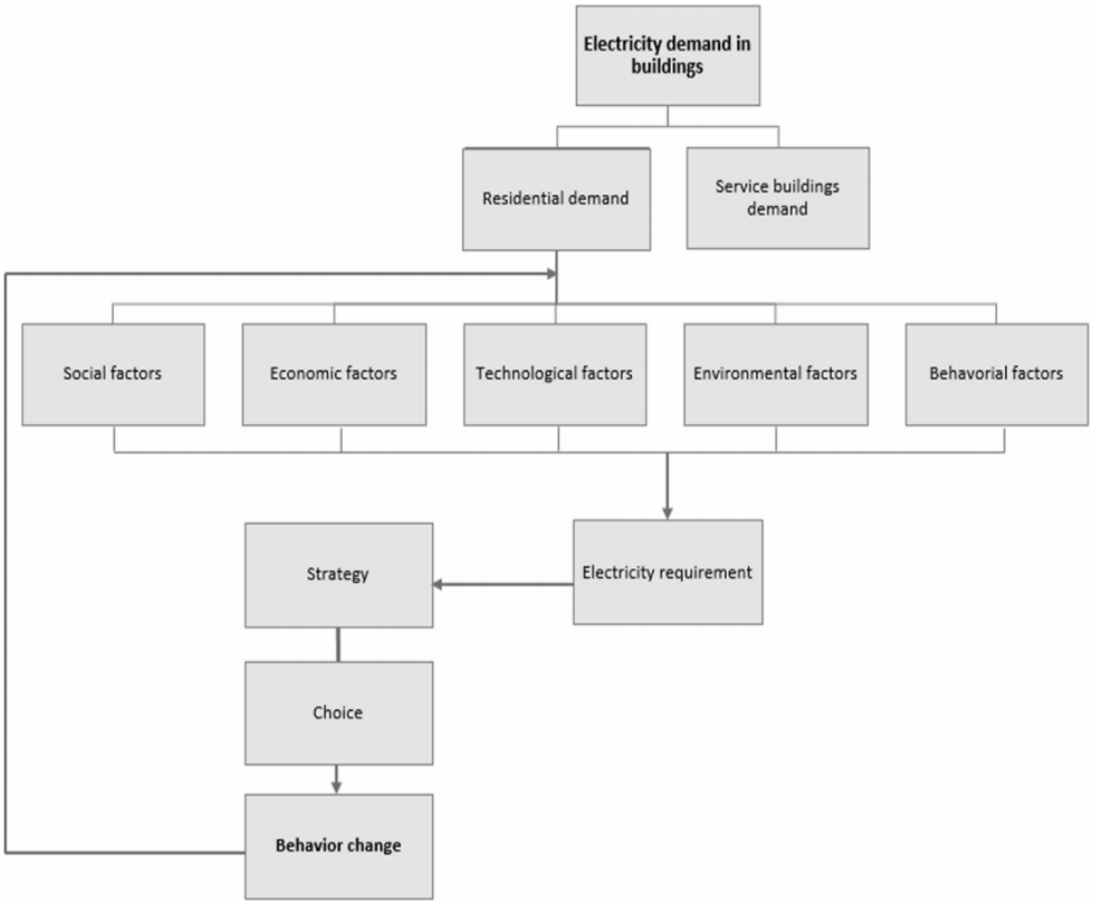


Fig. 2. The relation between energy demand and its determining factors via behaviour change in the residential sector.

3.1. Identification of the parameters determining electricity demand

"The nature and level of the demand for energy depends on several determining factors, including number of inhabitants per dwelling, number of electrical appliances used in households, local priorities for the development of a particular economic sector, the evolution of the efficiency of special types of equipment, penetration of new technologies or energy forms, etc. Identification of these factors is important for energy demand modelling" (Farzaneh, 2019). Identifying these factors can help set up energy-saving policies (Zhang et al., 2012). They can be divided into social, economic, technological, environmental, and behavioural factors (see Table 1). Behavioural factors depend on lifestyle, which is influenced by and dependent on socio-economic, technological and environmental factors (Weber & Perrels, 2000), affecting where people live and their domestic appliances. Understanding these determining factors is key to evaluating the categories of demand on the urban energy system (Farzaneh, Suwa, Dolla, & Oliveira, 2014).

These variables affect the decision-making process of the occupants and can lead to changes in their behaviour. Fig. 2 is a flowchart showing the relationship between energy demand and these factors and how they influence decision making.

To identify the parameters that affect electricity consumption, the first step is to collect primary data. In addition to the monitoring devices mentioned above (e.g. sub-meter installations), there are several data collection techniques in France: 1) Housing surveys including interviews and questionnaires; 2) National surveys and information published by government or local authorities (e.g. Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE); 3) Information about electricity efficiency and end-use consumption details from the technical specifications published in the manuals or on the websites of electrical retailing companies or other electronic device vendors; 4) Aggregated information published by the French electricity transmission authority (Réseau de transport d'électricité, RTE); and 5) Electricity bills issued by utility companies.

In this study, we first carried out large-scale cross-national analysis using data from the French National Institute of Statistics and Economic Studies (INSEE). Assuming there are the same values across regions, we then used the result of the analysis for a smaller urban area. We also carried out housing surveys to complete the dataset. Some additional information was collected from electric appliance manufacturers. Finally, information published by RTE was used for verification.

3.2. Investigation of each parameter and analysis of their effects on energy consumption

Parameters determining electricity demand (Fig. 2) were divided into three categories: a) dwellings, b) occupants, and c) equipment. Each has several dimensions that may have an influence on electricity consumption, and for the purposes of this study, we analysed those related to household electric appliances. Factors affecting hot water, space heating/cooling, lighting or cooking were excluded. Some of these parameters are interrelated or dependent on others.

Table 2
Some domestic electric appliances.

Kitchen/cooking appliances (excluding ovens, stoves and electric hobs)					
1	Blender	13	Egg boiler	25	Mixer
2	Barbeque/grill	14	Fondue maker	26	Orange juice machine
3	Beer dispenser	15	Food waste disposal	27	Pancake maker
4	Bread maker	16	Freezer	28	Popcorn maker
5	Can opener	17	Hot dog maker	29	Raclette maker
6	Coffee grinder	18	Ice-cream maker	30	Refrigerator
7	Coffee machine	19	Juicer/ centrifuge	31	Rice cooker
8	Cotton candy machine	20	Kettle/water boiler	32	Sandwich maker /waffle iron
9	Deep fryer	21	Knife /slicer	33	Steam cooker
10	Dish washer	22	Kitchen hood	34	Tea maker
11	Donut/cupcake maker	23	Meat mincer	35	Toaster
12	Egg-beater	24	Microwave	36	Yogurt maker
Store/Servicing-cleaning appliances					
37	Alarm clock/ Radio	44	Iron	51	Tumble dryer
38	Carpet sweeper	45	Lawn mower	52	Vacuum cleaner
39	Deodorizer	46	Radio	53	Vaporizer/humidifier
40	Drill	47	Saw	54	Washing machine
41	Floor polisher	48	Screwdriver	55	dehumidifier
42	Insect killer	49	Sewing machine		
43	Interphone	50	Shoe polisher		
Living room/Entertainment appliances					
56	Aquarium	60	Guitar amplifier	64	Video game consoles
57	Audio system/Hi Fi	61	Home Theatre	65	Wii
58	Modem/Wireless rooter	62	Keyboard/Piano	66	Decoder/ TV box
59	DVD /CD player	63	Television		
Bathroom/Health-beauty appliances					
67	Epilator	70	Massager	73	Treadmill
68	Hair dryer	71	Razor		
69	Hair styler	72	Tooth brush		
Office appliances					
74	Answering machine	77	Speakers	80	Printer/scanner/ copier
75	Charger (telephone)	78	laptop	81	Telephone
76	CPU	79	Fax machine	82	Tablet

a) Dwellings: some studies have found a higher level of consumption in households in larger dwellings with more bedrooms. No direct relationship has been found between the location of the dwelling and the electric appliances used. However, in colder mountainous areas of France, the use of appliances such as "Fondue" or "Raclette" makers is likely to be more common. Primary residences may be better equipped in terms of electric appliances than holiday homes, *but no studies have been found* to confirm this theory. According to Levinson and Niemann (2004), tenants are more energy-consuming than owners. This is particularly the case when energy costs are included in the monthly rent, as the tenants then have little incentive to save or use energy efficiently. However, other studies show that owners consume more, or less efficiently, than tenants (Twerefou & Abeney, 2020), which could be explained by owners buying more furniture and equipment, including electric appliances, although there is no evidence to support this hypothesis. It could also be related to the owners' income. As tenants p*ay a monthly rent, they* might be more conservative on energy bills (Twerefou & Abeney, 2020). Privately owned rented houses have a higher demand profile than social housing rented by low-income families and homes with households with financial difficulties who thus have lower purchasing power. Other factors, such as having a garden, may also influence energy consumption due to use of electric gardening tools.
b) Occupants: differences in race, gender, cultural practices, traditions and habitual behaviours, age, employment status, education level, financial status and health of household members lead to different patterns of electricity demand, due either to personal preferences, habits and requirements, or to the level of income or electricity consumption awareness. Household composition and size (the number of adults and children) and their relationship also have an important influence on electricity consumption. The household includes all the people living in the same dwelling, whether or not they are related. In other words, the word household can describe a traditional family unit, or non-familial households, or even a single person living alone.
c) Electric appliances: occupants influence the electricity use of a dwelling both by the electric appliances they buy, and by how often they use these appliances. However, to determine electricity demand, it is also important to know how long the appliances have been used. Variations in the type of electric appliance and semi-random use of them by occupants makes domestic electricity demand difficult to predict with accuracy, particularly for short periods of time such as an hour or less. However, in order to design and implement energy-efficient measures and generate on-site electricity, we need a thorough understanding of domestic electricity consumption and demand and knowledge of the type of appliances and their time and duration of use.

The references, approaches and procedure to collect the required data may vary according to the availability of data about each appliance. This information was collected on appliances presented below in Table 2.

The average use of an appliance might vary due to differences in size, model, age, capacity, function, efficiency, performance, etc. of appliances produced by different manufacturers (e.g. a 30" CRT TV made in 2007 versus a 46" LCD TV produced recently). The average time of use shown in these tables is for all types of occupants, irrespective of their occupation, education, financial status, or other factors.

3.3. Elimination of less impacting variables and identifying the most effective

In order to evaluate electricity consumption, it is first necessary to categorize and identify relevant parameters. This can be based on mathematical modelling, such as linear regression, alongside user-expert knowledge. However, it is not a simple task, as analyses based on statistical data are sensitive to correlations between parameters. We thus carried out Principal Component Analysis (PCA) to reduce the dimensionality of the data set while retaining as much information as possible.

It is only possible to assess the relationship or correlation between data that are quantifiable (e.g. dwelling size, financial status, etc.) and not categorical (e.g. gender, ethnic group, health), as stated in (2020). However, little or no relationship was found between the electricity consumption of electric appliances and the above-mentioned categorical parameters (apart from occupants' gender and household type). We therefore examined the relationship between the quantifiable parameters of dwelling size, occupant's age, household size and household income, and the relationship between these variables and the number of appliances possessed by the household.

Different methods can be used to collect quantitative and qualitative data regarding households, where they live, and the electric appliances they possess. Due to lack of funding and access to smart metering devices, and to the complexity of the French administration system in relation to the Data Protection Act ("*loi no 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés*") regarding the use of data collected by electricity suppliers, we sent a questionnaire online randomly to 24 volunteers living in the study area (response rate 100 %). This questionnaire had three sections: 1) information about the respondent and his/her household, 2) dwelling characteristics, and 3) electric appliances possessed and used by the household (from the list of 82 appliances shown in Table 2).

Table 3
Descriptive statistics of the variables influencing electricity demand.

Variables	Data	Analysed as	Number of observations	Missing value	Min	Max	Mean	Standard deviation
X1	Size of dwelling	m2	54	0	12	300	72.72	61.23
X2	Age	Years old	54	0	18	64	33.43	10.87
X3	Household size	Number of people	54	0	1	7	2.46	1.48
X4	Financial status (annual income)	Euros	54	0	2500	78499.5	23749.56	16588.38
N	Number of electric appliances	Number of appliances	54	0	7	68	26.63	12.62

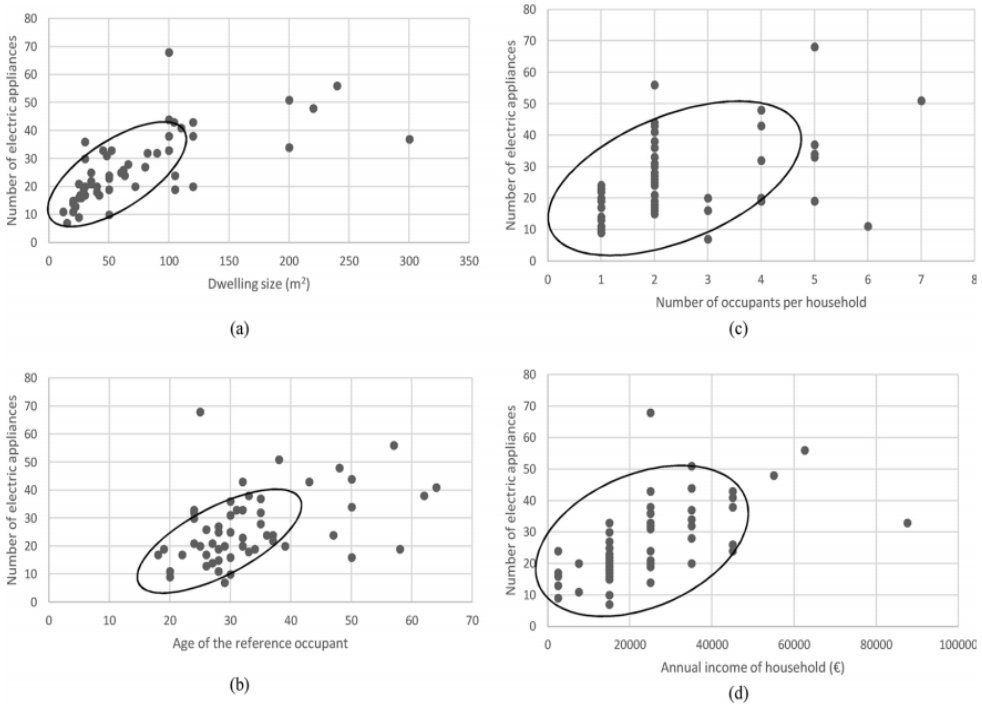


Fig. 3. Correlations between the studied variables: (a) size of dwelling and number of appliances; (b) age of occupants and number of electric appliances; (c) size of household and number of electric appliances; (d) size of household and number of electric appliances.

The objective of this questionnaire was to determine the relationship between type of electric appliances used by the household and dwelling characteristics (size, age, type, location, etc.) and household characteristics (e.g. type, ages, income, education level, length of occupancy). In order to maximize the diversity of responses and to extend the initial sample, we conducted an online open-access survey, which provided 30 further answers from different locations in France, giving a total of 54 responses covering all age groups, household types, dwelling types, etc. identified in French National statistics. Due to time constraints, it was not possible to investigate a larger sample.

Mean values and standard deviations of the variables shown by the questionnaire to have the greatest impact on electricity demand are presented in Table 3.

As shown in Fig. 3, the sensitivity between variables was studied and analysed to identity how they are inter-related and to eliminate negligible variables.

Data illustrated in Fig. 3 show that all the variables analysed were positively correlated with the number of electric appliances. However, to interpret these correlations and to reduce the number of variables, we performed a Principal Component Analysis (PCA). Using Eq. 1, we calculated the correlation between every two X and Y variables.

Table 4
Correlation matrix for the variables influencing electricity demand.

	Size of dwelling (Y1)	Age of reference person in household (Y2)	Household size (Y3)	Financial status of household (Y4)
Size of dwelling (X1)	1	0.488733327	0.546429620	0.639449166
Age of reference person in household (X2)	0.488733327	1	0.091018335	0.422255729
Household size (X3)	0.546429620	0.091018335	1	0.388256237
Financial status of household (X4)	0.639449166	0.422255729	0.388256237	1

Table 5
Calculation of initial eigenvalues for PCA for the variables influencing electricity demand.

	X1	X2	X3	X4
Eigenvalue	2.330331575	0.912629659	0.285127848	0.471910918
Eigenvectors	0.590010960	0.051460671	0.801594953	−0.081758161
	0.417967981	-0.708861170	-0.310657282	-0.475721202
	0.428966055	0.7005560344	-0.401970403	-0.404503553
	0.541459100	-0.063897152	-0.315210057	0.776776555
Variance	3749.22327	118.060447	2.17784766	275174481.2

Table 6
Calculation of cumulative proportion for PCA.

Component number	Variable name	Proportion of variance (eigenvalue/total variance)	Cumulative proportion of variance
1st	X1	58.25 %	58.25 %
2nd	X2	22.82 %	81.07 %
3rd	X4	11.80 %	92.87 %
4th	X3	7.13 %	100 %

Table 7
Variables affecting electricity consumption of electric appliance end-user.

Quantifiable Variables	Occupants' age (<25, between 25 and 65, >65)	Dwelling size (<40, between 40 and 100, >100)	Household size (1, 2, 3,…)
Categorical Variables	Occupants' gender (M, F)	Activity (active, inactive)	Household type (single, mono-parental, couple, family, complex)

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \overline{X}\right)\left(Y_i - \overline{Y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \overline{X}\right)^2\left(Y_i - \overline{Y}\right)^2}} \quad (1)$$

where X and Y are the correlated variables, and $\overline{X}$ bar and $\overline{Y}$ bar are the means of X and Y.

Correlations r_{XY} between these variables are shown in Table 4. Size of dwelling (X1), financial status (X4), age of household participant (X2) and household size (X3) contribute most to the number of electric appliances owned by each household. Size of dwelling (X1) was correlated with financial status (Y4) and had the highest correlation coefficient (0.639), indicating that the higher the financial status, the larger the dwelling. This enabled us to remove the variables that had already been taken into account due to their multi-collinearity. To identify the variables responsible for the variation in the number of appliances, an input matrix is presented in Table 4.

The determinant of the matrix is calculated as 0.286161998, from which we derived eigenvalues, eigenvectors and variance of each variable, as shown in Table 5.

Each eigenvalue divided by the sum of eigenvalues (total variance) yields a number representing the amount of variation accounted for by each variable. The sum of this number with its successive number indicates the running total variation. For example, 81.07 % of variation can be explained by the first and second variables even when the 3rd and 4th components have been removed (see Table 6). This assumes that the first two components (size of dwelling and age of occupants) explain sufficient variation and at the same time have high correlations with X3 (0.55) and X4 (0.64). In this way, X1 and X2 are referred to as principal components.

Table 8
Different typologies and possibilities of consumer profiles.

No. 1−45	Typologies Age + type of household + size of dwelling	Possibilities Activity / non-activity of each household member
1	Y SM S	1) AM, 2) IM, 3) AF, 4) IF
2	Y SM M	1) AM, 2) IM, 3) AF, 4) IF
3	Y SM L	1) AM, 2) IM, 3) AF, 4) IF
4	MA SM S	1) AM, 2) IM, 3) AF, 4) IF
5	MA SM M	1) AM, 2) IM, 3) AF, 4) IF
6	MA SM L	1) AM, 2) IM, 3) AF, 4) IF
7	O SM S	1) IM, 2) IF
8	O SM M	1) IM, 2) IF
9	O SM L	1) IM, 2) IF
10	Y C S	1) AMs, 2) AFs, 3) AM & AF, 4) IMs, 5) IFs, 6) IM & IF, 7) IM & AF, 8) IF & AM, 9) AM & IM, 10) AF & IF
11	Y C M	1) AMs, 2) AFs, 3) AM & AF, 4) IMs, 5) IFs, 6) IM & IF, 7) IM & AF, 8) IF & AM, 9) AM & IM, 10) AF & IF
12	Y C L	1) AMs, 2) AFs, 3) AM & AF, 4) IMs, 5) IFs, 6) IM & IF, 7) IM & AF, 8) IF & AM, 9) AM & IM, 10) AF & IF
13	MA C S	1) AMs, 2) AFs, 3) AM & AF, 4) IMs, 5) IFs, 6) IM & IF, 7) IM & AF, 8) IF & AM, 9) AM & IM, 10) AF & IF
14	MA C M	1) AMs, 2) AFs, 3) AM & AF, 4) IMs, 5) IFs, 6) IM & IF, 7) IM & AF, 8) IF & AM, 9) AM & IM, 10) AF & IF
15	MA C L	1) AMs, 2) AFs, 3) AM & AF, 4) IMs, 5) IFs, 6) IM & IF, 7) IM & AF, 8) IF & AM, 9) AM & IM, 10) AF & IF
16	O C S	1) IMs, 2) IFs, 3) IM & IF
17	O C M	1) IMs, 2) IFs, 3) IM & IF
18	O C L	1) IMs, 2) IFs, 3) IM & IF
19	Y F S	1) AMs & C(s), 2) AFs & C(s), 3) AM & AF & C (s), 4) IMs & C(s), 5) Ifs & C(s), 6) IM & IF & C (s), 7) IM & AF &C(s), 8) IF & AM & C(s), 9) AM & IM & C(s), 10) AF & IF & C(s)
20	Y F M	1) AMs & C(s), 2) AFs & C(s), 3) AM & AF & C (s), 4) IMs & C(s), 5) Ifs & C(s), 6) IM & IF & C (s), 7) IM & AF &C(s), 8) IF & AM & C(s), 9) AM & IM & C(s), 10) AF & IF & C(s)
21	Y F L	1) AMs & C(s), 2) AFs & C(s), 3) AM & AF & C (s), 4) IMs & C(s), 5) Ifs & C(s), 6) IM & IF & C (s), 7) IM & AF &C(s), 8) IF & AM & C(s), 9) AM & IM & C(s), 10) AF & IF & C(s)
22	MA F S	1) AMs & C(s), 2) AFs & C(s), 3) AM & AF & C (s), 4) IMs & C(s), 5) Ifs & C(s), 6) IM & IF & C (s), 7) IM & AF &C(s), 8) IF & AM & C(s), 9) AM & IM & C(s), 10) AF & IF & C(s)
23	MA F M	1) AMs & C(s), 2) AFs & C(s), 3) AM & AF & C (s), 4) IMs & C(s), 5) Ifs & C(s), 6) IM & IF & C (s), 7) IM & AF &C(s), 8) IF & AM & C(s), 9) AM & IM & C(s), 10) AF & IF & C(s)
24	MA F L	1) AMs & C(s), 2) AFs & C(s), 3) AM & AF & C (s), 4) IMs & C(s), 5) Ifs & C(s), 6) IM & IF & C (s), 7) IM & AF &C(s), 8) IF & AM & C(s), 9) AM & IM & C(s), 10) AF & IF & C(s)
25	O F S	1) IMs & C(s), 2) Ifs & C(s), 3) IM & IF & C(s)
26	O F M	1) IMs & C(s), 2) Ifs & C(s), 3) IM & IF & C(s)
27	O F L	1) IMs & C(s), 2) Ifs & C(s), 3) IM & IF & C(s)
28	Y MPS	1) AM & C(s), 2) IM & C(s), 3) AF & C(s), 4) IF & C(s)
29	Y MPM	1) AM & C(s), 2) IM & C(s), 3) AF & C(s), 4) IF & C(s)
30	Y MP L	1) AM & C(s), 2) IM & C(s), 3) AF & C(s), 4) IF & C(s)
31	MA MP S	1) AM & C(s), 2) IM & C(s), 3) AF & C(s), 4) IF & C(s)
32	MA MP M	1) AM & C(s), 2) IM & C(s), 3) AF & C(s), 4) IF & C(s)
33	MA MP L	1) AM & C(s), 2) IM & C(s), 3) AF & C(s), 4) IF & C(s)
34	O MP S	1) IM & C(s), 2) IF & C(s)
35	O MP M	1) IM & C(s), 2) IF & C(s)
36	O MP L	1) IM & C(s), 2) IF & C(s)

(continued on next page)

Table 8 (*continued*)

No. 1–45	Typologies Age + type of household + size of dwelling	Possibilities Activity / non-activity of each household member
37	Y CO S	1) AMs, 2) AFs, 3) AMs & AFs, 4) IMs, 5) IFs, 6) IMs & IFs, 7) IMs & AFs, 8) IFs & AMs, 9) AMs & IMs, 10) AFs & IFs
38	Y CO M	1) AMs, 2) AFs, 3) AMs & AFs, 4) IMs, 5) IFs, 6) IMs & IFs, 7) IMs & AFs, 8) IFs & AMs, 9) AMs & IMs, 10) AFs & IFs
39	Y CO L	1) AMs, 2) AFs, 3) AMs & AFs, 4) IMs, 5) IFs, 6) IMs & IFs, 7) IMs & AFs, 8) IFs & AMs, 9) AMs & IMs, 10) AFs & IFs
40	MA CO S	1) AMs, 2) AFs, 3) AMs & AFs, 4) IMs, 5) IFs, 6) IMs & IFs, 7) IMs & AFs, 8) IFs & AMs, 9) AMs & IMs, 10) AFs & IFs
41	MA CO M	1) AMs, 2) AFs, 3) AMs & AFs, 4) IMs, 5) IFs, 6) IMs & IFs, 7) IMs & AFs, 8) IFs & AMs, 9) AMs & IMs, 10) AFs & IFs
42	MA CO L	1) AMs, 2) AFs, 3) AMs & AFs, 4) IMs, 5) IFs, 6) IMs & IFs, 7) IMs & AFs, 8) IFs & AMs, 9) AMs & IMs, 10) AFs & IFs
43	O CO S	1) IMs, 2) IFs, 3) IMs & IFs, 4) IMs & AFs, 5) IFs & AMs, 6) AMs & IMs, 7) AFs & IFs
44	O CO M	1) IMs, 2) IFs, 3) IMs & IFs, 4) IMs & AFs, 5) IFs & AMs, 6) AMs & IMs, 7) AFs & IFs
45	O CO L	1)IMs, 2) IFs, 3) IMs & IFs, 4) IMs & AFs, 5) IFs & AMs, 6) AMs & IMs, 7) AFs & IFs

Legend: Age of the reference person (Y: Young, MA: Middle-aged, O: Older) Type of household (Single-member: SM, Couple: C, Family: F, Mono-parental: MP, Complex: CO) Size of dwelling (S: Small, M: Medium, L: Large) Occupation (A: Active, I: Inactive) Individual (M: Adult Male, F: Adult Female, C: Child).

3.4. Classification and examination: defining different profile typologies, inputting the statistical data at the urban scale and removing typologies with insignificant values

The quantifiable and categorical variables that affect the electricity consumption of electric appliances and their possible categories are presented in Table 7.

For a more precise analysis, we examined household type, which intrinsically includes household size, as households consisting of two people may differ in structure (e.g. a single-parent family consisting of a father and child, a couple consisting of two adults) and thus show different patterns of electricity demand.

In this way, five factors were identified as having the greatest effect on residential electricity consumption related to electric appliances. Dividing each factor into its possible categories and multiplying them by each other yields various scenarios and different possibilities for each. These categories are based on population census data and activity/employment status (student, employee, retired, etc.). The combination of these variables creates many typologies (Table 8).

However, not all typologies necessarily exist. Therefore, after verification with national statistics, we eliminated those that were not available.

The neighbourhoods in this study are based on IRIS division (districts grouped for statistical information in France) in order to ensure homogeneity in terms of number of habitants per district (Fig. 4). Table 9 presents the percentage of different dwelling sizes, age of household members and household types in 22 districts of the city of Tours, derived from the French Population Census of 2010 published by INSEE.

In this database, small dwellings are those with a floor area of less than 40 m^2, medium dwellings between 40 and 100 m^2, and large dwellings 100 m^2 and over. A young reference person is aged between 15 and 24 years, a middle-aged person is aged 25–65 years, and older is 65 and over. For example, in the Centre district, 67 % of households are single, 16 % are composed of couples without children, 7% couples with children, 5% are complex households, and 5% are single-parent households. Regarding the household reference person, the largest category (46 %) is middle-aged; younger and older head of households represent 34 % and 20 % respectively. Regarding dwelling size, 49 % of the total number have a surface area between 40 and 100 m^2, 39 % less than 40 m^2, and only 12 % have a surface area of 100 m^2 or above (see Table 9).

The percentage of each typology in each neighbourhood can be estimated from the variables revealed by PCA to have the greatest effect. For example, about 37.6 % of households living in the district of "Les Fontaines" (No. 21) are aged between 25–65 years and live alone in a dwelling of 40 to 100 m^2, 6.8 % are in the same age category and live in a dwelling of less than 40 m2, 6.5 % are under 25 years old and live in a dwelling of 40 to 100 m^2, 1.2 % in the same age category live in a dwelling of less than 40 m^2, and finally 0.1 % live in dwellings larger than 100 m^2 (Table 10) (All these percentages concern only single-member households living in Les Fontaines). This suggests that the probability of finding some of the typologies in certain neighbourhoods is zero or close to zero in this sample. At this stage, we eliminated these typologies in order to reduce the number of scenarios.

Nine typologies listed in Table 11 were eliminated:

3.5. Attribution: identification of electric appliances for each typology based on the energy survey and statistical analyses

In order to identify consumption patterns, we need to know which appliances are used most by different households. From the initial survey, it was possible to estimate the percentage of households that own each appliance and therefore determine the most common appliances, as shown in Table 12.

For instance, as illustrated in Fig. 5, 100 % of our sample own mobile phones and refrigerators, and only 10.4 % possess a fax machine. In this way, we were able to remove the least commonly owned appliances from this table, and by comparing similar households and their appliances, it was possible to attribute different appliances to each of the typologies in relation to the proportion of households possessing the appliance (Table 13).

3.6. Occupation: analysis of temporal variations in the model by considering the occupants' activities

We estimated the average length of time of use for different electric appliances on different temporal scales based on the average daily schedule of people aged over 15 years living in Metropolitan France . This includes Saturdays, Sundays, public holidays and days away from the principal residence (e.g. vacations abroad or in other cities). Thus, multiplying this figure by 7 and 365 will respectively yield weekly and annual average time spent on each activity. For instance, male students devote 11 h and 49 min of their day to physiological activities, which include sleeping, eating, personal care, hygiene and beautification. A great deal of information can be derived from this statistic (schedule of activities of French individuals by occupation and gender in Metropolitan France in 2010). For example, it is possible to ascertain sleeping time on a given type of day, based on sleeping time, number of working days, number of public holidays, etc., or to calculate the approximate time individuals wake up during the week and consequently the length of time they sleep from information about the time spent travelling to and from work, washing, dressing and eating, and the start and end of a working day. Some activities that necessarily take place outside the principal residence are also included, such as meeting friends, jogging, travelling to places other than work or school, etc. From these data it was possible to calculate the average time spent at home for each category of population, depending on gender and professional situation (student, employee, independent contractor/employer, unemployed, housewife, retired), which in turn enabled us to estimate time of use of appliances that are occupancy dependent. For the purpose of this study, these data are divided into active and inactive categories. The activities of interest for modelling are those that involve electric appliances, as shown in Table 14. The occupants were also categorized by gender and

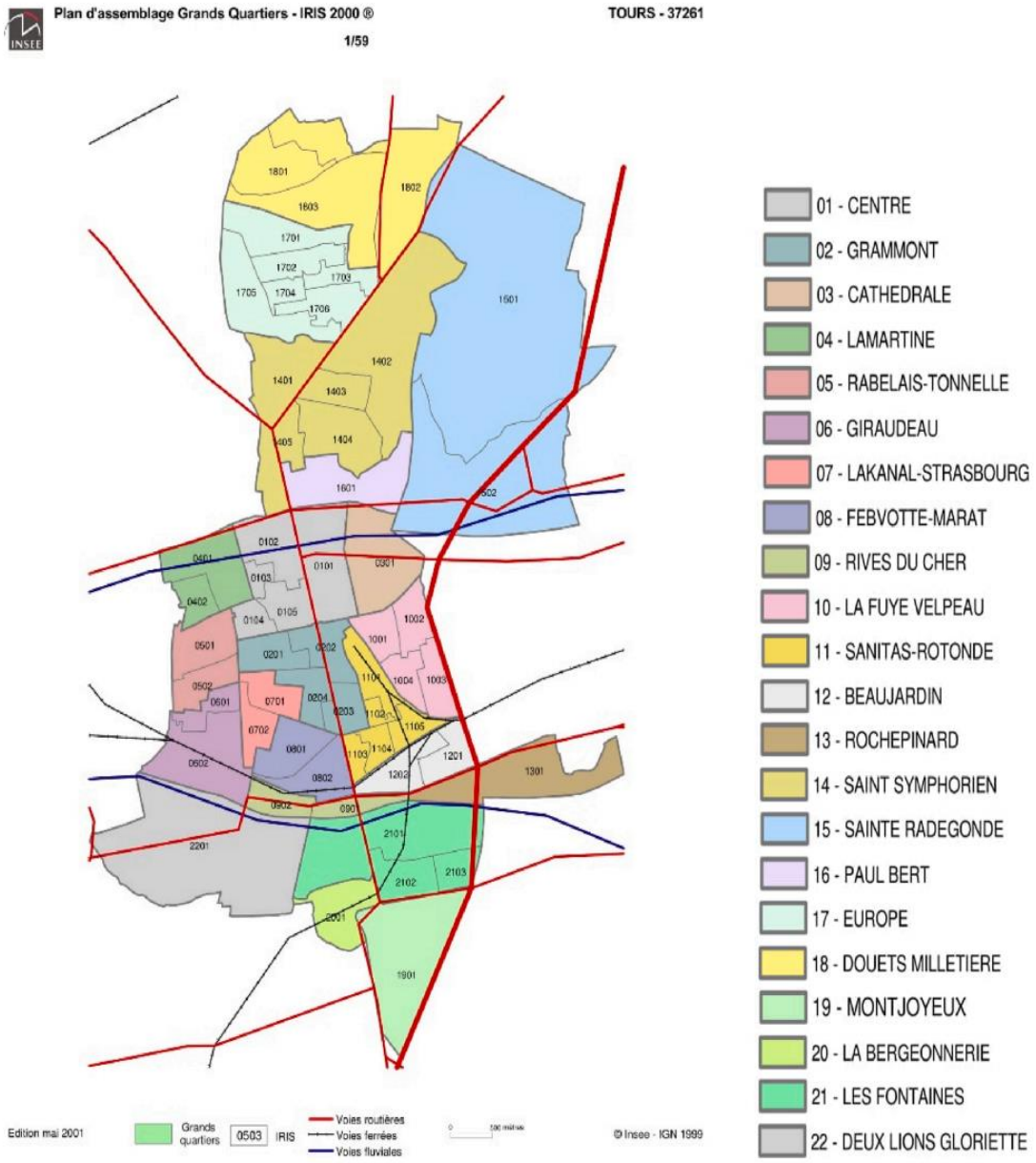


Fig. 4. 22 neighbourhoods of Tours (France) according to IRIS division by INSEE 2000.

activity, and the average time spent on each activity was then calculated.

Some activities, such as telephoning, watching television and sending or receiving emails, inevitably require the use of electric appliances, whereas others do not, which makes modelling difficult. The objective was thus to determine how much time is spent using each electric appliance. For example, an active male spends an average of 51 min per day on toiletry and personal care, but he may only use his electric shaver 5 min per day. On the other hand, he spends 54 min per day on cooking and cleaning, but the time of use of his rice cooker, washing machine, kettle, etc. may exceed 54 min as his activities can overlap, and several activities do not need his presence and might not be calculated in the 54 min. For example, the domestic work time of an individual may include the time spent putting the dirty laundry in the washing machine and removing the clean laundry, with no information about the time the washing machine is running. Moreover, one can cook while the television is on, and therefore may not note "watching television" when responding to national surveys that are based on a 24 -h program and do not take into account overlapping activities. In other words, in every 24 h, the quantity of electricity consumed may be considerably more than this time.

This is another challenge for the simulation of domestic electricity demand using individuals' schedules of activity. The previous table is thus summed up per individual in Table 15, showing some of the electric appliances that might be used for each activity.

The time of use per occupant is shown in Table 14, but given that

Table 9
Statistical analysis of size of dwellings, age of reference person and type of household in 22 districts of Tours, in percentage.

District IRIS No.	Size of dwelling			Age of reference person			Type of household					Total number of households
	Small	Medium	Large	Young	Middle -aged	Older	Single	Couple	Family	Mono-parental	Complex	
1	39	49	12	34	46	20	67	16	7	5	5	7842
2	30	49	21	26	47	27	56	20	14	4	5	6538
3	33	47	20	31	51	18	57	19	15	4	4	2069
4	32	63	5	25	50	24	61	16	11	8	4	3206
5	32	58	10	31	44	25	58	20	11	7	4	3147
6	25	72	4	21	50	29	50	18	17	14	2	2363
7	27	50	23	21	49	30	55	20	15	6	5	2870
8	13	70	17	19	55	26	45	24	19	8	4	2788
9	2	86	12	12	42	47	43	27	16	10	5	2162
10	27	61	13	20	50	30	57	22	12	5	4	5378
11	31	66	3	21	46	34	53	12	18	14	3	5318
12	9	81	9	11	51	38	43	23	19	10	4	2027
13	15	80	5	10	45	46	49	21	18	10	2	972
14	14	73	14	15	51	33	48	25	16	9	3	6663
15	13	61	26	19	57	24	35	29	26	8	3	2907
16	30	51	19	33	51	16	59	24	11	4	2	1485
17	12	81	7	13	49	39	44	26	17	12	2	5139
18	5	78	17	16	54	31	28	35	27	9	1	1439
19	49	47	4	48	34	18	70	14	10	4	2	1822
20	44	55	1	29	41	30	58	20	12	7	2	971
21	17	83	3	14	54	32	56	17	15	10	2	4017
22	48	48	3	50	40	10	71	17	5	3	4	1081
Total	545	1409	248	519	1057	627	1163	465	331	171	72	72,207

Table 10
Percentage of existing consuming typologies in different neighbourhoods of Tours.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	N/T
8,9	4,4	5,8	4,9	5,8	2,5	3,1	1,1	0,1	3,1	3,4	0,5	0,7	1,0	0,9	5,9	0,7	0,2	22,7	7,3	1,2	16,9	1
11,2	7,2	8,3	9,6	10,4	7,5	5,8	6,0	4,4	7,0	7,3	3,9	4,0	5,2	4,1	10,0	4,7	3,5	21,8	9,2	6,5	16,9	2
2,7	3,1	3,5	0,7	1,8	0,4	2,6	1,4	0,6	1,4	0,3	0,4	0,2	0,9	1,8	3,7	0,4	0,8	1,9	0,2	0,1	1,5	3
16,0	11,5	12,1	13,3	11,7	8,8	11,0	4,3	0,6	11,2	12,5	3,5	6,1	5,0	3,4	9,6	4,3	1,1	9,3	17,0	6,8	16,7	4
20,1	18,7	17,2	26,2	21,2	26,5	20,3	23,2	28,6	25,2	26,6	28,1	32,4	26,0	16,1	16,3	28,9	17,7	8,9	21,2	37,6	16,7	5
4,9	8,0	7,3	2,1	3,7	1,5	9,4	5,6	4,0	4,9	1,2	3,1	2,1	4,6	6,8	6,1	2,5	3,9	0,8	0,4	0,9	1,4	6
1,3	1,0	0,9	1,4	1,1	0,6	0,7	0,4	0,1	1,2	0,5	0,4	0,6	0,7	0,3	2,3	0,3	0,1	2,4	1,0	0,4	0,4	7
1,6	1,7	1,4	2,7	2,0	1,8	1,4	2,2	4,1	2,8	1,1	3,2	3,1	3,5	1,3	4,0	2,1	0,6	2,3	1,3	2,3	0,4	8
0,4	0,7	0,6	0,2	0,3	0,1	0,6	0,5	0,6	0,6	0,1	0,3	0,2	0,6	0,6	1,5	0,2	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	9
2,2	1,6	2,0	1,2	2,0	0,9	1,1	0,6	0,1	1,2	0,8	0,2	0,3	0,5	0,7	2,4	0,4	0,3	4,6	2,6	0,3	4,1	10
2,7	2,6	2,8	2,5	3,5	2,7	2,1	3,2	2,7	2,7	1,7	2,1	1,7	2,7	3,4	4,0	2,7	4,4	4,3	3,2	2,0	4,1	11
0,7	1,1	1,2	0,2	0,6	0,1	0,9	0,8	0,4	0,5	0,1	0,2	0,1	0,5	1,4	1,5	0,2	1,0	0,4	0,1	0,0	0,3	12
3,9	4,2	4,1	3,4	4,0	3,1	3,9	2,3	0,4	4,3	2,9	1,9	2,6	2,6	2,8	3,8	2,5	1,5	1,9	6,1	2,0	4,0	13
4,9	6,8	5,8	6,7	7,2	9,3	7,3	12,7	17,6	9,7	6,1	15,0	13,9	13,4	13,2	6,5	16,9	22,4	1,8	7,5	11,3	4,0	14
1,2	2,9	2,5	0,5	1,2	0,5	3,4	3,1	2,5	1,9	0,3	1,7	0,9	2,4	5,6	2,4	1,5	4,9	0,2	0,1	0,3	0,4	15
0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,2	0,0	0,5	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,9	0,2	0,1	0,5	0,4	0,1	0,1	16
0,4	0,6	0,4	0,7	0,7	0,6	0,5	1,2	2,5	1,1	0,2	1,7	1,3	1,8	1,1	1,5	1,3	0,8	0,4	0,4	0,7	0,1	17
0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2	0,3	0,4	0,2	0,0	0,2	0,1	0,3	0,4	0,6	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	18
0,9	1,1	1,6	0,9	1,1	0,8	0,8	0,5	0,0	0,6	1,2	0,2	0,3	0,3	0,6	1,1	0,3	0,2	3,1	1,5	0,3	1,2	19
1,1	1,8	2,2	1,7	2,0	2,5	1,6	2,5	1,6	1,4	2,5	1,7	1,4	1,7	3,0	1,8	1,8	3,3	3,0	2,0	1,7	1,2	20
0,3	0,8	1,0	0,1	0,3	0,1	0,7	0,6	0,2	0,3	0,1	0,2	0,1	0,3	1,3	0,7	0,2	0,7	0,3	0,0	0,0	0,1	21
1,6	2,9	3,2	2,3	2,2	3,0	3,0	1,8	0,2	2,3	4,2	1,5	2,3	1,7	2,5	1,8	1,6	1,0	1,3	3,5	1,8	1,2	22
2,0	4,7	4,6	4,6	4,0	8,8	5,4	9,6	10,6	5,2	8,9	12,5	11,9	8,7	11,7	2,9	11,0	16,7	1,2	4,3	9,8	1,2	23
0,5	2,0	1,9	0,4	0,7	0,5	2,5	2,3	1,5	1,0	0,4	1,4	0,7	1,5	5,0	1,1	1,0	3,7	0,1	0,1	0,2	0,1	24
0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,0	25
0,2	0,4	0,4	0,5	0,4	0,6	0,4	0,9	1,5	0,6	0,3	1,4	1,1	1,2	0,9	0,7	0,8	0,6	0,3	0,3	0,6	0,0	26
0,0	0,2	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	27
0,7	0,4	0,4	0,7	0,7	0,7	0,3	0,2	0,0	0,3	0,9	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,2	0,1	1,3	0,9	0,2	0,6	28
0,8	0,6	0,6	1,3	1,3	2,1	0,6	1,0	1,0	0,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,9	0,7	1,2	1,1	1,2	1,2	1,2	0,6	29
0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,4	0,3	0,1	0,3	0,1	0,0	0,0	0,1	30
1,2	0,9	0,8	1,8	1,4	2,5	1,1	0,8	0,1	1,1	3,3	0,8	1,1	1,0	0,8	0,7	1,1	0,4	0,5	2,3	1,2	0,6	31
1,5	1,5	1,2	3,5	2,6	7,3	2,2	4,1	6,5	2,4	7,1	6,8	6,4	5,1	3,5	1,2	7,7	5,8	0,5	2,8	6,9	0,6	32
0,4	0,6	0,5	0,3	0,4	0,4	1,0	1,0	0,9	0,5	0,3	0,7	0,4	0,9	1,5	0,5	0,7	1,3	0,1	0,0	0,2	0,1	33
0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,1	0,0	34
0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,5	0,1	0,4	0,9	0,3	0,3	0,7	0,7	0,7	0,3	0,3	0,6	0,2	0,1	0,2	0,4	0,0	35
0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	36
0,6	0,4	0,4	0,3	0,4	0,1	0,3	0,1	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,7	0,3	0,0	1,1	37
0,8	0,6	0,6	0,7	0,8	0,0	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,2	0,1	0,6	0,4	0,3	1,1	38
0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	39
1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	0,4	0,9	0,4	0,1	0,7	0,7	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,0	0,3	0,7	0,2	1,0	40
1,5	1,7	1,3	1,9	1,6	1,3	1,7	2,2	3,1	1,5	1,4	2,4	1,0	1,5	1,2	0,6	1,1	0,4	0,3	0,9	1,6	1,0	41
0,4	0,7	0,5	0,2	0,3	0,1	0,8	0,5	0,4	0,3	0,1	0,2	0,0	0,3	0,5	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	42
0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	43
0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,5	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	44
0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45
100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	Total

households are a set of individual occupants, this time changes and becomes more complicated to analyse. For example, for a household consisting of several people, some of the activities may be done by a single person or shared. For example, one person may cook for two, or they may watch television at the same time. As cooking time is almost the same for one or two people, we can take the longer time spent by each person as the time the household spends on cooking/cleaning activity (although, it might be slightly longer when cooking/cleaning for two). In other activities, such as using the Internet or telephone, each person uses the appliance separately. Thus, the time of use is the sum of the time spent by each person. This highlights the importance of considering household type as a variable affecting electricity consumption. The numbers in Table 14 are average times and depend on the category in which active and inactive people belong. For example, the time devoted to cooking and cleaning by an active male is 54 min on average, but might be less for an active man living with an inactive

Table 11
Eliminated typologies.

Initial typology number	Description	Maximum possible percentage of total population in the city
T25	families with reference person over 65 years old, live in less than 40 m2	0.9%
T27	families with reference person over 65 years old, live in more than 100 m2	0.5%
T30	mono-parental households with reference person less than 25 years old live, live in more than 100 m2	0.2%
T34	mono-parental households with reference person less than 65 years old live, live in less than 40 m2	0.5%
T36	mono-parental households with reference person less than 65 years old live, live in more than 100 m2	0.2%
T39	complex households with reference person less than 25 years old live, live in more than 100 m2	0.1 %
T43	complex households with reference person more than 65 years old live, live in less than 40 m2	0.2%
T44	complex households with reference person more than 65 years old live, live between 40 and 100 m2	0.6%
T45	complex households with reference person more than 65 years old live, live in more than 100 m2	0.1 %

Table 12
The most widely possessed electric appliances within studied sample.

Personal computer (PC)	Laptop (L)	Modem (M)	Tablet (T)
Printer/Scanner/ Photocopier (P)	Audio System (A)	Speakers (S)	Television (TV)
Television box (TVB)	DVD/Video/Blu-ray player (DVD)	Home cinema (HC)	Mobile (MO)
Telephone (TE)	Fax (F)	Refrigerator (R)	Freezer (FR)
Multi-function pastry robot (MF)	Mixer (MI)	Blender (B)	Egg beater (E)
Knife (K)	Hood (H)	Microwave (MW)	Rice cooker (RC)
Deep fryer (DF)	Fondue maker (FM)	Raclette maker (RM)	Crepe maker (C)
Sandwich maker/ Waffle iron (SW)	Dish washer (DW)	Coffee machine (CM)	Water boiler (W)
Orange juice maker (O)	Toaster (TO)	Hair dryer (HD)	Razor/ Epilator (RE)
Hair iron/Hair styler (HH)	Drill (D)	Radio/Alarm (RA)	Vacuum cleaner (V)
Washing machine (WM)	Tumble dryer (TD)	Iron (I)	Tooth brush (TB)

partner than for an active separated man living with his children. In this model for reducing complexity, time is considered for everyone, independent of household type, and to resolve this issue, the occupancy rate indicates that the longer people spend at home, the more likely they are to use electric appliances.

According to the daily average time spent by French individuals on different activities, we can first calculate the time each person spends out of the home and consequently his/her occupancy time. However, this is the occupancy time for an average day. Given that public holidays, weekends and special days are also included in this table, it is more realistic to calculate different daily patterns using simple assumptions rather than generalizing this information to every single day. Thus, taking into account data from different online surveys related to French individuals' schedule of activities, it is possible to estimate a schedule for average weekdays, weekends/public holidays and vacations per individual, as shown in Table 16.

The time of absence from dwelling during the week or at the weekends or public holidays is distributed randomly. By applying the same method to other households comprising several people, a table for different composition of individuals can be created. However, it is important to coordinate some of the activities between the occupants of the same dwelling (e.g. a couple may sleep at the same time or go out together at the weekend). Using occupancy time of an average day for every type of household, the active occupancy rate (AOR) can be calculated by dividing the active minutes into duration of a day, as presented in Table 17.

To calculate the approximate time that occupants use an appliance, several methodologies can be used. Asking households to note their consumption (start and end time of utilization of each appliance) for several weeks in different seasons is a complicated approach as they may not mention overlapping activities or appliances not dependent on active occupancy (e.g. dish washer or washing machine) and may not be reliable as they may reduce their time of use so as not to be judged as over-consumers. Sub-metering, while giving more and the most accurate information, is the most expensive solution and needs public awareness and acceptance. Therefore, in this study we divided the tasks during the year by the active occupancy of the household members and the likely start time of each activity. Regarding AOR, daily time of use (depending on type of day) can be used to estimate the annual consumption of an appliance. Each year is divided into several days: 240 working days (hot/cold), 50 Saturdays (hot/cold), 50 Sundays (hot/cold), 10 public holidays (hot/cold), and 15 vacation days away from the principal residence (hot/cold). The nature of each appliance (e.g. those used particularly in cold seasons, such as fondue maker) and their cycle of use (e.g. times per year) can determine the type of day in which the appliance is used. For example, fondue makers are used approximately 5 times per day, which is equivalent to the number of cold-weather public holidays. This methodology can determine the type of day each appliance is used and provide a rough estimation of total consumption. Fig. 6 plots the previously mentioned assumptions for weekdays and weekends or public holidays. The absence time of individuals is distributed

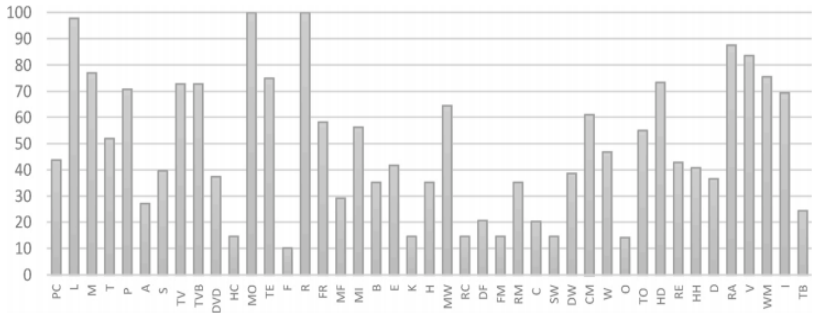
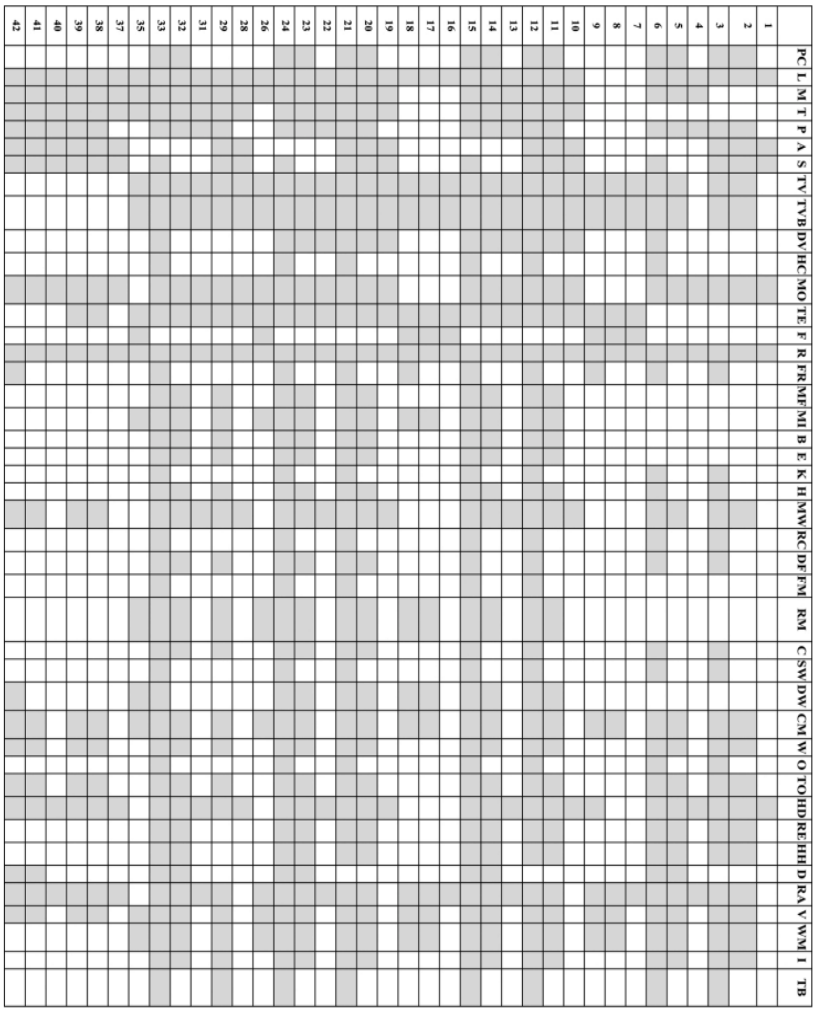


Fig. 5. Percentage of households owning an electric appliance.

Table 13
Simulation of distribution of electric appliances between household typologies.



randomly. Each colour represents the number of occupants.

In addition to type of day, there are also variations between hot and cold seasons, as depicted in Fig. 7, which was created using average temperatures of the city of Tours in 2014 in which the coldest weeks are marked as darker blue and the hottest weeks as darker red.

3.7. Calculation and profile creation: establishing the relationship between energy demand and the spatio-temporal variables and defining consumption patterns for each type and each category to create load profiles

Prior to any calculation, a number of actions were performed: 1) a list of the most frequently used electric appliances was created based on surveys; 2) as much information as possible was collected from the literature regarding these appliances and their pattern of use (e.g. the number of cycles per year the appliances run, from National statistics or surveys); and 3) appliances that consume electricity were identified for each activity (e.g. hair dryer in toiletry activity) and for every household type.

The total domestic electricity demand depends on several variables (Fig. 8) and the methodology to assess annual electricity demand can be simplified as six steps:

i Collecting data for each appliance;
ii Calculating values from the database (presented in Appendix A);
iii Calculation of unit energy consumption of every appliance (i) for the whole year in different operational modes (active, sleep, standby, off) using Eq. (2), where EC is electricity consumption, P is power, T is time, and m is unit of time (minute):

$$EC = \sum_{m=1}^{t} P_{m,i} T_{m,i} \quad (2)$$

iv Addition of all appliances of one household type in one-minute intervals to create the consumption of the type per minute for different

Table 14
Daily average time (in minutes) spent by French individuals on different activities.

Activity	Percentage of using electric appliances	Electric appliance that might be used	Active		Inactive	
			Male	Female	Male	Female
Toiletry & personal care	N.A.	HD, HH, RE, TB	51	64	62	71
cleaning, cooking & laundry	N.A.	MF, MI, B, E, K, H, MW, RC, DF, FM, RM, C, SW, DW, CM, W, O, TO, V, WM, I	54	128	126	239
DIY	N.A.	D	13	4	36	4
Gardening & animal care	N.A.	–	9	10	33	16
Television	100 %	TV, TVB, DV, HC	94	79	173	158
Internet & games	100 %	PC, L, M, T, P, S, A –	54	27	51	29
Telephone & email	100 %	PC, L, M, T, MO, TE, F	18	26	18	20

Table 15
Average time of daily activity per minute of individuals in Metropolitan France in 2010 (based on INSEE).

	Active Male	Active Female	Inactive Male	Inactive Female
Physiological time	679	692	728	734
- sleeping	503	510	522	528
- personal care	51	64	62	69
- eating	125	126	145	137
- breakfast	25	25	29	27
- lunch	50	50	58	55
- dinner	50	50	58	55
Professional time	364	290	31	10
- work	248	182	25	7
- transport	41	29	5	0
- training	75	79	1	3
Domestic time	88	167	207	300
- cleaning/cooking	54	128	126	239
- child care	11	26	13	41
- DIY	13	4	36	4
- garden/animal	9	10	33	16
Leisure time	214	170	349	273
- television	101	85	186	167
- reading	15	20	36	29
- walking/jogging	16	19	39	28
- Internet	58	33	63	37
- sports/activities	24	13	26	12
Social time	52	58	60	63
- telephone/email	20	28	22	23
- visit	33	30	38	40
- other transport	43	54	67	61
Total time	1440	1440	1440	1440
- Time spent out of the home (excluding work/school time)	115	117	169	141
- Occupancy time	407	472	719	761

types of day (weekdays, cold Saturdays, hot Saturdays, cold Sundays, hot Sundays, cold public holidays, hot public holidays, and vacations when applicable);

v Multiplication of consumption of each type by the number of households of the same type in each neighbourhood; and

vi Addition of total consumption to create annual total consumption of the neighbourhood.

After that, the associated load profiles can be created, showing hourly, daily, weekly and seasonal variations. To this end, it is necessary to: 1) Find the proportion of time spent by each type of individual on each activity (a household that spends more time on an activity such as cooking is more likely to use more electric cooking appliances); 2) Multiply this number by the total minutes per year the appliance is running to gain the annual utilization of each appliance for each household type; 3) Apply the active occupancy rate (calculated in the previous step) per type of day (weekday, weekend/public holidays) to the annual running time of each appliance to obtain the time of use of the appliance on that type of day (e.g. if the appliance is used on one type of day such as public holidays, the figure should be divided by the number of this type of day per year, in this case 10); 4) Create a daily active occupancy pattern in one-minute intervals for each household from the information derived from national statistics and surveys (the reason for choosing shorter intervals rather than a 15-minute interval as in previous models is that many energy-consuming appliances such as irons can be used for less than 15 min and therefore be overlooked); 5) Identify the possible number of minutes to start each appliance, from the most energy-consuming, and making the model more practical by removing/adding secondary appliances; 6) Install an application to choose a random cell (minute) to start an appliance (if the selected cell is outside the active occupancy and possible cells, the action can be repeated until it is within the possible time); 7) Repeat the previous stage for the other appliances, taking into account synchronization, possible simultaneous activities and active occupancy rate for different types of day; and 8) Present the results of each typology for each type of day.

Using the methodology described above, the load profile of each household type can be created. For example, the electricity load profile of household type 12 (couple with reference person less than 25 years old in a dwelling measuring more than 100 m^2) for an active male and active female on different types of day is presented in Fig. 9. The annual electricity consumption of this household type and category for electric appliances is estimated at 2779 kW h per year, and the maximum demand for this end-use is estimated at 9012 kW. The number of household members in this example is two, which results in 1389 kW h of electricity consumption per person per year.

Total annual electricity consumption of electric appliances by two active partners is estimated to be 4002 kW h per year, and hence 2001 kW h per year per person, and the maximum demand is 5755 kW. For a couple consisting of one active and one inactive person, consumption is estimated to be 3275 and 3873 kW h per year for active female-inactive male couples and inactive female-active male couples respectively. Thus, the average consumption per person for active female-inactive male couples is 1637 and for inactive female-active male couples it is 1936 kW h per year. Maximum demand is 4499 and 8683 kW respectively. This estimation can be analysed at various time scales (e.g. daily, weekly, monthly) in order to gain a better understanding of a household's behaviour toward electric appliances based on two random weeks of vacation away from home (Figs. 10 and 11).

The estimated annual consumption and maximum demand of different household types and their categories depending on activity/inactivity of the adult household members are presented in Table 18.

In order to generalize the load profiles to the neighbourhood level, we used the statistics of the 2010 national census published by INSEE (Table 19).

To identify the number of households of each type in each neighbourhood, we first found the ratio of households at the national level, as detailed information, including household activities and household composition shown in Table 10, is not available at city and district levels. For example, the information regarding a household composed of a couple with an active reference person is unknown. The reference

Table 16
French individuals' average (A) daily activity and during weekdays (WD) and weekends (WE)/public holidays (PH) in Metropolitan France in 2010.

	Active male			Active female			Inactive male			Inactive female		
	A	WD	WE/PH	A	WD	WE/PH	A	WD	WE/PH	A	WD	WE/PH
Average sleeping (min)	503	441	621	510	448	628	522	522	522	528	528	528
Waking up		6:33	10:03		6:20	9:50		8:46	8:46		8:42	8:42
Toiletry (min)	51	41	71	64	58	76	62	62	62	69	69	69
Eating Breakfast		7:13	10:50		7:02	10:35		10:00	10:00		9:56	9:56
Leaving home to work		8:14	N/A		8:23	N/A		N/A	N/A		N/A	N/A
Transportation to /from work (min)	41	62	0	29	44	0	5	0	0	0	0	0
Arriving home from work		18:43	N/A		16:59	N/A		N/A	N/A		N/A	N/A
Eating dinner		19:36	19:00		19:44	21:08		20:00	20:00		19:08	19:08
Sleeping		23:12	23:42		22:52	23:22		00:04	00:04		23:52	23:52
Time of absence (except working/training time) (min/day)	115	30	120	117	30	126	169	115	115	141	86	86
Occupancy time	407	415	699	472	521	685	719	803	803	761	826	826

Table 17
Occupancy rate of different individual compositions depending on their activity.

	AM	AF	IM	IF	AFM	IFM	IMAF	IFAM
WD	29 %	36 %	56 %	57 %	32 %	57 %	44 %	43 %
WE/PH	49 %	48 %	56 %	57 %	48 %	57 %	52 %	53 %

person is considered to be the one who has the largest income and is financially responsible for the household. Information about the gender of this person and the activity of the other person in the couple is not available at the urban level.

According to INSEE (RP2014), household structure is fairly similar in terms of percentage type at the local and national scales (Table 20). Therefore, despite the lack of local information about households, we can assume that the distribution of population types in the city of Tours and its neighbourhoods is similar to the national scale, as published by INSEE in RP2012 and RP2017 (Table 21).

The number of households is calculated using Eq. (3):

$$n = Nh \times A \times Ds \quad (3)$$

Where n is the number of households in each neighbourhood, Nh is the number of households per activity at the national level, A is age category percentage, and Ds is dwelling size percentage.

With this methodology, it is possible to calculate the number of households in each category for each of the 22 neighbourhoods, as well as the total annual consumption for each neighbourhood and consequently for the entire city of Tours.

4. Results and discussion

In this estimation for 130,817 individuals living in 72,202 dwellings, the total annual electricity consumption of electric appliances is 86 GW h/yr (Table 22), in other words, about 0.66 MW h per person per year. The average person per household is 1.81, and therefore the average annual consumption per household/dwelling is about 1195 kW h.

The results can be validated by installation of smart sub-metering devices, which is the only non-intrusive method for disaggregating data with precision ranging from intervals of 15–60 min (Zhao, Ye, Stankovic, & Stankovic, 2020). In the absence of smart meters and sub-meters for identification of electric appliances in all the areas studied, the results can be checked by comparing data based on disaggregated estimation with data published by suppliers.

Based on the existing data (see Table 23), for 134,978 individuals living in 80,905 dwellings in the city of Tours, 356,408 MW h (356 GW h) of electricity is consumed annually for all end-uses (electric appliances, hot water, heating, etc.), which is approximately 2.64 MW h per person per year and 4404 kW h per household/dwelling per year. Therefore, in this example, electric appliances are estimated to account for approximately 25 % of the total consumption calculated by suppliers. However, according to Cerema (2014), electric appliances represent 20 % of total consumption (lighting included) for the same period as the national statistics. This difference can be explained by errors and uncertainty in analyses, differences in structure between national and urban levels, rapid advances of technologies, and not including some typologies and exceptions. There are also other important factors, such as type of final energy, which varies from household to household. Some dwellings use gas rather than electricity for heating/cooling systems, hot water and cooking equipment. Thus, even if the results are slightly over-estimated, the approximate estimation of the share of electric appliances and the existing data validate the methodology.

To sum up, in this Spatio-Temporal Analysis of electric domestic appliances through the case study of Tours (France), we aimed to estimate disaggregated electricity consumption and demand for this end-use at different urban scales, from neighbourhood to city. By combining a bottom-up approach of households' load profiles and a top-down approach using national statistics, we were able to estimate aggregated electricity demand and consumption with different spatial resolutions and extremely high temporal resolution.

Analysis of electricity demand reflects the medium- and long-term structural changes in energy demand, through detailed analysis of the social, economic, and technological characteristics of the city or neighbourhood. In particular, this approach takes into account changes in the social needs of the population in urban and rural areas; the industrial policies of the country, policies concerning transportation, housing etc., technological developments, and changes in potential electricity markets (Iaea (International Atomic Energy Agency), 2006).

However, regardless of scale and technique, creating a model analysing energy consumption and/or demand is complex, due to the following factors: numerous determining variables, heterogeneous urban context, unpredictable human behaviour, difficulty of forecasting temperature, rapid technological developments, possible rebound effect when taking energy efficiency measures (Gillingham, Rapson, & Wagner, 2014) (e.g. some inactive consumptions created by manufacturers), difficulty of creating future socio-economic and demographic scenarios, the important role of local authorities, and a lack in proper reference models and relevant information. Despite all these challenges, developing electricity load models can help policy makers, local authorities and energy suppliers to gain a better understanding of load curves in order to find solutions for flattening them through algorithms and DSM strategies in the framework of a smart grid project.

Due to the novelty of this analysis, it is not possible to compare our

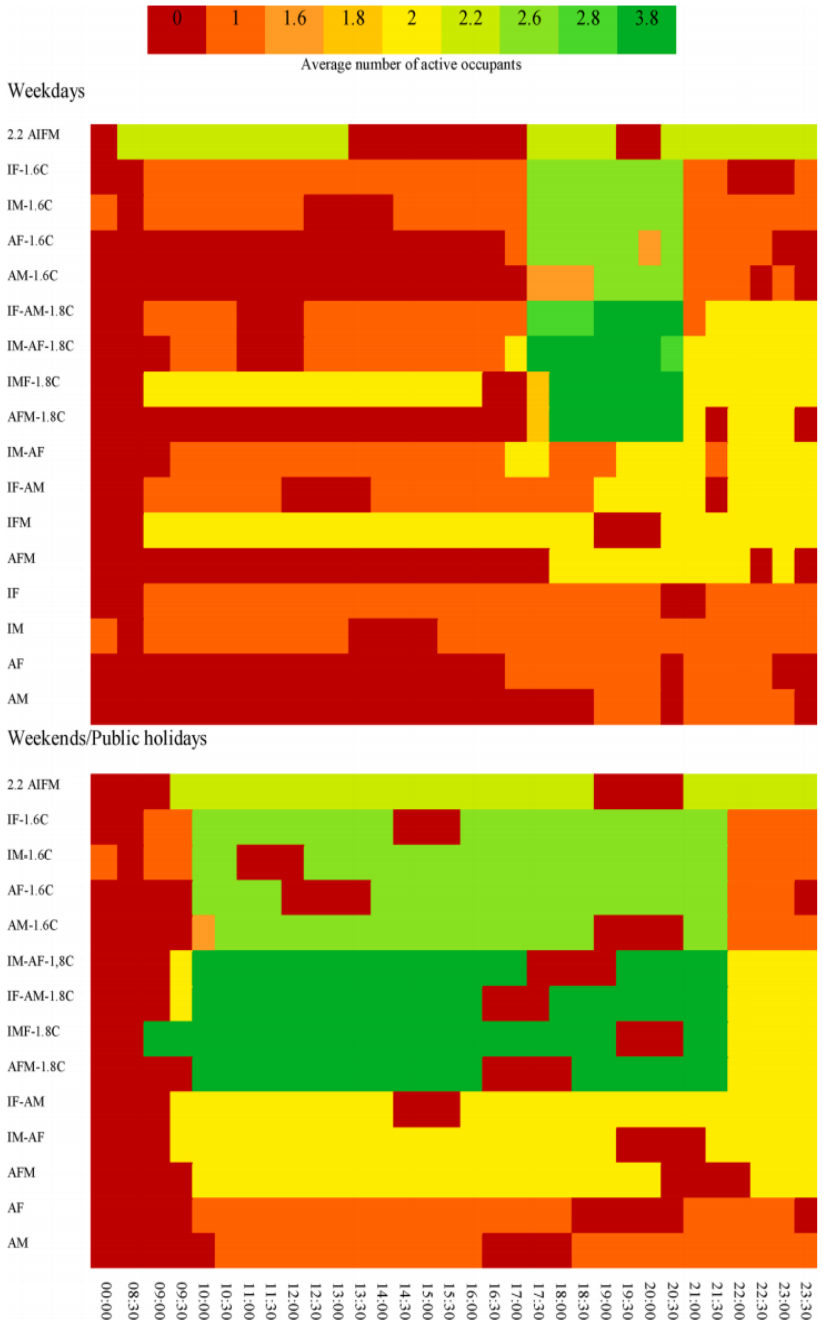


Fig. 6. Daily occupancy profile (Temporal variation) of households.

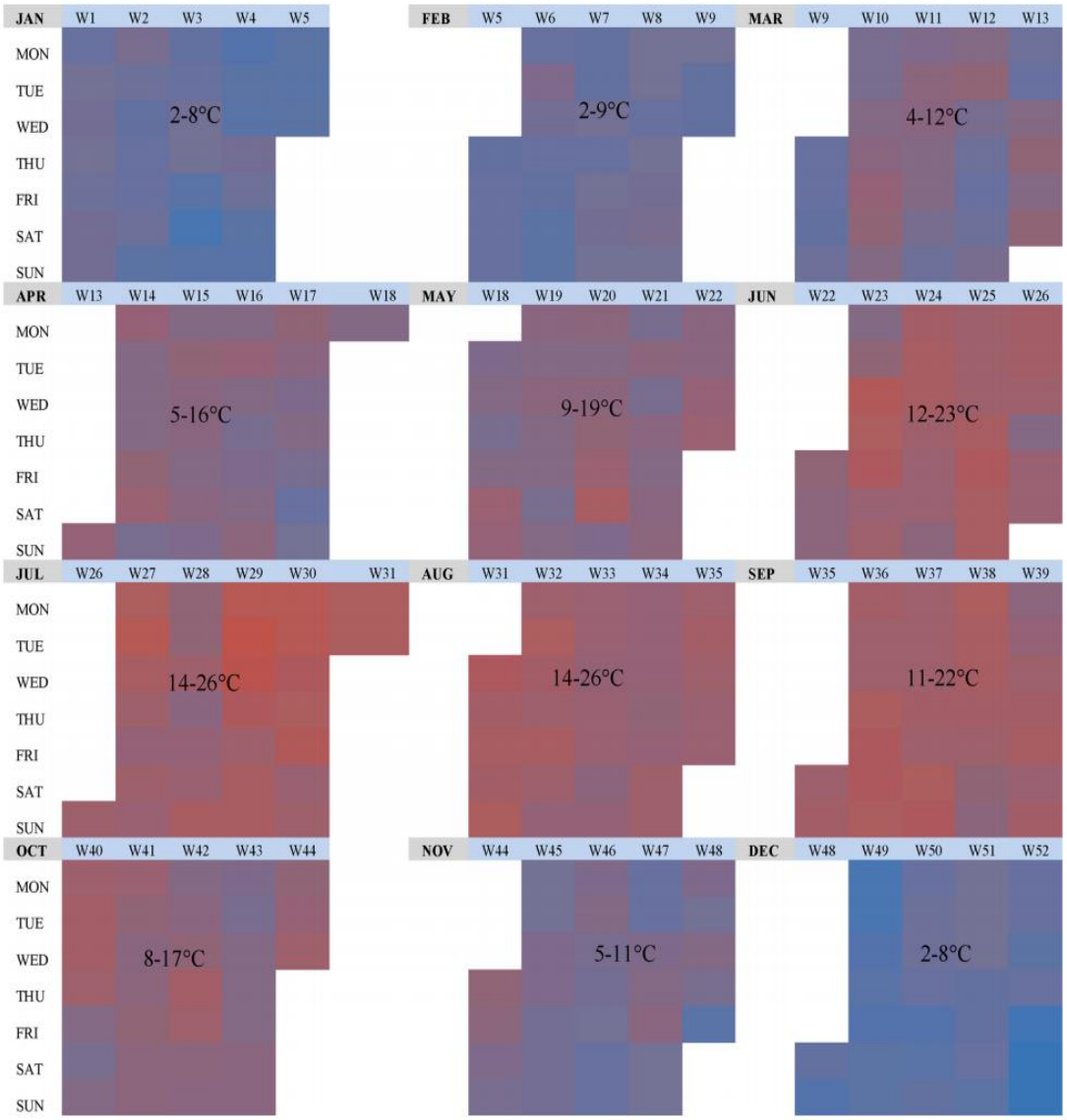


Fig. 7. Average seasonal variation – example of Tours (France) in 2019.

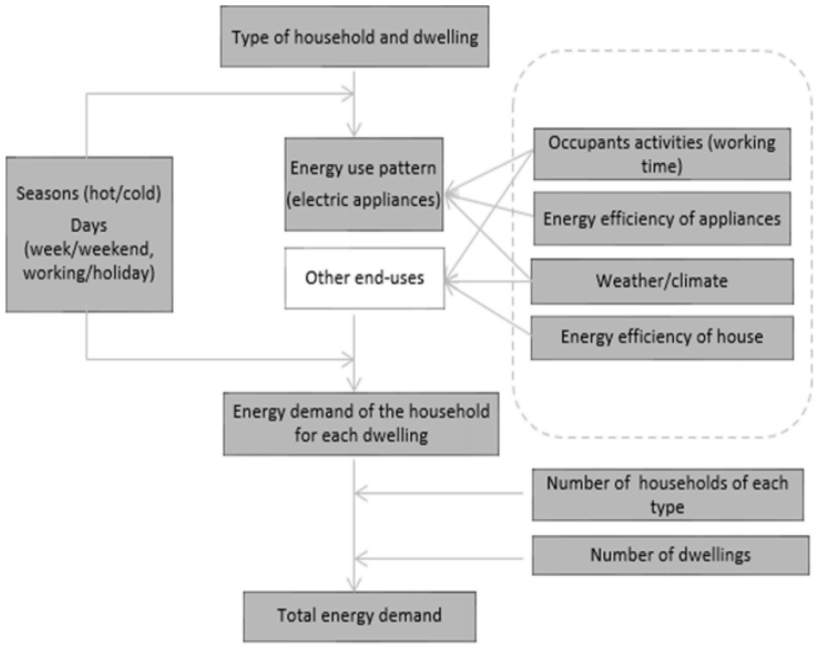


Fig. 8. Total domestic energy demand.

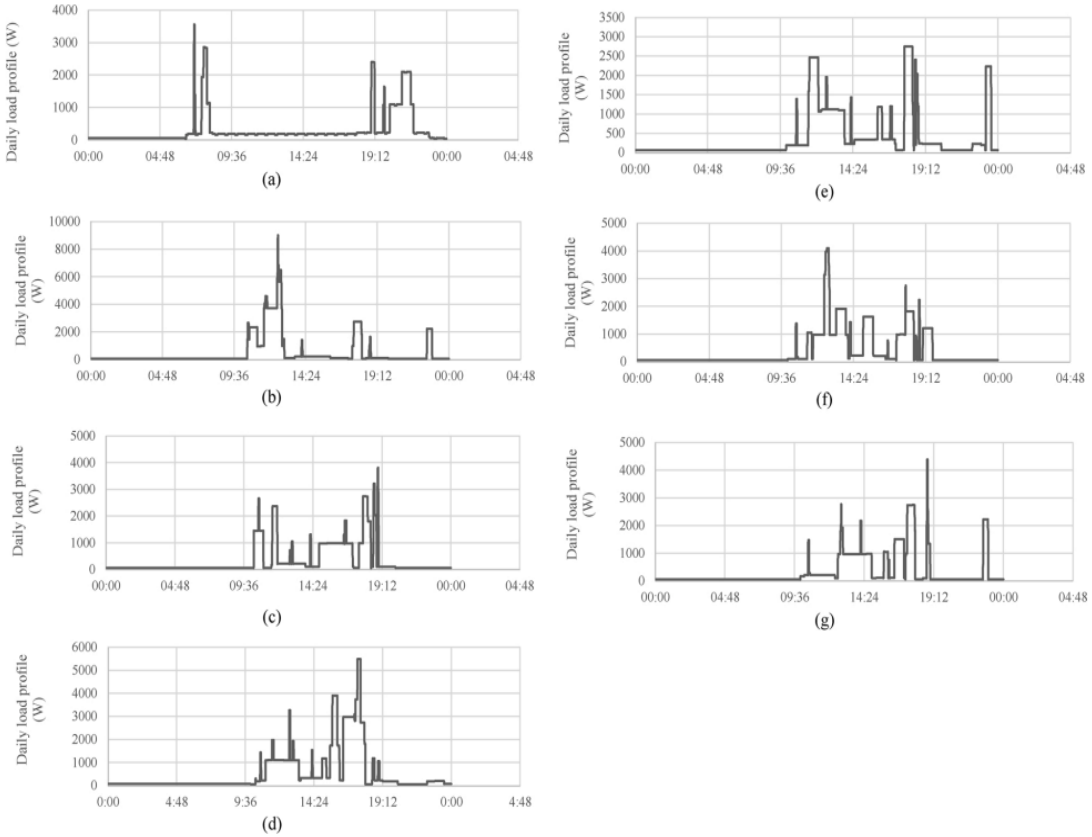


Fig. 9. Daily load profile for T12 AFM (active female and active male). (a) Cold/Hot weekdays; (b) Cold Saturdays; (c) Hot Saturdays; (d) Cold Sundays; (e) Hot Sundays; (f) Cold public holidays; (g) Hot public holidays.

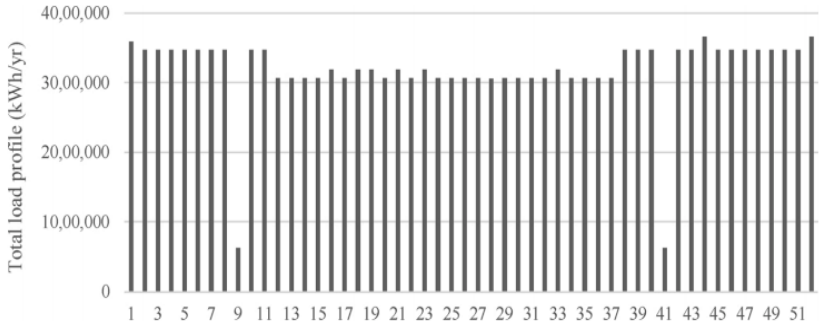


Fig. 10. Total load profile presented on weekly basis for active male and female of T12 AFM household per kWh/yr.

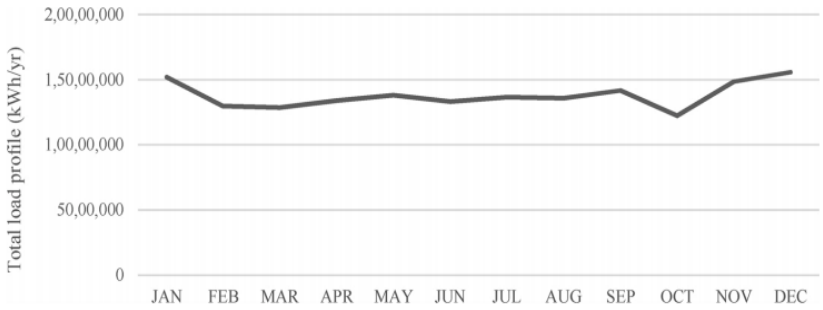


Fig. 11. Total load profile presented on monthly basis for active male and female of T12 household per kWh/yr.

findings with other samples. However, there are similarities in terms of urban morphology and building characteristics in many French or even European cities . Therefore, the methodology is applicable to other case studies with similar characteristics. At smaller scales, French cities of approximately the same size present similarities in terms of structure, hierarchical organizations, and inhabitants' activities (Pumain & Saint-Julien, 2017). Thus, estimating the electricity demand of electric appliances can offer a constructive decision-making tool for energy and environmental measures in similar neighbourhoods (e.g. in the historic centre of cities with similar building and socio-demographic characteristics). Policy makers and energy providers can use this information to balance the electricity supply and demand and optimize the electricity system. Policy decisions related to electricity supply have a direct impact on the economic and environmental costs of electricity generation.

Another policy implication of this study concerns electric appliances. The Spatio-Temporal Analysis identifies the most widely owned and energy-consuming appliances. Energy consumption is due not only to nominal output power of the appliance but also to its time and frequency of use as well as to stand-by and non-active consumption. Estimating demand is thus of considerable importance in order to implement the energy reduction measures imposed on electric appliance manufacturers and could lead to developing more energy-efficient appliances and standards. Inactive consumption can be eliminated by changing the behaviour of household members. This simulation thus highlights the information required to provide an educational basis for households to correct their inappropriate electricity-consuming habits.

5. Conclusion, limitations and directions for future research

At the macro-scale (regional or national), energy models and analyses can be used to determine overall energy supply requirements. At the micro-scale, they can be used to add houses to the grid or analyse changes in energy consumption by introducing or removing technologies. Energy models are of interest for many stakeholders, including utilities, consumers, policy makers and appliance manufacturers (Carlson et al., 2013) and can help in decision-making and in developing building policies and codes. They can be used to define priorities of the requirements of EU energy policy (European Commission (Eurostat), 2014). They can also facilitate technology adoption, the quantification of supply, etc. They can be useful for Transmission System Operators in order to study demand-response, balance (near)-real-time demand and supply and to define transformer and storage size; for appliance manufacturers in order to design connected appliances; for Distribution Network Operators (DNOs) in order to simulate distribution networks, to differentiate tariffs and to manage electric vehicles; and for demand-side participation aggregators in order to offer demand-side response services (Ardakanian et al., 2011; Torriti, 2014).

The first step to reduce electricity consumption/demand is to monitor how and when each appliance is working, and then to identify the largest consumers and the time when the demand is highest. To this end, we carried out a spatio-temporal analysis with a high temporal resolution (per minute) to create residential load profiles in the urban context of Tours and to simulate its electricity demand related to electric appliance use.

Table 18
Annual consumption and maximum demand of various household typologies.

Type	category	Annual consumption per household (kWh)	Annual consumption per person (kWh)	Maximum demand (W)
T 1	AM	576	576	1787
	AF	596	596	1788
	IM	608	608	1791
	IF	565	565	1787
T 2	AM	939	939	3516
	AF	1147	1147	3733
	IM	1298	1298	3393
	IF	1548	1548	3728
T 3	AM	1216	1216	3143
	AF	1452	1452	4128
	IM	1639	1639	5372
	IF	1979	1979	6727
T 4	AM	487	487	1782
	AF	515	515	1782
	IM	529	529	1782
	IF	509	509	1782
T 5	AM	1168	1168	2725
	AF	1424	1424	3178
	IM	1575	1575	2728
	IF	1902	1902	4128
T 6	AM	1790	1790	3261
	AF	2011	2011	4386
	IM	2632	2632	5221
	IF	2931	2931	6397
T 7	IM	354	354	148
	IF	337	337	148
T 8	IM	525	525	1432
	IF	639	639	2726
T 9	IM	791	791	1782
	IF	932	932	2636
T 10	AFM	825	412	1835
	IFM	969	484	1808
	IMAF	910	455	1841
	IFAM	919	459	1800
T 11	AFM	1222	611	4487
	IFM	1620	810	5479
	IMAF	1244	622	5131
	IFAM	1866	933	6075
T 12	AFM	2732	1366	8985
	IFM	3957	1978	5761
	IMAF	3230	1615	4505
	IFAM	3827	1913	8683
T 13	AFM	520	260	1770
	IFM	664	332	1766
	IMAF	598	299	1770
	IFAM	615	307	1762
T 14	AFM	1934	967	4991
	IFM	2755	1377	7164
	IMAF	2011	1005	5479
	IFAM	2662	1331	5954
T 15	AFM	1624	812	5233
	IFM	2599	1299	6616
	IMAF	2018	1009	5151
	IFAM	2743	1371	1000310,003
T 16	IFM	371	185	189
T 17	IFM	1336	668	4140
T 18	IFM	1804	902	3769
T 19	AFM+1.8C	822	216	1798
	IFM+1.8C	974	256	1798
	IMAF+1.8C	910	239	1798
	IFAM+1.8C	916	241	1798
T 20	AFM+1.8C	1229	324	5117
	IFM+1.8C	2179	574	6275
	IMAF+1.8C	1210	318	4735
	IFAM+1.8C	1815	478	6076
T 21	AFM+1.8C	1890	497	5896
	IFM+1.8C	2319	610	5287
	IMAF+1.8C	2072	545	4920
	IFAM+1.8C	2039	537	7088
T 22	AFM+1.8C	812	214	1793
	IFM+1.8C	950	250	1797
	IMAF+1.8C	899	237	1793
	IFAM+1.8C	843	222	1793
T 23	AFM+1.8C	1087	286	5479
	IFM+1.8C	1597	420	5479
	IMAF+1.8C	1082	285	5469
	IFAM+1.8C	2135	562	7131
T 24	AFM+1.8C	1816	478	5981
	IFM+1.8C	2432	640	6278
	IMAF+1.8C	2027	533	4692
	IFAM+1.8C	2519	663	7508
T 26	IFM+1.8C	802	211	2751
T 28	AM+1.6C	700	269	1793
	AF+1.6C	736	283	1793
	IM+1.6C	846	325	1793
	IF+1.6C	840	323	1793
T 29	AM+1.6C	959	369	5016
	AF+1.6C	1206	464	3510
	IM+1.6C	1271	489	3728
	IF+1.6C	1668	641	4727
T 31	AM+1.6C	620	238	1788
	AF+1.6C	668	257	1788
	IM+1.6C	756	291	1788
	IF+1.6C	764	294	1788
T 32	AM+1.6C	1047	403	2450
	AF+1.6C	1230	473	5319
	IM+1.6C	1368	526	4136
	IF+1.6C	1713	659	4308
T 33	AM+1.6C	2086	802	4579
	AF+1.6C	2413	928	4716
	IM+1.6C	3034	1167	6403
	IF+1.6C	3597	1384	6576
T 35	IM+1.6C	883	340	2904
	IF+1.6C	1251	481	2819
T 37	2.2AIFM	887	403	1791
T 38	2.2AIFM	1410	641	3058
T 40	2.2AIFM	1277	580	3192
T 41	2.2AIFM	1634	743	3397
T 42	2.2AIFM	2367	1076	4148

By combining a survey of 54 households and national socio-demographic statistics, we were able to identify the factors influencing household possession of electric appliances and the relationship between types of household, dwellings and their type and usage of electric appliances.

In this study, dwelling size, age of the household reference person, total annual income of the household, and the size of the household (number of occupants in the dwelling) are responsible for the number of electric appliances used in the dwelling. Both the frequency and time of use of most of these appliances depend on the active occupancy of the household members.

The results show that the type of household owning the most electric appliances is a young couple with children living in the largest dwellings, which is probably related to their purchasing power and lifestyle and their preference for new technologies and electric devices. The household using the fewest appliances is a young single person.

Based on this estimation, the lowest annual consumption of electric appliances (excluding space heating, air conditioning and other end-uses) is by a senior female living in a small dwellings, and the highest consumption is by a young couple living in a large dwelling. The maximum demand within these typologies is by a middle-aged couple in a large dwelling, and the minimum demand is that of a single senior living in a small dwelling.

The results illustrate that average consumption per person decreases with the number of adults living together in the same dwelling, particularly in the case of complex households (generally not family members), compared to single-member households. In other words, energy consumption per person is more efficient in shared housing.

Due to the variety of typologies and the complexity of predicting the

Table 19
Type of household to which French individuals belonged in 2010.

Type of household to which individuals belong	Population (ref: INSEE, 2010)	Households (estimate based on average number of children)
Individuals belonging to a household with head of household below 65 years old	49 659 000	
Single-member household	5 428 000	
Inactive males	601 000	601 000
Active males	2 352 000	2 352 000
Inactive females	681 000	681 000
Active females	1 794 000	1 794 000
Single-parent household	5 310 000	
Inactive fathers	173 360	66 677
Active fathers	614 640	236 400
Inactive mothers	1 015 000	390 385
Active mothers	3 507 000	1 348 846
Couples	37 195 000	
Inactive couples	507 008	253 504
Inactive families	2 158 992	568 156
Inactive males, active females without children	400 507	200 253
Inactive males, active females with children	1 840 493	484 340
Active males, inactive females without children	1 185 000	592 500
Active males, inactive females with children	5 432 000	1 429 474
Active couples	4 882 000	2 441 000
Active families	20 789 000	5 470 789
Complex households	1 726 000	784 545
Individuals belonging to a household with head of household 65 years old or more	11 248 000	
Male single-members	1 734 240	1 734 240
Female single-members	1 878 760	1 878 760
families	5 474 455	1 440 646
Couples	1 216 545	608 273
Male single-parents	394 790	151 842
Female single-parents	427 690	164 496
Complex	121 520	55 236
Total	60 907 000	24 943 818 (2.44 p per household)

Table 20
Percentage of type of households in Tours and France in 2016.

Household type	Reference person <25 years (%)		Reference person 25–65 years (%)		Reference person >65 years (%)	
	Tours	France	Tours	France	Tours	France
Single-member	27	9	47	53	26	38
Complex	43	16	49	68	8	16
Mono-parental	2	2	91	88	7	10
Family and couple	4	2	77	80	19	18

Table 21
Activity and unemployment rates in Tours and France in 2017.

	Tours	France
Total jobs in 2017	82 603	26 412 162
Percentage of jobs including employed jobs in 2017	90,4	86,8
Total variation of employment between 2012 and 2017	0,7	0,1
Activity rate between 15 and 64 years in 2017	69,8	74,0
Unemployment rate between 15 and 64 years in 2017	18,5	13,9

behaviour of occupants regarding electricity consumption and/or demand, it could be interesting for suppliers to use Spatio-Temporal Analysis to model peak curve flattening scenarios and to provide optimal amounts of electricity at the local scale.

Table 22
Estimation of annual electricity consumption of city of Tours per neighbourhood in GWh.

Neighbourhoods	Annual electricity consumption in GWh
Centre	8,575309193
Grammont 1-4	7,811309294
Cathédrale	2,418548538
Lamartine 1-2	3,531439956
Rabelais-Tonnellé 1-2	3,576800988
Giraudeau 1-2	2,723685247
Lakanal-Strasbourg 1-2	3,56593071
Febvotte-Marat 1-2	3,593456028
Rives du Cher 1-2	2,869119227
La Fuye Velpeau 1-4	6,385435423
Sanitas-Rotonde 1-5	5,912222763
Beaujardin 1-2	2,590263936
Rochepinard	1,194167593
Saint-Symphorien 1-5	8,47044477
Sainte-Radegonde 1-2	3,894944284
Paul Bert	1,778062455
Europe 1-6	6,405866034
Douets Milletiere 1-3	1,924441862
Montjoyeux	1,829010912
La Bergeonnerie	0,993703097
Les Fontaines 1-3	4,865201981
Deux Lions Gloriette	1,082792058
Total	85,9922

Table 23
Total electricity consumption at different scales.

		Annual definitive consumption 2015	Residential (all end-users) (41 % of total)
Average neighbourhood (local) scale	Centre	N/A	N/A
City (urban) scale	Tours	N/A	356 GW h (4)
Regional scale	Centre Val de Loire	18 (1)	7362 GWh (2)
National scale	France	476 (1)	194684 GWh (3)

Source: eCO2mix RTE énergie (1) https://www.ligair.fr/media/docutheque/Oreges_rapport_2014_BD.pdf (2) https://www.agence-france-energie.fr (4) Various (3) Is calculated based as (1) and (2)

The different scales of analysis in this study (from neighbourhood to city scale) enable examination of the impact of spatial resolution on DSM and smart grid applications. This study can thus provide the basis for investigation of the optimal smart-grid scale, which, to the best of our knowledge, has not yet been explored.

Simulations of total energy demand should include the contribution of other end-uses (space heating/cooling, hot water, cooking and lighting), as well as future structural changes affecting urban energy systems. Changes in policy, legislation and decisions may lead to a change in the factors determining energy demand, and these factors should therefore be identified and evaluated not only when designing development scenarios but also when forecasting long-term demands.

Declaration of Competing Interest

The authors report no declarations of interest.

Acknowledgements

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Appendix A. Calculation method of the annual energy consumption

The average energy demand per cycle is calculated as below:

$$CED_a = CL_a \times CP_a \tag{A.1}$$

where CED_a is Mean cycle energy demand of the appliance in active mode (in kWh), CL_a is mean cycle length of the appliance in active mode (in hours), CP_a is mean cycle power of the appliance in active mode (in kWh).

The annual time the appliance is running can be expressed as:

$$T_a = CL_a \times NC_a \tag{A.2}$$

where T_a is annual time the appliance is running (in hours), NC_a is number of annual cycles.

The number of minutes per year an appliance has the potential to start functioning is calculated as follows:

$$M = (365 \times 24 \times 60) - T_a \tag{A.3}$$

where M is minutes per year when an activity can be started.

The average time between each start is expressed as:

$$MBS = \frac{M}{NC_a} \tag{A.4}$$

Lambda denotes:

$$\lambda = \frac{1}{\text{MBS}} \tag{A.5}$$

Probability of each appliance being in use is indicated as:

$$AP = \left(\frac{T_a}{525600}\right)\% \tag{A.6}$$

The scalar calibration is calculated as follows:

$$SC = \frac{\lambda}{AP} \tag{A.7}$$

The annual unit electricity consumption of the electric appliance when in use is expressed as:

$$UEC_a = CED_a \times NC_a \tag{A.8}$$

The time each appliance is not operating can be calculated as:

$$T_s = (365 \times 24) - T_a \tag{A.9}$$

The annual standby power of the electric appliance is calculated as below:

$$UEC_s = T_s \times P_s \tag{A.10}$$

where Ps is standby power of the appliance (in Kilo-watts),

The total consumption of an electric appliance per year is equal to its total active and inactive power and is expressed as:

$$UEC_T = UEC_a + UEC_s \tag{A.11}$$

The total average demand per dwelling taking ownership into account is presented as:

$$DPD_T = PD \times UEC_T \tag{A.12}$$

where PD is the proportion of dwelling owning this appliance.

References

Alalouch, Chaham (2019). The impact of space syntax spatial attributes on urban land use in Muscat: Implications for urban sustainability. *Systainable Cities and Society, 46*. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.01.002

Ardakanian, O., Keshav, S., & Rosenberg, C. (2011). Markovian models for home electricity consumption. *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM workshop on green networking*, 31-36 p.

Baker, K. J., & Rylatt, R. M. (2008). Improving the prediction of UK domestic energy-demand using annual consumption-data. *Applied Energy, 85*(6), 475–482.

Bartiaux, F., & Gram-Hanssen, K. (2005). Socio-political factors influencing household electricity consumption: A comparison between Denmark and Belgium. *Proceedings of the ECEEE 2005 summer study, European council for an energy efficient economy*, 1313–1325.

Bartusch, C., Odlare, M., Wallin, F., & Wester, L. (2012). Exploring variance in residential electricity consumption: Household features and building properties. *Applied Energy*, (92), 637–643.

Bin, S., & Dowlatabadi, H. (2005). Consumer lifestyle approach to US energy use and the related CO2 emissions. *Energy Policy, 33*(2), 197–208.

Brounen, D., Kok, N., & Quigley, J. M. (2012). Residential energy use and conservation: Economics and demographics. *European Economic Review, 56*(5), 931–945.

Capasso, A., Grattieri, W., Lamedica, R., & Prudenzi, A. (1994). A bottom-up approach to residential load modeling. *IEEE Transactions on Power Systems*, 957–964.

Carlson, D. R., Matthews, H. S., & Berge'S, M. (2013). One size does not fit all: Averaged data on household electricity is inadequate for residential energy policy and decisions. *Energy and Buildings*, (64), 132–144.

Carter, A., Craigwell, R., & Moore, W. (2012). Price reform and household demand for electricity. *Policy Modelling, 34*(2), 242–252.

Cerema. (2014). *Consommation d'énergie dans les bâtiments – chiffres clés 2013*.

Chen, S., Zhang, X., Wei, S., Yang, T., Guan, J., Yang, W., et al. (2019). An energy planning oriented method for analyzing Spatio-Temporal characteristics of electric loads for heating/cooling in district buildings with a case study of one university campus. *Sustainable Cities and Society*, (51).
Datta, S. (2019). Decoupling and demand-side management: Evidence from the US electric industry. *Energy Policy*, (132), 175–184.
Diawuo, F. A., Sakah, M., Pina, A., Baptista, P. C., & Silva, C. A. (2019). Disaggregation and characterization of residential electricity use: Analysis for Ghana. *Sustainable Cities and Society*, (48).
Doucet, A., De Freitas, N., & Gordon, N. (2001). *Chapter 1-An introduction to sequential Monte Carlo methods: Sequential Monte Carlo methods in practice* (pp. 3–14). Springer.
European Commission (Eurostat). (2014). *The 2030 energy strategy*.
Farzaneh, H. (2019). *Energy systems modeling*. Singapore: Springer.
Farzaneh, H., Suwa, A., Dolla, C., & Oliveira, J. (2014). Developing a tool to analyze climate co-benefits of the urban energy system. *Procedia Environmental Sciences*, (20), 97–105.
Genjo, K., Tanabe, S., Matsumoto, S., Hasegawa, K., & Yoshino, H. (2005). Relationship between possession of electric appliances and electricity for lighting and others in Japanese households. *Energy and Buildings, 37*(3), 259–272.
Gillingham, K., Rapson, D., & Wagner, G. (2014). *The rebound effect and energy efficiency policy, discussion paper, resources for future*. Washington.
Gram-Hanssen, K., Kofod, C., & Petersen, K. N. (2004). Different everyday lives: Different patterns of electricity use. *Proceedings of the ACEEE 2004 summer study, American council for an energy efficient economy*, 74–85.
Halvorsen, B., & Larsen, B. M. (2001). Norwegian residential electricity demand-a microeconomic assessment of the growth from 1976 to 1993. *Energy Policy, 29*(3), 227–236.
Iaea (International Atomic Energy Agency). (2006). *Model for analysis of energy demand (MAED-2)*. Austria.
Iea. (2020). *Electricity information: Overview*. Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview.
Iea. (2019a). *Global energy review 2019*. Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019.
Iea. (2019b). *Global energy & CO2 status report 2019*. Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019.
Kavousian, A., Rajagopal, R., & Fischer, M. (2013). Determinants of residential electricity consumption: Using smart meter data to examine the effect of climate, building characteristics, appliance stock, and occupants' behavior. *Energy*, (55), 184–194.
Kelly, S. (2011). Do homes that are more energy efficient consume less energy?: A structural equation model for England's residential sector. *EPRG working paper*. Electricity Policy Research Group, University of Cambridge.
Kroese, D. P., Taimre, T., & Betev, Z. I. (2011). *Handbook of Monte Carlo methods*. Wiley Series in Probability and Statistics.
Leahy, E., & Lyons, S. (2010). Energy use and appliance ownership in Ireland. *Energy Policy, 38*(8), 4265–4279.
Levinson, A., & Niemann, S. (2004). Energy use by apartment tenants when landlords pay for utilities. *Resource and Energy Economics, 26*(1), 51–75.
Lopez-Rodriguez, M. A., Santiago, I., Trillo-Montero, D., Torriti, J., & Moreno-Munoz, A. (2013). Analysis and modeling of active occupancy of the residential sector in Spain: An indicator of residential electricity consumption. *Energy Policy*, (62), 742–751.
Louw, K., Conradie, B., Howells, M., & Dekenah, M. (2008). Determinants of electricity demand for newly electrified low-income African households. *Energy Policy, 36*(8), 2812–2818.
Macmackin, N., Miller, L., & Carriveau, R. (2019). Modeling and disaggregating hourly effects of weather on sectoral electricity demand. *Energy, 188*.
Mcloughlin, F., Duffy, A., & Conlon, M. F. (2010). The generation of domestic electricity load profiles through Markov chain modelling. *Euro-Asian Journal of Sustainable Energy Development Policy, 3*.
Mcloughlin, F., Duffy, A., & Conlon, M. F. (2012). Characterizing domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study. *Energy and Buildings*, (48), 240–248.
Miyasawa, A., Fujimato, Y., & Hayashi, Y. (2019). Energy disaggregation based on smart metering data via semi-binary nonnegative matrix factorization. *Energy and Buildings*, (183), 547–558.
Ndiaye, D., & Gabriel, K. (2011). Principal Component Analysis of the electricity consumption in residential dwellings. *Energy and Buildings, 43*(2–3), 446–453.
Paatero, J. V., & Lund, P. D. (2006). A model for generating household electricity load profiles. *International Journal of Energy Research, 30*(5), 273–290.
Parker, D. S. (2003). Research highlights from a large scale residential monitoring study in a hot climate. *Energy and Buildings, 35*(9), 863–876.
Praveen, M., & Rao, G. V. S. (2020). Ensuring the reduction in peak load demands based on load shifting DSM strategy for smart grid applications. *Procedia Computer Science*, (67), 2599–2605.
Pumain, D., & Saint-Julien, T. (2017). Fonctions et hiérarchie des villes françaises. *Annales de géographie, Armand Colin de 1976* (pp. 358–440). May.
Ren, Z., Paevere, P., Grozev, G., Egan, S., & Anticev, J. (2013). Assessment of end-use electricity consumption and peak demand by Townsville's housing stock. *Energy Policy*, (61), 888–893.
Richardson, I., & Thomson, M. (2008). *Domestic active occupancy model – Simulation example*. Loughborough University Institutional Repository.
Richardson, I., Thomson, M., Infield, D., & Clifford, C. (2010). Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model. *Energy and Buildings, 42*(10), 1878–1887.
Robert, C., & Casella, G. (2004). *Monte Carlo statistical methods*. Springer.
Sakah, M., De La Rue Du Can, S., Diawuo, F. A., Sedzro, M. D., & Kuhn, C. (2019). A study of appliance ownership and electricity consumption determinants in urban Ghanaian households. *Sustainable Cities and Society*, (44), 559–581.
Sanquist, T. F., Orr, H., Shui, B., & Bittner, A. C. (2012). Lifestyle factors in U.S. residential electricity consumption. *Energy Policy*, (42), 354–364.
Santamouris, M., Kapsis, K., Korres, D., Livada, I., Pavlou, C., & Assimakopoulos, M. N. (2007). On the relation between the energy and social characteristics of the residential sector. *Energy and Buildings, 39*(8), 893–905.
Santiago, I., Lopez-Rodriguez, M. A., Trillo-Montero, D., Torriti, J., & Moreno-Munoz, A. (2014). Activities related with electricity consumption in the Spanish residential sector: Variations between days of the week, Autonomous Communities and size of towns. *Energy and Buildings*, (79), 84–97.
Shimoda, Y., Fujii, T., Morikawa, T., & Mizuno, M. (2004). Residential end-use energy simulation at city scale. *Building and Environment, 39*(8), 959–967.
Summerfield, A. J., Lowe, R. J., Bruhns, H. R., Caeiro, J. A., Steadman, J. P., & Oreszczyn, T. (2007). Milton Keynes Energy Park revisited: Changes in internal temperatures and energy usage. *Energy and Buildings, 39*(7), 783–791.
Swan, L., & Ugursal, I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (13), 1819–1835.
Tiwari, P. (2000). Architectural, demographic, and economic causes of electricity consumption in Bombay. *Policy Model, 22*(1), 81–98.
Torriti, J. (2012). Demand side management for the european supergrid: Occupancy variances of European single-person households. *Energy Policy*, (44), 199–206.
Torriti, J. (2014). A review of time use models of residential electricity demand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (37), 265–272.
Tso, G. K. F., & Yau, K. K. W. (2003). A study of domestic energy usage patterns in Hong Kong. *Energy, 28*(15), 1671–1682.
Tso, G. K. F., & Yau, K. K. W. (2007). Predicting electricity energy consumption: A comparison of regression analysis, decision tree and neural networks. *Energy, 32*(9), 1761–1768.
Twerefou, D. K., & Abeney, J. O. (2020). Efficiency of household electricity consumption in Ghana. *Energy Policy*, 144.
Vorger, E. (2014). *Etude de l'influence du comportement des habitants sur la performance énergétique du bâtiment*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
Weber, C., & Perrels, A. (2000). Modelling lifestyle effects on energy demand and related emissions. *Energy Policy, 28*(8), 549–566.
Widén, J., & Wäckelgård, E. (2010). A high-resolution stochastic model of domestic activity patterns and electricity demand. *Applied Energy*, (87), 1880–1892.
Widén, J., Lundh, M., Vassileva, I., Dahlquist, E., Ellegård, K., & Wäckelgård, E. (2009). Constructing load profiles for household electricity and hot water from time-use data—Modelling approach and validation. *Energy and Buildings, 41*(7), 753–768.
Widén, J., Nilsson, A., & Wäckelgård, E. (2009). A combined Markov-chain and bottom-up approach to modelling of domestic lighting demand. *Energy and Buildings, 41*(10), 1001–1012.
Wiesmann, D., Azevedo, L. I., Ferrão, P., & Fernández, J. E. (2011). Residential electricity consumption in Portugal: Findings from top-down and bottom-up models. *Energy Policy, 39*(5), 2772–2779.
Wyatt, P. (2013). A dwelling-level investigation into the physical and socio-economic drivers of domestic energy consumption in England. *Energy Policy*, (60), 540–549.
Yao, R., & Steemers, K. (2005). A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK. *Energy and Buildings*, (37), 663–671.
Yohanis, Y. G., Mondol, J. D., Wright, A., & Norton, B. (2008). Real-life energy use in the UK: How occupancy and dwelling characteristics affect domestic electricity use. *Energy and Buildings, 40*(6), 1053–1059.
Zhang, J., Yang, X. Y., Shen, F., Li, Y. W., Xiao, H., Qi, H., et al. (2012). Principal component analysis of electricity consumption factors in China. *Energy Procedia*, (16), 1913–1918.
Zhao, B., Ye, M., Stankovic, L., & Stankovic, V. (2020). Non-intrusive load disaggregation solutions for very low-rate smart meter data. *Applied Energy*, 268.
Zhou, Y., Shi, Z., Shi, Z., Gao, Q., & Wu, L. (2019). Disaggregating power consumption of commercial buildings based on the finite mixture model. *Applied Energy, 243*, 35–46.

Annexe IV : Paramètres effectifs sur la consommation électrique en France

Type et taille de logements en France : Un logement en France est nommé selon le nombre de pièces hors cuisine, salle de bain et toilettes et peut être d'environ 7 mètres carrés à 600 mètres carrés ou plus (ex. un T2 a deux pièces comprenant 1 chambre et 1 salon ainsi qu'une cuisine et des services). Les tailles existantes les plus courantes en fonction de leur type sont fournies à la suite d'une étude de 1000 logements aléatoires en ligne, à louer ou à vendre, en France métropolitaine.

Tableau IV-1 : Taille commune des logements en fonction de leur type en France métropolitaine

Réf : Basé sur une étude de 1000 biens en ligne aléatoirement mis en location ou en vente en France métropolitaine (2012)

Type	Taille minimale et maximale trouvée entre 1000 sélections aléatoire (m^2)
Studio	7-46
T2	24-71
T3	44-110
T4	60-160
T5	72-170
T6	60-260
T7	67-300
T8	100-351
T9	135-368
T10 et plus	120-600

Réf : Basé sur une étude de 1000 biens en ligne aléatoirement mis en location ou en vente en France

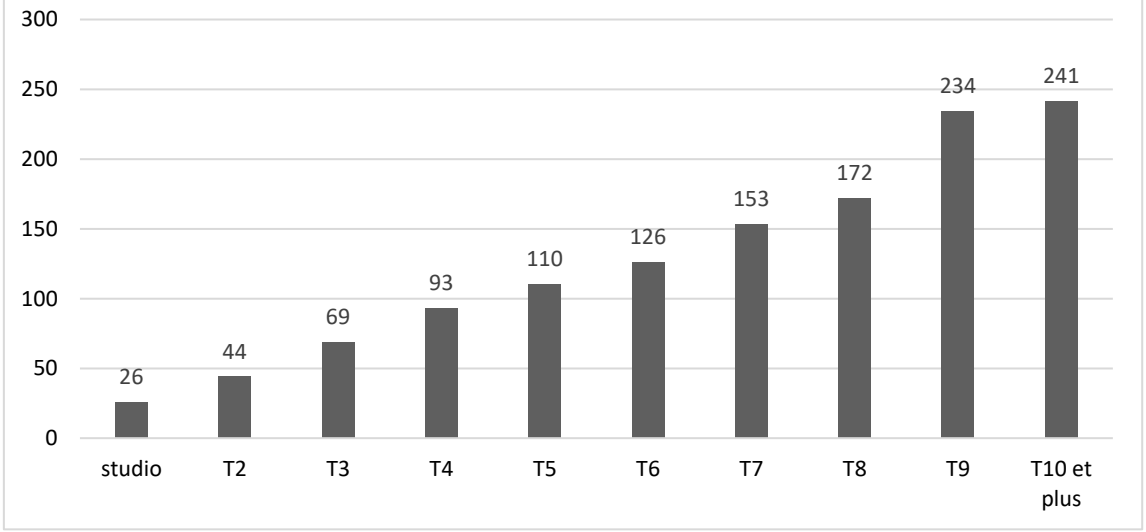


Figure IV-1 : Taille moyenne des différents types de logements en France métropolitaine

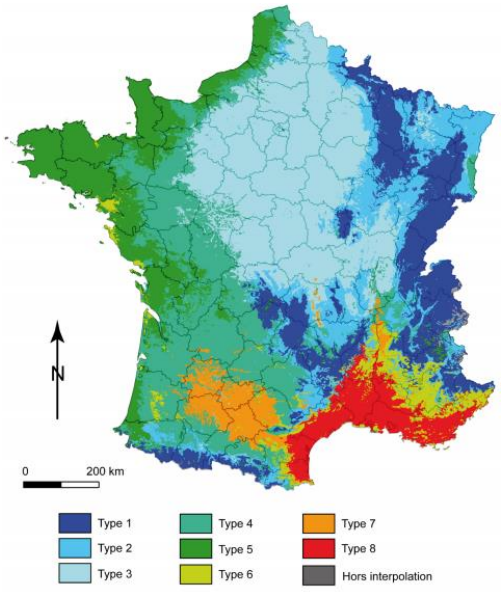
Tableau IV-2 : Superficie (m^2) et type de logement de 1000 logements aléatoires en location ou en vente en ligne en France métropolitaine (2012)

Réf : Basé sur une étude de 1000 biens en ligne aléatoirement mis en location ou en vente en France métropolitaine (2012)

studio	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10+
30	48	65	125	95	116	170	162	154	T14-300
20	35	70	120	121	121	300	170	210	T10-360
30	40	65	126	115	108	227	159	180	T10-380
18	30	67	74	72	150	150	160	200	T14-310
20	38	75	105	95	152	158	130	326	T10-330
28	44	64	87	120	110	110	131	200	T10-254
30	36	75	110	115	135	220	240	285	T11-400
25	45	65	104	105	120	155	175	240	T14-280
24	58	70	120	110	260	133	250	210	T11-220
26	37	72	78	103	140	200	200	319	T10-187
31	44	60	90	100	130	140	172	177	T10-440
25	42	77	130	140	100	130	201	268	T10-285
30	53	70	100	110	113	112	180	325	T13-378
21	32	56	87	100	169	160	150	272	T12-340
30	60	89	101	73	90	170	200	280	T10-311
20	52	74	83	160	150	260	120	270	T10-210
34	35	65	116	100	90	120	320	166	T10-400
14	54	64	90	87	122	200	260	250	T12-240
28	38	98	90	93	120	260	160	282	T10-205
21	50	52	113	94	144	157	165	175	T10-150
31	42	65	100	114	168	150	115	300	T12-190
33	40	60	100	130	152	158	100	165	T18-352
28	65	67	107	121	140	137	220	234	T10-209
19	55	68	74	145	101	143	150	220	T11-180
20	33	66	80	131	168	120	180	206	T10-145
30	32	65	92	90	130	240	141	210	T10-163
23	30	65	85	92	100	230	129	230	T11-170
31	37	63	80	92	140	125	180	200	T10-240
37	44	66	110	121	95	150	130	210	T10-220
23	30	65	67	120	60	105	198	300	T11-150
32	28	90	74	146	120	67	134	250	T12-235
25	45	66	150	90	83	180	200	368	T10-227
23	40	61	80	100	85	143	161	240	T10-130
26	32	70	115	98	165	140	150	260	T10-500
20	45	52	80	90	103	120	197	162	T10-240
30	52	70	84	99	100	300	158	157	T13-200
46	48	65	83	75	90	110	215	255	T10-250
27	44	80	120	117	150	120	100	180	T10-185
18	46	86	90	100	94	190	148	260	T10-229
20	50	70	90	110	175	150	130	254	T10-204
22	49	80	120	110	120	121	180	169	T10-254
25	50	61	64	85	139	160	298	230	T11-240
34	48	66	100	85	80	120	240	250	T10-225
30	46	62	90	103	90	120	112	243	T11-150
22	40	70	160	130	80	140	203	320	T10-298
30	30	91	84	120	141	170	231	167	T10-140
26	56	56	85	140	100	157	120	285	T10-200
15	45	72	80	115	125	90	100	210	T10-181
19	52	68	90	118	170	70	130	190	T10-183
38	44	74	70	84	170	150	150	300	T11-120
31	48	57	94	110	100	110	230	185	T10-171
41	55	56	95	90	120	90	250	150	T14-181

29	71	62	77	118	80	215	160	270	T15-217
35	50	65	73	162	123	90	105	242	T10-200
19	45	57	83	140	120	258	160	210	T10-270
27	30	60	79	105	130	135	240	250	T12-300
28	30	58	90	152	140	100	110	160	T10-150
25	35	84	92	114	70	99	160	235	T10-200
24	49	60	75	117	120	90	196	216	T16-328
24	40	58	100	97	110	90	150	205	T12-180
19	50	53	70	120	109	100	140	300	T15-300
11	46	75	84	110	83	90	187	232	T10-170
25	48	65	70	170	160	188	150	190	T10-180
28	25	65	60	130	119	128	200	260	T11-143
7	45	110	77	100	206	100	175	180	T10-236
33	46	68	82	100	130	280	200	233	T10-200
9	41	86	110	95	137	80	185	182	T10-165
35	55	87	122	110	76	103	250	176	T10-190
29	59	67	70	77	106	182	200	167	T11-220
19	60	59	76	100	110	200	100	205	T11-208
36	53	64	92	110	115	125	180	235	T11-200
30	40	58	100	120	92	96	120	265	T12-248
30	60	100	84	110	140	110	159	200	T11-232
35	40	60	88	150	86	180	120	135	T12-336
24	33	68	97	95	88	120	155	220	T10-130
23	66	68	76	166	183	130	100	300	T12-190
26	45	66	90	121	153	156	110	265	T10-240
27	42	90	81	104	160	160	150	239	T15-183
23	47	55	84	106	128	200	120	260	T10-250
27	32	69	90	100	160	129	128	300	T10-200
38	50	60	92	120	180	150	196	222	T12-175
24	44	44	90	79	100	180	200	233	T10-300
23	45	57	72	94	128	120	133	185	T10-200
35	48	80	90	90	150	165	200	202	T14-400
22	24	65	87	110	178	195	250	205	T10-250
35	40	110	127	112	130	255	280	326	T10-250
27	40	90	87	120	185	100	200	210	T11-315
10	42	55	85	110	152	108	145	330	T10-240
20	40	68	90	95	160	130	351	177	T11-120
21	31	60	114	166	85	172	165	241	T10-180
21	48	62	84	121	120	110	300	195	T12-300
34	40	67	100	104	96	221	153	235	T11-294
18	44	70	120	106	110	162	180	252	T10-250
14	54	78	110	100	155	160	110	250	T10-200
30	42	70	112	85	156	190	120	160	T10-140
24	53	57	93	92	120	145	132	203	T10-211
42	50	62	72	90	110	175	120	320	T11-295
37	47	72	100	110	120	172	200	240	T12-212
38	37	100	75	112	120	210	110	270	T14-352

Réf : CYBERGEO (2010)



T1 : Montagneux

T2 : Semi-continental et marges montagnardes

T3 : océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord

T4 : Océanique altéré

T5 : Océanique franc

T6 : Méditerranéen altéré

T7 : Bassin du Sud-Ouest

T8 : méditerranéen franc

Figure IV-2 : Cartes des climats de France métropolitaine hors Corse

Réf : INSEE (2010)

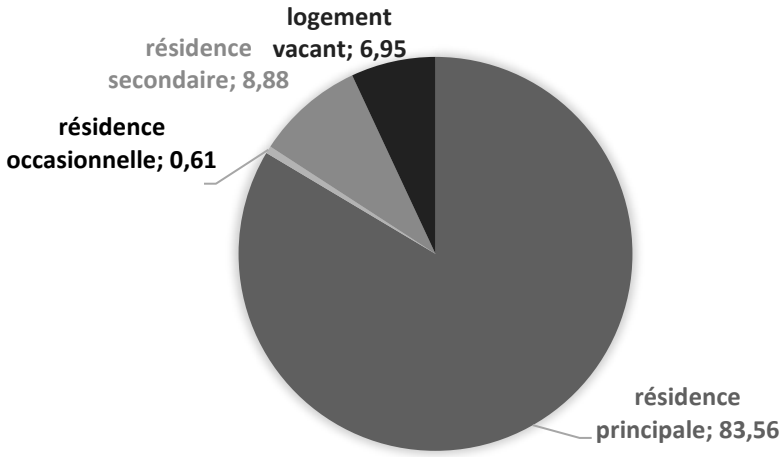


Figure IV-3 : Répartition des logements selon leur fonctionnalité en France par pourcentage

Réf : INSEE - RP2009 exploitation principale

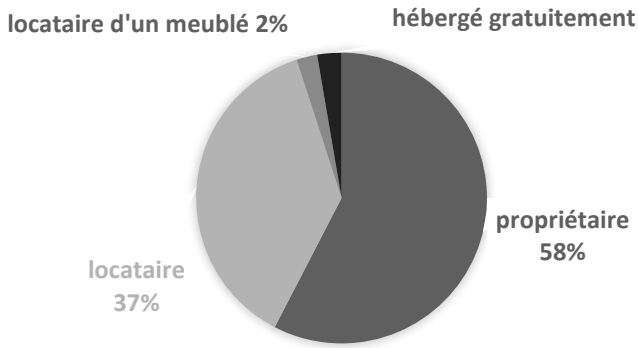


Figure IV-4 : Statut de la propriété concernant le secteur résidentiel en France métropolitaine

Réf : INSEE - dispositif SRCV 2010

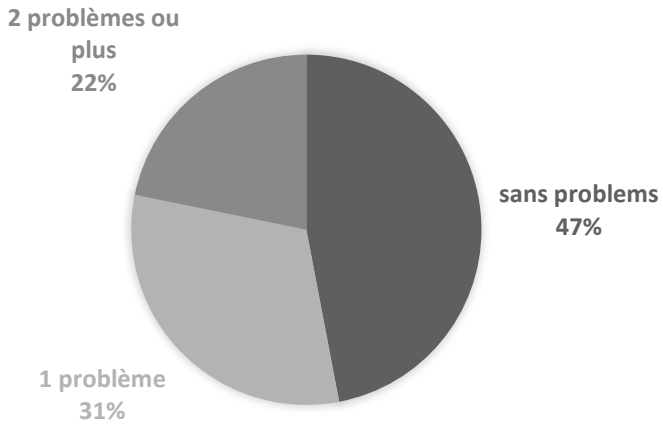


Figure IV-5 : Logements avec ou sans problèmes en France métropolitaine

Annexe V : Consommation électrique des appareils domestiques

Tableau V-1: Références utilisées pour collecter les données nécessaires associées aux appareils électriques domestiques

Réf : mentionnées dans le Tableau					
No.	**Nom de l'éditeur/du fournisseur**	**Type d'établissement/ Expertise de l'auteur**	**Titre d'étude ou de recherche**	**Date**	**Articles référencés**
1	Centre Urbain	Association des études d'urbanisme et d'environnement à Bruxelles	Appareils électroménagers & éclairage	2012	
2	Energie Douce	Entreprise spécialisée dans les énergies renouvelables	Tableau de consommation des appareils électroménagers	-	Consommation énergétique moyenne des appareils en cours d'utilisation
3	Ecowizz	Producteur de prises électriques et d'applications intelligentes		2010-2016	
4	Lawrence Berkeley National Laboratory	Plateforme publique de documentation sur l'ingénierie	Home Energy Saver & Score: Engineering Documentation	2012-2014	
5	Les Numériques	Magazine en ligne consacré à l'essai de produits numériques	La consommation électrique des appareils domestiques	2011	Consommation énergétique moyenne des appareils en cours d'utilisation
6	Pomona College	Institut d'enseignement	Electrical Appliance Typical Energy Consumption Table	2012	Consommation énergétique moyenne des appareils en cours d'utilisation
7	Sidler/ PW consulting	Expert en gestion de l'énergie	Maîtrise de la demande d'Electricité Etude expérimentale des appareils de cuisson, de froid ménager et de séchage dans 100 logements	1999	
8	Sidler /Enertech, France	Expert en gestion de l'énergie	Consommations de veille des principaux appareils domestiques	2012	
9	Sust-it	site web sur l'efficacité énergétique des produits électriques	N/A	2006-2016	
10	U.S Department of Energy (DoE)	Service gouvernemental concernant l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables	Residential Miscellaneous Electric Loads: Energy Consumption Characterization and Savings Potential.	2007	Consommation énergétique moyenne des appareils en cours d'utilisation
11	U.S Department of Energy (DoE)	Service gouvernemental concernant l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables	Building energy book (statistics on residential and commercial building energy consumption)	2012	Consommation énergétique moyenne des appareils en cours d'utilisation
12	Website of different Marques of electric	Fabricant	Product's manuals, use and care manuals, installation information and energy guides,	2012-2016	Puissance nominale et moyenne

	appliance producers		product specifications and technical standards		
13	Swiss agency for energy efficiency	Office fédéral de l'énergie	Standby consumption of household appliances	2003	Consommation de veille
14	Hydro Quebec	Fournisseur d'électricité	N/A	-	
15	Diver/autre	Enquêtes, forums, questionnaires, entretiens, calculs à partir d'autres données disponibles, informations des similaires, etc.	N/A	2012-2017	

Tableau V-2 : Puissance moyenne et fréquence d'utilisation des appareils électriques de : a) cuisson/cuisine ; b) stockage/entretien ; c) salon/loisir ; d) salle de bain/soins personnels et e) bureau

Réf : Tableau précédent — a)

App.	Variété de la puissance nominale de différentes marques (W)	Puissance nominale moyenne (Wh/h)	Conso. moyenne en fonction (Wh/h)	Puissance en veille (W)	Puissance à l'arrêt (W)	Conso. annuelle en veille (kW/h)	Durée moyenne d'usage par cycle (min)	Cycle	par:	Conso. annuelle moyenne par personne (kW/h)	Conso. annuelle moyenne par foyer (3,2 personnes en moyen) (kW/h)
B	180-1400	700	-	N/A	N/A	N/A	6	55	yr	1	4
CM	500-2450	1205	750	2	3	17	10	335	yr	10	42
			1100		0,4			4	d	63	34
			1000							12	41
			834								98
			1330								
DF	800-3600	1928	1750	N/A	N/A	N/A	20	1,5	m	3	11
			1833				60	48	yr		84
DW	193-372*	kWh/an	900	1.3	N/A	17	60	280	yr	83	265
			25					240	yr	69	220
								240	yr	68	216
										90	288
E	85-800	341	-	N/A	N/A	N/A	5	55	yr	0.5	1.6
FM	750-1500	1143	-	N/A	N/A	N/A	90	4	yr	2	7
FR	127-194* kWh/an	18	-	N/A	N/A	N/A	1440	-		63	201
W	1100-3000	2169	1589	N/A	N/A	N/A	5	1	d	18	58
			2000				6	1	d	13	61
			1500								
K	100-180	132	-	N/A	N/A	N/A	2	24	yr	0.03	0.1
H	100-380	216	110	N/A	N/A	N/A	40	335	yr	8	25
M	170-800	513	125	N/A	N/A	N/A	10	48	yr	0.3	1
MW	700-1000	839	667	2	N/A	19	9	604	yr	23	75
MF	200-1500	859	-	N/A	N/A	N/A	15	91	yr	6	20
O	25-115	71	-	N/A	N/A	N/A	10	15	yr	0.05	0.2
C	400-3000	1280	-	N/A	N/A	N/A	30	4	yr	1	3
RM	350-1500	943	-	N/A	N/A	N/A	90	4	yr	2	6
R		27	23	N/A	N/A	N/A	1440	-	-	-	201
			175								285
			33								
RC	400-710	577	-	N/A	N/A	N/A	15	104	yr	5	15
SW	650-1800	958	1000	N/A	N/A	N/A	60	15	yr	5	15
TO	700-3000	1183	875	N/A	N/A	N/A	10	48	yr	2	5
			750							3	11
			1050								
			800								

b)

App.	Variété de la puissance nominale de différentes marques (W)	Puissance nominale moyenne (Wh/h)	Conso. moyenne en fonction (Wh/h)	Puissance en veille (W)	Puiss. à l'arrêt (W)	Conso. annuelle en veille (kW/h)	Durée moyenne d'usage par cycle (min)	Cycle	par:	Conso. annuelle moyenne par personne (kW/h)	Conso. annuelle moyenne par foyer (3,2 personnes en moyen) (kW/h)
RA	0.1-12	3.4	1.7	N/A	N/A	N/A	1440	-	-	6	18
			23							6	20
			5				240	335	yr	9	30
D	500-900	657	-	N/A	N/A	N/A	5	14	yr	0.2	0.8
I	1000-2750		925	N/A	N/A	N/A	300	48	yr	81	260
			1350				20	1	w	135	432
			1800								
TD		1324	2750	1.4	N/A	103	106	64	yr	133	427
								64	yr	67	215
V	600-1600	950	725	N/A	N/A	N/A	40	48	yr	22	70
			1900					1	w	21	66
										29	94
WM		1400	2100	2.7	N/A	-	40	192	yr	54	173
								220	yr	56	179

C)

App.	Variété de la puissance nominale de différentes marques (W)	Puissance nominale moyenne (Wh/h)	Conso. moyenne en fonction (Wh/h)	Puissance en veille (W)	Puiss. à l'arrêt (W)	Conso. annuelle en veille (kW/h)	Durée moyenne d'usage par cycle (min)	Cycle	par:	Conso. annuelle moyenne par personne (kW/h)	Conso. annuelle moyenne par foyer (3,2 personnes en moyen) (kW/h)
A	10-600	112	45	43	5	-	2h13min	130	yr	42	
					3						
M		7	6	N/A	N/A	-	21h				57
			7				24h	365	yrr		
DVD	9-40	18	14	11	3	-	52min	156	yr		
			17	1	2		1h42min				
					3						
					3						
HC	300-1330	774	38	19	3	-	4h78min	335	yr	58	
				34	1						
TV (CRT)			90	14	3	59	3h40min	335	yr	73	180
					7		2h49min				
							4h				
TV (LCD)			170	8.5	2	22	3h40min	335	yr	185	263
			211		1		4h54min	365	yr		145
			72		3		4h				
							5h30				
TV (plasma)			303	5.6	2	22	3h40min	335	yr	503	424
			339		1		6h05min	365	yr		473
					3		4h				
			235				5h30				
TVB	6-48	21	16	0.8	N/A	-	21h	365	yr	61	197
			23		15		24h			66	187
			26				5h30				

d)

App.	Variété de la puissance nominale de différentes marques (W)	Puissance nominale moyenne (Wh/h)	Conso. moyenne en fonction (Wh/h)	Puissance en veille (W)	Puiss. à l'arrêt (W)	Conso. annuelle en veille (kW/h)	Durée moyenne d'usage par cycle (min)	Cycle	par:	Conso. annuelle moyenne par personne (kW/h)	Conso. annuelle moyenne par foyer (3,2 personnes en moyen) (kW/h)
RE		6	10	5	-	-	15	335	yr	0.1	0.3
HD		1750	450	30	N/A	-	30	335	yr	13	40
			938	N/A						3	11
HH		967	-	-	-	-	74	153	yr	57	182
TB		1.9	1.7	-	-	-	740	2	w	2	7

e)

App.	Variété de la puissance nominale de différentes marques (W)	Puissance nominale moyenne (Wh/h)	Conso. moyenne en fonction (Wh/h)	Puissance en veille (W)	Puiss.e à l'arrêt (W)	Conso. annuelle en veille (kW/h)	Durée moyenne d'usage par cycle (min)	Cycle	par:	Conso. annuelle moyenne par personne (kW/h)	Conso. annuelle moyenne par foyer (3,2 personnes en moyen) (kW/h)
PC (CRT screen)			110	4	-	400	3h15min	240	Yr	-	506
			136	7		8	4h				110
			190	50			2h				163
PC (flat screen)			75	1	-	25	3h15min	240	Yr	-	97
			102	6		5	4h	335	Yr		46
			130	3		219	6h				339
			103	30			2h				78
S			-	N/A	-	N/A	14h42m	-	-	-	17
L		37	25	2		13	135min	365	Yr	41	37
			23		-	10	120min				17
						9	180min				
						38					
F		18	-	4	-	39	-	-	-	-	-
P		23	15	4	3	20	60min	1	W	-	21
			11	5			10min	1	D		18
			20								
TE			5	2	-	20	24h	365	Yr	-	12
			14								
MO			3	-	-	1	60min	365	Yr	1	-
			7				60min	365	Yr	2	
			4								
T			16	-	-	-	300min	183	Yr	12	-

Tous les appareils utilisés dans cette recherche sont conçus pour un usage domestique et tous les appareils destinés à une utilisation commerciale sont exclus. Cette étude ne couvre pas :

- Les appareils de chauffage ou de climatisation, les couvertures chauffantes électriques, les ventilateurs ou tout autre système de chauffage ou de climatisation électrique ;
- Les appareils d'éclairage ;

- Les équipements électriques pour les aquariums, les piscines et les spas tels que les pompes, les lumières, le chauffage, les systèmes de jacuzzi, etc.

La consommation électrique des appareils varie d'un modèle à l'autre. Un appareil électrique consomme plus ou moins d'électricité en fonction de ses caractéristiques techniques, de sa taille, de son efficacité, etc. Il existe également des éléments différents en termes de fonction, de confort, d'esthétique et de prix. La puissance nominale moyenne de chaque appareil électrique en watts de différents fabricants est présentée ci-dessous. On y trouve également la consommation moyenne annuelle de chaque appareil en fonction de la fréquence d'utilisation supposée et des statistiques industrielles.

Ces ensembles de spécifications ont été collectés sur les sites de divers distributeurs pour 74 appareils actuellement en production en France.

Certains appareils consomment des quantités variables d'électricité. Par exemple, une table de cuisson consomme en fonction de son niveau de température. Un autre exemple est celui d'un lave-linge, qui consomme plus d'énergie s'il lave à l'eau chaude. Dans le réfrigérateur, il y a un cycle dans lequel le compresseur ne fonctionne pas et la consommation se réduit à zéro, puis il arrive à sa consommation maximale et ensuite il répète ce cycle. Cette recherche considère la puissance moyenne et ne tient pas compte de la surconsommation de l'appareil due à son inefficacité énergétique ni de ses diverses consommations dues à ses réglages (ex. températures plus élevées dans les tables de cuisson, volumes plus élevés dans les systèmes audio, températures d'eau plus élevées dans les machines à laver, etc.)

Home World Business (Housewares census 2011) note que si le prix continue d'être un élément important du processus de décision des consommateurs dans le choix de différents appareils, il est de plus en plus évident que d'autres facteurs, notamment la durabilité, la performance et l'efficacité, deviennent des facteurs efficaces dans le choix d'un appareil, d'où la collecte de ces données. Ce qui suit explique le mode de consommation des appareils, leur temps d'utilisation, leur utilisation en période de pointe et leur fréquence d'utilisation en raison de divers rapports, études et autres références et présente une collection de différents modèles et marques de fabricants avec leur consommation électrique nominale d'entrée annoncée par leurs producteurs comme des spécifications techniques pour se référer. Ces informations, collectées entre 2012 et 2015, dépendent de la taille de l'appareil, de son modèle, du fabricant, de ses caractéristiques, etc. et changeront éventuellement à l'avenir en

raison des évolutions technologiques potentielles de l'industrie électrique et des efforts des fabricants pour répondre aux politiques nationales et internationales en matière de réduction de la consommation (Tableau V-3 – Réf : Tableau V-1).

Tableau V-3 : Puissance nominale et consommation moyenne des appareils électriques

1. Blender

Marques	SIEMO PC282; PC289; PC290	RUSSELL HOBBS 18995-56; 18356-56; 20230-56; 21480-56	RIVIERA ET BAR PR384A	PROLINE OMX5; SP1350 ; MXS5	PHILIPS HR2109/90; HR2201/80; HR2097/00 ; HR2872/00 ; HR2181/10; HR2202/80
Conso. (w)	800; 1100; 1350	750; 1000; 850; 800	1200	300; 1000; 550	400; 990; 800; 350; 850; 180; 900
Marques	MAGIMIX 11611	KRUPS YY8521FD; YY8522FD	KITCHENAID 5KSB5553E	KENWOOD BL370; BL460; BLX68; BLM800WH ; BL680; SB055	BRAUN JB3060BK; JB5050BK
Conso. (w)	1200	850; 350	550	400; 600; 800; 1400; 500; 300	800; 900
Marques	LISTO BML1; BML2V	ESSENTIEL B EPAE; EBM6i	LAGRANGE 609001	PRINCESSE 21204001001; SMOOTHIE	TRISTAR BL4431
Conso. (w)	500; 550	250; 700	1000	1000; 180	180
Marques	CUISINART BF603E	MOULINEX LM9031B1; LM310E10; LM142A26; LM233A10; LM841110; LM300141	BRANDT BLE615EG	SWEET ALICE 26883	
Conso. (w)	600	1100; 500; 300; 600; 980; 400	600	800	

Puissance nominale : De 180 à 1400 watts
Consommation moyenne : 699.13 watts

2. Barbecue/grille-viande

Marques	RUSSELL HOBBS 20960-56; 19921-56	FAGOR BBC820	ENO Elektra45	TEFAL CB501801; TG390812; BG902D12; GC305012; CB445001; CB902012	PHILIPS HD6360/20; HD4430/20	MOULINEX BG132811
Conso. (w)	2000 ; 1600	1800	1500	1800; 1900; 2200; 2000; 2400; 2300	2000; 2300	2000
Marques	WEBER Q240	INDU+ Tomboy; Beechboy	KRAMPOUZ GECIB3; GECIA4	RIVIERA ET BAR QC448A; QC445A ; QC416A	KITCHEN CHEF AJ5001A	ESSENTIELB EBAP1
Conso.(w)	2200	3700; 3200	2000; 3200	1600; 1900; 2200	1800	2200
Marques	INTERCOL BBGRILL30	PROLINE BBQ22tsble; MGP200; PLA2000	CUISINART GR50E	FORGE ADOUR Sukaldea320	ROLLER GRILL PCE4000	LISTO BATL3
Conso. (w)	1000	2200; 1800; 2000	2000	1600	3000	2000

Puissance nominale : De 1000 à 3700 watts
Consommation moyenne : 2134.66 watts

3. Distributeur de bière

Marques	SEB VB2158F2B80	KITCHEN CHEF TH12B ; CO12A	KRUPS VB502E00 ; VB5021B90	PHILIPS HD3620/25
Conso.(watts)	70	73 ; 88	61 ; 70	70

Puissance nominale : De 61 à 88 watts
Consommation moyenne : 71.2 watts

4. Machine à pain

Marques	LISTO MP L4	RIVIERA ET BAR QD794A ; QD789A ; QD782A	KENWOOD BM450	PROLINE MP300	MOULINEX OW311E10	DOMO B3990; B3959; B3958
Conso.(watts)	600	1240; 850; 600	780	660	700	815 ; 600 ; 850

Puissance nominale : De 600 à 1240 watts
Consommation moyenne : 769.5 watts

5. Ouvre-boîtes

Marques	TRISTAR BO-2104	SEB 8536-01	KENWOOD CO 600	KRUPS GVE142
Conso.(watts)	50	35	40	50

Puissance nominale : De 35 à 50 watts
Consommation moyenne : 43.75 watts

6. Moulin à café

Marques	ESSENTIELB EMC1	BOSCH MKM6003	KRUPS GVX242; KM75	MOULINEX AR110510	DELONGHI KG79	KITCHENAID 5KCG100
Conso.(watts)	150	180	100; 200	180	110	220

Puissance nominale : De 100 à 220 watts
Consommation moyenne : 162.86 watts

7. Machine à café

Type	**Modèle/dimension**	**Puissance d'entrée nominale (W)**
Drip	Petit (4/5 tasse)	550-900
Drip	Grand (10/12 tasse)	750-1200
Single-serve	*Capsule*	900-1500
Espresso	*Pump*	1000-1500
Espresso	*Steam*	600-800

Marques	ARIETE 00M138811AR0	BOSCH TES50621RW ; TES50328RW ; TKA8013 ; TAS1203 ; TAS3202	MIELE CM 6110	PHILIPS HD8643/01 ; HD8752/85 ; HD8760/01 ; HD9933/11; HD7447/40; HD7810/61	JURA Ena ; Impressa	RIVIERA ET BAR CE305A ; CE442A ; CE542A ; CE760A ; CE830A ; CE834A ; CF865A
Conso.(w)	900	1100 ; 1600 ; 1160 ; 1200 ; 1300	1450	1400 ; 1900 ; 1850 ; 1300 ; 1000 ; 1450	1450 ; 1350	1250 ; 1275 ; 2225 ; 1550 ; 1625 ; 1325 ; 1075
Marques	DELONGHI ESAM5400EX ; EC250 ; EC5 ; EN520S ; BCO415 ; Lattissima ; ICM15250	MELITTA Caffeo ; Aroma ; Look ; Fun	ILLY 6603 ; 6739 ; 6580	KRUPS YY1540FD ; YY2292FD ; YY1531FD ; YY8126FD ; YY1801FD ; YY8204FD ; KM900830 ; YY1600FD ; KM468910 ; YY8310FD ; YY8304FD	KENWOOD ES024 ; CM024	ELECTROLUX ELM5100 ; ELM3100RE ; EKAM300 ; EKF7800; EKF955
Conso.(w)	1450 ; 1100 ; 800 ; 1300 ; 1750 ; 1400 ; 1000	1400 ; 500 ; 900 ; 950	1200 ; 1250 ; 1050	1260 ; 1500 ; 1200 ; 1450 ; 2300 ; 2450 ; 1000 ; 1460 ; 850 ; 1400 ; 1100	1100 ; 1200	1300 ; 1200 ; 1000 ; 1080 ; 1400
Marques	SAECO HD8964/01 ; HD8327/91	PROLINE EXP15000 ; CBE16 ; EXP1600 ; KCM6 ; PCM125 ; KCME	ESSENTIELB EXPA ; SYLO ; LOLA	KITCHENAID 5KES2102 ; 5KCM0802EER; 5KCM0402EOB	LISTO XPL1 ; CFL3b	MAGIMIX 11411 ; 11304 ; 11423 ; 11335 ; 11344 ; 11492 ; 11480
Conso.(w)	1900 ; 950	1050 ; 1850 ; 1000 ; 650 ; 870 ; 800	1400 ; 1000 ; 600	1300 ; 1200 ; 700	800 ; 750	1260 ; 1710 ; 2010 ; 2300 ; 1700 ; 1465 ; 1200
Marques	MOULINEX FT2608 ; FT360811 ; FG260811 ; FG150813	RUSSELL HOBBS 18626-56; 18503-56; 20690-56	BRANDT CAF2012X; CAF688R; CAF2012X	ROWENTA CT3818; CG380811; CG3808	SEB CM425D31; CM511800	TEFAL CM282810; CM340811; CM390811
Conso.(w)	800 ; 850 ; 1000 ; 600	1050 ; 1100 ; 1000	1100 ; 680 ; 1000	800 ; 1100 ; 1000	1200 ; 600	1000 ; 600 ; 1200
Marques	SIMEO CF120	PANASONIC NC-DF1BXE	FIGUI	LAGRANGE 529001	BREVILLE VCF050X-01	
Conso.(w)	650	900	1100	1000	650	

De 500 à 2450 watts en fonction de leur taille, du fabricant, etc.
Consommation moyenne : 1204,8 watts
Les machines à espresso consomment entre 900 et 2450 W, avec une consommation moyenne de 1675 W

Les cafetières filtres consomment entre 500 et 1400 W, avec une consommation moyenne de 950 W
Les machines à café à capsule consomment entre 1200 et 1450 W

8.Plaque de cuisson
Grande (3-5 foyers)

Marques	Whirlpool	Siemens	Sauter	Essentiel B	Hotpoint	Gorenje
Conso.(Watts)	6000-7200	4600-8600	5900-7200	7000-7400	6400	5500
Marques	Bosch	Beka	Faure	Listo	Candy	Brandt
Conso.(Watts)	4600-7200	5000-7200	5300-7400	5100-6000	7200-7500	5500-7200
Marques	Rosières	Electrolux	De Dietrich	Miele	Scholtes	AEG
Conso.(Watts)	6500-8600	7100-7400	7200-9900	7400	7200	7400
Marques	Indesit	Samsung	Bomann	Fagor	Neff	
Conso.(Watts)	6200	7200	7000	5900-8900	4600-7200	

De 4600 à 9900 watts
Consommation moyenne : 6686.96 watts

Petite (2 foyer)

Marques	De Dietrich	Beko	ELECTROLUX EHS3920HOX	PROLINE VH23T, IH235T, IH234P	WESTLINE WPE2IX, WTCV2N	AIRLUX AT320WH, ATH32KN
Conso.(Watts)	3100	2500	3000	3000, 3500, 3400	2500, 3000	3500, 2900
Marques	ROSIERES RDH32	FAURE FEV3920FBV	Brandt	Scholtes	Smeg	
Conso.(Watts)	2900	3000	2800-3200	3300	2900	

De 1700 à 3700 watts
Consommation moyenne : 2730 watts

9. Machine à barbe à papa

Marques	Lagrange 389002	Listo BPL2	Siméo FC342	Domoclip DOM201
Conso.(watts)	400	400	450	500

De 400 à 450 watts
Consommation moyenne : 437.5 watts

10. Friteuse

Marques	Moulinex AF123111; AM101510; AM302130	Magimix 11609/11600, 11598	Philips HD6163/00; HD9220/20	Proline DF30	Brandt FRI2500E	Listo FCF L2	Essentiel b EFP 5; EFM 1; EFCA 1; EFP 42	Frifri FRI.1905
Conso. (w)	1600; 2100 ; 1800	3000; 2400	2200; 1450	1800	2200	1800	2000; 900; 1800; 2600	3200
Marques	Delonghi F28533; F34532CZ; FH1163/1; F13235; F22310CZ	Tristar FR6929; FR6904; FR6930; FO1102	Riviera et bar QD574A; QD510A	SEB FR405400; FR460000; GH8070; FZ200000; FF160800; AH9500	Russell Hobbs 20810-56	Domo DO461FR; DO456FR	Princess 182727-01	Roller grill R.FD80RC
Conso. (w)	1800 ; 3200; 1400; 1200; 2400	800; 1600; 2000; 900	2200; 900	2300; 2100; 1400; 1200; 1900; 1550	1230	1800; 3000	2000	3600

De 800 à 3600 watts
Consommation moyenne : 1927.83 watts

11. Lave-vaisselle

Marques	HOTPOINT LSFF 9M114 C EU, LSB 7M121 B EU, LFK 7M121	Faure FDF16001WA	Electrolux ESF 6528LZW, ESF 5521LOW, ESI8420ROX,ESF8540ROW	De dietrich DVY1310X, DVH1180GJ, DVH1464J , DVH1150X , DVH1238J	Rosiers RDI1044RB	Brandt DFS1009, VH1100J, DKH1315I
Conso.(KWh/an)	237, 265, 193	290	290, 295, 304, 270	238, 259 , 266,	299	222, 295, 262

				262, 237		
Marques	Candy CDI 6015, CDPM96390F, CDP7270, CDPM8563X	Smeg STD413, ST2FABR02 , ST733TL	Siemens SN26U291FF, SR25E231EU, SN24D801EU, SR25M283EU, SN55M548EU, SR76T090EU, SN66M099EU	Neff S71N65X4EU	Proline DWP 1247, SDW 49-l, 1249 DWP, DWIP 49 SS, DW 1249 P WH	Whirlpool ADP8673, ADP7463WH,, ADG8798A++PCFD, DG196FD, ADG8674, ADP 4570 IX, ADPL9874IX
Conso.(KWh/an)	273, 276, 280, 270	236 , 233, 230	299, 220, 290, 237, 262, 211, 266	262	290, 222, 291, 372, 289	293, 295, 261, 211, 263, 262, 233
Marques	Thomson TDW 1445	Listo LVS49 L2s; LV48 L2b	Essentiel b ELVP, PG ELV3-451b	Aeg F78420VI0P, F56322, F65722IMOP	Samsung DW60H997OFS	LG D14447IXS, D14867IXS
Conso.(KWh/an)	299	268; 291	309 , 266	195, 262, 241	266	264, 235
Marques	ORIGANE OLV 491b	Beko DFS2539, DSFS6635, DSFN5610, DFN5530, DFGN5820X	Bosch SMS40D12EU; SPS50E12EU; SMS69U52EU, SMS50E98EU, SPV58M10EU, SMS88TI01E, SPI69T25EU, SMS69N48EU, SMS53L88EU	Indesit DSG263NX; DFP 27B16 FR, 16M19 A EU	Miele G 4700 SC, ACTIVE, G 4220 SC, G 4965 SCVI, G 4920 SCI, G 6410 SC	LADEN C5320WH,C2020WH, C5320WH
Conso.(KWh/an)	291	268, 236, 291, 290, 262	290; 220; 299, 237, 266, 211, 262, 258	268; 293, 237	221, 295, 299, 266, 262, 237	292, 324, 295

De 193 à 372 kWh/an
Consommation moyenne : 265.15 kilowatts hour per year

mini:

Marques	SIEMENS SKS26E821EU	ORIGANE OLVC 551b	ELECTROLUX ESF2300OW	BOSCH SKS51E12EU	ESSENTIELB ELVC 491b	Proline CDW53
Conso.(KWh/an)	174	185	188	174	174	174

De 174 à 188 kWh/an
Consommation moyenne : 179 kWh/an
A+++ 211, 230, 233, 237, 241
A++193, 195, 211, 258, 261, 262, 264, 265, 266, 273, 276
A+ 299, 293, 290, 291, 220, 221,222, 224, 236, 237, 295, 304, 309, 324
A 268, 222

mini:
A+ 174
A 185, 188

12. Appareil à beignets et à cupcakes

Marques	Siméo FC610	Tristar SA-1122, DM-1147	Proline MULTICAKE	Essentiel b donut	Bestron ADM218,DKP2828	Domena FC 630
Conso.(watts)	1300	800, 1200, 1000	1000	700	700, 1400	750

Puissance nominale : De 700 à 1400 watts
Consommation moyenne : 1006.25 watts

13. Batteur à œufs

Marques	Tristar MX-4159	Listo BT L2	Krups GN9031	SEB HT6181, HT612100	Russell Hobbs 21200-56, 18965-56, 20200-56	Electrolux EHM4400
Conso.(Watts)	200	200	400	800, 500	300, 380, 500	300
Marques		Kenwood HM790, HM620, HM535	Moulinex ABM11A30, HM200031	Essentiel b EBT 1	Bosch MFQ36300, MFQ3540	Proline HM120, HM251
Conso.(Watts)		400, 350, 280	200, 150	300	400, 450	120, 250
Marques	Braun HM3135WH	SEB HT4101 21, HT612100	SEVERIN HM 3810		BODUM 11532-913	Kitchenaid 5KHM9212EOB
Conso.(Watts)	500	450, 500	300		200	85

Puissance nominale : De 85 à 800 watts
Consommation moyenne : 340.6 watts

14. Cuiseurs à œufs

Marques	Wahl ZX642	Kalorik EK 10B	Severin 3056	Cuisinart CEC10E	Bestron AEC100	Steba EK3	Tristar EK3074
Conso.(watts)	400	360	400	600	400	350	350

Puissance nominale : De 350 à 600 watts
Consommation moyenne : 408.57 watts

15. Appareil à fondue

Marques	Tristar FO-1100	Tefal EF310B12, EF501601, WK3020 13	RUSSELL HOBBS 20940-56	Riviera et bar QC 040	Proline FD6B, FDC8	Princess 173000
Conso.(Watts)	1300	750, 800, 1200	1300	1000	1300, 1500	1500
Marques	Domoclip DOM 266	Lagrange 349 001	Listo FE L1	Moulinex EF150811	White Brown WF138 IX	Brandt FON800NR
Conso.(Watts)	1300	900	1300	1000	1000	1000

Puissance nominale : De 750 à 1500 watts
Consommation moyenne : 1143.33 watts

16. Congélateur

150-299 litres upright freezer (A+: 211-325, A++: 176-310, A+++: 194)

300-399 litres upright freezer (A++: 246-301, A+++: 181-201)

<70 litres chest freezer (A+ : 152)

70-149 litres chest freezer (A+: 165-193, A++: 149)

150-299 litres chest freezer (A+:190-281, A++: 172-211, A+++: 117-137)

300-399 litres chest freezer (A+: 267-318, A++: 234-250, A+++: 152)

Marque	WhirlpoolWVN26562NFN, WVE26962NFX, WVE17622NFW, WVE2650NFW , WVE22622NFW, WVA35643NFW , WVA31612NFW, WHS1421, WH2010A+E, WHE39352F, WHE22333, WHE28333 ,	GORENJE FN6181CW	Samsung RZ28H6000SA	Proline UFZ170 , PLCH101-1, PLCH200	LiebherrGKN 190, GP 2033, GP 2433, GN 2323-22, GP 2733, GNP2713, GNP3013, GN 3613, GNP3666, GN4113, GN3613, G 3513, GT1432 , GT 2122, GT 2132-G, GTP3156, GTP 2356-22 15J, GT 3622,GT 4232-G, GTP 3656-21 15J, GT3632G, GTP 3126, GT 3032-21, GT2632-G, GT3032-G	Indesit UIAA12S.1 ? UIAA 10.1, UIAA 10, F UIAA 12 F	Thomson THFZ165, THFZ190, TCH 150, TCH 250, TCH300	Candy CFUN6172XE, 5142WH, CFUN 2850 E	CURTISS OCA6250PL, CC 1105 PL
Conso. (KWh/an)	292, 246, 198, 314, 225, 194, 273, 193, 234, 250, 120, 136	284	325	212, 175, 217	262, 176, 192, 264, 208, 227, 248, 271, 181, 270,	281, 256, 266, 299	232, 255, 190, 247, 267	303, 229, 255	259, 180

					246, 267, 149, 229, 172, 137, 117, 290, 247, 152, 225, 210, 209, 190, 209				
Marques	Electrolux EUF2740AOW, ECM30132W, EC2200AOW2, EC3131AOW , EC3340AOW EC3230AOW2 , EC3230AOW2	AEG AGN7180051	Essentiel b 160-60b1, ECAV 170-60b1 , ECC 351b,ECC 293b, ECC 231b ,	LISTO CAL145-55b1, CCL 301b, CCL105b	Miele FN128215, FN12740S	Faure FFU19400WA, FFU25200WA	Hier HF-220WAA, BD-66GAA	Beko FNE20921, FN127921, RFNE290E33W, FRNE312E33X, FS127320, FN130420 , FSE21921	Bosch GSN29VW30, GSN33CW32, GSN36VW30, GSV33VW30, GSV36VW30, GCM34AW20, GCM28AW20 ,
Conso. (kWh /an)	306, 281, 227, 211, 318, 286	306	262, 244, 234, 208, 186	217, 268, 165	330, 271	240, 304	288, 152	242, 282, 310, 255, 270, 307, 234	211, 225, 234, 204, 212, 334, 292
Marque	HOTPOINT UPS 1746.1, UPAH 1831 F	SIEMENS GS29NAW30, GS36NAI31, GS 58 NAW 40, GS54NAW30, GS58NAW30F							
Conso. (KWh/an)	281, 247	211, 234, 201, 281, 301							

De 117 à 334 kWh/an
Consommation moyenne : --- kWh/an

kWh/an	Moins de 400 litres	400-499 litres	500-599 litres	600-699 litres	700 litres ou plus
avant 1980	2144(u*) 1234(c**)	2364(u) 1437(c)	2511(u) 1573(c)	2614(u) 1668(c)	2907(u) 1940(c)
1980-1989	1781(u) 1025(c)	1964 (u) 1194 (c)	2086(u) 1307(c)	2171(u) 1386(c)	2415(u) 1611(c)
1990-1992	1260(u) 725(c)	1389(u) 845(c)	1475(u) 924(c)	1536(u) 980(c)	1708(u) 1140(c)
1993-2000	875(u) 497(c)	988(u) 580(c)	1063(u) 635(c)	1116(u) 674(c)	1266(u) 785(c)
2001-2007	662(u) 404(c)	747(u) 472(c)	803(u) 517(c)	843(u) 548(c)	956(u) 638(c)
2008-2010 (20% better)	530(u) 323(c)	599(u) 378(c)	642(u) 414(c)	674(u) 438(c)	765(u) 510(c)
CEE Tier 3 (30% better)	371 (u) 226(c)	419(u) 265(c)	449(u) 290(c)	472(u) 307(c)	536(u) 357(c)

*u : *upright* (vertical) **c : *chest* (coffre)
Nous n'utilisons que la première colonne (moins de 400 litres) qui correspond à un usage résidentiel. Les volumes plus importants n'entrent pas dans le cadre de cette étude.

17. Machine à hot-dogs

Marques	Listo HD L2	Proline Hot Dog	LAGRANGE 169002	Siméo FC 465	Ariete PARTY TIME
Conso. (Watts)	380	380	370	450	650

De 370 à 650 watts
Consommation moyenne : 446 watts

18.Machine à glace

Marques	Tristar YM-2603	Essentiel b ESI 1 - GLACE A	BRANDT SOR15ER, 15EF	Domoclip DOM147P	Proline GELATI	SEB IG 500131	SIMEO FF140	MAGIMIX 11121	Lagrange 409001	CUISINART ICE40BCE
Conso.(Watts)	7	15	10, 9.5	12	12	6	40	15	12	50

De 6 à 50 watts
Consommation moyenne : 17.14 watts
Les turbines à glace sont exclues de cette étude.

19. Extractreur de jus

Marques	Moulinex JU350G10, ZU500800	Kenwood JE680	Philips HR1836/00, HR1855/70, HR1869/70	Bosch MES25A0	Riviera & bar PR886A, PR785A, PR776A, PR772A1, PR776 A7	magimix 18072F
Conso.(Watts)	400 , 300	700	500, 700, 900	700	1500, 1300, 950, 750, 1000	400
Marques	Braun J700	Electrolux EJE955	Taurus 924.717	Russell Hobbs 20365-56	Proline juicy	Kitchenaid 5KVJ0111ECA , 5KVJ0333EOB
Conso.(Watts)	1000	700	400	650	500	250, 500
Marques	NAELIA Slow Juicer	PETRA ELECTRIC FG2007	Kitchen Chef PC150	SIMEO PJ550		
Conso.(Watts)	150	150	150	400		

De 150 à 1500 watts
Consommation moyenne : 598 watts

20. Bouilloire/chauffe-eau
Ils sont utilisés généralement entre 6 et 9 heures du matin, mais aussi pendant la journée, vers 13 heures et 19 heures.

Marques	Moulinex BY105810, BY540511	Melitta Look Aqua	Philips HD9300/60	Krups YY8311FD, YY8317FD	Kenwood KMIX SJM023	Electrolux EEWA 3100	Delonghi KBZ2001.W
Conso.(W)	2400, 2000	2400	2400	2200, 2400	2200	2200	2000
Marques	Smarter iKettle	WMF LONO	Tefal BF512011, BI 8125	Listo BL L4b, BL L3, EBL 10i		Riviera et bar QD641A, QD 658 A, QD686A	Proline PJK5
Conso.(W)	2200	3000	2400 , 2200	2200, 2000, 1200		2000 , 2200, 1300	2200
Marques	SEVERIN WK3342	Essentiel B EBL RETRO, EBL 13i	Bosch TWK7809	Brandt BO811, BO1700X	Russel Hobbs 20192-70, 20420-70	Morphy M100002	Smeg KLF01RDEU
Conso.(W)	2200	1200, 2200	2200	1100, 2200	2200, 2400	2200	2400
	Breville VKJ885X-01, VKJ821X-01	Kitchenaid 5KEK1722EER	Lagrange 509 010, 509 021	Dualit 72220, 72480	Simeo CT 270	CUISINART CPK18E	
	2200, 2400	2400	2200, 2400	2000, 3000	1850	2750	

Les chauffe-eau de voyage d'une capacité d'environ 0,5 litre sont exclus de cette étude.
De 1100 à 3000 watts
Consommation moyenne : 2169.23 watts

21.Couteau / trancheuse

Marques	Essentiel b ECOU 1	Clatronic Em 3062	Severin3965	Techwood TCE-003	Moulinex DJAC41	Kalorik TKG EM	QUIGG - MD11169	Kenwood KN650	Krups G VD2
Conso.(w)	180	180	100	180	100	100	180	100	100
Marques	Tefal 8523.31	LLOYTRON E9111WH	Wahl ZX773	Seb 8523.01	Koenig B04201	TristarEM-2100	Princess 492952	ROMMELSBACHER - EM 120	AEG EM5512
Conso.(w)	100	120	120	100	120	150	180	120	150

De 100 à 180 watts
Consommation moyenne : 132.22 watts

22. Hotte de cuisine

Marques	NOVY D814	Elica CYDER IX/A/60, FLIRT IX/A/90/TC, LOL BL/A/60, STRIPE BL/A/60, F/85, BL/F/90, ELLE WH/F/80, IX/F/51, WH/F/80, WH/GL/F	DE DIETRICH DHD516XE1, DHD1129DG, DHG576XP1, DHD1300X, DHD1592X, DHD1102X, DHD1555X	Rosieres RMB9685IN, RHG527/1PN, RHG580IN, RHC626/1RB, RHT650IN,RDR91/2AV	Candy CFT62/2X, CMB97SLX, CMGL972X, CVM670LX, CMB650/1X, CBT6130X	Faber VALIA 900, CASUAL 800, COCKTAIL 550	Bosch DWW09W450, DWB09W452	Airlux AHW99IX, AHC63WH, AHV98BK	AEG DD9893-M, X69453MV02
Conso. (W)	115	265, 160, 260, 210, 262, 290, 247, 254, 346, 271	220, 376, 250, 260, 319, 200, 269, 290	250, 200, 290, 280, 140, 135	120, 250, 190, 150, 100, 110	125, 145, 140	155, 160	250, 120, 350	175, 140
Marques	WhirlpoolAKR689NB, AKR981IX, AKR855GWH, AKR474IXL, AKR441IX, AKR770IX, AKR749IX	Stoves HOTTE60 INOX	Leisure H110X	Scholtes HP 966 IX, HDN 9 IX	Sauter SHR4922X, SHD525XF1	Proline CHP65SS-E, SHP65W2	Listo C 60L2b	Hot point HDAI9 HA IX	TURBOAIR OLIMPIA
Conso. (W)	170, 120, 250, 175, 140, 150	250	250	255, 280	305, 310	190, 100	110	160	210
Marques	ElectroluxEFC90475OX, EFC60465OW, EFC60465OX, EFB90581OX, EFC45465OAX, EFG50300X	Faure FHG5121X, FHC9754X, FHT6131X1	Neff D86D55N1	Essentiel B EHDT 612i	Brandt AC500WF1, AD916X, AD1516X, AD1006X	Roblin IKOS/2, RUBIS/2 55, 1000-6209207, VIZIO/3, VIZIO/3 900, LOTUS/2	Beko CFB6432XH-1	Falmec ONDA1440, ALLEGRA1430,CONCORD1430, NY1210, PLANE2430, VELA1410	SiemensLD97AA670, LB55564, LC97BE532, LC97BB520
Conso. (W)	255, 241, 243, 360, 230, 345	100, 196, 140	220	230	380, 135, 215, 190	250, 130, 270, 230, 255, 275	140	243, 250, 260, 242, 220, 145	285, 200, 130, 270
Marques	Portinox PDGE 60	Smeg KI90C-2							
Conso. (W)	115	250							

La consommation électrique des appareils d'éclairage est exclue de cette étude et seule la puissance du moteur de la hotte est notée.
De 100 à 380 watts
Consommation moyenne : 216.35 watts

23. Hachoir à viande

Marques	Essentiel b	Philips	Figui	Krups	Moulinex	Kenwood	Riviera & bar
Conso.(w)	300	200-800	220-240	400	150-1000	400-2000	850-2000

Marques	Russell hobbs	Harper	Listo	Seb	Magimix	Tristar	Kitchenaid
Conso.(w)	300	500	200	250-450	290	300-500	240

De 150 à 2000 watts
Consommation moyenne : 493.57 watts

24. Micro-ondes

Marques	Whirlpool MAX34NB, JC 212 BL	Samsung MS23F300EAW, MS28H5125GK	Proline SM 117, RED20	PanasonicNN-S251WEPG, NN-SD452WEPG	Moulinex MO28MSWH, MO28ES	SIMEO FC810	Hitachi MSO23, MDE25 SILVER
Conso.(W)	700, 950	800, 1000	700, 800	800, 1000	800, 900	800	800, 900
Marques	Sharp R322STWE	LG MSR4320MR, MSR-4398MK	Daewoo KOR-6L9RB, KOR-134K	Essentiel b EM203b, EM281n	Technolux MM820CPZ	Listo MOM L6	Brandt SM2603S
Conso.(W)	900	800, 850	800, 1000	700, 900	800	700	900

De 700 à 1000 watts
Consommation moyenne : 839.13 watts

Marques	Whirlpool GT290IX, GT390WH, JT469NB, JQ280NB	Samsung MC28H5125AK, MC35J8055KT/EF, MC455TCRCBB, CP1395-EST INOX	Panasonic NN-CD567/560, NN-CF760MEPG	Brandt CE2605B, CE3610B	Daewoo KOC-9C3T, KOC-8HBTM, KOC-1B4KSA, KOC-1C2RBV	Proline CB250P, CBS23
Conso. (W)	2050, 2100, 1500, 1350	2100, 2700, 1550, 2050	2050, 1400	2500, 1750	1250, 1850, 2300, 2650	1350, 1200
Marques	Moulinex MO32ECSL	Hitachi MCE 42, MCG25	Lg MJ-9250NB	CANDY CMC30DCS, EGO-C25DCW	ESSENTIELB EX 281b	
Conso. (W)	2500	2700, 2500	2600	1100, 1900	2500	

De 1100 à 2700 watts
Consommation moyenne : 1980 watts

25.Mixeur

Marques	Lagrange 619004	Krups HZ5071	Kenwood HB850, HDP404WH, HB615		Electrolux ESTM9500, ESTM 955	Bosch MSM6B150, MSM64120, MSM88110, MSM6150, MSM 87160	Bamix MX102116, MX100081
Conso.(W)	800	800	700, 800, 400		700, 600	300, 450, 800, 400, 750	140, 200
Marques	Tristar MX-4146	Kitchenaid 5KHB2531WH	SEB HB853800, HB4061S1 ,	Russell Hobbs 21501-56, 20210-56, 18986-56	Proline HB21, HB41, HB14	Moulinex DD1011141, DD8621, DDH241, DDG15141	Braun MQ525, MR300, MQ735, MQ320
Conso.(W)	200	180	700, 450	600, 700, 400	200, 300, 170	350 , 700, 450, 400	600, 450, 750, 550
Marques	Philips HR1606/00, HR1643/00, HR1672/90	Essentiel b EMXP 1, EMMX 401	Listo MXL1	Riviera & Bar PR154A			
Conso.(W)	550, 700, 800	600, 400	170	800			

De 170 à 800 watts
Consommation moyenne : 513.08 watts

26.Robot multifonction

Marques	Kenwood KM242 ; KMX51 KMIX ; KHH300WH ; KVC5000T; KMC015 ; KVL6015T ; KMY095 ; FPP220 ; FPM910 ; FP190	Kitchenaid KSM45EWH ; 5KSM150 ; 5KSM7580XEFP ; 5KFP1644EAC	Moulinex QA202110 ; QA4041B1 ; DJ600110 ; FP211110 ; MC8000 ; FP648H10	Magimix 18600F ; 18250 ; 18364 C3200XL ; CS4200 XL ; 18700 5200XL	Harper AK45SILVER ; AK65NSILV
Conso.(W)	900 ; 500 ; 1000 ; 1100 ; 1400 ; 1200 ;	250 ; 300 ; 500 ; 650	700 ; 900 ;	1500 ; 400 ;	600 ; 1000

	1500 ; 750 ; 1300 ; 600		350 ; 500 ; 850 ; 1000	650 ; 950 ; 1100	
Marques	KITCHENCOOK MIXMASTERV1SIL ; AK80_BLK	Smeg SMF01SVEU	AmiCook KR200	Bosch MUM54240 ; MUM58257 ; MUMXL40G	Electrolux EKM4000 ; EFP9300
Conso.(W)	600 ; 1000	800	1200	900 ; 1000 ; 1600	1000 ; 1200
Marques	H.koenig KM80S	Philips HR7951/00 ; HR7759/90	Proline KMP600W ; KM1400 ; FP35	UDPP UD180	Robusta le chef
Conso.(W)	1000	900 ; 750	600 ; 1000 ; 350	1000	1200
Marques	Russell Hobbs 20355-56	KRUPS YY8526FD	Braun FP5160 WH	Lacor Thermochef	SEB DO321800
Conso.(W)	700	900	1000	200	750

De 200 à 1500 watts
Consommation moyenne : 859.18 watts

27. Presse-agrumes/centrifugeuse

Marques	KRUPS ZX700041	Braun CJ3050	Philips HR2738/00	Brandt PAI-40V		Krups ZX7000	Proline CJ13
Conso.(W)	115	60	25	40		115	30
Marques	Kenwood JE290	Fagor MZ-2006X	ElectroluxECP955, PJ5000	LISTO PA L1 KOLO	Riviera & bar PR 866 A,PR750A	Siméo PC 320	ESSENTIELB EPA 1 TUTTI, EPA 2 MELI
Conso.(W)	40	100	100, 65	30	110, 85	85	100, 30

De 25 à 115 watts
Consommation moyenne : 70.63 watts

28.Four

Marques	Faure	Fagor	De Dietrich	AEG	Proline	Samsung	Brandt	Bosch	Beko
Conso.(W)	2550-3480	2670	2100-3750	3500	2300	3650	2635-3355	2300-3650	2400
Marques	Siemens	Miele	Electrolux	Indesit	Iberna	Hotpoint	Gaggenau	Listo	
Conso.(W)	3580-3650	3600	2540-3080	2250	2300	2800	3700	2400	
Marques	Scholtes	Smeg	Whirlpool	Laden	Airlux	Rosieres	Candy	Sauter	
Conso.(W)	2700-3400	3000	3650	2500	2650	2000	2100-2800	3375	

De 2100 à 3750 watts
Consommation moyenne : 2903.20 watts
Le mini-four est utilisé 20 minutes par jour en moyenne et 0,6 cycle/jour

29. Crêpière

Marques	Tristar BP-2988	Tefal PY300901, PY559312, PY605813, PY604413, PY710812	Proline WP6	Moulinex PY312511
Conso.(W)	400	900, 1000, 1110, 1100, 1500	1000	720
Marques	Listo CE L1	Krampouz CEBPF2BO, CEBPA4AO, CEFIA2	Essentiel b ECPM 1, ECE 1	Lagrange 139009, 109001
Conso.(W)	1250	1250, 3000, 1600	1000, 1250	2000, 1400

De 400 à 3000 watts
Consommation moyenne : 1280 watts

30. Machine à pop-corn

Marques	Siméo	Proline	Lagrange	Listo
Conso.(Watts)	1100	1100	900	900

De 900 à 1100 watts
Consommation moyenne : 1000 watts

31. Appareil à raclette

Marques	Proline RACPIER2, RAC3R, RAC65	Tefal PR457812, RE506412, RE11812, RE521116, RE522812, RE521116, RE457116	Brandt RAC2X4NR	Russell Hobbs Raclette, 21000-56
Conso.(Watts)	1200, 350, 800	1350, 850, 450, 1000, 1050, 1400, 1500	1600	900, 1200
Marques	Lagrange 009804, 129013, 149 001, 009204	Listo RG L3, RG L4	Essentiel b ERG 21, ERGL 1,ERGP 81	Moulinex RE160811
Conso.(Watts)	900, 800, 450, 350	900, 1200	400, 1000, 1200	850

De 350 à 1500 watts
Consommation moyenne : 943.48 watts

32. Réfrigérateur
Réfrigérateur américain (fabriqué après 2008)
A+: 312-525 kWh/an
A++: 325-435
A+++: 347

Marques	Whirlpool WSF5574A+NX, WMD4001X	Panasonic NR-B53V26XF	Siemens KA62DP91	Samsung RFG23RESL1, RH56J6917SL, RH57H90507F, RS7687FHCLS, RS7547BHCSP, RSG5PUBC, RF62QEPN, RSA1UHMG, RSA1ZTWP, RF56J9040SR, RS7778FHCSL, RS7577THCSP, RSA1UTWP1/XEF	Liebherr SBSES7165A, SBSBS7263, CBNes 6256-1, SBSESF 7212 C	LG GWP3122SC, GWL2710WH, GWS6039SC, GWS8439SC, GWP2723PS, GS9366PZQVD, GWL3113PS, GWP3126SC, GLC8839SC ,	BEKO GN162430X, GNE134630X, GNE60520X
Conso.(kWh/an)	453, 481	346	464	426, 452, 420, 449, 458, 512, 390, 429, 419, 470, 353, 459, 409	444, 344, 325, 485	466, 442, 382, 376, 425, 480, 445, 349, 470	370, 351, 458
Marques	Haier HB22FWRSSAA, HRF664ISB2, HRF628IW6, HRF-800DGS8, HFR-628IX7, HB25FSSAAA,	HISENSE RS731N4AW1	Daewoo FRN-Q21FCS, FRN-X22B3CSI, FRN-T22DAMI	Bosch KAN58A55, KAD62521	Thomson THSBS90IX, THM80IX	Hotpoint E3D AA X	FRIGIDAIRE FFHS2202PB
Conso.(kWh/an)	415, 438, 420, 347, 350, 435	435	418, 474, 525	460, 486	401, 312	432	351

De 312 à 525 kWh/an
Consommation moyenne : 422.47 kWh/an ou 50.76 watts

Réfrigérateur-congélateur en bas (fabriqué après 2008)
A+: 193-468 kWh/an
A++: 205-312
A+++: 149-179

Marques	Haier CFE629CWE, C2FE632CSJ,A2FE635CFJ, C2FE636CRJ	GorenjeRK 60319 OBK, RK 60359 OBK, NRK6192JBK	Brandt BFC5555GR, BFC3852PW	Faure FRB24100 WA	ElectroluxEN3488 MOH, EN3858MFX, EN3617MOX, EN3889MFX, EN3211MOW, EN3451JOX	Listo RCL 150-55b1, RCL 170-55b1	Candy CKBS 2165W, CF18S, CFM 2050 / 1 E, CF18S WIFI/1 CKBS5152 X

Conso.(kWh /an)	310, 336, 348, 353	205, 229, 235	215, 281	237	240, 254, 242, 251, 233, 308	214, 234	251, 292, 214, 273, 226
Marques	Essentiel b PG ERCV 195-70i1, ERCV 185-60i2, PG ERCV 441i, ERCV 185-60i4, ERC 150-60b1, ERC 175-60b1, ERC 185-60b1	Whirl pool WBE34152W , WBE3321A+ NFS, WBE33352NF CTS, BSNF8101W, BLFV8102W, WBA34983D FCW, WBA4328NF W, WBA43282N FIX, BSNF9452OX 8, PG BLFV8001OX, WBE3377NFC TS, WBA4398NF CIX, WBA34272D FCIX, WBA43983N FCIX, BSNF9452OX, BSNF8152W	SamsungRB41J73 59S4, RB29HSR3DWW, RL56GSBSW, RB33J3700WW, RB37J5000WW, RL58GWGIH, RB41J7215SR, RB36J8215SR, RL56GSBMG, RL56GEGBP1, RL58GEGSW1/XE F, RB37J5325WW, RL4363FBASL/EF, EX RL58GRGMG, RL60GQERS1/XEF	Proline PLC320W-F-1, PLC 281, PLC 161 W	Liebherr CPESF3813-1, CBN3913-21, CNSL 306, CU 2311, CNESF5123-1, CBPESF 4043, CU2811, CPESF3523-2, CBP4013-21, CNPESF4613, CNES 4023-23, CP 4023-2, CNPesf 4003/CNPesf 3803, CUP2901-21, CUPSL3221-1, CUef 3311, CN 3423, CNPbs 4013, CBN 3913-21, CNPES4056, CBNPES3956, CNES4023-23, CBNPES4656, CBNPES3967	LG GC5400WH, GC5410PS, GCF5728SC, GC5000PS, GBB530PZCFS, PG GCD5718PS, GCD5611PS	Siemens KG33NV04 , KG39EBI40 , KG33NV44 , KG38QAL3 0, KG36VVW 33S, KG39NVW 32, KG36EBW 40, KG49NAI3 2, KG36NVW 32, KG39NXI3 2
Conso.(kWh /an)	310, 250, 394, 269, 219, 248, 229	231, 328, 245, 311, 243, 160, 391, 293, 248, 387, 252, 309, 312, 387, 242, 195, 251, 241	191, 272, 348, 280, 314, 358, 288, 262, 325, 347, 359, 259, 296, 269, 190	273, 241, 202	155, 359, 271, 176, 384, 355, 191, 231, 242, 265, 337, 247, 252, 197, 217, 210, 307, 257, 359, 255, 268, 319, 282, 262	303, 289, 248, 307, 166, 249, 322	279, 156, 266, 219, 227, 250, 149, 284, 239, 268
Marques	Smeg FAB32RR1, FC40PXNE3	Laden SC302ISA+, BL700OX, SC302A+BL	Daewoo RN-331NS, RN-T42CNPB	Miele KDN 12823S-1, KFN 11923 SD-2, KFN 12823 SD-1, KD 12625 S	Hot point EBOH 18243 F SL, E4DAAXC, E3 DAAX, E4DG AA X MTZ, E3D AA X	Beko GNE60521X,CNE47 520GB, CN161220D, CN142230, CN142220DS, CSE134DS, CSA29020, CNA 29120S, EX CN237220,CN 151920 DX, CN161230DX, CN151121X	Indesit LI7 FF2 S B, BIAA 13P K DR, CAA 55 NX, BIAA 13P SI, CAA55NFS M, NCAA 55 NX, CTAA 55 NF,BIAA 134P SI,CAA 55
Conso.(kWh /an)	229, 368	283, 297, 299	307, 310	323, 242, 322, 197	282, 393, 415, 372, 432	460, 394, 468, 312, 390, 272, 257, 296, 336, 425, 368, 396	246, 285, 268, 272, 270, 253, 255, 277, 276, 257
Marques	Aeg S83420CMX2, S83930CMX2	Thomson CTH 310 GLW,CTH 326 WH, CTH122, THM70IX	Panasonic NR-BN31AX1-E, NR-B32FE2-XE	CURTISS OKM 330 GPL	HISENSE RB325D4AB1, RB296F4AW1	ORIGANE ORC 145-50b1	Bosch KGV36VW 32S, KGN49SM 31, KCE40AR4 0, KGN36SB3 1, KGN39XI4 2, KGE39BI41 , KGN33V04 ,

							KGV36VB32S, KGN39VL32, KGV58VL31S, KGN39VL21, KGN36NW20
Conso.(kWh/an)	240, 167	274, 312, 193, 305	234, 173	281	256, 254	202	227, 284, 149, 238, 179, 156, 266, 277, 250, 292, 333, 293

De 130 à 472 kWh/an
Consommation moyenne : 275.70 kWh/an ou 28.13 watts

Réfrigérateur-congélateur en haut

Marques	Gorenje RF60309OW	Faure FRT23100XA, FRT27101XA, FRT23100XA		Electrolux EJ1800AOW, EJ2305AOW2, EJ2805AOX2, EJ1800AOW	Daewoo FN380SP	Candy CKDS 5122W, CKDS 2145W, CKDS5122X
Conso.(kWh/an)	213	237, 254, 227		215, 227, 242, 205	329	200, 226, 191
Marques	Whirlpool EX WTE2215W, WTE 2215X, WTV4536NFCIX, WTE3322A+NFW, WTV45972NFCIX	Siemens KD33EAI40, KD33VVW30, KD29VVW30	Proline DD120-1 , DD 221, DD250W	Liebherr CTP210, CTP230,CTP 3316-22, CTPSL250, CTNES 4753-2 15J, CTN3223, CTP 3316-21	LG GRF-7848SC, GR5511PS, GRF8648SC	Thomson THD 300 NF WH
Conso.(kWh/an)	211, 212, 386, 307, 289	139, 215, 205	183, 215 , 228	176, 188, 211, 202, 355, 214, 213	317, 259, 354	277
Marques	Samsung RT25FARADWW, RT32FARADWW, RT29FARADWW, RT38FEJADSA, RT53H6630SL/EF, RT53H6305SL	Bosch KDV58VL30, KDV29VL30, KDV47VL30, KDN30X13, KDN53VW20	Listo RDL170-55b1, RDL 145-55b1	Beko DN161230DX, DSA 25020, DN150220D, DN156720D	SMEG FAB30RNE1, FAB50X	Haier D1FM636CW, D1FM636CS
Conso.(kWh/an)	253, 270, 264, 298, 340, 310	289, 205 245, 273, 354	246, 216	458, 229, 350, 422	212, 419	315, 322
Marques	Hot point ENTM182AOVW, ENXTLH 19322 FW L O3	AEG S52710DDX0	Indesit TIAA 12 V SI, RAA28, TAA5V, TIAA 12 V, TAAN6FNF	Brandt BFD1252BW, KDV29VL30	CURTISS ODP90GPL	ORIGANE ORD 130-50b1
Conso.(kWh/an)	341, 306	242	277, 226, 341, 290, 413	223	175	184

De 139 à 458 kWh/an
Consommation moyenne : 264.09 kWh/an ou 29.50 watts

Réfrigérateur-congélateur à l'intérieur (fabriqué après 2008)
A+: 169-297
A++: 110-310
A++:120-225

Marques	WhirlpoolARG865/A+, EX WME3080W	SMEG FAB28RUJ1, FAB10RNE	SiemensKI24LV51, KI82LAD30, KI24FA65		ProlineFRI2400 PW-1, PLF210-F-1	ElectroluxERF2405FOW, ERN2012FOW, ERF2406FOW, ERN3017FOW	BEKO SSA25421S	FaureFRA22700WE, FBA30455SA, FRA17800WA, EX FRA22800WA	De Dietrich DRS1133J
Conso.(kWh/an)	217, 297	180, 169	234 211, 187		220, 197	217, 175, 171, 225	224	228, 279, 200, 217	204

Marques	AEG SKS81240F0, SKS91240FO	Listo RFL 125-55b1, RFL 145-55b1	Gorenje RB 60299 OO , RB6151BW	Candy CBO 150 E , CFBO 3550 E	Miele K 34142 IF	ORIGANE ORF 125-55b1	Liebherr GK 300, IK 2710, IK 2354, GKP 310, KBP3864 15J, IKB 3514, IK 2754, IKB 2714, IK 3514, IKBP 3554	Bosch KIL24V21FF, KSL20AW30	Rosieres RBOP 244 , RBOP3683
Conso.(kWh/an)	165, 120	200, 201	196, 248	197, 286	176	200	238, 110, 176, 178, 157, 310, 189, 203, 217, 163	234, 149	232, 286

De 110 à 310 kWh/an
Consommation moyenne : 206.58 kWh/an

Réfrigérateur sans congélateur
A+: 123-170
A++:64-75
A+++: 75-366

Marques	BOSCH KSV36CW32, KSV36VW40, KIR81AF30, KIR 24V21FF, KIR18X30	SIEMENS KS33VVW30, KS36WPI30, KS36VAI41, KI81RAD30, KI21RAD30	SMEG FAB10HRP	BEKO SSE26026, SS137020D, SS137020D
Conso.(kWh/an)	112, 75, 116, 132, 96	110, 112, 75, 116, 97	123	132, 127, 141
Marques	HOTPOINT EX SDS 1721/HA	INDESIT SIAA 12 S	LIEBHERR KP 3120-21,KBesf 4210-2, KPesf 4220, B2756-21, KBBS4260, K 4220-23, IKB 3550, K 220, IKP 2350, GK 280, EK 1610, IK 3510, IKB 2310, IK 2750 , IKB 3510, IKB 2710	ESSENTIELB ERL 160-60b1, ERL 145-60b1, PG ERLV 170-60i1
Conso.(kWh/an)	142	142	109, 170, 117, 124, 133, 149, 366, 132, 71, 106, 98, 118, 121, 110, 134, 125	138, 133, 129
Marques	WHIRLPOOL WME32222W, WME36562X, WMN36562N, ARG855A+, ARGR715	SAMSUNG RR35H6110SS	ELECTROLUX ERF3312AOX, ERN2212AOW, ERN1402AOW, ERN3214AOW	LISTO RLL145-55b1
Conso.(kWh/an)	110, 113, 114, 132, 128	143	139, 103, 96, 113	132
Marques	Thomson TH-TTRL 0	De Dietrich DRS1204J	Faure FBA32055SA	Rosieres RBLP 230
Conso.(kWh/an)	91	104	143	136
Marques	Brandt BFL5456GB	Proline PLF 240L	Candy CFL6172XE, CBL 150 E	Aeg S84020KMW0, SKS98800CO, SKS81200F0
Conso.(kWh/an)	104	128	150, 126	115, 64, 95
Marques	Miele K32122I, k34122i, K14820 SDED/CS, K37222ID, K34272ID			

Conso.(kWh/an)	98, 106, 155, 118, 121			

De 64 à 366 kWh/an
Consommation moyenne :122.34 kWh/an

Réfrigérateur encastrable (fabriqué après 2008)
A+: 99-185
A++: 91-139
A+++: 93-98

Marques	PROLINE TTP85, TTR92SL, TTR105P, TTR903, TTR 109	Thomson TH-TTR 4 WH, TH-TTRL 0	LISTO RTL 114, RML 504	Smeg FA130APX1
Conso.(kWh/an)	112, 111, 161, 157, 154	137, 91	165, 107	178
Marques	FAURE FRG10800WA	CANDY CCTOS 502SH, CCTOS 542WH, CCTOS 542XH, CFL050E	WHIRLPOOL ARC 104 +, WMT5532W	BRANDT TF12700, TL 13700
Conso.(kWh/an)	165	171, 180, 172, 113	164, 138	168, 117
Marques	LIEBHERR TSL 1414, KTS 103, KTS 166, GK 200, TX 1021-2, TP1724, PG T1404, T1400	ELECTROLUX ERT1501FOW2, ERT1601AOW3, ERT1661AOX2	ESSENTIELB ERT 85-55s1, ERTL 85-55b2	ORIGANE ORTF 85-50b1
Conso.(kWh/an)	177, 118, 93, 139, 114, 98, 185, 124	183, 119, 120	170, 115	113
Marques	SIEMENS KTL16LPW42	AEG S71700TSX0	LG GC-051SW	DAEWOO FN-15B2RNB
Conso.(kWh/an)	95	94	99	110
Marques	FRIGELUX TOP132IX	INDESIT TFAA5, TFAA10/A+, TLAA10, TFAA 10 S	BEKO TS190320, TSE1402F	
Conso.(kWh/an)	154	172, 181, 121, 173	118, 116	

De 93 à 185 kWh/an
Consommation moyenne : 137.77 kWh/an ou 22.44 watts

33. Cuiseur de riz

Marques	Tefal RK103811, RK100570	SEB RK302E00	Proline RC15S	PhilipsHD3011/08	Moulinex MK1111FR, MK 156800	Russell Hobbs 19750-56	ESSENTIELB ECR 1	CuisinartCRC400E, CRC800E	Listo CR L1
Conso.(W)	710, 500	710	400	500	600, 500	700	700	500, 700	400

De 400 à 710 watts
Consommation moyenne : 576.67 watts

34. Croque-monsieur / gaufrier

Marques	Riviera Et Bar QC804A	Moulinex SW281512, SM180811, SW290101	Lagrange 019422, 029422, 189002, 029112	SIMEO FC 640	Domo DO9064C, DO9046C	Listo CM L2r
Conso.(Watts)	1650	850, 650, 780	1200, 1000, 700, 1070	800	1800, 1200	700
Marques			Tefal SW853D12, SW323812			Proline SM23S, SM22S
Conso.(Watts)			700, 780			750, 700

De 650 à 1800 watts
Consommation moyenne : 958.13 watts

35. Cuiseur vapeur

Marques	Philips	Proline	Clatronic	Domo	Dejelin	Magimix	Braun	Listo	Orva
Conso.(W)	900-2000	900	850	900	1700	1700-1900	850	800	900
Marques	TZS first	Trsitar	Tech wood	Severin	SEB	Russell Hobbs	Kenwood	Essentiel b	
Conso.(W)	700	900-1000	800	1000	600-2000	650-800	900-2000	900	

De 650 à 2000 watts
Consommation moyenne : 1057.35 watts

36. Théière

Marques	Tefal	Simeo	Riviera et bar	Princess	Philips	Morphy Richards

Conso.(w)	600	600	600-2000	2400	1650	2200
Marques	Caso	Essentiel b	Bodum	Bestron	Clatronic	
Conso.(w)	1200	600	450	1300-1500	600	

De 450 à 2400 watts
Consommation moyenne : 1186.36 watts

37. Grille-pain

Marques	Moulinex LT260H11, LS260800, TL176530, A15453	Magimix 11527, 11517, 11536	Proline MINITT, LONGTT, TTLONGSS, TTMINISS, BT15	Philips HD2598/60, HD2611/11	ELECTROLUX EAT7800, EAT5110, EAT5300, EAT7100W	Krups YY8319FD	KenwoodTTP230, TTM020RD, TTM610	SMEG TSF02CREU , TSF01CREU
Conso.(W)	850, 800, 1000, 760	1450 , 1150, 1850	700, 980, 1000, 850, 870	1150, 1200	980, 1000, 1050, 900	720	1500, 900, 1080	1500, 950
Marques	Electrolux EAT3100, EAT955	Riviera and bar VTT519X-01, QD812A	Yoo digital CY50W	Brandt GP100X	Breville VTT519X-01, VTT713X-01		Cuisinart CPT420E	Morphy Richards M242005EE
Conso.(W)	870, 1000	1100, 1650	850	800	1100, 1600		900	1800
Marques	Delonghi 2003.AZ		Bosch TAT8611, TAT6001	Listo GP L3j, GP L4	Kitchenaid 5KMT221EER, 5KMT2204EOB, 5KMT421EAC, 5KMT4205EMS		Essentiel b EGP 3, EGP 3r, ETT 22i, EGP 2r,EGP 4	Dualit 27390, 47030, 60165
Conso.(W)	900		860, 900	750, 1450	1100, 1250, 1800, 2500		750, 800, 850, 1100, 1450	1200, 2200, 3000
Marques		Russel Hobbs 18951-56, 21293-56, 18625-56, 21390-56, 21391-56, 13767-56		SEB TL210101, TL180001	Tefal TT356110, TT562E10, TL365ETR, TL600830 TOAST'N		RowentaTL700030, TL681830	DELONGHI CTO2003.R
Conso.(W)		1100, 1580, 1050, 2400, 1000, 1800		900, 1000	850, 950, 1000, 1300		900, 1600	900

De 700 à 3000 watts
Consommation moyenne : 1182.58 watts

38. Yaourtière

Marques	Orva	Sweet Alice	Essentiel b	Lagrange	Moulinex	Russell Hobbs	SEB
Conso.(watts)	22	15	12	7-17	13	28	14-40

De 7 à 40 watts
Consommation moyenne : 18.43 watts

39. Réveil / radio

Marques	Scott i-CX 6	Akai ACI		PhilipsAJ5030, AJ7260D, AJ3200, AJ3231	Proline	Thomson CR62
Conso.(watts)	8	6		0.6 , 8, 0.5, 0.1	5	0.25
Marques	Jbl HORIZON	GRUNDIG SC 990, SC930IP, SC 590, SC 600	NAFNAF V3	SONY ICFC1B.CED, ICFC11IPW.CED	LENCO CR-3306 BT	H&B IP-10i
Conso.(watts)	10	3, 2, 0.25, 0.4	4	0.1, 1.6	4, 0.5	12

De 0,1 à 12 watts
Consommation moyenne : 3.49 watts

40. Balai à tapis

Marques	Beem	Black and Decker	Clean'up	Dirt Devil	Karcher	Original nettoyeur	Plason	Vapornet
Conso.(w)	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500

Différentes marques consomment 1500 watts
Consommation moyenne : 1500 watts

41. Perceuse

Marques	AEG SBE 705 RE, SBE 650 R	Bosch PSB 530 RE, PSB 500 RE, PSB 650 RE, PSB 570 RE, PBH 2100 SRE	Metabo SBE 900	Black & Decker KR604CRESK	Einhell TH-ID 720/1	Skil F015 6388 AD	Kress SB-2, 04050312 500 BS
Conso.(Watts)	705, 650	530, 500, 560, 570, 550	900	600	720	850	850, 550

De 500 à 900 watts
Consommation moyenne : 656.54 watts

42. Polisseur de sol

Marques	Verna Australia	Fakir	Red devil
Conso.(Watts)	180	300-500	400

De 180 à 500 watts
Consommation moyenne : 326.67 watts

43. Désinsectiseur

Marques	Flowtron	Kill pest	Vermatik	Professional
Conso.(Watts)	15-80	20	16-40	30

De 15 à 80 watts
Consommation moyenne : 31.38 watts

44. Fer à repasser

Marques	Moulinex IM1221, 3165E0	TRISTAR ST8137	PanasonicNI-W920	Philips GC2965/15, GC4521/90, GC2048/30, GC2042/40	Proline TI20, PI260, PI20	Rowenta DA1510F1, DW9210D5, DW9240, DW5125D1, DW8112D1, DW9220	
Conso.(W)	1800, 2200	2000	2400	2400, 2600, 2300, 2100	1000, 2200, 2000	1000, 2600 , 3100, 2400, 2700, 2750	
Marques	Braun TS735TP, TS715, TS320C, TS320	Listo FV L2	Essentiel b EFV 2402, EFN 1	Calor FV9970C0, FV9960C0, FV3840C0, FV3825C0, FV3830C0, FV2545CO, FS4020C0	Hitachi SDA HSR229	Delonghi FXK18 , FXK22T	ElectroluxEDB 8040, EDB 5110MO, EDB 8060, EDB 8050
Conso.(W)	2400, 2300, 2000, 1700	2200	2400, 1100	2600, 2400, 2300, 2100, 2200, 2000, 1200	2200	1800, 2200	2400, 2100, 2600, 2500

De 1000 à 2750 watts
Consommation moyenne : 2164.47 watts

45. Tondeuse à gazon

Marques	AL-KO	Black & Decker	Bosch	Flymo	Gardena	MLM	Skil
Conso.(Watts)	1300	1600-1800	1200-1600	1000-1300	1200-1500	1300-1800	1100

De 1000 à 1800 watts
Consommation moyenne : 1364.29 watts

46.Scie

Marques	Delonghi	powerplus	Black and Decker	Draper	Bosch
Conso.(Watts)	1500	1500	400	710	530

De 400 à 1500 watts
Consommation moyenne : 928 watts

47. Tournevis

Marques	Bosch	Metabo	Black and Decker	Silverline	Einhell	Draper
Conso.(w)	500-750	400	500	500-650	650	600-810
Marques	Skil	SupaTool	Makita	Ryobi	Terrarek	
Conso.(w)	550	500	710	500	500-710	

De 400 à 810 watts
Consommation moyenne : 574.55 watts

48. Machine à coudre

Marques	AEG	Dragonfly	Kuangpo	Singer	Starlight	Janome
Conso.(Watts)	75	85	70	85 -105	70	85

De 70 à 105 watts
Consommation moyenne : 80 watts

49. Cireur de chaussures

Marques	Ronda	Supentown	Klarstein	True power	Kalorik	Beem
Conso.(Watts)	130	95	120	100	120	120

De 95 à 130 watts
Consommation moyenne : 114.17 watts

50. Séche-linge

Marques		Beko DPU8341GX, DC7230, DV8220X, DPY8506GX, DCU 9331 GXS, EX DCU 8330 X	Bosch WTW86430FF, WTW87490FF, WTB86500FF, WTA74200FF, WTB86200FF, WTC84102FF, WTW84381 FF	Brandt VAP9831 F, ETE 6716 F , ETE 6336 F	Candy GVC71013, GCH 980NA1T, GVH 9913 NA1X, GCV580NC , GVC 7813 NBX	ElectroluxEDH3497RD E, EDC2086PDW, EDC3150, EDH3886GDE, PG EDH3786 GSE, EDH3686GZW	Laden AMB377 1, AMB487 1, AMA 2810
Conso.(kWh/a n)		288, 504, 579, 176, 616, 561	225, 259, 561, 482, 501, 527, 212	656, 497, 460	670, 310, 340, 272, 561	259, 560, 358, 235, 299, 308	503, 560, 290
Marques	Listo SLC 7L2, SLE 6LD5	Miele 4819 CI, T 8822 C, 4859 CI CHG, TMV 840, TKG 640 WP, PT 5135 C, PT 5136, TKR350 WP, TKR650 WP, T8722, T 8164 WP,	Siemens WT46E3X1FF,WT46W361 FF, WT46G400FF, WT47W490FF, WT46B200FF, WT34A200FF	Vedette VST6610, VST6400	Whirlpool HSCX9042 2, AWZ3428, AZA8325, AZA8221, AZB9320, AZB8220, AZA8325, AZA 8221, AWZ 3789	Essentiel b PG ESL-HP8D3, ESLC 8D3, PG ESLE 8D1	Indesit IDVL 75 B FR, IS 41 V (EX), IDPA 745 A ECO
Conso.(kWh/a n)	504, 458	265, 494 , 430, 193, 235, 486, 498, 233, 259, 489, 257	581, 212, 616, 259, 561, 482	497, 460	259, 528, 179, 290, 616, 560, 176, 186, 582	299, 561, 579	474, 329, 303
Marques	Lg RP8050WH, RC9055AP2Z , RC7055AH1 M	Samsung DV80H4100C W, DV80F5E5HG W, DV 70F5E0HGW/E F	Proline PCD 7, TD 6 VE, DVE 6, PRO HP 8	HOTPOIN T TCD 87 B 6K	ORIGANE OSLE 6m1		
Conso.(kWh/a n)	230, 259, 205	561, 235, 211	504, 437, 425, 309	560	458		

De 176 à 670 kWh/an
Consommation moyenne : 402.73 kWh/an

A: 303
A+: de 186 à 340 avec une consommation moyenne de 263
A++ de 211 à 259 avec une consommation moyenne de 235
A+++: de 176 à 193 avec une consommation moyenne de185
B: de 265 à 670 avec une consommation moyenne de 468
C: de 272 à 656 avec une consommation moyenne de 464

51. Aspirateur

Marques	Bosch BGS5Z0002-GS-50, BGB2B111, BGL8ALL4 GL-80, BGL35MON4, BGL4SIL69W GL-40, BSNC100	Dirt devil DD2220-3, DD2820-7	Dyson DC52, DC37C	ElectroluxZUSANIMAL+, ZUFGREEN, ZUOGREEN+, ZUCDELUXE, ZUOQUATTRO, UFANIMAL	Moulinex MO5391PA, MO5244PA	Hoover MI70_MI40, RU80_RU40	Thomas 784 024
Conso.(w)	800 , 650, 700, 600, 2400, 850	800, 1000	1200, 840	650, 700, 750, 1200, 800, 600, 1000	950, 750	700, 850	650
Marques	Miele C3, C2, C1 POWERLINE, C3 POWERLINE	Philips FC8724/09, FC8120/09, FC9522/09	Proline VCB3330, VCBS2225, VCB4224, VCBS8070	RowentaRO7853EA, RO2323EA, RO6723PA	Samsung VCDC08RH, VC06H70F1HC/EF, SC15F30WJ	Zanussi ZAN2010EL+, ZAN2410EL	Tornado TO1823EL, TOML8805EL, Jetmaxx 6860EL, TO7920RPE
Conso.(w)	800, 700, 1400, 1200	650, 1100, 750	1000, 900, 800, 700	950, 750, 700	850, 650, 1550	800, 1500	700, 800, 1300, 1400
Marques	VAX C88-Z-H-E ZEN	KARCHER DS6000	LG VWS513SA, VCA404PH	Essentiel B EAS 1204, EAT 902, EAT 1100, EAS1001, EAT 1251	Listo AT 12L3, AT14 L2		
Conso.(w)	1600	900	620, 650	1200, 900, 1100, 1000, 1250	1200, 1400		

De 600 à 1600 watts
Consommation moyenne : 950.18 watts

52. Lave-linge
Lave-linge hublot

Marques	Faure FWGB6122K, FWF7145PW	Scholtes SDLE 129 EU	Candy GS 1282D3/1, GC 1271D, GV 1410D2, GC14101D2, GV148D3, GOW477, GVW4538TC, GSF1410TWHC3/1, GVW5107 LWHC, AQUA1142D1, EVOT1261D3S	Rosieres 1482DN1-S	Essentiel b ELF 614D4, ELF 714DD1, PG ELF 814DD1	Beko WMB61220E, WMB 71436, WMB81421M, WMY71483, WMB71433S, WMY81440, WMY10140, WMI 81441, WMB51230EBL, WCB-51030, WCB612, WMB 91430	AEG L87495XFL, L61470WDBI, L61270BI	ORIGANE OLF 1005-2
Conso.(kWh/an)	192, 171	250	196, 224, 197, 271, 222, 238, 240, 239, 300, 141, 153	252	194, 196, 218	187, 171 , 248, 169, 196, 193, 237, 218, 168, 146, 164, 275	152, 210, 190	167
Marques	Whirlpool FSCR80421, AWOD4714, AWOD2721, AWOD4836, AWOD293	Vedette VLF842 CS	Proline PFL 100 WF-1, PFL 80 F, PFL 106 F, PFL 126 WF	Indesit XWE 81252X W FR, IWC 5125 FR, IWC61252C FR, XWE 71252 W FR, XWE 101484X	Hotpoint HAF921SFR, FMF 923K EU.C, AWM 129, AQ103F49FR, RPG 945 JS FR, RPG 845 JS FR, AQ113DA	Bosch WAB24211FF, WAE28330FF, WAQ28413FF, WAW28660FF, WAS327B1FF	Electrolux EWW1685HDW, EWP1470TDW, EWT1364ELW, EWM1042NDU, EWX127410W, EWF1407MEW, EWF1494DOW, EWF1482BS, EWF1497HDW,	Haier HW70-1479S-F, HW70-1479-F, HW90-1279

	1, 194, AWOD4948, AWS7213, FSCR80413, SPA1000, AWOD065, FSCR10432, FSCR 10427, AWOD2830, AWS6213, AWOD4621, AWOD4939			WSSS FR, IWDC6145, IWDC 7145, EWC 71252 W FR, EWC 61252 W FR	697 EU		EWF1486EHW, EWC 1350, EWF1472BS	
Conso.(kWh/an)	177, 171, 203, 193, 240, 194, 173, 174, 196, 165, 167, 119, 191, 217, 147, 179, 215	196	167, 169, 173, 196	222, 169, 172, 192, 205, 224, 266, 198, 173	253, 216, 212, 210, 174, 157, 258	153, 165, 135, 152, 196	204, 193, 167, 133, 210, 189, 203, 190, 188, 191, 126, 171	189, 170, 235
Marques	Brandt BWF48TCW	Daewoo DWD-E6214E, DWD-FC5242E	Miele WDA 110, WKK 210 WPS,WDA 200 WPM, W 2859 I WPM CHD, WMV 960 WPS, WKH 120 WPS, PW 5065 LP, W1 - WKR570 WPS	Lg F74902WH, F74882WH, F14952WHS, F84918BL, F28693WRH, F 52590WH6, F24962WH, F84872WH, F94912WH, F74552WH, F14942WH, F32591WH, F84802WH	Thomson TW 814 , WT1407	Listo LF 1210D1, LF1208 D1, LF 1206D3, LF 1005D1	Samsung WW70J3467KW, WW80J3267KW, WF70F5E5W4W, WW70J3283KW, WF80F5EDW4W, WW90J6410CW, WW10H9400EW, WW12H8420EW, WF1802XEC, WW90H7410EW/EF, WF80F5EBW4W/EF	Siemens WM14B211FF, iQ 300 WM14E461FF, WM12K260FF, WM14T480FF, WM14Q49XFF, WI14S421FF, WI 12 A 200 FF
Conso.(kWh/an)	196	307, 215	179, 176, 168, 137, 130, 156, 160, 174	104, 156, 143, 117, 210, 386, 166, 151, 131, 122, 250, 384, 175	196, 194	240, 200, 174, 155	157, 175, 173, 174, 166, 130, 119, 141, 190, 151, 195	153, 165, 196, 152, 135, 220, 195

C: 210
B: 210-266
A: 126-300
A+: 133-384
A++:167-386
A+++:104-239
De 104 à 386 kWh/an
Consommation moyenne : 189.34 kWh/an

Lave-linge top

Marques	Vedette VLT6210W,	Bosch WOT24257FF	Miele W679,	Laden EV1049,	Faure FWY5090WA,	Listo LT 1255D1	Electrolux EWT1375DDW,	Candy 11061D3 ,

	VLT5190W, VLTS8224V, VLT85VAP, VLT52W	, WOR 24156FF	W194	EV9547, EV1266	FWQ6129		EWT1260ESW, EWT1061SSW, EWT1276GDW, EWD1264DDW , EWD1265DD1	EVOT13072D3 , EVOT 12071D, COT 11061D
Conso.(kWh/an)	173, 169, 272, 197, 149	174, 164	150 , 152	167, 181, 173	176, 185	176	174, 185, 192, 194, 172, 167	153, 175, 224, 196
Marques	Whirlpool AWE6628, AWE5213, AWE9760GG , AWE9999GG , AWE9765GG , AWE6111, AWE6235	AEG L61260TL, L86560TL4, L75370TL	Thomso n THOM TOP 14	Proline PTL1155 -F	Siemens WP12T287FF , WP12T285FF	Brandt BWT630F, WTD8074SF , WTD8384SF , BWT3610E, BWT 2812 T	Hoover HAT7143D3	Carad MW100AT
Conso.(kWh/an)	153, 131, 137, 129, 164, 188, 153	167, 129, 174	153	181	174, 164	153, 270, 272, 173, 196	175	110

B:270-272
A:94-181
A+:167-224
A++: 167-194
A+++: 129-197
De 110 à 272 kWh/an

Consommation moyenne : 174.70 kWh/an

53. Système audio/HiFi

Marques	Essentiel B Bubble Gum	Onkyo CSN765, CS265, CS-1045	Panasonic SC-PMX70EG-K, SC-HC39EF-K	Philips MCM2300, MCM2005, BTM2280, BTM2185, DTM3170, FX25, MCM2320, BTM2180, NTRX100	Pioneer XSMC01, XPM12, XEM12, XHM51K	Samsung MME320, MM-E430D, MXJ730, MM-E330	Sony CMTSBT40D, CMT-SBT300W, MHCECL77 BT, CMTX7CD , CMTX3, GTKX1BT
Conso.(W)	10	44, 20, 140	120, 40	15, 24, 20, 100, 150, 300, 30, 70, 380	20, 60, 30, 100	20, 120, 600, 70	50, 100, 470, 40, 20, 500
Marques	Yamaha MCRN560, MCR-232	Marantz MCR610	Thomson MIC 101	LG CM2440, CM1530, CM4340, CM4350	TEAC CR-H700-B, LPP1000	BrandtMCB5000BT	Micromega MYSYSTEM
Conso.(W)	64, 40	120	20	100, 10, 220 , 260	80, 50	10	60
Marques	Tivoli MUSIC SYSTEM	AKAI AM-301K	Denon DM39 SPCW, CEOL N4, DF109C SPCW, CEOL N9	Elipson MUSIC	Hitachi CHMIC AXM649BT		
Conso.(W)	40	40	60, 80, 130, 120	240	90		

From 10 to 600 watts
Consommation moyenne : 112.18 watts

54. Décodeur/boîtier TV

Marques	CGV 70027, HD-W4	Thompson THS805, THS801	Neli N1 TNTHD	Sagemcom BPRSi88-250, DS81, DT84	Strong SRT 7402, SRT7404
Conso.(watts)	-, 36	18, -	9	48, 20, 15	9, 18
Conso. veille (w)	1 , 0.5	1, 0.8	-	0.5, 1, 1	0.8, 1
Marques	LISTO SAT-151, SAT-168 SD	XEOFIX HD-PVR , HDCI+ 7200	ASTON SIMBA	Essential B HD4	Metronic 441333
Conso.(watts)	-, -	-, 30	25	18	6
Conso. veille (w)	0.8, 1	0.5, 1	0.5	1	1

De 6 à 48 watts pendant le temps de fonctionnement et de 0,5 à 1 watt en mode veille
Consommation moyenne : 21 watts (mode fonctionnement) et 0.84 watts (mode veille)

55. Lecteur DVD /CD

Marques	LG HR935D, BP440, HR831T, BP735	Panasonic DMR-BWT745EC/EC9, DMR-BWT640EC, DMP-BDT370, DMPBDT171	Philips BDP9700, BDP7750, BDP2190, BDP3490M	Pioneer BDP170	Samsung BDH6500, BDH5500, BDF5500, BDH8500, BDJ5500, BDJ7500	Sony BDPS4200, BDPS5200, BDPS4500, BDPS1500, BDPS7200, BDPS6500
Conso.(watts)	40, 12, 30, 16	29, 25, 17, 13	20, 20, 11, 12	17	17, 9.8, 8.8, 33, 10.8, 22	13, 11, 9.5, 8.8, 16, 12
Conso. veille (w)	-, 0.5, -, 0.5	6, 4, 0.5, 0.5	0.2, 0.3, 1, 0.2	0.3	0.4, 0.4, 0.3, 1, 0.4, 0.4	0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.4, 0.5
Marques	YAMAHA BDS477	DENON DBT3313, DBT-1713UD	MARANTZ UD5007, UD7007			
Conso.(watts)	-	-, -	20, 40			
Conso. veille (w)	0.3	0.3, 0.5	0.3, 0.3			

De 8.8 à 40 watts pendant le temps de fonctionnement et de 0,2 à 1 watt en mode veille
Consommation moyenne : 18.29 watts (mode fonctionnement) et 0.73 watts (mode veille)

56. Amplificateur de guitare

Marques	Fender	Rogue	Line	Behringer	Peavey	Vox
Conso.(watts)	15-20	10	15	15	20	10

De 10 à 20 watts
Consommation moyenne : 14.58 watts

57.Home cinéma

Marques	ONKYO HT-S7705	LG LHB655, LHB755W	Samsung HTJ4550, HTJ5550W, HTJ7750W	Sony BDVEF1100, BDVE2100, BDVN9200
Conso. (W)	900	1000, 1200	500, 1000, 1330	150, 1000, 1200
Marques	Philips HTD3540	Pioneer HTB529, HTP329		Yamaha YHT1992, YHT4910
Conso. (W)	300	650, 525		500, 575

De 300 à 1330 watts
Consommation moyenne : 773.57 watts

58. Clavier/Piano

Marques	Harman Kardon	LG	Samsung	Sony	Panasonic
Conso. (W)	330	300-850	110-1000	150-1000	520-1000
Marques	Philips	Pioneer	Thomson	Yamaha	
Conso. (W)	600-1200	550-1100	300	500	

De 12 à 20 watts
Consommation moyenne : 15.67 watts

59.Télévision

Selon l'INSEE (2010), la télévision est regardée en moyenne 3 heures par jour
Télévision LED < 40 pouces

Marques	Proline 28" L2832HD	Proline 32" L3231HD	Brandt 18.5" B1926WHD	Brandt 32" B3225HD	Brandt 18.5" B1928WHD	JVC 27" LT-28HA52U, LT-28HA72U
Conso.(W)	33	55	30	42	28	29, 38
Veille(w)	-	0.5	0.5	-	-	- , -
Marques	LG 32" 32LF5610 300, 32LF5800, 32LF650V	JVC 21.5" LT-22HG72U	Samsung 28" UE28J4100	JVC 32" LT-32HA72U, LT-32HG62U	LG 22" 22MT47D	Samsung 22" UE22H5000, UE22H5000
Conso.(W)	38 , 40, 39	34	21	45, 69	22	22, 35
Veille(w)	0.3, 0.3, 0.3	-	0.3	0.5, 0.5	0.3	0.3, 0.3
Marques	Samsung 32" UE32EH4003, UE32J5000, UE32J5500, UE32J6300,	Philips 22" 22PFH4109, 22PFH4000	Philips 24" 24PHH4000, 24PHH5219,		Philips 32" 32PHH4100, 32PFH5300,	PANASONIC TX-32CS600E

	UE32H5500, , UE32H5000, UE32J4000		24PHK5619		32PFH4100, 32PFK6509	
Conso.(W)	35, 28, 42, 40, 30, 32, 31	24, 24	20, 23, 21		30, 29, 35, 27	45
Veille(w)	1, 0.3, 0.5, 0.5, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3	0.3, 0.5	0.5 , 0.3, 0.3		0.5 , 0.5, 0.3, 0.3	0.5
Marques	TCL 24" H24E4443, H24E4433	TCL 28" L28E4103	TCL 32" H32E4413	Thomson 24" 24HA4243W	Thomson 32" 32FA3103, 32HA4243B, 32HA4243W	Thomson 28" 28HA3203, 28HW4323W, 28HW4323
Conso.(W)	25, 32	-	70	25	43, 37, 25	38, 22, 26
Veille(w)	0.3, 0.3	0.3	0.3	0.2	0.3, 0.3, 0.3	0.3, 0.3, 0.3
Marques	Listo 31.5" DLEDUSB-559	Listo 21.5" LED-554	Ess. b 21.5 " Velinio	Ess. b 23.6" Kissario	Ess.b 31.5" Kea	Sony 32" KDL32R400C, KDL32W706
Conso.(W)	49	30	21	25	41	31, 39
Veille(w)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5, 0.5
Marques	Samsung 19" UE19H4000	LISTO 23,6'' LEDUSB-503	Listo 27.5" DLEDUSB-595	LG 28" 28MT47D	ESSENTIELB Velinio 27,5''	LISTO 18,5" LED-608, DVD-803
Conso.(W)	17	25	38	26	32	25,17
Veille(w)	0.3	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5, 0.5

De 17 à 55 watts pendant le temps de fonctionnement et de 0,2 à 1 watt en mode veille
Consommation moyenne : 32.67 watts (mode fonctionnement) et 0.40 watts (mode veille)

LED 40-50 pouces

Marques	Essentiel b 40" Kea	LG 40" 40LF630V	LG 43" 43LF630V, 43LF5400	LG 42" 42LF652V, 42LF5800	Listo 40" DLEDUSB-114	TCL 40" F40B3803	Panasonic 40" TX-40CS520E
Normal (W)	60	45	52, 36	46, 52	60	45	42
Standby (w)	0.5	0.3	0.3, 0.3	0.3, 0.3	0.5	0.3	0.5
Marques	Philips 40" 40PFH5300, 40PFH4100	LG 49" 49LF630V, 49LF5400	LG 47" 47LB650V	Philips 47" 47PFH5209, 47PFK6589	Samsung 40" UE40J6300, UE43J5500, UE40H6400, UE40H5003, UE40H6200	Sony 43" KDL43W756C	Samsung 48" UE48H6400, UE48J5500
Normal (W)	35, 46	54, 43	55	55, 47	47, 51, 50, 35, 50	55	59, 66
Standby (w)	0.5, 0.3	0.3 , 0.3	0.3	0.3, 0.3	0.5, 0.5, 0.3, 0.3, 0.3	0.5	0.3 , 0.5
Marques	Sony 40" KDL40W605B, KDL40R450C, KDL40W705C, KDL40R550C	Sony 42" KDL42W705B	LISTO 48" DLEDUSB-349	SONY 48" KDL48R550C	Toshiba 40" 40L5435DG	Toshiba 48" 48L5441DG	GRUNDIG 47" 47VLE9481SL
Normal (W)	50, 45, 44, 43	50	85	46	46	44	63
Standby (w)	0.5, 0.5, 0.5, 0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

From - to - watts during the working time and from - to- watt in standby mode
Consommation moyenne : 50.05 watts (power mode) and - watts (standby mode)

Télévision LED >50 pouces

Marques	Samsung 50" UE50H6200	TCL 55" F55S3803	TCL 50' F50S3803	Sharp 70"	Panasonic 55"	Thomson 50"	Samsung 70-75"
Normal (W)	65	85	65	136	90-91	82	176
Standby (w)	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2-0.3	-	0.3
Marques	Samsung 55"	LG 50" 50LF652V, 50LF5610	LG 65"	Philips 50" 50PFH5300	Panasonic 60"	Thomson 51'	Samsung 65"
Normal (W)	75-110	69, 64	209	43	104	120	110-128
Standby (w)	0.1 -0.3	0.3, 0.3	0.3	0.5	0.2	0.3	0.1
Marques	Sony 65" KDL65W859C	Sharp 60"	LG 55"	Sony 50" KDL50W815, KDL50W755C	Panasonic 51'	Thomson 55"	Samsung 60"
Normal	123	112	71-85	51, 75	91	113-160	92-95

(W)							
Standby (w)	0.5	0.2	0.3-0.4	0.5, 0.5	0.2	0.3	0.3-0.5

From 63 to 209 watts during the working time and from 0.1 to 0.3 watt in standby mode
Consommation moyenne : 105.35 watts (power mode) and 0.25 watts (standby mode)

LCD television < 40 inch

Marques	Brandt 19"	Continental Edison 26"	Samsung 19"	Grundig 32"	Toshiba 32"	Telestar 37"	Windsor 32"
Normal (W)	36	80	22	58	55-56	109	58
Standby (w)	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3
Marques	LG 32"	Odys 23.6"	Panasonic 24"	Sharp 22"	Philips 22"		
Normal (W)	41-81	60	24	22	38	Grundig 26"	
Standby (w)	0.3-1	1	0.3	0.5	0.3	60	
Marques	Samsung 22"	Samsung 32"	Panasonic 32"	Sony 32"	Haier 39"	0.5	LG 26"
Normal (W)	30	112	79	41	70	95	59
Standby (w)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.4	0.3

De 22 à 112 watts en fonctionnant et de 0.3 à 1 watt en mode veille
Consommation moyenne : 63.13 watts en fonctionnant et 0.42 watts en mode veille

LCD television 40-50 inch

Marques	Continental Edison 40"	LG 42"	Panasonic 42"	Philips 42"	Philips 47"	
Normal (W)	190	120	55	99	99	
Standby (w)	1	0.3	0.3	0.3	0.3	
Marques	Samsung 40"	Samsung 46"	Sharp 40"	Sharp 42"	Toshiba 46"	Thomson 40'
Normal (W)	55-63	62-210	44-113	48	134	96
Standby (w)	0.3	0.2-0.3	0.3-0.5	0.5	0.3	0.4

From 44 to 210 watts en fonctionnant et from 0.2 to 1 watt in standby mode
Consommation moyenne : 101.31 en fonctionnant et 0.40 watts (standby mode)

LCD télévision > 50 inch

Marques	Samsung 50"	**Sharp 60"**	**Sharp 70"**
Conso. (W)	130	87-101	136
Standby Conso. (w)	-	0.15	0.1

Puissance nominale : De 87 à 136 watts en fonctionnant et de 0.1 à 0.15 watt en mode veille
Consommation moyenne : 120 watts en fonctionnant et 0.13 watts en mode veille

Télévision Plasma

Marques	**LG 42"**	**LG 50"**	**LG 60"**	**Panasonic 50"**	**Panasonic 55"**
Conso.(W)	93	130	183	180-195	205-238
Veille(w)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Marques	**Panasonic 65"**	**Samsung 43"**	**Samsung 51"**	Samsung 59"	
Conso.(W)	305	90-118	82-133	208	
Veille(w)	0.3	0.3	0.3	0.3	

télévision (toutes les tailles)
Puissance nominale : De 90 à 305 watts en fonctionnant et 0.3 watt en mode veille
Consommation moyenne : 171.05 watts en fonctionnant and 0.30 watts en mode veille

en watts	LED	LCD	Plasma
<40	36.31	63.13	-
40-50	67.47	101.31	98.50
>50	105.35	120	191.79

			Télévision LED	Télévision LCD	Télévision Plasma
	Taille de l'écran en pouces	Surface de l'écran en pouces carrés	Consommation énergétique moyenne des téléviseurs Samsung, LG et Panasonic en mode normal (par watts) Average energy consumption of Samsung, LG and Panasonic TV in normal mode (per watts)		

			Average energy consumption of Samsung, LG and Panasonic TV in normal mode (per watts)								
			Sa	LG	Pa	Sa	LG	Pa	Sa	LG	Pa
19”	15.19*11.42	173.4017	21.4	-	-	22	-		-	-	
22”	17.58*13.22	232.4811	22-23	22	-	30	-		-	-	
24”	19.18*14.42	276.674	-	-				24			
26”	20.78*15.63	324.7062	28-33		-	-			-	-	
28”	22.38*16.83	376.5827	25	-	-	-	-		-	-	
32”	25.58*19.23	491.8662	31-52	-	-	112	41-81	79	-	-	
39”	31.17*23.44	730.5914	80	-	-						
40”	31.97*24.04	768.5341	55-88	-	55-63	-	-		-	-	
42”	33.57*25.24	847.3127	58	52-68	45-133	-	120	55	-	93	-
43”	34.37*25.84	888.1371	-	-	-	-	-		90-118	-	
46”	36.77*27.64	1016.3888	62-81	-	-	62-210	-		-	-	
47”	37.57*28.25	1061.062	-	63-77	68-69		-	-		-	
50”	39.96*30.05	1200.84	-	-	-	-	-		-	130	180-195
51”	40.76*30.65	1249.3513	-	71	91	-	-		82-133	-	
55”	43.96*33.05	1453.0187	75-110	71-85	90-91	-	-	-	-	-	205-238
60”	47.96*36.06	1729.2083	92-95	-	104		-		-	183	-
65”	51.95*39.06	2029.418	110-128	209	-				-	-	305
66”	52.75*39.66	2092.3356		98							
70’	55.95*42.06	2353.6444	176								

per 1 square inch of the screen	LED	LCD	PDP	CRT
Minimum and maximum energy consumption of Samsung, LG & Panasonic TV in normal mode <40”	0.06-0.15 watts	0.08-0.25 watts		-
Minimum and maximum energy consumption of Samsung, LG & Panasonic TV in normal mode 40”-50”	0.05-0.16 watts	0.06-0.25 watts	0.10-0.13 watts	-
Minimum and maximum energy consumption of Samsung, LG & Panasonic TV in normal mode >50”	0.04-0.11 watts	0.05-0.06 watts	0.07-0.16 watts	-
Energy consumption of 42inch LG TV in normal mode	67	120	93	-
Average energy consumption of 1 square inch of screen	0.1	0.15	0.12	0.30*

* According to Agilent

60. Consoles de jeux vidéo

Types	Nintendo wii	Sony play station 3	Microsoft xbox 360
Conso.(w)*	29	178	184

Puissance nominale : De 29 à 184 watts (Selon DoE)
Consommation moyenne : 130.33 watts

61.Epilateur

Marques	Braun	Panasonic	Philips	Veet	Calor
Conso.(w)	7	5	7.5-8	5	9

Puissance nominale : De 5 à 9 watts
Consommation moyenne : 6.75 watts

62. Sèche-cheveux

Marques	Babyliss	calor	Okoia	Vidal sassoon	Philips	Listo	Gama
Conso.(w)	2000-2300	1600-2300	1400-2000	2200	1600-2300	1400	2100

Marques	Valera	Toni & guy	Solac	Jean Louis David	Remington	Essentiel b	Epilady
Conso.(w)	1800-2000	1700-2000	2000-2200	2000	2000-2200	1800-2000	2000

Puissance nominale : De 1400 à 2300 watts
Consommation moyenne : 1950 watts

63. Coiffeur (lisseur/fer à boucler)

Marques	Listo	Calor	Babyliss	Dessange	Vidal sasoon	Philips
Conso.(w)	1000	700-1200	300-1000	1200	1000	1000

Puissance nominale : De 300 à 1200 watts
Consommation moyenne : 966.66 watts

64. Rasoir/tondeuse

Marques	**Braun**	Panasonic	Philips
Conso.(w)	6	7	5.4

Puissance nominale : De 5.4 à 7 watts
Consommation moyenne : 6.13 watts

65. Brosse à dents

Marques	Braun	Panasonic	Philips
Conso.(w)	2.4	2	1.3

Puissance nominale : De 1.3 à 2.4
Consommation moyenne : 1.9 watts

66. Tapis de course

Marques	Confidence	Dura
Conso.(Watts)	600	750

Puissance nominale : De 600 à 750 watts
Consommation moyenne : 675 watts

67. Vaporisateur/humidificateur/ Désodorisant

Marques	Air naturel	Bionaire	Petit terraillon	Proline	Okoia	Stylies
Conso.(W)	18-30	18-20	30	12	30-38	15
Marques	Elro	Tribest	Sunpentown	Medisana medibreeze	Chicco humi cube	Stadlerform
Conso.(W)	20	20	15	10	20	18-32

Puissance nominale : De 10 à 38 watts
Consommation moyenne : 20.33 watts

68. Ordinateur portable

Marques	Lenovo ThinkPad X41 Tablet 12' (late 2005)	Lenovo ThinkPad X300 13' (early 2008)	Dell Latitude D420 12' (mid 2006)	Apple MacBook Pro 15' (mid 2006)	Apple MacBook Pro 15' (early 2008)
Moderate use(W)	19-20	38-40	23-26	26-38	55-58
sleep (w)	2	1	1-4	2	1
Marques	Apple MacBook Pro 13' "Retina" (mid 2012)	Apple MacBook Pro 13'(mid 2009)	Lenovo Think PadT410s 14'(mid 2010)	Dell Latitude E4200 12'(late 2008)	Dell Latitude XT2 XFR 12'(early 2010)
Moderate use(W)	49-53	58-60	39-58	38-40	28-32
sleep (w)	1	1	1	1	1-2
Marques	Dell Inspiron Mini 10 10'(late 2009)	Lenovo ThinkPad X100e 11.6' (early 2010)	Dell XPS 12 12.5'(late 2012)		
Moderate use(W)	19-21	19-21	38-40		
sleep (w)	1	1	1		

Consommation : De 19 à 60 watts en utilisation modérée
Consommation moyenne modérée : 37.17 watts

Tous les tests ont été effectués avec une connexion à Internet via Ethernet et une résolution d'écran de base et une utilisation modérée. (Réf : John Mulhern III, Lead for Client Technologies, ISC Technology Support Services)

69. Ordinateur personnel

Marques	Apple iMac/Intel 21.5' (late 2012)	Apple iMac/Intel 21.5' (late 2011)	Apple iMac/Intel 27' (late 2009)	Apple iMac/Intel 24' (early 2009)
Moderate use(W)	52 - 56	92 - 96	141-147	146-154
sleep (w)	1	1	1	1
Marques	Dell OptiPlex 9010 All-In-One 23' (late 2012)	Dell OptiPlex 9010 w/Dell LCD (mid 2012)	Dell OptiPlex 990 w/Dell LCD (mid 2011)	Dell OptiPlex 980 wDell LCD (mid 2010)
Moderate use(W)	43-45	66	33-37	64-71
sleep (w)	1	1	1	1
Marques	Dell OptiPlex 745 w/19' Dell LCD (mid 2006)	Dell OptiPlex 755 w/19' Dell LCD (late 2007)	Dell OptiPlex 740 w/19' Dell LCD (late 2006)	Lenovo ThinkCentre M 91 wLenovo LCD (early 2012)
Moderate use(W)	111-133	126-130	108-138	50-68
sleep (w)	2	2	3	1
Marques	Apple iMac/Intel 17'(early 2006)	Apple iMac/Intel 20'(early 2008)	Dell OptiPlex 760 w/19' Dell LCD (late 2008)	Apple iMac/G5 20'(early 2005)
Moderate use(W)	60-61	117-118	95-111	112-113
sleep (w)	3	1	1	4
Marques	Apple PowerMac G5 w/20'Apple LCD (mid 2005)	Dell OptiPlex GX620 w/17' Dell LCD (mid 2005)	Dell OptiPlex GX270 w/17' Dell LCD (mid 2003)	IBM ThinkCentre M52 w/19'IBM LCD (mid 2006)
Moderate use(W)	48-49	164 - 170	104-162	156-194
sleep (w)	2	5	4	1

Consommation : De 33 à 194 watts en utilisation modérée
Consommation moyenne modérée : 125.22 watts

Tous les tests ont été effectués avec une connexion à Internet via Ethernet et une résolution d'écran de base et une utilisation modérée. (Réf : John Mulhern III, Lead for Client Technologies, ISC Technology Support Services)

70. Télécopieur

Marques	Brother	Philips	Sagemcom
Conso. W)	16-30	15	15
Veille (w)	4-8	1-4	2

Puissance nominale : De 15 à 30 watts en fonctionnant et de 1 à 8 watts en mode veille
Consommation moyenne : 17.67 watts en fonctionnant et 3.5 watts en mode veille

71. Imprimante/scanner/copieur

Marques	Brother	Canon	Epson	HP
Conso.(W)	17-42	11-24	18	10-46
Veille (w)	0.5-3.5	0.3-4	2	0.8-3.3

Puissance nominale : De 10 à 46 watts en fonctionnant et de 0.3 à 4 watts en mode veille
Consommation moyenne : 23.25 watts en fonctionnant et 2.05 watts en mode veille

72. Haut-parleurs

Marques	Polaroid Bluetooth	Logilink SP0027 ; SP0009 ; SP0026	LBMTech BTS-06; Boombox	Dcybel MINI DRUM ; ESCAPE ; SMART	Logitech X100
Conso. (W)	3	1 ; 2 ; 2.4	3 ; 3.4	3 ; 5 ; 6	1.5
Marques	Philips BT1300B/00 ; BT2650B/00 ; BT3600B/00 ; BT7500B/12 ; BT6000W/12 ; BT6050B/12	Brandt BBTS-1100US ; BBTS 200W ; BBTS-1500R ; BTD-200BT	Jbl GO ; CLIP; Flip	Ryght POCKET	Dual Bluetooth
Conso. (W)	2 ; 4 ; 10 ; 30 ; 12 ; 14	4 ; 3 ; 6 ; 18	3 ; 3.2 ; 12	3	6 ; 3
Marques	Lexibook Moi, Moche et Méchant ; La Reine des Neiges	LBMTech Étanche	Easypix	Dynabass DBX40BLU	Jam XT; TRANCE
Conso. (W)	6 ; 3	3	3 ; 10	3	3 ; 4.5
Marques	Maxell MXSB	Sony SRS-X11 ; SRS-X11	Jabra SOLEMATE	Audiosonic SK1528	BLACK PANTHER CITY B-LIGHT
Conso. (W)	5	10 ; 3	3	6	4
Marques	Harper DBT30RED	Hercules WAE 04+			
Conso. (W)	10	5			

Puissance nominale : De 1 à 30 watts
Consommation moyenne : 5.61 watts

73.Téléphone

Marques	Polycom	Cisco
Appel (W)	2-10.5	3.7-15.4
***Idle* (w)**	1.4-6.5	2.3-9.12

Puissance nominale : De 2 à 15.4 watts en fonctionnant et de 1.4 à 9.2 watts en mode veille
Consommation moyenne : 7.90 watts en fonctionnant et 4.84 watts en mode veille

74. Chargeur (téléphone)

Phone	**Endurance rating**	**Talk time**	**Web browsing**	**Video playback**	**Custom rating**
Acer CloudMobile S500	30h	9:05h	4:32h	5:18h	43h
Acer Liquid Jade Primo	56h	13:53h	7:30h	12:53h	82h
Acer Liquid Jade S	43h	16:51h	4:54h	4:31h	73h
alcatel Hero	55h	25:02h	9:40h	9:49h	74h
alcatel Idol X+	45h	14:41h	5:55h	6:29h	69h
Apple iPhone 4s	45h	7:41h	6:56h	9:24h	68h
Apple iPhone 5	51h	8:42h	9:56h	10:12h	74h
Apple iPhone 5c	52h	10:18h	9:05h	7:41h	79h
Apple iPhone 5s	54h	10:46h	9:58h	10:31h	78h
Apple iPhone 6	61h	12:23h	10:29h	9:24h	92h
Apple iPhone 6 Plus	79h	23:49h	9:05h	11:15h	127h
Apple iPhone 6s	62h	9:41h	12:27h	10:46h	94h
Apple iPhone 6s Plus	85h	15:51h	11:51h	13:57h	135h
Apple iPhone SE	73h	11:56h	12:55h	14:17h	110h
Archos 50 Diamond	60h	15:23h	7:20h	8:24h	97h
Asus PadFone 2	56h	11:20h	8:20h	7:38h	90h
Asus PadFone X	80h	18:45h	11:07h	11:01h	127h
Asus Zenfone 2 Deluxe ZE551ML	59h	15:47h	7:52h	8:34h	92h
Asus Zenfone 2 ZE551ML	59h	15:47h	7:52h	8:34h	92h
Asus Zenfone Selfie ZD551KL	63h	20:22h	7:43h	11:32h	94h
BlackBerry Bold 9790	35h	5:00h	4:02h	5:47h	62h
BlackBerry Curve 9380	39h	6:52h	6:40h	5:09h	63h
BlackBerry Leap	45h	12:05h	7:37h	8:59h	63h
BlackBerry Passport	73h	25:12h	10:12h	10:46h	109h
BlackBerry Priv	62h	14:40h	8:20h	6:33h	106h
BlackBerry Q10	56h	20:00h	8:42h	11:15h	77h
BlackBerry Q5	55h	14:31h	10:04h	12:28h	75h

BlackBerry Z10	46h	8:20h	6:27h	8:44h	71h
Gionee Elife S5.1	55h	8:55h	7:04h	6:06h	101h
Gionee Elife S5.5	48h	11:32h	5:10h	6:02h	84h
Gionee Marathon M5	148h	38:07h	30:51h	26:24h	205h
HTC Butterfly	45h	12:18h	6:24h	8:28h	66h
HTC Butterfly 2	66h	19:23h	13:11h	10:26h	92h
HTC Butterfly S	81h	19:14h	11:07h	9:03h	136h
HTC Desire 500	47h	11:31h	6:31h	7:50h	71h
HTC Desire 510	70h	14:06h	10:53h	9:54h	110h
HTC Desire 600 dual sim	53h	11:58h	6:34h	6:49h	89h
HTC Desire 616 dual sim	52h	13:00h	5:24h	5:15h	98h
HTC Desire 700 dual sim	52h	16:56h	12:30h	6:26h	74h
HTC Desire 816	64h	14:46h	11:48h	10:34h	93h
HTC Desire 820	49h	14:17h	9:10h	7:10h	70h
HTC Desire 820 dual sim	49h	14:17h	9:10h	7:10h	70h
HTC Desire Eye	70h	19:11h	10:02h	10:35h	106h
HTC Desire X	42h	11:03h	5:16h	5:38h	68h
HTC DROID DNA	49h	11:07h	6:40h	7:30h	77h
HTC DROID Incredible 4G LTE	42h	11:25h	5:48h	6:51h	63h
HTC First	57h	12:31h	6:39h	10:03h	91h
HTC One	48h	13:38h	9:58h	10:02h	64h
HTC One (E8)	77h	17:47h	10:02h	11:16h	123h
HTC One (M8)	77h	14:15h	12:29h	10:11h	124h
HTC One (M8) for Windows	79h	28:34h	12:31h	11:15h	115h
HTC One A9	46h	11:12h	5:22h	8:33h	72h
HTC One E9+	59h	12:07h	8:05h	7:00h	100h
HTC One M9	62h	20:44h	7:31h	8:21h	98h
HTC One Max	81h	22:13h	11:20h	13:11h	121h
HTC One mini	40h	12:04h	8:12h	7:23h	54h
HTC One mini 2	50h	09:58h	06:33h	06:05h	85h
HTC One S	35h	9:42h	4:03h	9:28h	51h
HTC One S C2	35h	9:42h	4:03h	9:28h	51h
HTC One SV	38h	11:07h	6:15h	6:55h	54h
HTC One V	31h	10:00h	6:49h	5:20h	42h
HTC One X	37h	9:57h	4:18h	5:45h	59h
HTC One X+	44h	13:31h	7:56h	8:11h	61h
HTC Radar	34h	6:53h	7:17h	5:54h	49h
HTC Rezound	32h	8:10h	5:16h	5:03h	47h
HTC Rhyme	39h	8:48h	5:08h	5:23h	63h
HTC Sensation XL	40h	9:30h	5:20h	6:12h	62h
HTC Titan II	23h	5:10h	4:05h	5:50h	32h
HTC Vivid	42h	9:02h	4:46h	6:00h	71h
HTC Windows Phone 8X	31h	11:07h	6:01h	6:27h	41h
Huawei Ascend Mate	81h	25:12h	8:17h	12:18h	133h
Huawei Ascend Mate2 4G	106h	33:19h	16:41h	18:01h	152h
Huawei Ascend Mate7	67h	20:06h	13:53h	14:04h	89h
Huawei Ascend P1	34h	12:30h	3:23h	7:38h	52h
Huawei Ascend P6	46h	14:17h	6:30h	6:55h	69h
Huawei Ascend P7	53h	13:36h	7:13h	8:10h	81h
Huawei G8	71h	27:44h	10:00h	10:20h	105h
Huawei Honor 5X	76h	29:40h	10:00h	9:16h	119h
Huawei Honor 6	67h	17:13h	12:59h	12:51h	93h
Huawei Honor 7	64h	14:33h	10:38h	9:43h	96h
Huawei Mate 8	103h	26:45h	17:05h	12:34h	159h
Huawei Mate S	60h	13:53h	9:43h	11:26h	87h
Huawei MediaPad 7 Vogue	62h	22:16h	7:23h	6:40h	104h
Huawei Nexus 6P	74h	20:50h	8:35h	9:59h	121h
Huawei P8	64h	13:50h	13:32h	9:25h	93h
Huawei P8lite	53h	17:38h	8:27h	9:00h	75h
Huawei P8lite ALE-L04	61h	18:25h	8:42h	10:00h	90h
Huawei P9	75h	14:53h	9:15h	8:46h	132h
Lenovo K3 Note	53h	17:13h	5:56h	6:55h	87h
Lenovo S90 Sisley	54h	10:00h	7:00h	7:30h	91h
Lenovo Vibe K4 Note	73h	18:51h	9:10h	9:13h	120h
Lenovo Vibe K5 Plus	69h	31:40h	8:46h	7:24h	111h
Lenovo Vibe Shot	54h	16:17h	8:11h	5:40h	87h
Lenovo Vibe X2	50h	12:30h	8:01h	5:09h	82h
Lenovo Vibe Z2 Pro	76h	33:20h	7:42h	7:29h	136h
Lenovo ZUK Z1	97h	22:13h	10:46h	14:14h	162h
LG AKA	73h	23:20h	10:38h	11:54h	107h
LG G Flex	97h	25:19h	9:31h	19:57h	156h
LG G Flex2	62h	17:51h	6:16h	10:35h	101h

LG G Pro 2	61h	25:37h	9:31h	5:49h	98h
LG G2	81h	25:15h	11:42h	9:28h	128h
LG G2 mini	76h	18:11h	11:02h	10:23h	119h
LG G3	63h	25:38h	6:29h	8:30h	103h
LG G4	54h	16:40h	7:54h	7:23h	82h
LG G5	60h	17:37h	7:35h	10:21h	91h
LG G5 SE	60h	17:37h	7:35h	10:21h	91h
LG Nexus 4 E960	32h	14:17h	4:34h	4:55h	46h
LG Nexus 5	38h	10:01h	4:45h	5:01h	62h
LG Nexus 5X	60h	16:57h	8:32h	6:25h	99h
LG Nitro HD	28h	5:16h	4:00h	4:17h	45h
LG Optimus 3D Max P720	34h	8:42h	4:10h	3:28h	60h
LG Optimus 4X HD P880	40h	7:41h	3:59h	4:14h	79h
LG Optimus G E975	45h	15:30h	5:15h	7:16h	69h
LG Optimus G Pro E985	50h	20:45h	6:40h	8:40h	72h
LG Optimus GJ E975W	39h	12:39h	7:11h	8:15h	52h
LG Optimus L9 P760	42h	11:07h	5:02h	5:53h	68h
LG Optimus Vu F100S	37h	7:57h	4:49h	6:23h	58h
LG V10	56h	16:40h	8:20h	7:30h	85h
Meizu m1 metal	61h	16:02h	11:33h	8:11h	90h
Meizu m1 note	66h	14:53h	13:05h	11:09h	94h
Meizu m2 note	69h	20:55h	9:54h	6:27h	117h
Meizu MX	39h	8:39h	4:35h	5:27h	65h
Meizu MX 4-core	38h	10:00h	5:19h	6:33h	57h
Meizu MX3	36h	11:02h	7:09h	5:38h	50h
Meizu MX4	89h	16:25h	14:06h	9:31h	152h
Meizu MX4 Pro	67h	22:09h	10:24h	12:41h	94h
Meizu MX5	55h	13:15h	9:03h	9:13h	81h
Meizu PRO 5	95h	23:10h	12:51h	18:02h	142h
Microsoft Lumia 435	58h	15:50h	9:22h	8:27h	86h
Microsoft Lumia 435 Dual SIM	64h	15:50h	9:22h	8:27h	100h
Microsoft Lumia 532	55h	14:24h	10:52h	8:51h	78h
Microsoft Lumia 532 Dual SIM	60h	14:24h	10:52h	8:51h	88h
Microsoft Lumia 535 Dual SIM	44h	12:15h	5:21h	5:27h	72h
Microsoft Lumia 550	42h	11:40h	6:55h	5:05h	65h
Microsoft Lumia 640 Dual SIM	76h	23:09h	10:23h	9:43h	119h
Microsoft Lumia 640 LTE	76h	23:09h	10:23h	9:43h	119h
Microsoft Lumia 640 LTE Dual SIM	76h	23:09h	10:23h	9:43h	119h
Microsoft Lumia 640 XL	74h	29:46h	10:14h	8:40h	115h
Microsoft Lumia 640 XL Dual SIM	74h	29:46h	10:14h	8:40h	115h
Microsoft Lumia 640 XL LTE	74h	29:46h	10:14h	8:40h	115h
Microsoft Lumia 640 XL LTE Dual SIM	74h	29:46h	10:14h	8:40h	115h
Microsoft Lumia 650	55h	18:30h	7:57h	7:09h	84h
Microsoft Lumia 950	48h	8:25h	7:29h	9:40h	73h
Microsoft Lumia 950 XL	62h	16:50h	10:50h	10:38h	88h
Microsoft Lumia 950 XL Dual SIM	47h	16:50h	10:50h	10:38h	60h
Motorola ATRIX HD MB886	36h	9:04h	6:40h	6:01h	51h
Motorola DROID RAZR M	55h	12:31h	7:42h	9:00h	84h
Motorola DROID RAZR MAXX	61h	20:24h	7:23h	14:17h	88h
Motorola DROID Turbo	90h	30:09h	11:31h	13:41h	137h
Motorola Moto E	60h	16:38h	8:42h	6:31h	98h
Motorola Moto E (2nd gen)	82h	22:36h	12:42h	13:04h	121h
Motorola Moto E Dual SIM	60h	16:38h	8:42h	6:31h	98h
Motorola Moto G	54h	13:41h	9:04h	6:37h	83h
Motorola Moto G (2nd gen)	50h	11:49h	6:37h	6:05h	83h
Motorola Moto G 4G	64h	14:17h	10:52h	7:27h	102h
Motorola Moto X	39h	14:06h	8:17h	10:01h	50h
Motorola Moto X (2nd Gen)	48h	14:45h	7:11h	7:31h	71h
Motorola Moto X Play	83h	26:28h	11:52h	12:06h	124h
Motorola Moto X Style	63h	22:23h	6:49h	9:14h	101h
Motorola Nexus 6	70h	25:03h	7:54h	10:01h	111h
Motorola RAZR i XT890	64h	20:07h	7:06h	8:11h	106h
Motorola RAZR MAXX	87h	21:18h	9:12h	16:35h	139h
Nokia 808 PureView	34h	5:16h	4:14h	9:53h	53h
Nokia Lumia 1020	61h	22:13h	5:50h	13:12h	95h
Nokia Lumia 1320	75h	22:13h	10:58h	9:17h	117h
Nokia Lumia 1520	107h	28:34h	12:40h	12:31h	182h
Nokia Lumia 510	44h	8:22h	6:13h	6:23h	71h
Nokia Lumia 520	49h	13:33h	7:15h	5:50h	78h
Nokia Lumia 610	43h	8:51h	8:01h	7:23h	63h
Nokia Lumia 620	36h	14:17h	3:50h	6:32h	55h
Nokia Lumia 630	66h	13:20h	10:18h	10:00h	102h

Nokia Lumia 635	66h	14:17h	10:00h	10:00h	102h
Nokia Lumia 710	27h	9:05h	3:51h	3:27h	41h
Nokia Lumia 720	60h	15:17h	7:37h	6:43h	102h
Nokia Lumia 735	59h	17:30h	8:20h	10:20h	86h
Nokia Lumia 800	35h	8:25h	4:07h	5:52h	56h
Nokia Lumia 810	48h	9:05h	8:20h	6:26h	76h
Nokia Lumia 820	40h	7:09h	4:24h	6:25h	69h
Nokia Lumia 830	68h	14:56h	10:36h	9:58h	105h
Nokia Lumia 900	38h	7:21h	5:25h	6:37h	59h
Nokia Lumia 900 AT&T	29h	5:53h	4:10h	5:18h	44h
Nokia Lumia 920	44h	8:56h	5:40h	6:19h	72h
Nokia Lumia 928	41h	12:27h	5:36h	6:54h	61h
Nokia Lumia 930	46h	16:40h	4:57h	5:48h	76h
Nokia Lumia Icon	40h	14:15h	5:17h	7:34h	58h
Nokia N9	39h	6:57h	4:33h	8:40h	62h
Nokia X	38h	11:13h	4:55h	6:10h	58h
Nokia XL	62h	10:45h	11:54h	6:28h	104h
OnePlus 2	61h	30:29h	8:05h	8:28h	91h
OnePlus One	66h	19:56h	9:46h	11:23h	96h
OnePlus X	54h	15:57h	6:32h	6:55h	88h
Oppo F1	58h	12:53h	7:55h	9:14h	90h
Oppo F1 Plus	74h	21:07h	8:17h	12:13h	117h
Oppo Find 5	43h	14:17h	5:33h	5:18h	68h
Oppo Find 7	44h	20:03h	5:02h	5:58h	69h
Oppo Find 7a	60h	18:11h	7:09h	9:19h	94h
Oppo N1	79h	25:01h	9:05h	11:15h	126h
Oppo N3	64h	14:14h	8:16h	9:49h	102h
Oppo R1x	56h	12:33h	9:10h	9:02h	84h
Oppo R5	38h	9:45h	4:05h	5:27h	64h
Oppo R7	63h	22:58h	7:22h	9:33h	97h
Oppo R7 Plus	94h	30:46h	10:39h	18:04h	142h
Oppo R7s	73h	24:03h	8:07h	14:05h	111h
Oppo R819	56h	19:03h	6:01h	5:54h	98h
Pantech Burst	31h	4:46h	5:51h	5:38h	47h
Pantech Discover	48h	14:17h	5:33h	6:55h	77h
Samsung Ativ Odyssey I930	57h	16:41h	9:54h	8:59h	82h
Samsung ATIV SE	60h	22:05h	7:12h	10:07h	90h
Samsung Focus S I937	38h	7:25h	6:15h	7:55h	56h
Samsung Galaxy A3	65h	20:04h	7:36h	8:34h	105h
Samsung Galaxy A3 Duos	60h	20:04h	7:36h	8:34h	93h
Samsung Galaxy A5	74h	18:02h	11:36h	9:18h	116h
Samsung Galaxy A5 (2016)	91h	20:40h	9:52h	12:21h	157h
Samsung Galaxy A5 Duos	69h	18:02h	11:36h	9:18h	104h
Samsung Galaxy A7	83h	25:12h	9:30h	9:58h	139h
Samsung Galaxy A7 (2016)	96h	26:01h	11:55h	13:08h	154h
Samsung Galaxy A7 Duos	83h	25:12h	9:30h	9:58h	139h
Samsung Galaxy A8	98h	25:02h	12:18h	12:45h	160h
Samsung Galaxy A8 Duos	98h	25:02h	12:18h	12:45h	160h
Samsung Galaxy A9 (2016)	103h	32:54h	13:26h	18:36h	152h
Samsung Galaxy Ace 3	34h	9:32h	6:38h	6:54h	46h
Samsung Galaxy Ace Duos S6802	42h	6:53h	4:45h	6:25h	74h
Samsung Galaxy Alpha	52h	13:20h	8:25h	8:05h	77h
Samsung Galaxy Core I8260	49h	11:52h	6:54h	7:30h	75h
Samsung Galaxy Core LTE	62h	22:13h	9:37h	5:34h	103h
Samsung Galaxy E7	76h	20:04h	8:17h	14:57h	119h
Samsung Galaxy Express I8730	59h	10:00h	7:09h	10:00h	99h
Samsung Galaxy Fame S6810	33h	8:21h	5:55h	5:02h	48h
Samsung Galaxy Grand 2	45h	19:55h	9:05h	8:41h	59h
Samsung Galaxy Grand I9082	56h	12:45h	7:09h	8:11h	90h
Samsung Galaxy Grand Neo	59h	13:20h	7:43h	6:55h	100h
Samsung Galaxy J2	67h	14:51h	8:58h	10:35h	105h
Samsung Galaxy J7	91h	18:37h	9:04h	16:22h	155h
Samsung Galaxy K zoom	67h	16:01h	9:10h	10:08h	104h
Samsung Galaxy Mega 6.3 I9200	60h	19:54h	8:17h	8:34h	91h
Samsung Galaxy mini 2 S6500	38h	6:28h	6:03h	9:22h	56h
Samsung Galaxy Nexus I9250	31h	8:23h	3:01h	6:02h	50h
Samsung Galaxy Note 3	75h	18:12h	9:04h	13:32h	116h
Samsung Galaxy Note 3 Neo	74h	24:52h	9:43h	11:38h	111h
Samsung Galaxy Note 4	90h	28:31h	11:01h	17:52h	133h
Samsung Galaxy Note Edge	68h	21:39h	9:20h	10:41h	101h
Samsung Galaxy Note I717	40h	8:02h	5:24h	7:30h	62h
Samsung Galaxy Note II N7100	69h	16:57h	8:48h	11:27h	107h

Samsung Galaxy Note N7000	39h	12:14h	3:35h	8:25h	62h
Samsung Galaxy Note5	85h	28:34h	10:43h	13:51h	128h
Samsung Galaxy Pocket S5300	34h	5:54h	3:47h	6:06h	57h
Samsung Galaxy Premier I9260	51h	11:30h	6:40h	12:51h	75h
Samsung Galaxy S Blaze 4G T769	39h	7:14h	5:45h	7:33h	59h
Samsung Galaxy S Duos S7562	43h	8:28h	5:23h	4:30h	78h
Samsung Galaxy S III I747	40h	12:18h	6:16h	8:14h	56h
Samsung Galaxy S4 zoom	61h	15:32h	8:51h	9:30h	92h
Samsung Galaxy S5	83h	27:37h	9:39h	11:15h	133h
Samsung Galaxy S5 Active	70h	20:01h	9:05h	12:51h	104h
Samsung Galaxy S5 mini	72h	12:18h	13:14h	11:02h	111h
Samsung Galaxy S6	73h	19:48h	10:56h	12:12h	107h
Samsung Galaxy S6 active	109h	26:29h	16:25h	18:03h	163h
Samsung Galaxy S6 edge	73h	19:48h	10:56h	12:12h	107h
Samsung Galaxy S6 edge+	83h	30:29h	10:25h	13:53h	123h
Samsung Galaxy S7	80h	22:57h	9:34h	14:50h	121h
Samsung Galaxy S7 edge	98h	24:29h	13:32h	20:08h	144h
Samsung Galaxy S7 edge (CDMA)	87h	22:32h	10:09h	16:54h	134h
Samsung Galaxy Tab Pro 10.1 LTE	101h	46:44h	9:16h	12:10h	176h
Samsung I8190 Galaxy S III mini	42h	6:22h	7:38h	7:46h	64h
Samsung I8530 Galaxy Beam	52h	11:58h	5:28h	9:42h	84h
Samsung I9100 Galaxy S II	40h	8:35h	4:24h	8:00h	64h
Samsung I9103 Galaxy R	36h	9:40h	5:07h	6:21h	53h
Samsung I9105 Galaxy S II Plus	50h	11:06h	6:40h	10:00h	75h
Samsung I9190 Galaxy S4 mini	54h	13:10h	9:47h	13:12h	74h
Samsung i927 Captivate Glide	39h	8:20h	5:33h	6:04h	61h
Samsung I9295 Galaxy S4 Active	57h	16:40h	7:35h	7:03h	91h
Samsung I9300 Galaxy S III	50h	10:15h	6:27h	9:27h	78h
Samsung I9500 Galaxy S4	65h	11:01h	6:58h	11:29h	112h
Samsung I9505 Galaxy S4	69h	18:03h	7:24h	12:30h	110h
Samsung P6200 Galaxy Tab 7.0 Plus	63h	22:42h	6:02h	5:16h	126h
Samsung P6800 Galaxy Tab 7.7	80h	25:45h	6:54h	11:37h	141h
Samsung Rugby Smart I847	45h	7:09h	5:53h	9:34h	72h
Samsung S7710 Galaxy Xcover 2	48h	10:03h	6:35h	7:30h	76h
Samsung S8600 Wave 3	44h	11:07h	5:34h	7:52h	67h
Sony Ericsson Xperia neo V	42h	8:41h	4:20h	7:45h	70h
Sony Ericsson Xperia pro	37h	6:57h	4:50h	5:44h	60h
Sony Xperia acro S	36h	7:09h	5:16h	5:38h	56h
Sony Xperia C	68h	13:29h	12:45h	12:53h	98h
Sony Xperia C3 Dual	91h	22:11h	11:47h	12:22h	147h
Sony Xperia C4 Dual	53h	13:11h	7:05h	5:39h	90h
Sony Xperia C5 Ultra	62h	14:53h	7:15h	7:58h	105h
Sony Xperia C5 Ultra Dual	56h	14:53h	7:15h	7:58h	88h
Sony Xperia E	41h	6:40h	6:40h	9:00h	62h
Sony Xperia E dual	30h	6:42h	7:42h	6:27h	40h
Sony Xperia E1	56h	12:30h	11:30h	6:12h	87h
Sony Xperia E3	75h	14:28h	9:48h	8:26h	132h
Sony Xperia E4	88h	11:07h	16:40h	9:00h	162h
Sony Xperia E4g	47h	11:07h	11:32h	6:00h	68h
Sony Xperia ion LTE	31h	5:52h	5:56h	6:03h	45h
Sony Xperia J	50h	9:14h	7:06h	8:11h	79h
Sony Xperia L	39h	12:30h	6:40h	4:44h	59h
Sony Xperia M	54h	12:31h	7:09h	9:49h	82h
Sony Xperia M2	67h	16:40h	9:48h	10:04h	102h
Sony Xperia M2 Aqua	71h	16:39h	8:38h	9:21h	118h
Sony Xperia P	28h	5:58h	3:59h	4:30h	43h
Sony Xperia SP	51h	19:49h	6:18h	7:27h	78h
Sony Xperia T	36h	8:15h	5:33h	6:01h	54h
Sony Xperia T2 Ultra	96h	25:16h	12:17h	13:12h	153h
Sony Xperia T3	75h	19:48h	9:23h	9:56h	121h
Sony Xperia Z	48h	16:03h	6:37h	5:39h	76h
Sony Xperia Z Ultra	52h	24:23h	5:23h	8:45h	80h
Sony Xperia Z1	53h	26:53h	5:59h	6:12h	86h
Sony Xperia Z1 Compact	65h	20:42h	12:37h	10:01h	91h
Sony Xperia Z2	89h	22:13h	11:32h	12:16h	142h
Sony Xperia Z3	85h	23:13h	12:03h	11:47h	131h
Sony Xperia Z3 Compact	101h	16:40h	14:52h	15:03h	165h
Sony Xperia Z3+	65h	16:13h	11:51h	7:46h	100h
Sony Xperia Z4 Tablet LTE	105h	28:25h	15:05h	14:58h	161h
Sony Xperia Z5	73h	17:13h	14:35h	7:53h	114h
Sony Xperia Z5 Compact	86h	28:23h	11:20h	13:04h	130h
Sony Xperia Z5 Premium	66h	20:27h	9:29h	7:14h	106h

Sony Xperia ZL	44h	15:22h	6:04h	5:28h	68h
Sony Xperia ZR	62h	17:48h	11:20h	7:30h	93h
vivo X5Max	71h	17:23h	9:19h	10:44h	111h
vivo X5Pro	67h	16:57h	9:34h	10:41h	101h
Xiaomi Mi 3	66h	13:28h	8:04h	9:28h	110h
Xiaomi Mi 4	68h	18:15h	9:31h	7:00h	114h
Xiaomi Mi 4c	52h	18:31h	9:32h	10:47h	70h
Xiaomi Mi 4i	67h	21:02h	8:27h	10:11h	103h
Xiaomi Mi 4s	75h	23:25h	9:30h	10:35h	117h
Xiaomi Mi 5	92h	19:43h	12:50h	13:52h	145h
Xiaomi Mi Note	48h	14:31h	6:19h	6:32h	75h
Xiaomi Redmi 1S	51h	14:51h	6:54h	6:42h	80h
Xiaomi Redmi 2	55h	12:33h	5:41h	8:01h	95h
Xiaomi Redmi 3	107h	32:53h	15:11h	17:50h	157h
Xiaomi Redmi Note	55h	21:41h	5:53h	5:18h	98h
Xiaomi Redmi Note 2	49h	17:09h	7:36h	6:37h	73h
Xiaomi Redmi Note 3 (MediaTek)	72h	22:02h	10:12h	9:57h	110h
Yota YotaPhone 2	57h	22:09h	6:23h	7:41h	91h
ZTE Blade S6	51h	15:01h	7:01h	8:00h	77h
ZTE nubia Z9	70h	22:20h	12:18h	7:11h	110h
ZTE nubia Z9 mini	65h	19:08h	7:44h	7:02h	111h

Moyen de 336 téléphones portables : 93 h

Temps moyen pour une charge complète : 3.5 h

Pour 30 minutes d'utilisation, le téléphone moyen aura 93 heures d'autonomie. Cela signifie qu'il doit être rechargé complètement toutes les 93 heures, ce qui prend environ 3 heures et 30 minutes. Par conséquent, en supposant que le téléphone portable soit chargé quotidiennement, pour l'utilisation mentionnée ci-dessus, il devrait être chargé 54 minutes par jour. Ce temps de charge pour 18 minutes d'utilisation est réduit à 33 minutes par jour. Cette moyenne est calculée sur la base d'un test de batterie personnalisé pour 30 minutes d'appel, 30 minutes de navigation sur Internet et 30 minutes de lecture vidéo. (ref: http://www.gsmarena.com/battery-test.php3)

75.Routeur

Marques	Linksys	Cisco	Netgear
working(W)	6.5-12	5.3-5.8	4.0-10.6
***Idle* (w)**	2		

Puissance nominale : De 4 à 12 watts en fonctionnant et environs 2 watts en mode veille
Consommation moyenne : 7.36 watts en fonctionnant et 2 watts en mode veille

Annexe VI : Différents types de consommateurs des ménages

Tableau VI-1 : Différents types et possibilités de profils de consommateurs

Réf : INSEE RP2010 et les tableaux de chapitres 4

No.	Types	Possibilités
Légende:		
Âge de la personne référente (Y: Young , MA: Middle-aged, O: Old)		
Type of household (Single-member: SM, Couple: C, Family: F, Mono-parental: MP, Complex: CO)		
Taille de logement (S: Small, M: Medium, L: Large)		
Activité (A: Active, I: Inactive)		
Individu (M: Adult Male, F: Adult Female, C: Child)		
1	Y SM S	1) AM, 2) IM, 3) AF, 4) IF
2	Y SM M	1) AM, 2) IM, 3) AF, 4) IF
3	Y SM L	1) AM, 2) IM, 3) AF, 4) IF
4	MA SM S	1) AM, 2) IM, 3) AF, 4) IF
5	MA SM M	1) AM, 2) IM, 3) AF, 4) IF
6	MA SM L	1) AM, 2) IM, 3) AF, 4) IF
7	O SM S	1) IM, 2) IF
8	O SM M	1) IM, 2) IF
9	O SM L	1) IM, 2) IF
10	Y C S	1) AMs, 2) AFs, 3) AM & AF, 4) IMs, 5) IFs, 6) IM & IF, 7) IM & AF, 8) IF & AM, 9) AM & IM, 10) AF & IF
11	Y C M	1) AMs, 2) AFs, 3) AM & AF, 4) IMs, 5) IFs, 6) IM & IF, 7) IM & AF, 8) IF & AM, 9) AM & IM, 10) AF & IF
12	Y C L	1) AMs, 2) AFs, 3) AM & AF, 4) IMs, 5) IFs, 6) IM & IF, 7) IM & AF, 8) IF & AM, 9) AM & IM, 10) AF & IF
13	MA C S	1) AMs, 2) AFs, 3) AM & AF, 4) IMs, 5) IFs, 6) IM & IF, 7) IM & AF, 8) IF & AM, 9) AM & IM, 10) AF & IF
14	MA C M	1) AMs, 2) AFs, 3) AM & AF, 4) IMs, 5) IFs, 6) IM & IF, 7) IM & AF, 8) IF & AM, 9) AM & IM, 10) AF & IF
15	MA C L	1) AMs, 2) AFs, 3) AM & AF, 4) IMs, 5) IFs, 6) IM & IF, 7) IM & AF, 8) IF & AM, 9) AM & IM, 10) AF & IF
16	O C S	1) IMs, 2) IFs, 3) IM & IF
17	O C M	1) IMs, 2) IFs, 3) IM & IF
18	O C L	1) IMs, 2) IFs, 3) IM & IF
19	Y F S	1) AMs & C(s), 2) AFs & C(s), 3) AM & AF & C(s), 4) IMs & C(s), 5) Ifs & C(s), 6) IM & IF & C(s), 7) IM & AF &C(s), 8) IF & AM & C(s), 9) AM & IM & C(s), 10) AF & IF & C(s)
20	Y F M	1) AMs & C(s), 2) AFs & C(s), 3) AM & AF & C(s), 4) IMs & C(s), 5) Ifs & C(s), 6) IM & IF & C(s), 7) IM & AF &C(s), 8) IF & AM & C(s), 9) AM & IM & C(s), 10) AF & IF & C(s)
21	Y F L	1) AMs & C(s), 2) AFs & C(s), 3) AM & AF & C(s), 4) IMs & C(s), 5) Ifs & C(s), 6) IM & IF & C(s), 7) IM & AF &C(s), 8) IF & AM & C(s), 9) AM & IM & C(s), 10) AF & IF & C(s)
22	MA F S	1) AMs & C(s), 2) AFs & C(s), 3) AM & AF & C(s), 4) IMs & C(s), 5) Ifs & C(s), 6) IM & IF & C(s), 7) IM & AF &C(s), 8) IF & AM & C(s), 9) AM & IM & C(s), 10) AF & IF & C(s)
23	MA F M	1) AMs & C(s), 2) AFs & C(s), 3) AM & AF & C(s), 4) IMs & C(s), 5) Ifs & C(s), 6) IM & IF & C(s), 7) IM & AF &C(s), 8) IF & AM & C(s), 9) AM & IM & C(s), 10) AF & IF & C(s)
24	MA F L	1) AMs & C(s), 2) AFs & C(s), 3) AM & AF & C(s), 4) IMs & C(s), 5) Ifs & C(s), 6) IM & IF & C(s), 7) IM & AF &C(s), 8) IF & AM & C(s), 9) AM & IM & C(s), 10) AF & IF & C(s)
25	O F S	1) IMs & C(s), 2) Ifs & C(s), 3) IM & IF & C(s)
26	O F M	1) IMs & C(s), 2) Ifs & C(s), 3) IM & IF & C(s)
27	O F L	1) IMs & C(s), 2) Ifs & C(s), 3) IM & IF & C(s)
28	Y MPS	1) AM & C(s), 2) IM & C(s), 3) AF & C(s), 4) IF & C(s)
29	Y MPM	1) AM & C(s), 2) IM & C(s), 3) AF & C(s), 4) IF & C(s)
30	Y MP L	1) AM & C(s), 2) IM & C(s), 3) AF & C(s), 4) IF & C(s)
31	MA MP S	1) AM & C(s), 2) IM & C(s), 3) AF & C(s), 4) IF & C(s)
32	MA MP M	1) AM & C(s), 2) IM & C(s), 3) AF & C(s), 4) IF & C(s)
33	MA MP L	1) AM & C(s), 2) IM & C(s), 3) AF & C(s), 4) IF & C(s)
34	O MP S	1) IM & C(s), 2) IF & C(s)
35	O MP M	1) IM & C(s), 2) IF & C(s)
36	O MP L	1) IM & C(s), 2) IF & C(s)
37	Y CO S	1) AMs, 2) AFs, 3) AMs & AFs, 4) IMs, 5) IFs, 6) IMs & IFs, 7) IMs & AFs, 8) IFs & AMs, 9) AMs & IMs, 10) AFs & IFs
38	Y CO M	1) AMs, 2) AFs, 3) AMs & AFs, 4) IMs, 5) IFs, 6) IMs & IFs, 7) IMs & AFs, 8) IFs & AMs, 9) AMs & IMs, 10) AFs & IFs
39	Y CO L	1) AMs, 2) AFs, 3) AMs & AFs, 4) IMs, 5) IFs, 6) IMs & IFs, 7) IMs & AFs, 8) IFs & AMs, 9) AMs & IMs, 10) AFs & IFs

40	MA CO S	1) AMs, 2) AFs, 3) AMs & AFs, 4) IMs, 5) IFs, 6) IMs & IFs, 7) IMs & AFs, 8) IFs & AMs, 9) AMs & IMs, 10) AFs & IFs
41	MA CO M	1) AMs, 2) AFs, 3) AMs & AFs, 4) IMs, 5) IFs, 6) IMs & IFs, 7) IMs & AFs, 8) IFs & AMs, 9) AMs & IMs, 10) AFs & IFs
42	MA CO L	1) AMs, 2) AFs, 3) AMs & AFs, 4) IMs, 5) IFs, 6) IMs & IFs, 7) IMs & AFs, 8) IFs & AMs, 9) AMs & IMs, 10) AFs & IFs
43	O CO S	1) IMs, 2) IFs, 3) IMs & IFs, 4) IMs & AFs, 5) IFs & AMs, 6) AMs & IMs, 7) AFs & IFs
44	O CO M	1) IMs, 2) IFs, 3) IMs & IFs, 4) IMs & AFs, 5) IFs & AMs, 6) AMs & IMs, 7) AFs & IFs
45	O CO L	1)IMs, 2) IFs, 3) IMs & IFs, 4) IMs & AFs, 5) IFs & AMs, 6) AMs & IMs, 7) AFs & IFs

Annexe VII : Résultats du calcul de la demande électrique pour Tours (de l'échelle du quartier à celle de la ville)

Tableau VII-1 : Appareils électriques par type d'activité pour chaque type

Réf : Sur la base des Tableaux du chapitre 4

	Soins personnels	Cuisine, ménage, …	Bricolage	Télévision	Internet	Téléphone	Divers sans arrêt
T 1	HD	-	-	-	L, A, S	MO	R
T 2	HD, RE, HH	MW, CM, W, TO, V, WM, I	-	TV, TVB	PC, L, P, A, S	MO	R, RA
T 3	HD, RE, HH, TB	K, RC, MW, DF, C, W, SW, CM, O, TO, V, WM, I	-	TV, TVB	PC, L, P, A, S	MO	R, FR, RA
T 4	HD	-	-	-	L, M, P	MO	R, RA
T 5	HD, RE, HH	MW, CM, W, TO, V, WM, I	D	TV, TVB	PC, L, M, P	MO	R, RA
T 6	HD, RE, HH, TB	K, MW, RC, DF, C, SM, CM, W, O, TO, V, WM	D	TV, TVB, DVD, HC	PC, L, M, P, S	MO	R, FR, RA
T 7	-	-	-	TV, TVB	-	TE, F	R, RA
T 8	-	CM, V, WM	-	TV, TVB	-	TE, F	R, RA
T 9	HD	CM, V, WM	-	TV, TVB	-	TE, F	R, FR, RA
T 10	HD	MW	-	TV, TVB, DVD	L, M, T, A, S	MO, TE	R
T 11	HD, RE, HH	MF, MI, B, E, H, MW, RM, DW, CM, W, TO V, WM, TD, I	-	TV, TVB, DVD	PC, L, M, T, P, A, S	MO, TE	R, RA
T 12	HD, RE, HH, TB	MF, MI, B, E, K, H, MW, RC, DF, FM, RM, C, SW, DW, CM, W, O, TO, V, WM, TD, I	D	TV, TVB, DVD, HC	PC, L, M, T, P, A, S,	MO, TE	R, FR, RA
T 13	HD	MW	-	TV, TVB, DVD	L, M, T, P	MO, TE	R, RA
T 14	HD, RE, HH	MF, MI, B, E, H, MW, RM, DW, CM, W, TO, V, WM, TD, I	D	TV, TVB, DVD	PC, L, M, T, P	MO, TE	R, RA
T 15	HD, RE, HH, TB	MF, MI, B, E, K, H, MW, RC, DF, FM, RM, C, SW, DW, CM, W, O, TO, V, WM, TD, I	D	TV, TVB, DVD, HC	PC, L, M, T, P, S	MO, TE	R, FR, RA
T 16	-	-	-	TV, TVB	L	TE, F	R, RA
T 17	-	MI, RM, DW, CM, V, WM, TD	-	TV, TVB	L	TE, F	R, RA
T 18	-	MI, RM, DW, CM, V, WM, TD	-	TV, TVB	L	TE, F	R, FR, RA
T 19	HD	MW	-	TV, TVB, DVD	L, M, T, A, S	MO, TE	R
T 20	HD, RE, HH	MF, M, B, E, H, MW, DF, RM, C, DW, CM, W, TO, V, WM, TD, I	-	TV, TVB, DVD	PC, L, M, T, P, S, A	MO, TE	R, RA
T 21	HD, RE, HH, TB	MF, MI, B, E, K, H, MW, RC, DF, FM, RM, C, SW, DW, CM, W, O, TO, V, WM, TD, I	-	TV, TVB, DVD, HC	PC, L, M, T, P, S, A	MO, TE	R, FR, RA
T 22	HD	MV	-	TV, TVB, DVD	L, M, T, P	MO, TE	R, RA
T 23	HD, RE, HH	MF, MI, B, E, H, MW, DF, RM, C, CM, TO, V, WM, TD, I	D	TV, TVB, DVD	PC, L, M, T, P	MO, TE	R, RA
T 24	HD, RE, HH, TB	MF, MI, B, E, K, H, MW, RC, DF, FM, RM, C, SW, DW, CM, O, TO, V, WM, TD, I	D	TV, TVB, DVD, HC	PC, L, M, T, P, S, A	MO, TE	R, RA
T 26	_	MI, RM, CM, W, V, WM	-	TV, TVB	L, M	MO, TE, F	R, RA
T 28	HD	MW	-	TV, TVB	L, M, T, A, S	MO, TE	R
T 29	HD, TB	MF, MI, B, E, H, MW, DF, RM, C, CM, W, TO, V, WM, I	-	TV, TVB	L, M, T, P, S, A	MO, TE	R, RA
T 31	HD	MW	-	TV, TVB	L, M, T, P	MO, TE	R, RA
T 32	HD, RE, HH	MF, MI, B, E, H, MW, DF, RM, C, CM, W, TO V, WM, I	D	TV, TVB	PC, L, M, T, P	MO, TE	R, RA
T 33	HD, RE, HH, TB	MF, MI, B, E, K, H, MW, RC, FM, DF, RM, C, SW, DW, CM, W, O, TO, V, WM, TD, I	D	TV, TVB, DVD, HC	PC, L, M, T, P, S	MO, TE	R, FR, RA
T 35	-	MI, RM, DW, CM, V, WM, TD	-	TV, TVB	L, M, T	F, TE	R
T 37	HD	-	-	-	L, M, T, A, S	MO	R, RA
T 38	HD	MW, CM, W, TO, V	-	-	L, M, T, P, A, S	MO, TE	R, RA
T 40	HD	WM	-	-	L, M, T, P, A, S	MO	R, RA
T 41	HD	MW, CM, W, TO, V, WM	D	-	L, M, T, P, A, S	MO	R, RA
T 42	HD	MW, DW, CM, W, TO, V, WM, TD	D	-	L, M, T, P, A, S	MO	R, FR, RA

Tableau VII-2 : Résultats du calcul de la demande d'électricité pour les appareils de : a) cuisson/cuisine ; b) stockage/entretien ; c) salon/loisir ; d) salle de bain/soins personnels et e) bureau

Réf : Calculé en utilisant des équations de demande d'électrique																					*a)*
A	**B**	**CM**	**DF**	**DW**	**E**	**FM**	**FR**	**W**	**K**	**H**	**M**	**MW**	**MF**	**O**	**C**	**RM**	**R**	**RC**	**SW**	**TO**	
DPD_T (KWh/a)	1,4	52,2	8,8	106	0,7	1	91,9	34	0,02	17,1	2,31	60,3	5,71	0,03	0,52	2,00	236	2,19	2,10	5,21	
UEC_T (KWh/a)	3,85	85,32	42,42	273,11	1,56	6,86	157,68	72,57	0,11	48,24	4,10	93,35	19,54	0,18	2,56	5,66	236,52	15,00	14,37	9,46	
UEC_x (kWh/a)	0	11,31	0	11,05	0	0	0	0	0	0	0	17,34	0	0	0	0	0	0	0	0	
UEC_a (KWh/a)	3,85	74,01	42,42	262,08	1,56	6,86	157,68	72,57	0,11	48,24	4,10	76,01	19,54	0,18	2,56	5,66	236,52	15,00	14,37	9,46	
SC	0,76	1,71	0,11	0,09	0,91	0,05	0,00	0,84	2,27	0,13	0,46	0,53	0,31	0,46	0,15	0,05	0,00	0,31	0,08	0,46	
AP (%)	0,06	0,70	0,25	2,97	0,05	0,07	100,00	0,38	0,01	2,55	0,09	1,03	0,26	0,03	0,02	0,07	100,00	0,30	0,17	0,09	
λ	0,00005	0,01020	0,00003	0,00026	0,00005	0,00000	0,00007	0,00032	0,00002	0,00033	0,00004	0,00055	0,00008	0,00001	0,00000	0,00000	0,00007	0,00009	0,00001	0,00004	
MBS (min)	2096,4	83,54	3464	384,74	2097,4	2881,8	1440	311,3	4816	305,17	2399	182,44	1255,68	7698,8	2887,8	2881,8	1440	1096,87	7648,8	2399	
M (min)	115302	111947	114312	100032	115357	115272	525600	113625	115584	512200	115152	110196	114267	115482	115512	115272	525600	114072	114732	115152	
AOR	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1,0	0,2	0,2	0,2	
AOD (Yes/No)	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	
T_s (min)	525270	521915	524280	510000	525325	525240	0	523593	525552	512200	525120	520164	524235	525450	525480	525240	0	524040	524700	525120	
T_a (min)	330	3685	1320	15600	275	360	525600	2007,5	48	13400	480	5436	1365	150	120	360	525600	1560	900	480	
CEDa (KWh)	0,07	0,06	1,29	1,008	0,028	1,715	0,432	0,199	0,004	0,144	0,086	0,126	0,215	0,012	0,640	1,415	0,648	0,144	0,958	0,197	
CPa (Watts)	700	1205	1928	1008	341	1143	18	2169	132	216	513	839	859	71	1280	943	27	577	958	1183	
Ps (Watts)	0	1,3	0	1,3	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	
CLa (min)	6	3	40	60	5	90	1440	6	2	40	10	9	15	10	30	90	1440	15	60	10	
NCa	55	1340	33	260	55	4	365	365	24	335	48	604	91	15	4	4	365	104	15	48	
PD	**0,4**	**0,6**	**0,2**	**0,4**	**0,4**	**0,1**	**0,6**	**0,5**	**0,1**	**0,4**	**0,6**	**0,6**	**0,3**	**0,1**	**0,2**	**0,4**	**1,0**	**0,1**	**0,1**	**0,6**	

b)

A	AR	D	I	TD	V	WM
DPD_T (KWh/a)	23,1	0,28	265	219	26,5	163
UEC_T (KWh/a)	26,28	0,77	380,86	323,04	31,67	215,55
UEC_s (kWh/a)	0	0	0	12,11	0	23,28
UEC_a (KWh/a)	26,28	0,77	380,86	310,93	31,67	192,27
SC	0,00	0,91	0,02	0,05	0,12	0,12
AP (%)	100,00	0,01	2,01	1,29	0,38	1,57
λ	0,0007	0,0001	0,0005	0,0006	0,0004	0,0019
MBS (min)	1440	8254,43	2189	1700,75	2272,64	521,32
M (min)	525600	115562	105072	108848	113632	107392
AOR	1,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
AOD (Yes/No)	N	Y	Y	Y	Y	Y
T_s (min)	0	525530	515040	518816	523600	517360
T_a (min)	525600	70	10560	6784	2000	8240
CEDa (KWh)	0,072	0,055	7,935	4,858	0,633	0,933
Ps (Watts)	0	0	0	1,4	0	2,7
CPa (Watts)	3	657	2164	2750	950	1400
CLa (min)	1440	5	220	106	40	40
NCa	365	14	48	64	50	206
PD	**0,9**	**0,4**	**0,7**	**0,7**	**0,8**	**0,8**

c)

A	A	M	DVD	HC	TV	TVB
DPD_T (KWh/a)	17,9	47,3	3,60	201	89,3	22,4
UEC_T (KWh/a)	66,16	61,32	9,60	1376,26	122,49	30,69
UEC_s (kWh/a)	33,89	0	5,99	135,99	7,59	6,07
UEC_a (KWh/a)	32,27	61,32	3,60	1240,27	114,91	24,62
SC	0,04	0,00	0,07	0,09	0,06	0,06
AP (%)	3,29	100,00	2,29	18,29	13,38	13,38
λ	0,0013	0,0007	0,0015	0,0172	0,0074	0,0074
MBS (min)	756,48	1440	664,23	58,17	135,17	135,17
M (min)	98342	525600	103620	19487	45282	45282
AOR	0,2	1,0	0,2	0,2	0,2	0,2
AOD (Yes/No)	Y	N	Y	Y	Y	Y
T_s (min)	508310	0	513588	429455	455250	455250
T_a (min)	17290	525600	12012	96145	70350	70350
CEDa (KWh)	0,248	0,168	0,023	3,702	0,343	0,074
Ps (Watts)	4	0	0,7	19	1	0,8
CPa (Watts)	112	7	18	774	98	21
CLa (min)	133	1440	77	287	210	210
NCa	130	365	156	335	335	335
PD	**0,3**	**0,8**	**0,4**	**0,1**	**0,7**	**0,7**

d)

A	HD	HH	RE	TB
DPD_T (KWh/a)	405	71,2	18,8	0,63
UEC_T (KWh/a)	550,90	174,54	43,88	2,57
UEC_s (kWh/a)	257,78	0	43,38	0
UEC_a (KWh/a)	293,13	174,55	0,50	2,57
SC	0,17	0,07	0,32	0,02
AP (%)	1,91	2,15	0,96	14,64
λ	0,0032	0,0015	0,0030	0,0027
MBS (min)	315,17	681,77	330,17	371,85
M (min)	105582	104310	110607	38672
AOR	0,2	0,2	0,2	0,2
AOD (Yes/No)	Y	Y	Y	Y
T_s (min)	515550	514278	520575	448640
T_a (min)	10050	11322	5025	76960
CEDa (KWh)	0,875	1,141	0,002	0,025
Ps (Watts)	30	0	5	0
CPa (Watts)	1750	925	6	2
CLa (min)	30	74	15	740
NCa	335	153	335	104
PD	**0,7**	**0,4**	**0,4**	**0,2**

e)

A	PC	S	L	F	P	TE	MO	T
DPD_T (KWh/a)	73,8	2,74	54,7	16,4	29,5	52,6	5,66	3,12
UEC_T (KWh/a)	168,35	6,91	55,85	157,68	41,74	70,08	5,66	6.00
UEC_s (kWh/a)	24,35	0	15,33	0	41,03	0	4,20	2,36
UEC_a (KWh/a)	144	6,91	40,52	157,68	0,72	70,08	1,46	3,64
SC	0,05	0,05	0,06	0,00	0,51	0,00	0,09	0,03
AP (%)	13,15	13,15	12,50	100,00	0,36	100,00	4,17	10,39
λ	0,0062	0,0062	0,0073	0,0007	0,0018	0,0007	0,0040	0,0030
MBS (min)	161,5	161,5	136,8	1440	546,92	1440	256,8	335,34
M (min)	46512	46512	49932	525600	113760	525600	93732	61032
AOR	0,2	0,2	0,2	1,0	0,2	1,0	0,2	0,2
AOD (Yes/No)	Y	Y	Y	N	Y	N	Y	Y
T_s (min)	456480	456480	459900	0	523728	0	503700	471000
T_a (min)	69120	69120	65700	525600	1872	525600	21900	54600
CEDa (KWh)	0,500	0,024	0,111	0,432	0,003	0,192	0,004	0,02
Ps (Watts)	3,2	0	2	4	4,7	2,3	0,5	0,3
CPa (Watts)	125	6	37	18	23	8	4	4
CLa (min)	240	240	180	1440	9	1440	60	300
NCa	288	288	365	365	208	365	365	182
PD	**0,4**	**0,4**	**1,0**	**0,1**	**0,7**	**0,8**	**1,0**	**0,5**

Tableau VII-3 : Nombre moyen de minutes par an d'utilisation de chaque appareil électrique pour différentes compositions de ménages

Réf : Calculé en simulant les profils de charge

Abréviation des appareils	Jour d'utilisation	Durée maximale d'utilisation par an (par minutes) pour tous les types	Nombre moyen de minutes d'utilisation par an pour différentes combinaisons d'adultes dans les ménages (par activité) :							
			AM	**AF**	**IM**	**IF**	**AFM**	**IFM**	**IMAF**	**IFAM**
B	SAT	**330**	75	177	174	330	177	330	177	330
CM	WD/WE/PH	**3685**	838	1974	1943	3685	1974	3685	1974	3685
DF	SAT	**1320**	300	707	696	1320	707	1320	707	1320
DW	WD	**15600**	3546	8355	8224	15600	8355	15600	8355	15600
E	SAT	**275**	63	147	145	275	147	275	147	275
FM	PH C	**360**	82	193	190	360	193	360	193	360
W	WD/WE/PH	**2008**	456	1075	1058	2008	1075	2008	1075	2008
K	SAT C	**48**	11	26	25	48	26	48	26	48
H	WD/WE/PH	**13400**	3046	7177	7064	13400	7177	13400	7177	13400
MI	SAT	**480**	109	257	253	480	257	480	257	480
MW	WD/WE/PH	**5436**	1236	2911	2866	5436	2911	5436	2911	5436
MF	WE	**1365**	310	731	720	1365	731	1365	731	1365
O	PH	**150**	34	80	79	150	80	150	80	150
C	PH H	**120**	27	64	63	120	64	120	64	120
RM	PH C	**360**	82	193	190	360	193	360	193	360
RC	WD	**1560**	355	835	822	1560	835	1560	835	1560
SW	PH/SUN	**900**	205	482	474	900	482	900	482	900
TO	SAT	**480**	109	257	253	480	257	480	257	480
D	PH	**70**	26	7	70	7	26	70	70	26
I	WD/WE/PH	**10560**	2401	5656	5567	10560	5656	10560	5656	10560
TD	WE C	**6784**	1542	3633	3577	6784	3633	6784	3633	6784
V	SUN/PH	**2000**	455	1071	1054	2000	1071	2000	1071	2000
WM	WE/PH	**8240**	1873	4413	4344	8240	4413	8240	4413	8240
A	WE/PH	**17290**	15953	9037	17290	10143	15750	17290	16593	16447
DVD	WE	**12012**	6519	5504	12012	10792	6519	12012	12012	10792
HC	WD/WE	**96145**	52176	44056	96145	86384	52176	96145	96145	86384
TV	ALL	**70350**	38177	32236	70350	63208	38177	70350	70350	63208
TVB	ALL	**70350**	38177	32236	70350	63208	38177	70350	70350	63208
HD	WD/WE/PH	**10050**	7464	9416	9001	10050	8905	10050	9715	9239
HH	WD/WE/PH	**11322**	8409	10608	10140	11322	10032	11322	10945	10409
RE	WD/WE/PH	**5025**	3732	4708	4501	5025	4452	5025	4858	4620
TB	SUN	**76960**	57160	72103	68928	76960	68190	76960	74398	70752
PC	WD/SUN	**69120**	63775	36127	69120	40550	62963	69120	66332	65751
S	WD/SUN	**69120**	63775	36127	69120	40550	62963	69120	66332	65751
L	WD/WE/PH	**65700**	60619	34339	65700	38544	59848	65700	63050	62498
P	WD	**1872**	1727	978	1872	1098	1705	1872	1796	1781
TE	WD/WE/PH	**525600**	5402	7691	6043	6226	7332	6871	7691	6512
MO	WD/WE/PH	**21900**	7691	10950	8604	8864	10439	9782	10950	9271
T	ALL	**54600**	50378	28538	54600	32032	49736	54600	52398	51939

Tableau VII-4 : Nombre de ménages pour chaque type et catégorie dans le quartier Centre de Tours

Réf : Calculé dans ExcelSimulation				
Quartier	**AM**	**AF**	**IM**	**IF**
type1	118	90	30	34
type2	151	115	39	44
type3	37	28	10	11
type4	160	122	41	46
type5	205	157	52	59
type6	51	39	13	15
type7			205	222
type8			263	284
type9			65	70
	AFM	**IFM**	**IM-AF**	**IF-AM**
type10	122	13	10	30
type11	157	16	13	38
type12	39	4	3	9
type13	167	17	14	40
type14	213	22	17	52
type15	53	5	4	13
type16		72		
type17		92		
type18		23		
	AFM-1.8C	**IMF-1.8C**	**IM-AF-1.8C**	**IF-AM-1.8C**
type19	274	28	24	72
type20	351	36	31	92
type21	87	9	8	23
type22	373	39	33	98
type23	477	50	42	125
type24	118	12	10	31
type26		443		
	AM-1.6C	**AF-1.6C**	**IM-1.6C**	**IF-1.6C**
type28	12	68	3	20
type29	15	87	4	25
type31	16	92	5	27
type32	21	118	6	34
type33	5	29	1	8
type35			47	51
	2.2 AIFM			
type37	39			
type38	50			
type40	54			
type41	68			
type42	17			

Tableau VII-5 : Consommation électrique annuelle totale pour tous les ménages du quartier Centre de Tours

Réf : Calculé dans ExcelSimulation				
Quartier	**AM**	**AF**	**IM**	**IF**
type1	67005	52638	18599	19572
type2	142698	132661	50417	68003
type3	45073	41722	15789	21531
type4	87302	70017	24030	25835
type5	242759	224610	83321	113603
type6	91619	79717	34086	42958
type7			84384	87635
type8			152794	197950
type9			55068	69576
	AFM	**IFM**	**IM-AF**	**IF-AM**
type10	103577	12575	9331	27845
type11	193342	26566	16182	71211
type12	106645	15994	10328	36178
type13	86608	11485	8171	24863
type14	424027	62173	36131	140557
type15	86236	14290	8786	35304
type16		29525		
type17		128270		
type18		42387		
	AFM-1.8C	**IMF-1.8C**	**IM-AF-1.8C**	**IF-AM-1.8C**
type19	230491	28297	22568	67037
type20	436126	79909	38083	167955
type21	165244	21001	16051	46624
type22	303106	36828	29710	87685
type23	529818	80353	46737	269267
type24	215941	29955	21334	78203
type26		379741		
	AM-1.6C	**AF-1.6C**	**IM-1.6C**	**IF-1.6C**
type28	8596	51416	2873	16643
type29	14722	105106	5491	42012
type31	10920	66725	3699	21869
type32	22750	151459	8284	60287
type33	10714	70561	4386	30397
type35			43849	66101
	2.2 AIFM			
type37	35612			
type38	70946			
type40	69002			
type41	112121			
type42	40076			
Total				**8786236 KWh**

Tableau VII-6 : Simulation de la consommation annuelle d'électricité de la ville de Tours par quartier

Réf : Calculé dans ExcelSimulation	
Quartier	**Consommation électrique annuelle (GWh)**
Centre	8,575309193
Grammont 1-4	7,811309294
Cathédrale	2,418548538
Lamartine 1-2	3,531439956
Rabelais-Tonnellé 1-2	3,576800988
Giraudeau 1-2	2,723685247
Lakanal-Strasbourg 1-2	3,56593071
Febvotte-Marat 1-2	3,593456028
Rives du Cher 1-2	2,869119227
La Fuye Velpeau 1-4	6,385435423
Sanitas-Rotonde 1-5	5,912222763
Beaujardin 1-2	2,590263936
Rochepinard	1,194167593
Saint-Symphorien 1-5	8,47044477
Sainte-Radegonde 1-2	3,894944284
Paul Bert	1,778062455
Europe 1-6	6,405866034
Douets Milletiere 1-3	1,924441862
Montjoyeux	1,829010912
La Bergeonnerie	0,993703097
Les Fontaines 1-3	4,865201981
Deux Lions Gloriette	1,082792058
Total	**85,9922**

Tableau VII-7 : Consommation électrique annuelle totale pour tous les ménages du quartier Centre de Tours après application des stratégies de réduction de la charge

Réf : Calculé dans ExcelLoadManagement				
CENTRE	**AM**	**AF**	**IM**	**IF**
type1	63099	49589	17667	18403
type2	127010	123405	47519	65637
type3	41368	38791	14827	20567
type4	81219	65377	22960	24147
type5	214144	208196	78100	108467
type6	80075	71581	31722	40934
type7			80679	84653
type8			145285	190780
type9			53428	67891
	AFM	**IFM**	**IM-AF**	**IF-AM**
type10	93170	11841	8654	25691
type11	138781	18141	11974	48517
type12	98574	14097	9665	34275
type13	77444	11071	7755	23302
type14	405113	60222	35131	136955
type15	69232	10421	7240	27371
type16		29341		
type17		125940		
type18		41630		
	AFM-1.8C	**IMF-1.8C**	**IM-AF-1.8C**	**IF-AM-1.8C**
type19	206842	26227	20777	61908
type20	315161	62354	29955	132596
type21	130295	19528	15181	41918
type22	269811	34682	27409	81727
type23	350912	56834	34107	222321

type24	178623	26988	18989	63217
type26		368796		
	AM-1.6C	**AF-1.6C**	**IM-1.6C**	**IF-1.6C**
type28	7692	45522	2643	15488
type29	13462	96759	5125	40017
type31	10320	60355	3448	20560
type32	20959	140126	7932	57613
type33	9480	63794	4070	28626
type35			42503	64711
	2.2 AIFM			
type37	33818			
type38	66527			
type40	66134			
type41	106177			
type42	38633			
Total				**7728715 kWh**

Tableau VII-8 : Simulation de la consommation annuelle d'électricité de la ville de Tours par quartier après application des stratégies de réduction de la charge

Réf : Calculé dans ExcelLoadManagement

Quartier	**Consommation électrique annuelle (GWh)**
Centre	7,727769358
Grammont 1-4	7,015451932
Cathédrale	2,17515271
Lamartine 1-2	3,176888397
Rabelais-Tonnellé 1-2	3,20479164
Giraudeau 1-2	2,439925751
Lakanal-Strasbourg 1-2	3,199073673
Febvotte-Marat 1-2	3,206221971
Rives du Cher 1-2	2,55238025
La Fuye Velpeau 1-4	5,730116672
Sanitas-Rotonde 1-5	5,313504314
Beaujardin 1-2	2,314799165
Rochepinard	1,070128593
Saint-Symphorien 1-5	7,567987262
Sainte-Radegonde 1-2	3,474966423
Paul Bert	1,593277845
Europe 1-6	5,726439592
Douets Milletiere 1-3	1,713148107
Montjoyeux	1,647507645
La Bergeonnerie	0,89676148
Les Fontaines 1-3	4,356365986
Deux Lions Gloriette	0,975694684
Total	**77,0784**

Tableau VII-9 : Consommation annuelle et demande maximale après application des stratégies de réduction de la charge

Réf : Calculé dans ExcelLoadManagement

Type	Catégorie	Consommation annuelle par ménage (kWh)	Consommation annuelle par individu (kWh)	Demande maximale (W)
T 1	AM	535	535	1777
	AF	551	551	1777
	IM	586	586	1777
	IF	539	539	1777
T 2	AM	842	842	2356
	AF	1073	1073	2323
	IM	1233	1233	2441
	IF	1503	1503	2245
T 3	AM	1109	1109	2369
	AF	1363	1363	2352
	IM	1555	1555	3048
	IF	1904	1904	2390
T 4	AM	506	506	1777
	AF	534	534	1777
	IM	560	560	1777
	IF	520	520	1777
T 5	AM	1044	1044	2348
	AF	1330	1330	2365
	IM	1489	1489	2708
	IF	1826	1826	2321
T 6	AM	1578	1578	2385
	AF	1849	1849	2262
	IM	2446	2446	3262
	IF	2785	2785	3113
T 7	IM	393	393	148
	IF	381	381	148
T 8	IM	553	553	1427
	IF	671	671	1427
T 9	IM	823	823	1781
	IF	965	965	1781
T 10	AFM	761	380	1833
	IFM	931	466	1833
	IMAF	862	431	1839
	IFAM	865	432	1792
T 11	AFM	886	443	3070
	IFM	1116	558	2963
	IMAF	932	466	3057
	IFAM	1277	638	2919
T 12	AFM	2546	1273	3866
	IFM	3505	1753	3846
	IMAF	3042	1521	3698
	IFAM	3646	1823	3758
T 13	AFM	465	232	1765
	IFM	640	320	1761
	IMAF	568	284	1765
	IFAM	576	288	1752
T 14	AFM	1902	951	2945
	IFM	2723	1361	2831
	IMAF	2011	1005	2962
	IFAM	2649	1325	2909
T 15	AFM	1314	657	3737
	IFM	1905	952	4850
	IMAF	1675	838	3247
	IFAM	2141	1070	3775
T 16	IFM	407	204	189
T 17	IFM	1368	684	2824
T 18	IFM	1828	914	2824
T 19	AFM+1.8C	754	198	1792
	IFM+1.8C	920	242	1790
	IMAF+1.8C	855	225	1792
	IFAM+1.8C	863	227	1792
T 20	AFM+1.8C	898	236	2965
	IFM+1.8C	1711	450	2963

	IMAF+1.8C	964	254	2962
	IFAM+1.8C	1446	381	3821
T 21	AFM+1.8C	1501	395	3274
	IFM+1.8C	2167	570	3870
	IMAF+1.8C	1976	520	3866
	IFAM+1.8C	1848	486	3870
T 22	AFM+1.8C	723	190	1793
	IFM+1.8C	895	235	1794
	IMAF+1.8C	829	218	1792
	IFAM+1.8C	838	221	1793
T 23	AFM+1.8C	735	193	3183
	IFM+1.8C	1147	302	3080
	IMAF+1.8C	807	212	2899
	IFAM+1.8C	1783	469	3108
T 24	AFM+1.8C	1513	398	3152
	IFM+1.8C	2201	579	3845
	IMAF+1.8C	1817	478	3110
	IFAM+1.8C	2049	539	3862
T 26	IFM+1.8C	833	219	2237
T 28	AM+1.6C	649	250	1785
	AF+1.6C	673	259	1777
	IM+1.6C	790	304	1781
	IF+1.6C	791	304	1785
T 29	AM+1.6C	888	342	2360
	AF+1.6C	1119	430	2317
	IM+1.6C	1199	461	2319
	IF+1.6C	1598	615	2364
T 31	AM+1.6C	640	246	1786
	AF+1.6C	656	252	1777
	IM+1.6C	758	292	1779
	IF+1.6C	772	297	1786
T 32	AM+1.6C	1016	391	2449
	AF+1.6C	1191	458	2437
	IM+1.6C	1364	524	2327
	IF+1.6C	1691	651	2900
T 33	AM+1.6C	1858	715	3098
	AF+1.6C	2159	830	3349
	IM+1.6C	2829	1088	3270
	IF+1.6C	3398	1307	3984
T 35	IM+1.6C	911	350	2819
	IF+1.6C	1281	493	2787
T 37	2.2AIFM	859	391	1787
T 38	2.2AIFM	1322	601	2317
T 40	2.2AIFM	1235	562	1792
T 41	2.2AIFM	1551	705	2315
T 42	2.2AIFM	2282	1037	2941

Farinaz FALAKI

Optimisation de la consommation énergétique des ménages : application sur l'usage des appareils électriques pour le *smart grid*

Résumé

Le *smart grid* - l'union des technologies de l'information et de la communication et du système existant - qui est réputé avoir un impact important sur la rationnalisation des systèmes énergétiques, nécessite une analyse de la consommation/demande électrique pour déterminer les mesures d'efficacité d'énergie. Cette analyse semble compliquée spécifiquement pour les appareils électriques résidentiels car aucune méthode de calcul directe n'existe pour cet usage final. Cette recherche considère l'approche *bottom-up* du côté du fournisseur d'énergie et *top-down* du côté de la demande des consommateurs pour l'optimisation de la consommation et de la production d'électricité à l'échelle du quartier et de la ville dans le but de mettre en évidence les variables influençant la possession et l'utilisation de ces appareils. Ainsi, la thèse en proposant une procédure de gestion de la charge basée sur une analyse spatio-temporelle des appareils électriques résidentiels trouve une méthode pour estimer la demande et la consommation pour cet usage final et applique enfin les modèles développés sur une étude de cas Française dans différentes configurations urbaines.

Mots-clés **:** *smart grid, systèmes urbains, modélisation énergétique, approche descendante, approche ascendante, effacement énergétique, appareils électriques, électroménagers*

Résumé en anglais

Smart grid - the union of information and communication technologies and the existing system – which is deemed to have a huge impact on efficiency of energy systems, requires electricity consumption/demand analysis to determine energy efficiency measures. This analysis seems complicated specifically for residential electric appliances as no direct method of calculation exists for this end-use. This research considers top-down approach of energy supplier side and bottom-up approach of consumers demand side for electricity consumption and production optimisation in neighbourhood and city scale with the objective to highlight the variables influencing the ownership and utilisation of these appliances. Hence, the thesis by proposing a procedure of load management based on a spatio-temporal analysis of residential electric appliances finds a method to estimate this end-use demand and consumption and finally applies the developed models on a French case study in different urban configurations.

Keywords: *smart grid, urban systems, energy modeling, top-down approach, bottom-up approach, energy load management, electric appliances, home appliances*