



POLYTECH[®]
TOURS

Département Aménagement



Ecole d'ingénieurs
polytechnique
de l'université de Tours

CITERES
UMR 6173
Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés

Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement, Paysage,
Environnement

Projet de Fin d'Etudes

Le *Smart Grid* :

**Une réponse aux enjeux
environnementaux, énergétiques et
économiques liés à la
consommation d'électricité à
l'échelle urbaine ?**



2010-2011

Directeur de recherche
MAIZIA Mindjid

BOSCHET Florian
MAITRE Lucie
OUESLATI Sémia

Le *Smart Grid* :

**Une réponse aux enjeux environnementaux,
énergétiques et économiques liés à la
consommation d'électricité à l'échelle
urbaine ?**

2010-2011

**Directeur de recherche
MAIZIA Mindjid**

**BOSCHET Florian
MAITRE Lucie
OUESLATI Sémia**

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

Les auteurs de cette recherche ont signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche et projet de fin d'études en Génie de l'Aménagement

La formation au génie de l'aménagement, assurée par le département aménagement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme et de l'aménagement, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement de l'UMR 6173 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne les mémoires à partir de la mention bien.

Remerciements

Nous tenons particulièrement à remercier M. Mindjid MAIZIA, encadrant de cette recherche et professeur chercheur à l'école Polytech'Tours au département aménagement, pour son aide apportée tout au long de ce projet. Il a su nous encourager dans les moments les plus difficiles. Nous le remercions pour le temps qu'il nous a consacré et les connaissances qu'il nous a apportées.

Nous remercions également M. Gregory MAILLARD, coordinateur *CFBCT/ARDA mv*, pour les renseignements indispensables qu'il nous a fournis.

Nos chaleureux remerciements vont également à nos collègues de travail, ACCADEBLED Juliette, DELAVault Antoine et MAGRE Damien, pour leur soutien.

Un grand merci à GAYON Benjamin et SAUVANET Olivier pour la relecture de notre rapport.

Sommaire

Avertissement.....	9
Formation par la recherche et projet de fin d'études en Génie de l'Aménagement	11
Remerciements.....	13
Sommaire.....	15
Introduction.....	19
Partie 1. Introduction au <i>Smart Grid</i>	21
1 Le <i>Smart Grid</i> : une réponse aux enjeux environnementaux, énergétiques et économiques ?	21
2 Les objectifs du <i>Smart Grid</i>	22
3 Le <i>Smart Grid</i> et son développement dans le monde	23
4 Les objectifs de l'étude	28
Partie 2. Modélisation dynamique des consommations et des productions électriques d'une ville.....	29
1 Un modèle simulant l'implantation d'un <i>Smart Grid</i>	29
2 Schématisation du modèle	32
3 De l'usage à l'effacement	37
Partie 3. Analyse du territoire selon les données d'entrée du modèle.....	39
1 Les logements, des consommateurs d'énergie.....	39
2 L'étude des commerces et services, d'autres composant de la consommation d'une ville.....	42
3 La consommation totale à l'échelle urbaine, fortement marquée par les supermarchés	45
Partie 4. Simulation de la consommation des usages spécifiques au sein d'un IRIS	47
1 Introduction.....	47
2 Les modèles existants : deux grands groupes dépendant des données d'entrée	47
3 Les appareils électriques les plus énergivores d'un ménage.....	50
4 Le profil d'usage des équipements	52
5 Les courbes de charge.....	60
6 L'étude des équipements différables, effaçables et le stockage électrique	62
7 Conclusion	62

Partie 5. Détermination des usages effaçables des supermarchés et des boucheries d'une ville.....	65
1 La gestion de la demande des consommations du secteur tertiaire : un enjeu du <i>Smart Grid</i>	65
2 Recensement des équipements de chaque commerce ou service	66
3 Reconstitution des courbes de charges « réelles » des supermarchés et des boucheries.....	66
4 Conclusion	81
Partie 6. Simulation d'une production d'électricité à partir des énergies photovoltaïques et éoliennes à l'échelle de la ville de Tours, et conséquences en termes de charge sur le réseau	83
1 Introduction.....	83
2 Présentation des modèles	83
3 Une production insuffisante vis-à-vis des besoins d'une ville	86
4 Détermination de la puissance d'une centrale de production basée sur une énergie renouvelable en dehors de la ville de Tours.....	94
Conclusion	98
Partie 7. Les scénarios : évaluation des effets du <i>Smart Grid</i> (Tableau 10) ...	99
1 Détermination des scénarios selon le type de production renouvelable..	99
2 L'indicateur de dispersion, évaluateur des effets du <i>Smart Grid</i>	101
Conclusion	105
Bibliographie.....	107
Table des figures	109
Table des tableaux.....	113
Table de annexes	115
Table des matières.....	117
Annexes.....	121

Introduction

La consommation en électricité devient de plus en plus importante en raison de l'augmentation de la population et de la multiplication des équipements électriques. Actuellement, en France, 78% de l'électricité est produite par les centrales nucléaires, 11% par les énergies renouvelables (dont 10% d'hydraulique), et 10% par les installations thermiques (fioul, charbon, gaz). D'après le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, « le parc électrique français est dans son ensemble, grâce au nucléaire, l'un des moins émetteurs en Europe avec annuellement 0,4t.CO₂/habitant, contre 3,6t.CO₂/habitant pour l'Allemagne. » (MEDDTL, 2011). Néanmoins, afin de respecter les directives européennes de réduction des émissions, le parc thermique connaît une réduction de son activité avec la limitation voire la fermeture d'ici 2015 d'unités de production à charbon. Actuellement, l'électricité consommée en période de pic est produite par ces installations thermiques. Réduire la consommation de pointe revient à diminuer l'utilisation d'énergies fossiles plus émissives en gaz à effet de serre comme le charbon, le fioul et/ou le gaz. Le *Smart Grid* pourrait accompagner cette réduction en maîtrisant la demande. Pour cela, les usages de période de pointe sont reportés vers les périodes creuses. Cette maîtrise peut également se faire par une intégration plus efficace des énergies renouvelables, en rendant possible une consommation directe de la production locale. L'appel de puissance au réseau central en serait limité. Enfin, elle pourrait réduire la charge sur le réseau, ce qui éviterait des investissements supplémentaires. Dès lors, le *Smart Grid* permet-il véritablement de maîtriser la demande en énergie ? Pour ce faire, il est indispensable de comprendre, d'une part, ce qu'apporte cette technologie et, d'autre part, de mesurer ses effets aux échelles globale et locale sur le réseau.

Partie 1. Introduction au *Smart Grid*

1 Le *Smart Grid* : une réponse aux enjeux environnementaux, énergétiques et économiques ?

Jusqu'au XIX^{ème} siècle, l'électricité était une source d'énergie rare, l'offre créait alors la demande. Aujourd'hui, la multiplication des centrales de production inverse ce rapport. L'offre en électricité satisfait à tout moment la demande. Néanmoins, la production en électricité doit s'adapter à de nouveaux enjeux économiques, énergétiques et environnementaux.

Face à la multiplication des appareils électriques, la demande en électricité ne cesse d'augmenter. Un scénario tendanciel de la croissance de la demande prévoit une augmentation de 20 à 22% pour les trente prochaines années ((Laville, et al., 2009)). Afin de répondre à cette demande grandissante, EDF lance un investissement de 6000 MW sur la période 2006-2012 dont les deux tiers permettent de répondre aux périodes de pointe ((Laville, et al., 2009)). Une meilleure gestion de la demande pour limiter les pics de consommation pourrait réduire cet investissement. Ce dernier est réalisé sur des centrales nucléaires, l'enjeu n'est donc pas uniquement économique mais également environnemental.

Outre cette augmentation de la demande, le marché de l'électricité connaît depuis peu un grand changement. La loi du 10 février 2000 transcrit une directive européenne sur le marché intérieur de l'électricité. Elle impose une ouverture au droit à la concurrence du marché de l'électricité avant juin 2000. Il y a donc une multiplication des producteurs d'électricité sur le marché, auparavant détenue en majorité par le producteur historique, EDF. Néanmoins, cette libéralisation nécessite une nouvelle forme de gestion du réseau afin de connaître les sources de production de l'électricité. Un nouveau besoin émerge, celui de l'information.

Enfin, certains des moyens de production d'électricité actuels sont très émissifs en gaz à effet de serre. Ces derniers sont une des causes du changement climatique et doivent donc être minimisés afin de réduire les conséquences sur l'environnement et l'économie (7500 milliards de dollars liés à la raréfaction de l'énergie selon Sir Nicholas Stern). C'est pourquoi, le système électrique doit se moderniser afin de préparer sa transition vers moins d'émission carbonée et plus d'efficacité. Celle-ci peut se faire par une augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation, mais également par une meilleure intégration de ces énergies dans le réseau électrique. Une meilleure gestion de la demande en énergie pourrait également être un moyen de préparer cette transition. L'enjeu n'est plus d'adapter la production à la demande mais de créer une offre qui régit la demande en électricité.

Depuis peu, une nouvelle technologie de l'information et de la communication est expérimentée en France, le *Smart Grid*. Elle permettrait de maîtriser la demande en énergie et ainsi apporter une solution au besoin de modernisation du réseau électrique. Cette maîtrise de la demande permettrait de calquer la consommation d'énergie sur la production et ainsi éviter les pertes. En effet, aujourd'hui, pour répondre aux besoins énergétiques, la production est toujours surestimée. De plus, une limitation des périodes de pics est à envisager pour réduire les émissions en gaz à effet de serre. La gestion de la demande permettrait également de mieux intégrer la production en énergie renouvelable dans le réseau grâce à une meilleure connaissance de la consommation.

2 Les objectifs du *Smart Grid*

Le but est d'adapter la consommation électrique à la production peu émissive des énergies renouvelables et nucléaires. Pour limiter les émissions des gaz à effet de serre, il faudrait en priorité utiliser les sources renouvelables. Les consommations non couvertes par le renouvelable devraient alors correspondre à la production d'énergie nucléaire. En effet, cette technologie est moins émissive que les centrales thermiques (charbon, gaz, etc.). La limitation de l'utilisation de ces centrales passe par la diminution des pics de consommation. Effectivement, les pics de consommation électrique sont par définition des appels de puissance très brefs (quelques heures par jours) auxquels seules des technologies très réactives comme les centrales thermiques peuvent répondre. De plus, la réduction de ces pics permettrait un meilleur dimensionnement des réseaux électriques. Ces derniers sont en effet calibrés pour faire face aux pics de consommation.

D'autre part, un second objectif du *Smart Grid* est de mieux intégrer les énergies renouvelables afin de faire correspondre la demande à la production renouvelable. Celle-ci étant intermittente, elle rend le réseau électrique instable et son utilisation très complexe. Le *Smart Grid*, grâce à une connaissance plus fine des consommations et des productions, rendrait possible une consommation instantanée et locale des énergies renouvelables.

3 Le *Smart Grid* et son développement dans le monde

3.1 Les *Smart Grids*, une technologie innovante

Les *Smart Grids* sont des réseaux électriques complexes qui peuvent être considérés comme l'internet de l'énergie. Ils véhiculent des informations et rendent possible une communication bidirectionnelle. Ils pourraient participer à la diminution des émissions de CO₂ induites par la production d'électricité. Cette technologie serait donc fortement liée à l'utilisation d'énergies renouvelables, telles que les énergies photovoltaïque ou éolienne. Grâce à ces réseaux dits intelligents, l'énergie pourrait donc être produite en mixant différentes sources énergétiques, tout en faisant correspondre la production à la demande, quelles que soient les conditions météorologiques ((Miller, 2009) &(NC, 2009)). D'après R. Hedlik, ce réseau permettrait de consommer localement des énergies renouvelables au lieu de les transférer au réseau central, ce qui limiterait des pertes liées au transport (Hledik, 2009). Miller ajoute qu'outre la réduction des impacts environnementaux, l'utilisation de *Smart Grids* devrait apporter des gains économiques, notamment en diminuant la probabilité de blackouts (qui causent chaque année une perte évaluée à plus de 80 milliards de dollars aux Etats-Unis) (Miller, 2009). Selon R. Hedlik, cette technologie pourrait se déployer dans le résidentiel, le commerce et l'industrie (Hledik, 2009).

D'après une étude de R. Hledik, une réduction des pics de 11,5% induirait, pour le secteur de l'énergie électrique, une diminution des émissions annuelles de CO₂ de 5% d'ici 2030 (Hledik, 2009). L'un des moyens de limiter les pics de consommation consisterait à maîtriser la demande en énergie par une tarification dynamique. Cette dernière consisterait à faire varier le prix de l'électricité en temps réel, à la hausse en période de forte consommation et à la baisse en période de faible consommation, un tarif élevé incitant l'utilisateur à différer certains usages. D'autres types de tarification existent, en fonction de différentes échelles de temps (heures, jours, saison). Les utilisateurs, en modifiant leurs comportements, seraient donc une composante essentielle des *Smart Grids* (Miller, 2009).

Le *Smart Grid* se composerait de deux éléments essentiels : les compteurs « intelligents » qui mesureraient et collecteraient les informations relatives à la consommation des utilisateurs, et un réseau permettant une communication bidirectionnelle entre le fournisseur d'électricité et le consommateur. Les prestataires auraient pour leur part accès à l'information en temps réel de la consommation d'électricité de chaque client, qui aurait la possibilité de réduire ses factures électriques en évitant de consommer en période de pic. Cette nouvelle circulation d'informations entre le prestataire d'énergie et le consommateur impliquerait la mise en place d'un système de sécurité afin d'assurer la confidentialité. Le compteur électrique couplé à une dynamique des prix pourrait occasionner l'émergence de nouvelles technologies associées au *Smart Grid* (par exemple les systèmes automatisés pour le thermostat, etc.). Ce nouveau réseau permettrait de détecter et localiser les coupures de service et donc d'intervenir plus rapidement (Hledik, 2009).

Une autre utilisation possible du *Smart Grid* serait de gérer le stockage de l'énergie en le combinant à d'autres technologies comme les véhicules électriques qui seraient intégrés de manière plus efficace au réseau électrique. Ce nouveau mode de circulation permettrait de réduire de manière significative les émissions de CO₂ du secteur du transport ((NC, 2009) & (Hledik, 2009)).

3.2 Le lancement de la technologie aux Etats-Unis

Face à la libération du marché de l'énergie aux Etats-Unis et à la multiplication des fournisseurs, il est devenu nécessaire de créer un mode de gestion plus efficace de la demande pour les gestionnaires de réseau. Dans ce contexte, le pays lance de nouveaux projets tels que la modernisation des infrastructures de distribution de l'électricité, initiée par la loi sur l'indépendance et la sécurité énergétiques de 2007 (Energy Independence and Security Act of 2007). Sous la présidence de G.W.Bush, Al Gore a proposé un plan pour la modernisation du réseau afin de lutter contre le changement climatique. Il estime le coût des travaux à 400 milliards de dollars sur 10 ans. Les réseaux intelligents sont au cœur de cette transformation et du débat sur le changement climatique ((Hledik, 2009) & (Brown, et al., 2010)).

Dans ce but, l'Electric Power Research Institute (EPRI) prévoit que l'implémentation de cette technologie aux Etats-Unis aurait pour effet une diminution de 5 à 10% de la consommation énergétique, sans diminuer la sécurité énergétique. L'EPRI a estimé le coût de construction de ce réseau dit intelligent à 165 milliards de dollars sur les 20 prochaines années. Le président Obama souhaite également poursuivre l'investissement dans les énergies renouvelables et le développement des *Smart Grids*. Le Département de l'Energie a, en effet, prévu un budget de 57 millions de dollars pour 8 projets d'implémentation de ces nouveaux réseaux. Cette somme s'ajoute aux 17 millions de dollars alloués en 2008 (NC, 2009).

Avant la mise en œuvre de tels investissements, des simulations à petite échelle ont été réalisées afin d'évaluer la pertinence de l'implantation des *Smart Grids*. C'est ainsi que R. Hledik a publié une étude comparative, basée sur deux scénarios : l'un conservateur (technologie actuelle développée autour du *Smart Grid*) et l'autre étendu (technologie future qui sera développée avec celui-ci). Elle a démontré qu'une meilleure intégration des énergies renouvelables permettrait un gain écologique plus important. En effet, la réduction des émissions de CO₂ sans une meilleure prise en compte des énergies renouvelables serait de 5% par an à l'horizon 2030, contre 16% dans le cas contraire. Cette étude a également démontré une réduction des pics de 11,5% en les dirigeant vers les périodes creuses et une économie d'énergie de 4% liée à l'automatisation des équipements et à l'affichage d'informations (Hledik, 2009).

D.P. Chassin montre les avantages pour l'utilisateur par une expérience menée dans la péninsule olympique dans l'état de Washington. L'une des conclusions est qu'un moyen pour réduire sa facture d'électricité n'est pas de consommer moins, mais de consommer en évitant les périodes de forte demande en énergie. La satisfaction des consommateurs a été évaluée par l'économie réalisée sur leur facture d'électricité (réduction de 10%). L'utilisation du *Smart Grid* a également satisfait les utilisateurs par sa simplicité, son automatisation, et le fait que le contrôle des appareils reste possible (Chassin, 2010).

Ces études montrent que des effets bénéfiques seraient à attendre sur l'environnement, mais également pour l'opérateur et le consommateur. En parallèle, le taux de pénétration des compteurs intelligents aux Etats-Unis progresse : 4,7% en 2009 contre moins de 1% en 2006 (rapport de la Commission Fédérale de la Régulation de l'Energie). Néanmoins, des doutes persistent sur la généralisation du système et sur le taux de participation optimum des consommateurs à chaque plan de tarification (tarification en temps réel, tarification fixe, etc.) (Miller, 2009).

3.3 Le bilan en Europe

Les technologies se développent également en Europe à partir d'initiatives nationales et européennes. C'est ainsi qu'a été créée la plate-forme *SmartGrid Forum* qui coordonne les fonds des Programmes Cadres de Recherche et de Développement. La Commission européenne soutient financièrement les projets. Plus de 60 projets y sont associés, pour un investissement de plus de 190 millions d'euros. Pour accompagner cette aide financière, la Commission européenne a également créé la *Smart Grid Taskforce* qui met en relation tous les acteurs impliqués dans la recherche.

Au cœur de ces recherches se trouvent essentiellement celles portant sur l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux.

L'initiative la plus courante aujourd'hui consiste au remplacement des anciens compteurs électriques par de nouveaux compteurs. Cette action est la première étape dans la mise en place des réseaux intelligents en Europe. Les compteurs sont, soit généralisés sur tout le territoire national, comme en Grande-Bretagne, en Italie ou en Suède, soit installés uniquement dans une ville ou une région, c'est le cas en Espagne à Ibredola, en République Tchèque à Vrchlabi et en France à Lyon et en Indre-et-Loire (cf. § 3.4 Le développement en France).

En 2006, l'Allemagne a décidé d'investir 15 milliards d'euros dans la recherche et le développement en matière de *Smart Grid*. Ce pays est très actif dans le développement des technologies des réseaux électriques intelligents, ce qui se traduit par de nombreuses expériences régionales dont les buts sont de tester différents aspects de cette technologie. Des projets recherchent la stabilité du réseau malgré l'intégration de sources intermittentes de production. D'autres recherches portent plus spécifiquement sur la possibilité de réduction, voire d'élimination, des gaz à effet de serre dus à la consommation électrique, ou encore sur la création d'un réseau intelligent connectant les réseaux d'électricité, de gaz, d'eau et de chauffage urbain. De plus, ces études sont associées à la volonté de mettre en place de façon obligatoire des compteurs communicants combinés à des mesures tarifaires incitatives.

Aujourd'hui, au Portugal, l'énergie est gérée par un vaste réseau intelligent pour exploiter les conditions climatiques très favorables à la production d'énergie renouvelable (vents réguliers et fort ensoleillement). Certains jours, 90% de l'électricité est fournie par cette source d'énergie (CRE, NC).

L'intérêt porté par les pays est également lié au désir d'augmenter la part de la voiture électrique dans leur parc de véhicules. En effet, l'intégration d'une telle technologie ne saurait être efficace sans une gestion précise du réseau électrique. La Suède et le Danemark mènent tous deux un projet dont le but est de créer un réseau qui permettra de lier l'utilisation des véhicules électriques à la production d'énergie renouvelable (CRE, NC).

3.4 Le développement en France

En France, la demande en électricité devient de plus en plus importante. Cette croissance de la demande est spectaculaire au regard de la hausse en Europe qui n'est que de 1,5% depuis 2004. Face à cette augmentation, EDF programme un investissement matériel (10 cycles combinés au gaz et 5 turbines à combustion) dont les deux tiers sont pour les périodes de pointes. Une telle part des consommations sous la forme d'électricité incite les gestionnaires de réseaux à moderniser leurs systèmes de gestion de la demande. C'est pourquoi la France déploie, à l'horizon 2017, le compteur « intelligent » accompagné d'une tarification dynamique. Celui-ci devrait apporter des avantages au consommateur : meilleure information de sa consommation réelle, offres tarifaires et automatisation possible du système. Il permettrait également aux fournisseurs de facturer leurs clients en fonction des périodes de consommation. Ce système permettrait aux gestionnaires du système électrique de solliciter la participation des consommateurs à l'équilibrage des flux.

Des conditions préalables au succès du *Smart Grid* sont tirées des observations des Etats-Unis : un engagement clair et tangible, la mise en place d'un mécanisme d'apprentissage de la variabilité des prix et des conditions de variabilité, la possibilité pour le client d'anticiper sa demande (report des usages) et de gérer sa consommation sans culpabiliser. Toutes les expérimentations menées aux Etats-Unis démontrent que l'information au client est nécessaire. C'est ainsi qu'en France se développent de nouvelles technologies autour de l'information (Linky, BluePod) (Laville, et al., 2009).

Le projet PREMIO, qui a débuté en mars 2008 sur la commune de Lambesc, lance l'expérimentation française. Son but est de fournir aux opérateurs du système électrique les informations nécessaires à l'effacement des pics de consommation. Ces dernières se basent sur des connaissances précises de la structure énergétique du territoire en question. Ce projet devrait permettre de promouvoir les énergies renouvelables, d'optimiser la production locale des ressources en énergies et leur stockage, et de piloter dynamiquement l'offre et la demande en électricité. PREMIO prendra fin en 2011.

Actuellement, l'expérimentation Linky lancée par ERDF à Lyon (200 000 clients) et en Indre-et-Loire (100 000 clients) évalue la possibilité d'implanter le compteur intelligent à grande échelle. L'expérimentation a débuté en mars 2010 et se clôturera en mars 2011. Le but de cette expérience est de pouvoir envisager à l'horizon 2016, le remplacement de 35 millions de compteurs (CRE, NC).

Face à la libéralisation du marché français de l'énergie, les fournisseurs d'énergie se multiplient. Cette libéralisation pose la question de la répartition des bénéfices entre les différents acteurs du *Smart Grid* (fournisseurs, distributeurs, consommateurs et producteurs). Par exemple, l'effacement de certains postes de consommation par Voltalis¹ chez des clients d'EDF a occasionné la réclamation par EDF d'un dédommagement pour le manque à gagner (EDF veut faire payer les économies d'énergie réalisées par ses clients, 2009).

3.5 Retour sur la technologie *Smart Grid*

Malgré les avantages que pourrait apporter le *Smart Grid*, cette technologie n'en reste pas moins controversée. La tarification dynamique va-t-elle réellement donner un avantage aux consommateurs ou lui ajouter de nouvelles contraintes ? Le système étant basé sur la bonne volonté du consommateur à effacer ses usages, il ne pourra être efficace qu'en lui apportant de réels gains économiques. Sans ces gains, le consommateur ne ferait que subir les demandes de son fournisseur. Bien que l'utilisateur puisse être sensible à son environnement, sera-t-il prêt à modifier son mode de vie ? De plus, le jeu du marché de l'électricité peut avoir des effets pervers. Les fournisseurs ne seraient-ils pas tentés de moduler leurs tarifs en fonction des prix du marché, et non pas en fonction des gains environnementaux ? Par exemple, à un instant donné, la France pourrait vendre son électricité en Italie, qui serait alors en pénurie énergétique, à un meilleur prix que sur son propre territoire. Pour ce faire, elle demanderait aux consommateurs français d'effacer leurs usages.

La technologie *Smart Grid* s'associe à la mise en place de compteurs communicants chez les particuliers. Mais qui va les financer ? En effet, ces nouveaux équipements pourraient être financés par le gestionnaire de réseau, car ils l'aideraient à équilibrer à chaque instant la charge sur le réseau. Ils pourraient également être financés par les fournisseurs ou encore par les consommateurs. Actuellement, EDF envisage de répercuter le coût du compteur sur la facture du consommateur à hauteur d'un euro par mois pendant vingt ans (Sénat, 2010). De plus, doit-on laisser les fournisseurs installer leurs propres compteurs, comme par exemple le fournisseur Enel en Italie qui a installé les siens sans compatibilité avec ceux d'un autre fournisseur (CRE, NC) ? Dans ce cas, le consommateur doit changer de compteur s'il veut changer de fournisseur. Une autre solution est envisagée en Grande-Bretagne : l'implantation de compteurs compatibles entre eux, ce qui permettrait de changer de fournisseur sans changer de compteur (CRE, NC).

¹ Prestataire de service spécialisé dans l'ajustement de la demande énergétique en temps réel.

4 Les objectifs de l'étude

Cette nouvelle technologie est-elle applicable au territoire français ? En effet, chaque pays a des moyens de production différents. Le réseau intelligent permettra-t-il de répondre aux nouvelles exigences environnementales ? Face aux nombreux projets qui se développent et au fort investissement qu'ils occasionnent, les avantages du *Smart Grid* se vérifient-ils ?

Afin d'apporter des réponses à ces interrogations, le premier objectif est de créer un modèle qui rende compte des effets de cette technologie. Pour cela, les consommations d'électricité d'une ville doivent être reproduites. Un second objectif est d'évaluer les effets du réseau intelligent à travers sa capacité à effacer les pics de consommation et à intégrer les énergies renouvelables. Pour ceci, une courbe de charge de référence des consommations est déterminée vis-à-vis des enjeux environnementaux, économiques et énergétiques à atteindre. L'efficacité du *Smart Grid* sera évaluée par son aptitude à rapprocher la courbe de consommation de référence.

Partie 2. Modélisation dynamique des consommations et des productions électriques d'une ville

1 Un modèle simulant l'implantation d'un *Smart Grid* ...

1.1 ...intégrant la production renouvelable locale

Le modèle théorique développé dans cette recherche simule les consommations et les productions électriques d'une ville. Il est ici appliqué à Tours. Il permet d'étudier la demande en énergie à trois échelles différentes. On analyse dans un premier temps celle d'un site de consommation. Chaque site possède un compteur électrique, c'est-à-dire qu'il correspond à un logement ou à un établissement du secteur tertiaire. La consommation d'un îlot est étudiée dans un deuxième temps. Un îlot est un ensemble de sites de consommation. Ces îlots sont délimités par les IRIS². Enfin, la demande de la ville est estimée. Plusieurs îlots composent une ville. Ce modèle permet en outre d'étudier les potentialités en productions photovoltaïques et éoliennes de chaque îlot ou de la ville. L'utilisation de production renouvelable est alors liée à la mise en place d'un *Smart Grid*. On en considère ici trois types qui représentent différentes façons d'intégrer les énergies renouvelables au réseau (Figure 1) :

- **Type 1** : La production d'une entité (îlot ou ville) est intégralement transmise au réseau central (ERDF). Ce dernier répondra entièrement aux besoins énergétiques des entités. La production en énergie renouvelable produite sur l'entité n'est pas consommée localement.
- **Type 2** : La production d'une entité est consommée au sein de celle-ci et l'excédent est transmis au réseau central (les autres entités de la même échelle ne peuvent pas directement consommer l'excédent). Si la production ne satisfait pas la consommation alors l'appoint d'énergie nécessaire sera fourni par le réseau central.
- **Type 3** : La production d'une entité est consommée au sein de celle-ci et l'excédent est transmis au réseau de distribution local (une autre entité de la même échelle pourra consommer cet excédent). Après mutualisation de la production, si elle ne répond pas entièrement à la demande de toutes les entités, alors le réseau central fournira l'appoint nécessaire.

² IRIS : entité de découpage statistique de l'INSEE.

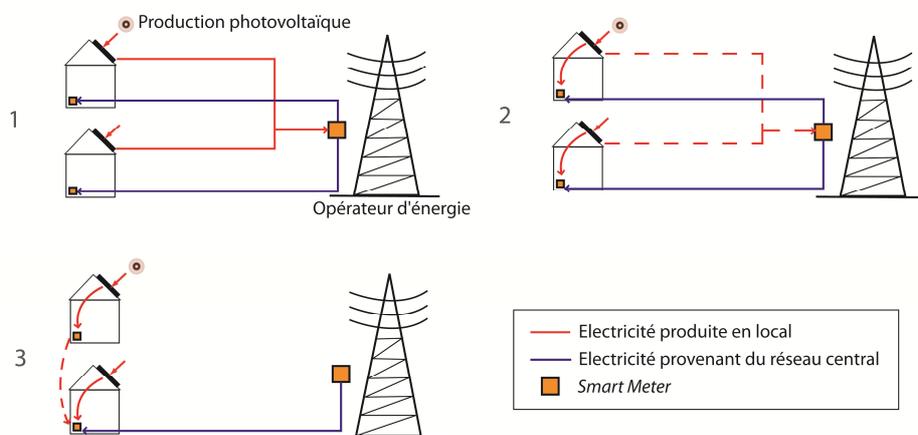


Figure 1 : Schématisation des trois types de *Smart Grid*

1.2 ...limitant les émissions de gaz à effet de serre

Un autre enjeu lié à cette technologie est la réduction des émissions de gaz à effet de serre dues à la consommation d'électricité. Or la production électrique est la plus émissive lors des périodes de pic, car les centrales thermiques sont mobilisées pendant ces instants critiques. Ainsi, outre l'intégration des énergies renouvelables au réseau, le *Smart Grid* efface des usages (cf. § Partie 2.3) pour supprimer ces pics en les déplaçant vers les creux de consommation (les usages qui peuvent être différés sont des leviers). Dans le modèle, ceci revient à faire correspondre la demande à une demande dite de référence. Celle-ci ne présente pas de pics. Elle limite donc l'utilisation des centrales émissives. La courbe de référence ainsi obtenue est comparée à la courbe de charge³ « réelle » de la demande. Ces deux courbes représentent des appoints de consommation, c'est-à-dire des puissances appelées au réseau central. Ce dernier doit alors produire l'énergie de la façon la moins émissive possible à savoir en utilisant uniquement les centrales nucléaires et les énergies renouvelables. Les productions photovoltaïque et éolienne sont incluses dans le modèle et sont utilisées en priorité avant tout autre moyen de production quelque soit le type de *Smart Grid*. Dès lors, lorsqu'une partie, ou l'intégralité, de ce type de production est renvoyée au réseau central, l'appoint de consommation est pallié par celle-ci, puis par la production nucléaire. La courbe de référence ne comprend donc pas les productions photovoltaïque ou éolienne et correspond alors à la courbe de production d'une centrale nucléaire (Figure 2).

³ Une courbe de charge représente l'évolution de la puissance appelée par un équipement au cours du temps. Elle peut également être établie pour un site de consommation dans son ensemble, pour un îlot, ou encore pour une ville, etc.

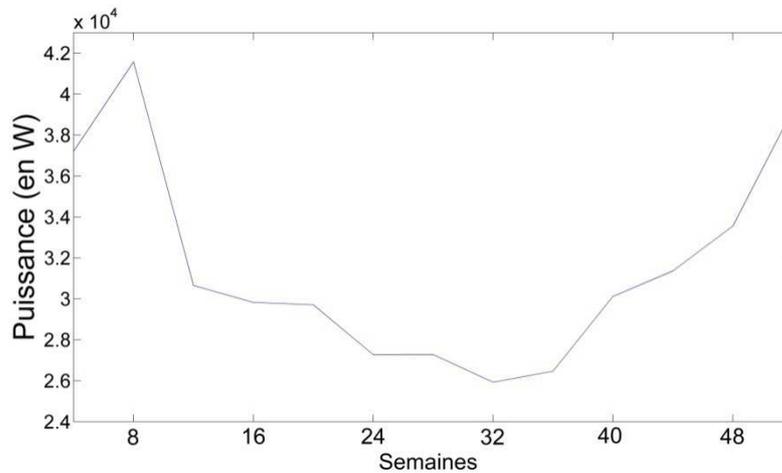


Figure 2 : Courbe de charge de la production électrique nucléaire en France en 2010
(Source : RTE)

La production nucléaire est plus importante en début et en fin d'année, c'est-à-dire pendant l'hiver. Ceci permet de répondre à un besoin énergétique plus important lié au chauffage. On parle alors d'effet saisonnier. Le modèle développé dans cette étude ne prend pas en compte le chauffage, les consommations des différentes entités ne présentent donc pas de variation dues aux saisons. Ainsi, la courbe de référence est une courbe de production du nucléaire sans effet saisonnier, soit une droite.

1.3 ...Conceptualisant une dynamique de la demande

La courbe de charge « réelle » de l'appoint de consommation (de la ville ou d'un îlot) est établie, dans un premier temps, pour un état initial, c'est-à-dire avant effacement des usages par le *Smart Grid* (cf. § Partie 2.3 De l'usage à l'effacement). Il ne s'agit pas de la courbe de charge des puissances réellement appelées par la ville de Tours. Elle est reconstruite par le modèle en fonction des consommations et des productions simulées (

Figure 3). Elle dépend donc des données d'entrée et des hypothèses de ce dernier (cf. Partie 40Partie 1). Cette courbe « réelle » est comparée à la courbe de charge de référence (respectivement, de la ville ou d'un îlot). Si elles ne sont pas semblables, alors les usages « différables » sont décalés dans le temps. Une nouvelle courbe de charge « réelle » est alors obtenue. Elle est confrontée à la courbe de charge de référence et, si elles ne sont pas similaires, le déplacement des usages est réitéré. Et ainsi de suite jusqu'à l'obtention d'une courbe de charge « réelle » la plus proche possible de la courbe de référence. La comparaison entre la « réalité » et la référence peut se faire au niveau de l'IRIS ou à l'échelle de la ville.

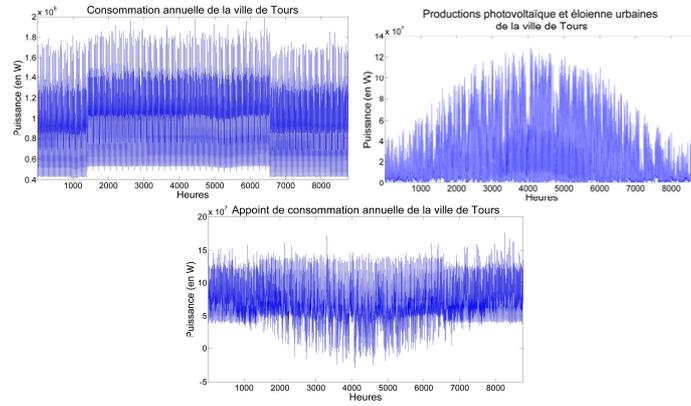


Figure 3 : Exemples de courbes de charge reconstruites grâce au modèle

L'évaluation de la ressemblance entre les deux courbes est estimée par l'indicateur de dispersion D :

$$D = \text{Var}^4(R - \text{Ref}),$$

avec R la courbe de charge réelle et Ref la courbe de référence.
 Ref est une constante donc :

$$D = \text{Var}(R)$$

2 Schématisation du modèle

2.1 Modélisation à l'échelle d'une ville

Le modèle présenté ci-dessus est schématisé par la Figure 4. Chaque cadre gris du schéma correspond à une échelle de consommation. Le premier représente celle d'un site de consommation i . L'échelle supérieure est celle de l'îlot j composé de plusieurs logements et établissements de commerce ou service i , avec :

$$i \in \mathbb{N} \text{ et } 1 \leq i \leq \text{Card}(I^{Lgt/CS}) \text{ et } I^{Lgt/CS} = \{\text{Logements; Commerces et services}\}$$

Eq. 1

La ville k correspond à un ensemble d'îlots j , avec :

$$j \in \mathbb{N} \text{ et } 1 \leq j \leq \text{Card}(I^{Ilot}) \text{ et } I^{Ilot} = \{\text{Ilots}\}$$

Eq. 2

L'îlot est également un lieu de production.

⁴ La variance (Var) caractérise la dispersion d'un échantillon ou d'une distribution. Plus elle est proche de zéro, moins l'échantillon est dispersé.

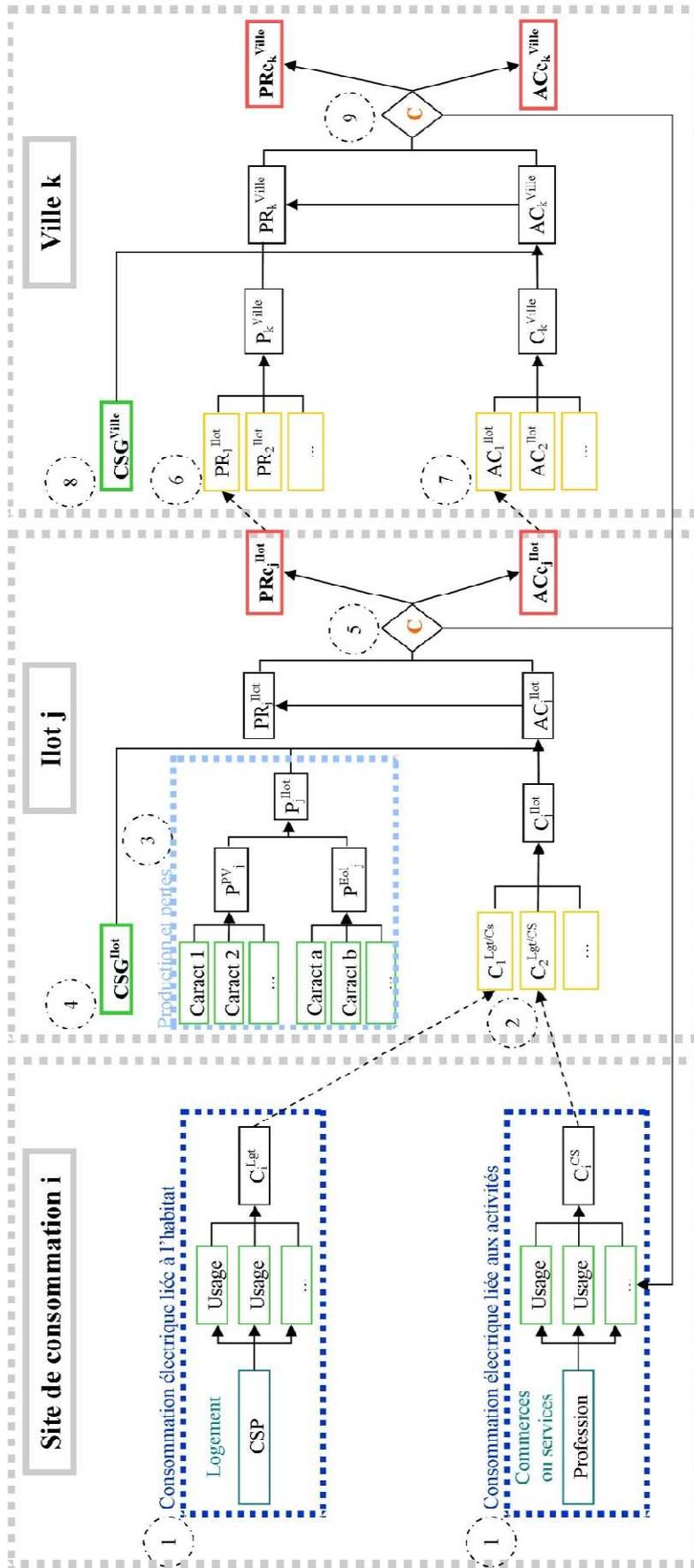


Figure 4 : Modèle de mise en place d'un Smart Grid

CSG^{ilot} : Configuration du Smart Grid à l'échelle de l'ilot

P^{PV} : Production électrique photovoltaïque de l'ilot j

P^{Eol} : Production électrique éolienne de l'ilot j

P^{ilot} : Production électrique de l'ilot j retransmise au réseau de distribution

C_j^{ilot} : Consommation électrique de l'ilot j

PR_j^{ilot} : Production électrique de l'ilot j retransmise au réseau de distribution

AC_j^{ilot} : Appoint de consommation électrique de l'ilot j

PR_c^{ilot} : Production électrique corrigée de l'ilot j retransmise au réseau de distribution

AC_c^{ilot} : Appoint de consommation électrique totale corrigée de l'ilot j

CSG^{ville} : Configuration du Smart Grid à l'échelle de la ville

P_k^{ville} : Production électrique de la ville k

C_k^{ville} : Consommation électrique de la ville k

PR_k^{ville} : Production électrique de la ville k retransmise au réseau central

AC_k^{ville} : Appoint de consommation électrique de la ville k

PR_c^{ville} : Production électrique corrigée de la ville k retransmise au réseau central

AC_c^{ville} : Appoint de consommation électrique corrigée de la ville k

Echelle du site de consommation :

1 – La consommation électrique du site de consommation i résulte du cumul de ses N usages, soit :

$$C_i^{Lgt/CS} = \sum_{n=1}^N C_n^{Usage}$$

Eq. 3

Ce site de consommation peut être un logement ou un établissement de commerce ou service.

Echelle de l'îlot :

2 – La consommation électrique de l'îlot j est constituée de la somme de ses I logements et établissements tertiaires, soit :

$$C_j^{lot} = \sum_{i=1}^I C_i^{Lgt/CS}$$

Eq. 4

3 – La production électrique inclue la technologie photovoltaïque et éolienne pour un îlot j donné. La somme des deux représente la production totale de l'îlot :

$$P_j^{lot} = P_j^{PV} + P_j^{Eol}$$

Eq. 5

4 – La configuration du *Smart Grid* permet de déterminer l'appoint de consommation nécessaire à l'îlot j en fonction de sa consommation et de sa production, soit :

- avec le *Smart Grid* de type 1 :

$$AC_j^{lot} = C_j^{lot}$$

Eq. 6

- avec le *Smart Grid* de types 2 ou 3 :

$$AC_j^{lot} = C_j^{lot} - P_j^{lot}$$

Eq. 7

De cet appoint découle la production redistribuée au réseau (c'est-à-dire la production qui n'est pas consommée localement), soit :

$$PR_j^{lot} = P_j^{lot} - C_j^{lot} + AC_j^{lot}$$

Eq. 8

5 – Le *Smart Grid* compare la courbe de charge « réelle » à la courbe de référence, en calculant l'indicateur de dispersion. Si celui-ci est différent de zéro, il applique une correction en différant certains usages (cf. § Partie 2.3). On obtient alors l'appoint de consommation corrigé de l'îlot j et la production redistribuée au réseau corrigé, soit :

$$AC_j^{Ilot} \xrightarrow{\text{Correction}} AC_j^{Ilot}$$

Eq. 9

$$P_j^{Ilot} \xrightarrow{\text{Correction}} PC_j^{Ilot}$$

Eq. 10

Echelle de la ville :

6 – La production électrique de la ville k correspond à la somme des productions corrigées redistribuées au réseau des J îlots constituant cette ville, soit :

$$P_k^{ville} = \sum_{j=1}^J PC_j^{Ilot}$$

Eq. 11

7 – La consommation électrique totale de la ville k découle du cumul des appoints de consommation corrigés de ses J îlots, soit :

$$C_k^{ville} = \sum_{j=1}^J AC_j^{Ilot}$$

Eq. 12

8 – La production et la consommation de la ville définissent son appoint de consommation en fonction du type de *Smart Grid*, soit :

- avec le type 1 ou 2 :

$$AC_k^{ville} = C_k^{ville}$$

Eq. 13

- avec le type 3 :

$$AC_k^{ville} = C_k^{ville} - P_k^{ville}$$

Eq. 14

La production redistribuée au réseau (c'est-à-dire la production qui n'est pas consommée localement) est déduite de cet appoint :

$$PR_k^{ville} = P_k^{ville} - C_k^{ville} + AC_k^{ville}$$

Eq. 15

9 – Si l'indicateur de dispersion n'est pas nul, alors l'appoint de consommation corrigé de la ville k et la production corrigée redistribuée au réseau sont obtenus après effacement par le *Smart Grid* de certains usages, soit :

$$AC_j^{ville} \xrightarrow{Correction} ACC_j^{ville}$$

Eq. 16

$$P_j^{ville} \xrightarrow{Correction} PC_j^{ville}$$

Eq. 17

2.2 Modélisation à d'autres échelles

Le modèle développé dans cette recherche peut être simplifié et être appliqué à d'autres échelles de consommation. En effet, pour chaque échelle considérée le mécanisme est toujours le même (Figure 5). L'entité i de l'échelle ε possède une consommation et une production renouvelable et telles que :

$$C_i^\varepsilon = \sum_k C_k^{\varepsilon-1}$$

Eq. 18

$$P_i^\varepsilon = \sum_k P_k^{\varepsilon-1}$$

Eq. 19

Du type de *Smart Grid* appliqué à cette échelle est déduit l'appoint de consommation nécessaire à l'entité i . Il fournira l'indicateur de dispersion. Si ce dernier est différent de zéro, un effacement est réalisé sur les usages « différables » (Leviers). L'appoint de consommation corrigé et la production corrigée redistribuée au réseau sont alors obtenus :

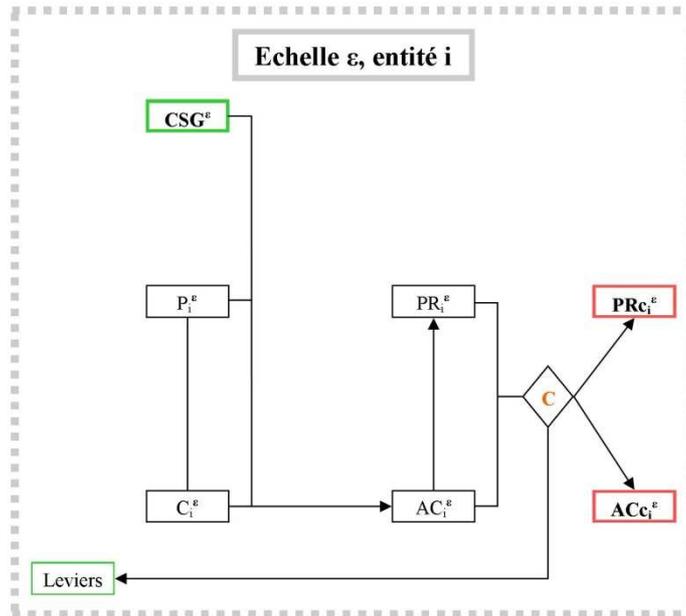
$$AC_i^\varepsilon \xrightarrow{Correction} ACC_i^\varepsilon$$

Eq. 20

$$P_i^\varepsilon \xrightarrow{Correction} PC_i^\varepsilon$$

Eq. 21

Ce modèle peut donc être appliqué à d'autres échelles : agglomération, territoire de SCoT, département, etc. Chaque nouvelle échelle considérée est la somme des entités composant l'échelle qui lui est inférieure.



Echelle ε = Site de consommation

$$P_i^\varepsilon = 0 \Rightarrow PR_i^\varepsilon = 0$$

$$C_i^\varepsilon = C_i^{Lgt} \text{ ou } C_i^{CS} \Rightarrow AC_i^\varepsilon = C_i^{Lgt/CS}$$

$$c = \emptyset \Rightarrow PRc_i^\varepsilon = 0 \text{ et } ACc_i^\varepsilon = C_i^\varepsilon$$

Echelle ε = Ilot

$$P_i^\varepsilon = P_i^{PV} + P_i^{Eol}$$

$$C_i^\varepsilon = \sum_j Cc_j^{Lgt/CS}$$

$$\text{Si } c = \emptyset \Rightarrow PRc_i^\varepsilon = PR_i^\varepsilon \text{ et } ACc_i^\varepsilon = AC_i^\varepsilon$$

Echelle ε = Ville ou échelle supérieure

$$P_i^\varepsilon = \sum_j Prc_j^{\varepsilon-1}$$

$$C_i^\varepsilon = \sum_j ACc_j^{\varepsilon-1}$$

$$\text{Si } c = \emptyset \Rightarrow PRc_i^\varepsilon = PR_i^\varepsilon \text{ et } ACc_i^\varepsilon = AC_i^\varepsilon$$

Figure 5 : Schéma simplifié du modèle

3 De l'usage à l'effacement

On considère ici qu'un usage correspond à un équipement électrique. Cet usage prend en compte les caractéristiques physiques de l'appareil (puissance et fonctionnement) mais aussi les habitudes de son utilisateur (horaires d'utilisation).

D'après A. Bonduelle et ses collaborateurs, dans le rapport du *Projet PROBAT 4*, il existe plusieurs stratégies de modulation des usages : les usages « différables », les usages « remis en cause », les usages « dégradables » et le stockage d'électricité. La classification des usages selon ces quatre stratégies dépend essentiellement du confort de l'utilisateur. Selon l'usage considéré, celui-ci est plus ou moins modulable suivant la perte ou non de confort lors du changement des horaires d'utilisation.

On ne cherche ici que les usages « différables ». Ils « correspondent aux usages dont la consommation peut être différée dans le temps sans nuire trop fortement au confort des utilisateurs : l'usage final est donc peu ou pas dégradé. On retrouve donc dans cette catégorie les usages correspondant à des besoins non immédiats ». De ce fait, effacer un usage consiste à différer dans le temps l'usage, c'est-à-dire à modifier les horaires d'utilisation de l'équipement.

Remarque : « Les usages remis en cause sont caractérisés par le fait qu'ils ne sont pas indispensables au moment où l'on cherche à soulager le réseau. [...] Une façon de moduler leur consommation consiste [...] à les supprimer à distance. Cependant, de manière à éviter toute dégradation des usages, l'utilisateur doit pouvoir [...] disposer à nouveau de ces usages. »

« Les usages dégradables correspondent à des usages dont la consommation est répartie dans le temps, ce qui ne permet pas [...] le report de leur consommation. La [...] stratégie de modulation consiste donc à agir sur le niveau de consommation en réduisant la quantité de l'usage consommé. » (Bonduelle, et al.).

Partie 3. Analyse du territoire selon les données d'entrée du modèle

1 Les logements, des consommateurs d'énergie

1.1 Tours, une commune aisée induisant un taux d'équipement élevé

D'après l'INSEE (2006), le taux d'équipement des ménages dépend de leur revenu. Cette tendance est particulièrement vraie pour le sèche-linge, le lave-vaisselle et l'ordinateur (Figure 7). Deux de ces équipements sont parmi les plus énergivores (cf. Partie 1). Le calcul des consommations devrait donc montrer une valeur plus importante pour les ménages à haut revenu.

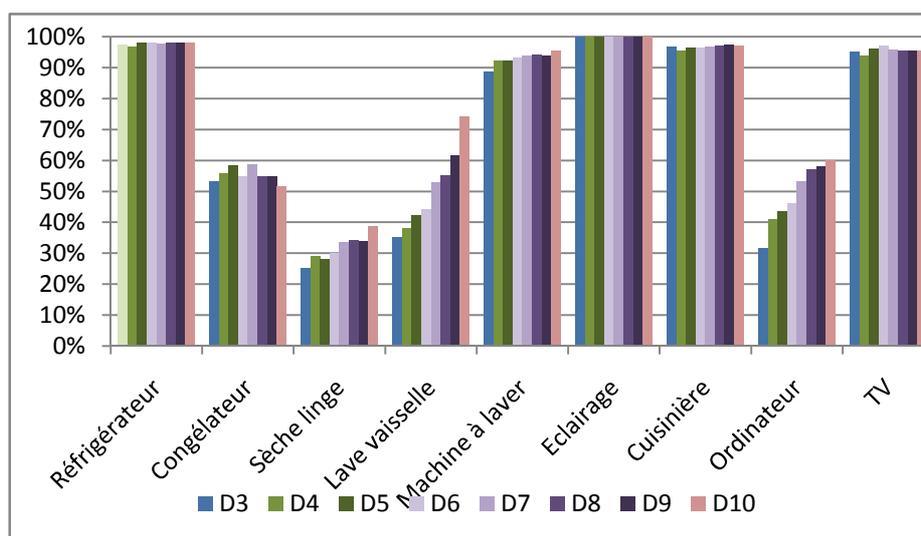


Figure 6: Taux d'équipement par décile en 2006 (INSEE, Enquête Budget de famille)

Le tableau ci-dessous représente les catégories de revenus nommées par ordre croissant du décile 1 au 10. Le décile représente donc indirectement le taux d'équipement.

Tableau 1: Tranche de revenu des déciles en 2006 (INSEE)

	Tranche de revenu (en Euros)
D1	de 0 à 7 790
D2	de plus de 7 790 à 11 380
D3	de plus de 11 380 à 13 520
D4	de plus de 13 520 à 15 440
D5	de plus de 15 440 à 17 320
D6	de plus de 17 320 à 19 350
D7	de plus de 19 350 à 21 710
D8	de plus de 21 710 à 24 860
D9	de plus de 24 860 à 30 120
D10	de plus de 30 120 à 51 690

Le territoire d'étude est la ville de Tours. Elle se segmente en 57 IRIS (Annexe 1 : Carte des IRIS de Tours). Pour chaque IRIS le revenu moyen des habitants est disponible et permet de déterminer le taux d'équipement. Pour cela, nous faisons l'hypothèse que les ménages d'un IRIS ont le même taux d'équipement.

A l'échelle urbaine, cette reconstruction nous donne la carte ci-dessous.

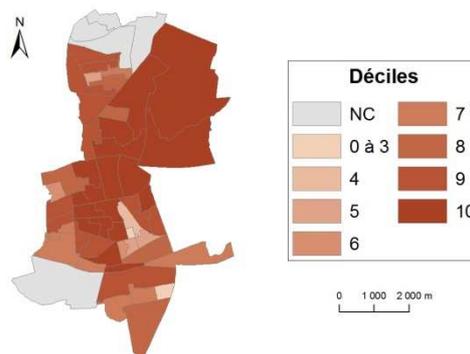


Figure 7 : Répartition des déciles par IRIS (INSEE, 2007)

On constate que le territoire de Tours est principalement constitué d'une population à hauts revenus. 38% de la population possède un revenu de type D10 (Tableau 2). Le taux d'équipement est donc élevé sur Tours.

Tableau 2 : Pourcentage de la population de Tours par IRIS

Type de décile	% de la population
D10	38
D9	24
D8	12
D7	11
D6	4
D5	4
D4	2
D3	4

1.2 Une consommation dépendant du nombre d'équipements des ménages

La détermination du nombre d'équipements par ménage provient de la combinaison du taux d'équipement et du nombre de ménages fiscaux par IRIS (Figure 8).

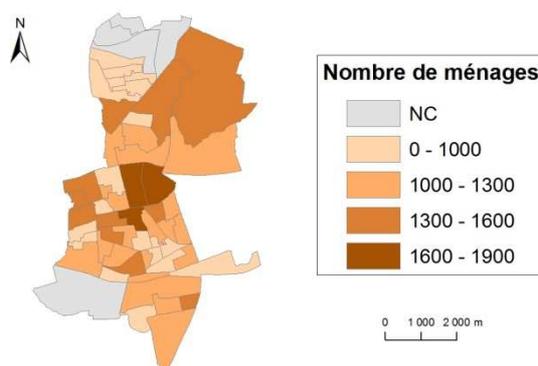


Figure 8 : Nombre de ménage fiscaux par IRIS (INSEE, 2007)

La carte suivante montre à l'échelle urbaine la répartition des consommations par IRIS.

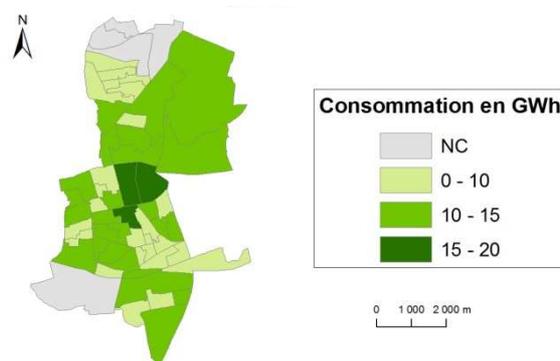


Figure 9 : Consommation annuelle des logements par IRIS

On constate que les IRIS les plus consommateurs sont les trois IRIS centraux. Ces derniers sont également les plus peuplés. La consommation pour les autres IRIS semble non seulement dépendre du nombre d'habitants mais aussi du taux d'équipement, soit le nombre d'équipements résultant de ces deux données.

2 L'étude des commerces et services, d'autres composant de la consommation d'une ville

A la différence du résidentiel, la reconstitution des courbes de charge des commerces et services n'est pas liée aux revenus mais à la typologie urbaine. Les quartiers de la ville de Tours se décomposent en différents types urbains suivant leur fonction urbaine et leur période de construction. Le type urbain influence la répartition des établissements de commerces et services, ainsi que les horaires et les jours d'ouverture (Tableau 3 et 4). On considère dans cette étude trois types urbains : le centre ville ancien qui correspond aux quartiers « Centre » et « Grammont », ce sont les quartiers historiques de la ville de Tours concentrant les points d'intérêt ; les grands ensembles de Tours à savoir « Sanitas-Rotonde », « Les Rives du Cher », « Les Fontaines » et « La Bergeonnerie », ces quartiers ont été construits à partir des années 1950, ils comportent un nombre important de logements en barres et en tours ; enfin les quartiers de petits collectifs et pavillonnaires, qui correspondent à des quartiers dont les densités d'habitation et d'activités tertiaires sont plus faibles. Ces trois types de quartiers représentent respectivement 18,87%, 20,75% et 60,38% des quartiers tourangeaux (Figure 10).

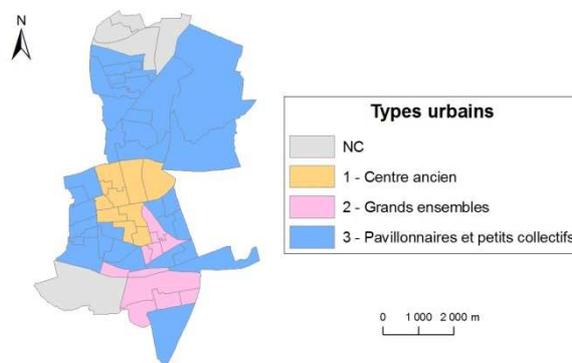


Figure 10 : Répartition des types urbains de la ville de Tours

Il existe 49 boucheries à Tours. Elles sont très présentes dans le centre ancien avec une concentration de deux boucheries par IRIS. Elles sont plus rares dans les autres types de quartier : trois boucheries pour quatre IRIS en quartiers pavillonnaires, et une pour deux IRIS dans les grands ensembles. Cependant, leur répartition au sein des IRIS d'un même type urbain n'est pas homogène. Par exemple, l'IRIS « Centre 5 » possède onze boucheries et l'IRIS « Centre 2 » zéro. L'implantation de ce type de commerce est alors très hétérogène sur le territoire de Tours. Elle couvre cependant l'intégralité du territoire de la ville. On observe donc de fortes disparités de consommation électrique entre les IRIS de la ville. Certains IRIS du centre ville de Tours ont une forte consommation annuelle due à cette activité (jusqu'à 4,9 GWh). Sur le reste du territoire cette consommation est plus diffuse et plus faible, de l'ordre de 0,42 GWh (Figure 11). Ceci s'explique par une population plus importante dans le centre de Tours (Figure 8).

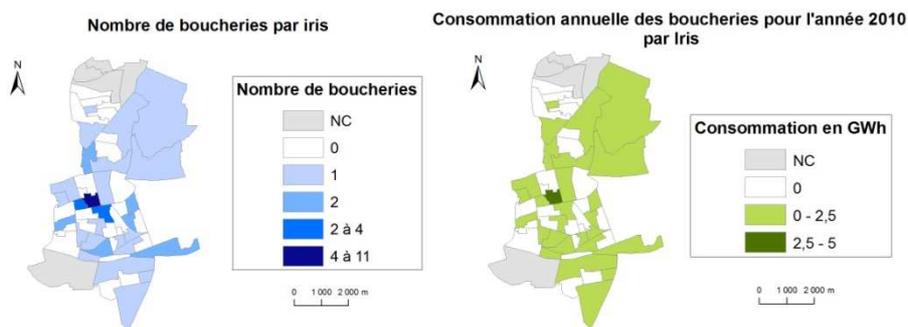


Figure 11 : Répartition et consommation électrique annuelles des boucheries sur l'agglomération de Tours (INSEE, 2009)

Tableau 3 : Horaires des boucheries en fonction du type urbain

	Horaires	Jours ouvrés
Centre ancien	8h-14h	L, Ma, Me, J, V, S
	16h-19h	
Grands ensembles	7h-14h	Ma, Me, J, V, S
	16h-19h	
	7h-13h	D
Petits collectif et pavillonnaire	8h-14h	L, Ma, J, V S
	17h-19h	
	8h-14h	Me

Les supermarchés sont moins nombreux, 18 établissements à Tours. Contrairement aux boucheries ils sont moins installés en centre ancien qu'ailleurs, un établissement pour cinq IRIS, contre trois pour huit pour les deux autres types urbains. Tout comme les boucheries, leur répartition n'est pas homogène sur le territoire de la ville, ni au sein d'un même type urbain. Les IRIS consommant le plus d'électricité à cause de cette activité sont principalement situés de part et d'autre du centre ancien (Figure 12).

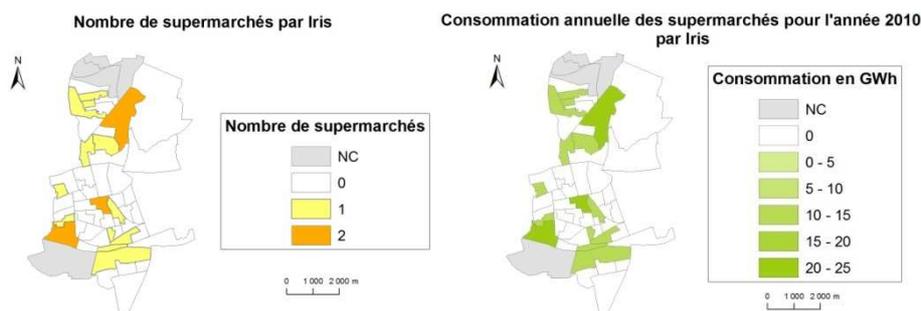


Figure 12 : Répartition et consommation électrique annuelle des supermarchés à Tours (INSEE, 2009)

Tableau 4 : Horaires des supermarchés de Tours en fonction du type urbain

	Horaires	Jours ouvrés
Centre ancien	9h-20h	L, Ma, Me, J, V, S
	8h-19h	
Grands ensembles	8h-14h	D
	8h-20h	L, Ma, Me, J, V, S
Petits collectif et pavillonnaire	8h-20h	L, Ma, Me, J, V, S
	8h-14h	

On observe que les boucheries ont très peu d'influence par rapport aux supermarchés. Les IRIS ayant la plus forte consommation (environ 22 GWh), sont ceux possédant le plus grand nombre de supermarchés (Figure 13). Le fait qu'un supermarché a une consommation annuelle plus de vingt fois supérieure à celle d'une boucherie explique ce phénomène (11 GWh contre 0,42 GWh).

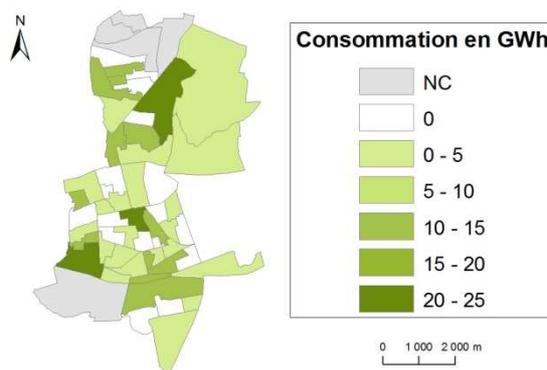


Figure 13 : Consommation des boucheries et des supermarchés de Tours par IRIS

3 La consommation totale à l'échelle urbaine, fortement marquée par les supermarchés

La carte ci-dessous présente la consommation totale par IRIS (Supermarchés, boucheries et logements). Sa comparaison avec la carte des supermarchés (Figure 12), montre que les IRIS ayant une consommation supérieure à 30GWh correspondent à une consommation des supermarchés de plus de 20GWh. On peut donc en déduire que la demande en énergie des IRIS dépend dans un premier temps de celle des supermarchés. Les équipements des supermarchés n'étant pas différables, le *Smart Grid* aura peu d'effets sur ces IRIS.

Lorsqu'il n'y a pas de supermarché, la consommation est marquée par les logements. En effet, elle est nettement plus importante que celle des boucheries (Figure 11 Figure 9).

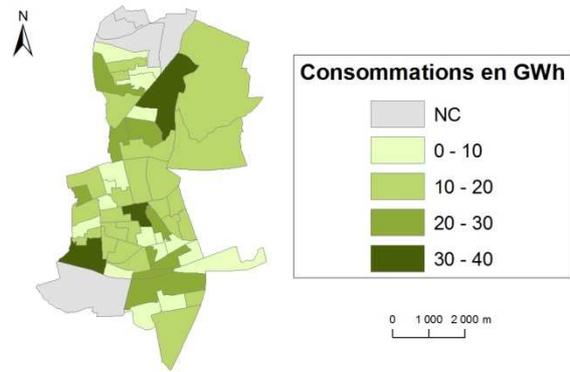


Figure 14 : Consommation totale de la Tours par IRIS

Partie 4. Simulation de la consommation des usages spécifiques au sein d'un IRIS

Sémia OUESLATI

1 Introduction

Selon le pays, le secteur résidentiel correspond entre 16 et 50% des consommations totales (Lukas G. Swan, 2009). Les usages spécifiques, qui sont l'ensemble des consommations liées à l'utilisation d'appareils électriques (petit et gros électroménager, multimédia, luminaires), représente en France à 60% de la consommation du secteur résidentiel (RTE, 2009). Le *Smart Grid* pourrait permettre de réduire les pics de consommation en reportant certain usages spécifiques. Afin d'évaluer les effets de cette technologie sur la demande en énergie, l'objectif de cette partie est de modéliser l'ensemble des consommations en usages spécifiques, ainsi que de déterminer les équipements participant à l'effacement des pics. Dès lors, comment simuler la consommation en électricité des usages spécifiques des logements ? De quoi dépend la participation d'un appareil à l'effacement ? Afin de répondre à ces questions, nous étudierons la littérature, ce qui nous permettra d'examiner les modélisations existantes. Dans une seconde partie, nous réaliserons notre propre modèle. Enfin, nous déterminerons les équipements pouvant être reportés.

2 Les modèles existants : deux grands groupes dépendant des données d'entrée

Les modèles utilisés afin de simuler les consommations des ménages peuvent être regroupés en deux grandes catégories : les modèles « Top down » et « Bottom-up ». La terminologie est en référence à la position des données d'entrées par rapport au secteur du logement. Les modèles « Top down » ont pour données d'entrée les consommations totales du secteur résidentiel et des données complémentaires qui caractérisent les consommations de l'ensemble du secteur. Les modèles « Bottom-up » calculent les consommations énergétiques d'une habitation ou d'un ensemble de maisons puis par agrégation celle d'une échelle supérieure.

2.1 L'approche "Top down"

L'approche top down considère le secteur résidentiel comme un puits énergétique et ne distingue pas les consommations individuelles. Ces modèles déterminent l'effet de certain changement à long ou à court terme sur la consommation énergétique du secteur résidentiel. Les variables souvent utilisées sont des indicateurs macro-économiques (PIB, taux d'emploi,...), les conditions climatiques, le taux de construction et de démolition, et les estimations du nombre d'appareils électriques dans les ménages. Il existe deux groupes de modèles top down : économétrique et technologique. Les modèles économétriques sont principalement basés sur le prix (par exemple de l'énergie) et sur les revenus. Les modèles technologiques attribuent la consommation énergétique à des caractéristiques générales du parc tel que le taux d'équipement des ménages. Certains modèles utilisent des techniques des deux groupes à la fois. Les points forts de cette approche top down sont une accessibilité simple des données et une possibilité d'intégrer la consommation de nouveaux logements lorsque le taux de pénétration reste faible. Les inconvénients sont une impossibilité d'intégration de nouveaux logements lorsque le taux de pénétration devient important, les progrès technologiques ne peuvent pas être pris en compte. Par exemple, lorsque le taux de pénétration est de 2%, il suffit de considéré une augmentation de la consommation de 1,5%, ce qui permet de prendre en compte une meilleure performance énergétique des nouveaux logements. Au contraire, lorsque ce taux devient trop important, tel que 10%, le modèle rencontre des difficultés à estimer la consommation (Lukas G. Swan, 2009). D'autre part, l'absence de données sur les consommations individuelles empêche d'identifier des points clés permettant de réduire les consommations énergétiques.

2.2 L'approche "Bottom-up"

L'approche « Bottom-up » englobe tous les modèles qui utilisent des données d'un niveau hiérarchique inférieur à celui de l'ensemble du secteur résidentiel. Ils peuvent rendre compte des consommations d'une habitation ou d'un ensemble de maisons. Ces résultats sont ensuite extrapolés à l'échelle supérieure en considérant que l'échantillon étudié est représentatif de l'ensemble. Il existe deux groupes de modèle « Bottom-up » : statistique et d'ingénierie.

La méthode statistique utilise des données issues de la consommation d'énergie d'un échantillon d'habitations. Elle se base également sur une variété de techniques de régression permettant de créer des relations entre les utilisations d'énergie finales et la consommation totale. Cette méthode peut utiliser des indicateurs macroéconomiques tels que le prix (par exemple de l'énergie), le revenu, bénéficiant ainsi des avantages de l'approche top down. La méthode d'ingénierie repose sur des données caractérisant les logements qui permettent de calculer les consommations énergétiques grâce à l'apport d'autres données telles que les quotas de puissance, les caractéristiques d'utilisation et les transferts thermiques. Cette méthode à l'avantage de pouvoir prendre en compte le développement de nouvelles technologies.

Ce haut niveau de détail de l'approche Bottom-up lui confère un avantage significatif et lui donne la possibilité de prendre en compte des innovations technologiques. Cette catégorie a l'avantage de déterminer les consommations individuelles, ce qui permet d'identifier les points à améliorer. Comme les modèles top down, elle peut déterminer les consommations totales du secteur résidentiel.

2.3 Exemple de modèles "Top down"

L'approche « Top down » se développe pendant la crise énergétique à la fin des années 1970. L'objectif était de comprendre le comportement des consommateurs face à l'évolution des prix et de l'offre. E. Hirst et ses collaborateurs⁵ initient la conception de ce type de modèle avec le calcul des consommations énergétiques du secteur résidentiel des Etats-Unis. Leur modèle est fondé sur des variables économétriques et prend en compte l'évolution démographique, ainsi que le taux de renouvellement du parc. Leur travail fut élargi et amélioré dans les années qui suivirent. Le nombre de logements est alors évalué par les données du recensement, la destruction et la construction des logements. L'évolution technologique est également prise en compte. La pénétration d'une nouvelle technologie dans le marché est considérée comme fonction du revenu, de l'offre et de la demande. Les applications sur le terrain ont permis aux auteurs d'estimer la sensibilité de leur modèle à l'évolution démographique, économique et technologique. Néanmoins, ils reconnaissent la nécessité de devoir constamment mettre à jour les données. Saha et Stephenson⁶ ont développé un modèle similaire pour la Nouvelle-Zélande avec une orientation plus technologique. Ils font une analyse séparée de la consommation par le chauffage, par l'eau chaude sanitaire et par les usages spécifiques. Leur capacité de prévision a été exacte tout au long des années 1960 et 1970 même s'il existe des divergences importantes durant la deuxième moitié des années 1970.

2.4 Exemples de modèles Bottom-up

L'approche bottom-up a été développée afin d'identifier la participation de chaque usage à la consommation totale du secteur résidentiel.

La méthode statistique de l'approche bottom-up est basée sur la facture énergétique des clients. L'avantage de cette méthode est sa capacité à discerner l'effet du comportement des occupants. Tonn et White⁷ développèrent un modèle statistique en basant leurs données sur l'étude d'un échantillon de 100 logements. Afin de comprendre le comportement des occupants, ils menèrent une enquête approfondie (300 questions) sur les objectifs et motivations des consommations énergétiques. Leur modèle compte 30 types de logement. Ils démontrèrent que les différences ethniques ont un plus fort impact sur la consommation que les facteurs économiques.

⁵ Hirst E, Lin W, Cope J. A residential energy use model sensitive to demographic, economic, and technological factors. *Quarterly Review of Economics and Finance* 1977;17(2):7-22.

⁶ Saha GP, Stephenson J. A model of residential energy use in New Zealand. *Energy* 1980;5(2):167-75.

⁷ Tonn BE, White DL. Residential electricity use, wood use, and indoor temperature: an econometric model. *Energy Systems and Policy* 1988;12(3): 151-65.

La méthode d'ingénierie de l'approche bottom-up est la seule méthode qui peut déterminer la consommation d'énergie du secteur sans disposer d'informations historiques sur la consommation énergétique. Les modèles développés peuvent être simples tel qu'une estimation de la consommation en fonction du climat, mais également complexes en développant des modèles thermodynamiques de transfert de chaleur. Cette méthode a un plus haut degré de flexibilité et peut ainsi intégrer de nouvelles technologies. Ces modèles prennent également en compte le comportement des utilisateurs. Jaccard et Baille⁸ ont développé un modèle sur la province du Canada. Les données d'entrées du modèle comprennent la consommation d'énergie historique, le prix (par exemple de l'énergie), des paramètres sur le comportement des consommateurs, le taux de pénétration d'une nouvelle technologie, et la quantité d'appareils électriques dans les ménages déterminée à partir de la loi de l'offre et de la demande. Cet outil de simulation détermine la consommation d'énergie de chaque appareil, dont la somme représente la consommation par le secteur résidentiel. Ce modèle permet de prendre en compte de potentielles rénovations d'anciens logements.

3 Les appareils électriques les plus énergivores d'un ménage

Afin de simplifier la modélisation, la première étape est de sélection des appareils les plus énergivores d'un ménage.

Si on considère que le critère puissance d'un équipement multiplié par son temps d'utilisation journalier permet de dégager les équipements les plus énergivores, nous obtenons le graphique ci-dessous.

⁸ Jaccard M, Baille A. CO2 emission reduction costs in the residential sector: behavioral parameters in a bottom-up simulation model. *Energy Journal* 1996;17(4):107-35.

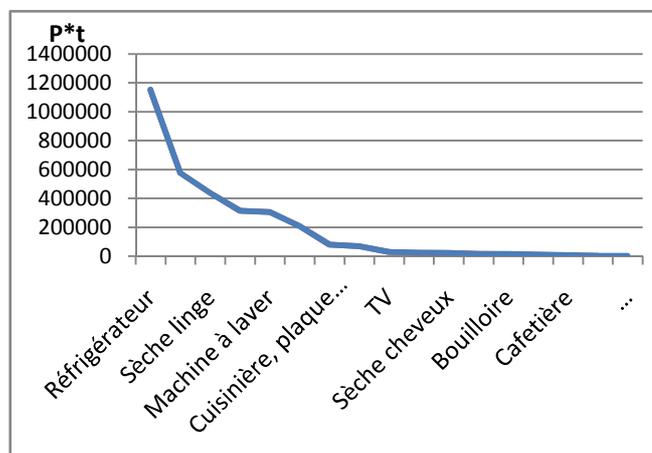


Figure 15. Classement des équipements en fonction de la Puissance multipliée par la durée d'utilisation

Ainsi, selon ce graphique les neuf appareils les plus énergivores sont le réfrigérateur, le congélateur, le sèche-linge, le lave-vaisselle, la machine à laver, l'éclairage, la cuisinière, l'ordinateur et la télévision. Ces équipements représentent 96% de la consommation totale des équipements d'un ménage.

Chacun de ces appareils est caractérisé par une durée d'utilisation et une puissance (Tableau 5).

Tableau 5. Caractérisation des équipements par leur puissance et leur durée d'utilisation par jour

Appareils	Puissance max (en W)	Source des puissances	Durée d'utilisation (en min)	Source des durées d'utilisation
Réfrigérateur	800	Asbl, 2010	1440	EDF, ADEME, Enertech, 2010
Congélateur	400	Darty, 2011	1440	EDF, ADEME, Enertech, 2010
Sèche linge	3000	Rainer, 2009	146	Cochran, 2009
Lave vaisselle	4000	Asbl, 2010	78,5	Persson 2007
Machine à laver	3000	Rainer, 2009	101,7	Persson 2007
Eclairage	14,5	EDF, ADEME, Enertech, 2005	420	EDF, ADEME, Enertech, 2005
Cuisinière, plaque de cuisson, four	2 000	Asbl, 2010	40	TNS, 2010
Ordinateur	165,6	Fung, 2003	420	Beauvisage, 2009
TV	145	Fung, 2003	207	SNPTV, 2009

Afin de modéliser l'usage de ces appareils l'objectif suivant est de connaître la manière dont ils sont utilisés dans un ménage et ceci en déterminant un profil d'usage par équipement.

4 Le profil d'usage des équipements

4.1 Le réfrigérateur

Le réfrigérateur est un appareil constamment sous tension, néanmoins sa consommation varie selon les saisons et l'heure (Figure 16).

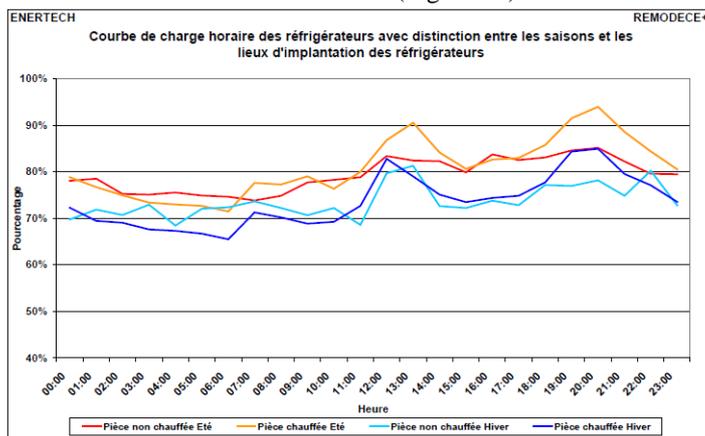


Figure 16 : Courbe de charge horaire des réfrigérateurs avec distinction entre les saisons et les lieux d'implantation. **SOURCE: ADEME, EDF, ENERTECH, AVRIL 2008**

Si nous considérons que les courbes de charge de la Figure 16 révèlent la consommation type d'un réfrigérateur, on peut déterminer le profil de charge sur l'année. On considère une période estivale allant de début mars à fin septembre, la période hivernale correspond au reste de l'année (ces périodes correspondent au changement d'horaire de l'année 2010). Le profil d'usage d'été correspond à la moyenne entre les courbes des pièces chauffées et non chauffées d'été, de même pour le profil d'usage de l'hiver. Ainsi nous obtenons le profil d'usage sur l'année (Figure 17).

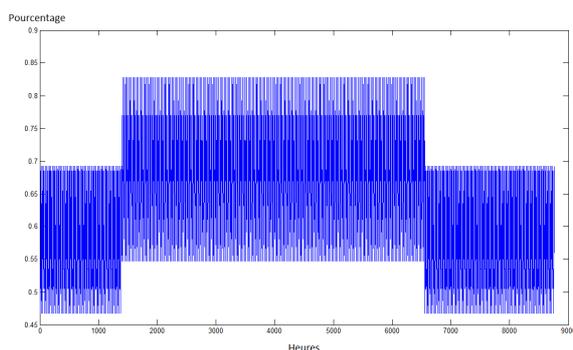


Figure 17: Profil d'usage du réfrigérateur sur l'année

4.2 Le congélateur

Comme le réfrigérateur, le congélateur est constamment sous tension, néanmoins sa consommation varie selon les saisons. Au vue de la courbe de charge du congélateur, son usage peut être considéré constant sur une journée (Figure 18).

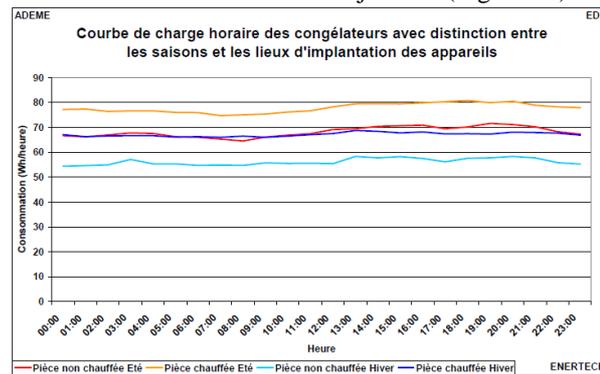


Figure 18: Courbe de charge horaire des congélateurs avec distinction entre les saisons et les lieux d'implantation des appareils. Source: ADEME, EDF, ENERTECH, Avril 2008

La consommation annuelle maximale des réfrigérateurs étudiés est de 1180kWh, soit une consommation de 130Wh par heure. Ainsi une consommation de 80Wh par heure représente 61% de la consommation maximale. Si nous considérons que le profil d'usage des congélateurs étudiés dans la Figure 18 révèle le fonctionnement type d'un congélateur, nous pouvons déterminer celui du congélateur sur l'année. Le profil d'usage d'été correspond à la moyenne entre les courbes des pièces chauffées et non chauffées (courbe orange et rouge), de même pour le profil d'usage de l'hiver (Figure 19).

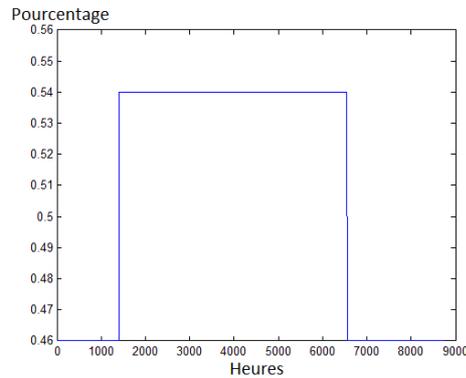


Figure 19: Profil d'usage du congélateur sur l'année

4.3 Le lave-linge

Un logement réalise en moyenne 4,64 cycles par semaine (ADF, Avril 2008). La Figure 20 représente la courbe de charge horaire moyenne des lave-linges. Si on considère que cette courbe (Etude AEE2008) est une loi de probabilité, on peut contraindre le profil d'usage sur l'année.

Ainsi, l'objectif est de créer un profil d'usage par IRIS qui rend compte de trois caractéristiques :

- Un ménage réalise 4,64 cycles/semaine ;
- La mise en route d'une machine à laver se fait aléatoirement, néanmoins elle est contrainte par la loi de probabilité ;
- Un cycle de machine à laver dure 101,7 minutes. Afin de simplifier la modélisation, nous considérons qu'un cycle est de deux heures.

(Annexe 3 : Détermination du profil d'usage du lave-linge).

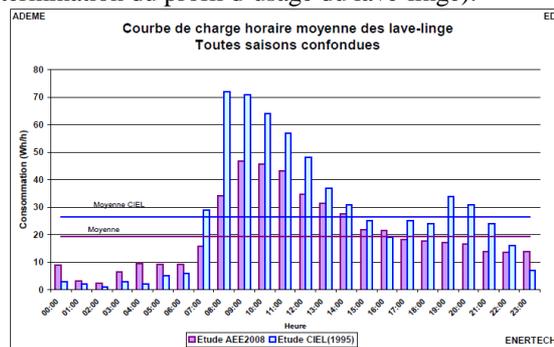


Figure 20: Loi de probabilité du lave-linge. Source: ADEME, EDF, ENERTECH, Avril 2008

Pour chaque IRIS de Tours un profil d'usage est ainsi créé (Figure 21).

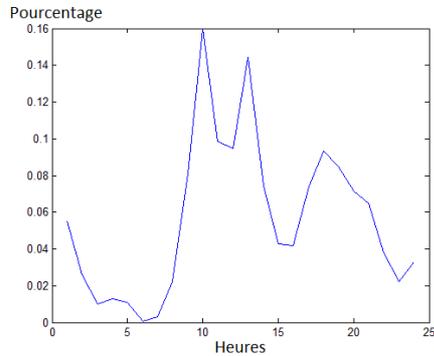


Figure 21: Profil d'usage de la machine à laver sur 24 heures pour l'IRIS 101

Le profil d'usage de la machine à laver suit la courbe de charge en Figure 20. Les machines à laver sont principalement en fonctionnement entre 8h et 22h. Les heures creuses d'EDF se situant entre 2h et 7h ne semble pas avoir d'impact sur la consommation.

4.4 Le sèche-linge

Si on considère qu'un sèche linge est activé immédiatement ou dans l'heure qui suit la fin de la machine à laver, le profil d'usage du sèche linge est le même que celui de la machine à laver décalé dans le temps de deux heures. Ces dernières correspondent au temps de fonctionnement d'un cycle de sèche-linge arrondi à la valeur supérieure afin de simplifier la modélisation.

Il y a donc, comme pour la machine à laver un profil d'usage par IRIS (Figure 22).

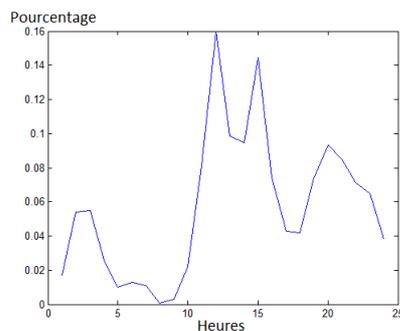


Figure 22 : Profil d'usage du sèche-linge sur 24 heures pour l'IRIS 101

4.5 Le lave-vaisselle

La création du profil d'usage du lave-vaisselle est similaire au sèche-linge. La méthodologie reste la même mais les caractéristiques changent.

- Un ménage réalise 4,1 cycles/semaine (ADF, Avril 2008) ;

- La mise en route d'une machine à laver se fait aléatoirement, néanmoins elle est influencée par la loi de probabilité (Figure 23, Etude AEE2008) ;
- Un cycle de machine à laver dure 78,5 minutes. Afin de simplifier la modélisation, nous considérons qu'un cycle est d'une heure.

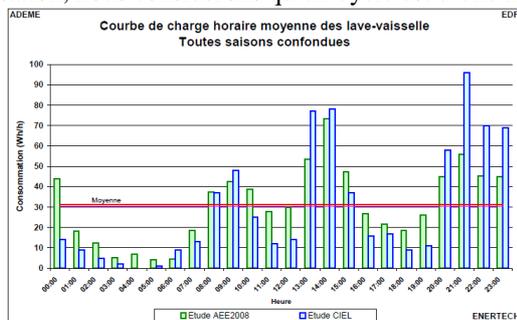


Figure 23 : Loi de probabilité du lave-vaisselle.
Source: ADEME, EDF, ENERTECH, Avril 2008

La loi de probabilité présente trois pics de consommation : le matin, l'après midi et le soir après 19h. On peut supposer que cela correspond au nettoyage de la vaisselle du petit déjeuner, déjeuner et dîner.

Nous obtenons un profil d'usage par IRIS (Figure 24).

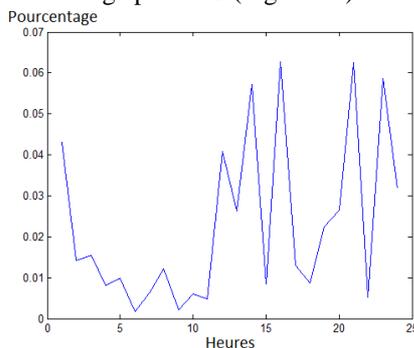


Figure 24 : Profil d'usage du lave-vaisselle sur 24 heures pour l'IRIS 101

4.6 L'éclairage

La création du profil d'usage de l'éclairage est assez similaire à ceux de la machine à laver et du lave-vaisselle.

Les caractéristiques de l'éclairage sont les suivantes :

- La mise en route de l'éclairage se fait aléatoirement, néanmoins elle est influencée par la loi de probabilité (Figure 25) ;
- Les ménages ont au moins une lumière en fonctionnement pendant 1662 heures/an.

(Annexe 4 : Détermination du profil d'usage de l'éclairage).

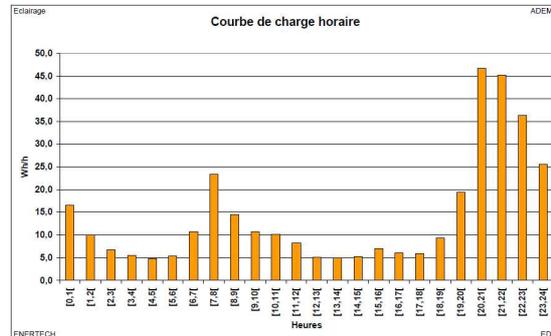


Figure 25 : Loi de probabilité de l'éclairage. Source: ADEME, EDF, ENERTECH, Mars 2005

La loi de probabilité présente deux principales consommations, le matin avant 9h et le soir après 19h. Ces périodes correspondent à l'absence de lumière du jour. Une consommation persiste pendant les autres périodes du au besoin d'éclairage des pièces sans fenêtre.

On obtient un profil d'usage par IRIS (Figure 26).

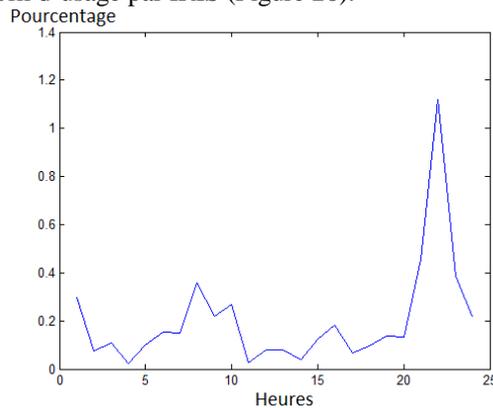


Figure 26 : Profil d'usage de l'éclairage sur 24 heures pour l'IRIS 101

Le choix a été fait de ne pas considérer de variation de l'éclairage dans l'année lié aux heures du couché et du levé du soleil. En effet, une telle précision n'été pas nécessaire pour évaluer les effets du *Smart Grid*.

4.7 La cuisinière

La création du profil d'usage de la cuisinière est basée sur des enquêtes ménages réalisées par TNS Sofres. La construction du profil d'usage est similaire à celle de la machine à laver. Les caractéristiques du profil d'usage de la cuisinière sont les suivantes :

- 97% des français font ou ont dans leur foyer quelqu'un qui fait de la cuisine «fait maison» (tns, 2010) ;

- Les ménages cuisinent à des heures différentes de la journée de façon aléatoire mais influencé par la loi de probabilité. Cette dernière est représentée par le graphique ci-dessous avec quelques différences :
 - Les résultats de l'enquête TNS Sofres 2004 montrent que la préparation d'un repas habituel est de trente minutes en semaine et d'une heure le week-end ;
 - Nous ne prenons en compte que le déjeuner et le dîner car ce sont eux qui occasionnent l'utilisation de la cuisinière.
 Ainsi, la loi de probabilité correspond aux heures de prise du déjeuner et du dîner avancé de 30 minutes en semaine et d'une heure le weekend.
- On considère que les ménages cuisinent deux fois par jour soit 730 fois par an.

(Annexe 5 : Détermination du profil d'usage de la cuisinière).

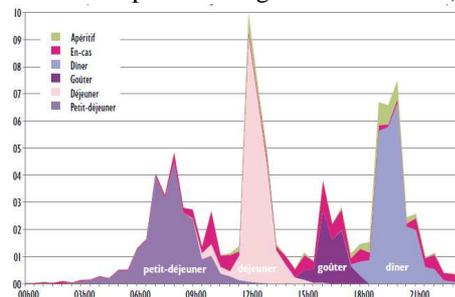


Figure 27 : Profil de prise des repas des français (en abscisse les heures et en ordonné le pourcentage). Source: CREDOC, enquête CCAF 2007

On obtient un profil d'usage par IRIS (Figure 28).

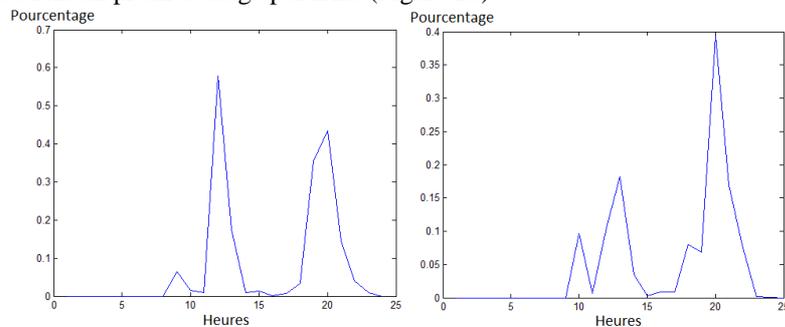


Figure 28 : Profil d'usage de la cuisinière sur 24 heures en semaine (à gauche) et en weekend (à droite) pour l'IRIS 101

Les profils d'usage présentent deux pics à 12h et 20h correspondant au moment de prise des repas.

4.8 Le multimedia

Selon l'étude de Thomas BEAUVISAGE de 2009 intitulée « Computer usage in daily life », il existe trois types d'utilisation de l'ordinateur.

- Le PC « 24h sur 24 » : l'ordinateur est constamment sous tension. Ce type d'usage est réalisé par 15% de la population ;
- Le PC « toujours disponible » : allumé pour la première utilisation, il reste sous tension jusque dans la soirée. Cette usage correspond aux habitudes de 33% de la population dont 43% ont leur ordinateur disponible toute la journée et 20% uniquement dans la soirée ;
- Le PC « à la demande » : allumé lors d'une utilisation, il est immédiatement éteint après. Ce type d'usage est réalisé par 52% de la population.

Si on considère que ces tendances reflètent l'utilisation de l'ordinateur sur notre territoire d'étude, on peut déterminer le profil d'usage sur l'année. Afin de créer le profil d'usage nous faisons certaines hypothèses permettant de préciser l'utilisation de l'ordinateur.

- Le PC « toujours disponible » : 14% des ménages allument leur ordinateur dans la matinée et l'éteignent dans la soirée. Nous faisons l'hypothèse que les ménages commencent progressivement à allumer leur ordinateur à 6h et qu'à 9h tous les ordinateurs de cette catégorie sont allumés. De même, les ménages commencent progressivement à éteindre leur ordinateur à 24h et à 4h tous les ordinateurs sont éteints.
- Le PC « toujours disponible » : 7% des ménages allument leur ordinateur dans la matinée et l'éteignent dans la soirée. Nous faisons l'hypothèse que les ménages commencent progressivement à allumer leur ordinateur à 17h et qu'à 20h tous les ordinateurs de cette catégorie sont allumés. De même, les ménages commencent progressivement à éteindre leur ordinateur à 24h et à 4h tous les ordinateurs sont éteints.

Si on considère une loi aléatoire reflétant l'allumage aléatoire des ordinateurs contrainte par les caractéristiques des utilisateurs vues précédemment, on obtient un profil d'usage par IRIS (Figure 29).

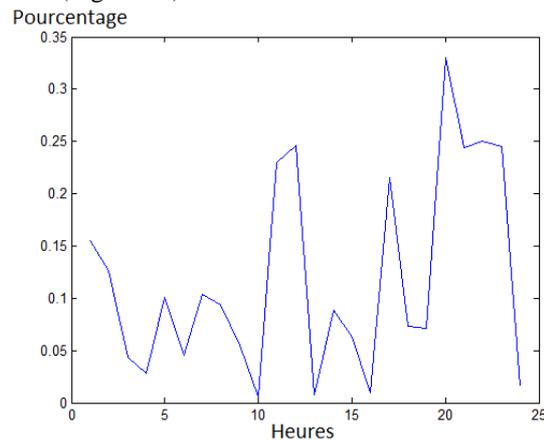


Figure 29 : Profil d'usage de l'ordinateur sur 24 heures pour l'IRIS 101

L'ordinateur connaît une forte utilisation entre 10h et 13h et le soir.

Le profil d'usage de la télévision est réalisé à partir des données obtenues par Médiamétrie. Pour chaque émission télévisée une part d'audience, ainsi que le nombre de personnes regardant cette émission est disponible. Il y a 45,7 millions de téléspectateur en France (Médiamétrie, Février 2010).

Afin de construire le profil d'usage de la télévision nous cherchons les records d'audience pour une émission particulière. Par exemple entre 18h et 19h durant la semaine, « une famille en or » a reçu un record d'audimat de 24,2% correspondant à 2,6 million de téléspectateurs. Ainsi, on peut déterminer le nombre de personnes qui était devant la télévision entre 18h et 19h, soit 100% de l'audimat représentant 10,7 million de téléspectateur. Le profil d'usage de la télévision entre 18h et 19h est donc la division de ce nombre de spectateurs par le nombre de téléspectateurs en France.

On obtient donc deux lois de probabilité, pour la semaine et pour le weekend. Si on considère la loi aléatoire reflétant l'allumage aléatoire de la télévision, contrainte par les lois de probabilité, on obtient un profil d'usage sur l'année par IRIS (Figure 30).

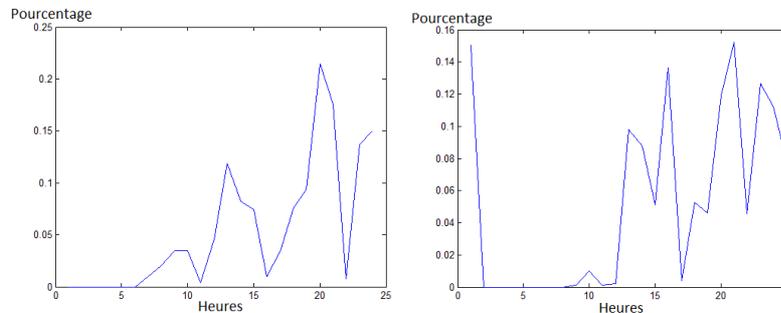


Figure 30 : Profil d'usage de la télévision sur 24 heures en semaine (à gauche) et en weekend (à droite) pour l'IRIS 101

La télévision connaît deux pics, à 12h et à 20h en semaine. L'usage en weekend est principalement en après-midi et en soirée. Les individus regardent plus la télévision en weekend.

5 Les courbes de charge

Grâce aux profils d'usages, nous pouvons déterminer les courbes de charges des consommations des habitants pour les appareils considérés. La courbe de charge des consommations des logements est réalisée grâce à la formule ci-dessous.

$$\sum_{t=0}^{8760} \sum_{j=1}^{53} \sum_{i=1}^9 P = \text{Profil d'usage}(t, i) * \text{nombre d'équipement}(j) * \text{Taux d'équipement}(i)$$

Eq. 22

t=temps (en heure)
i=type d'équipement

j=numéro IRIS

Les courbes peuvent être déterminées par IRIS ou pour un ensemble d'IRIS et par équipement ou pour un ensemble d'équipements.

Sur la Figure 31, on peut observer un pic de consommation vers 12h d'une puissance de 5,9MW et un second vers 20h de 3,3MW. Ces pics de consommation sont principalement dus à la cuisinière comme nous pouvons l'observer sur la Figure 32. La cuisinière est responsable à 63% du premier pic et à 51% du deuxième pic. On constate que les autres postes de consommation créent une base relativement stable bien que les profils d'usages de chaque appareil peuvent montrer des pics. Les postes de consommation les plus réguliers dans le temps sont le réfrigérateur et le congélateur.

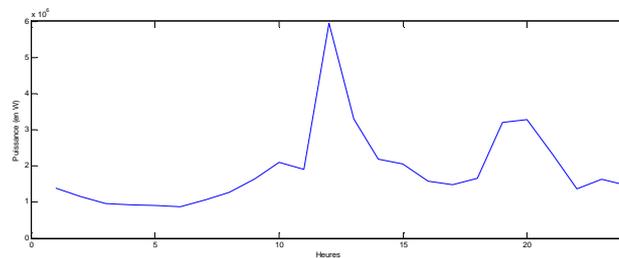


Figure 31 : Courbe de charge journalière pour l'IRIS 101

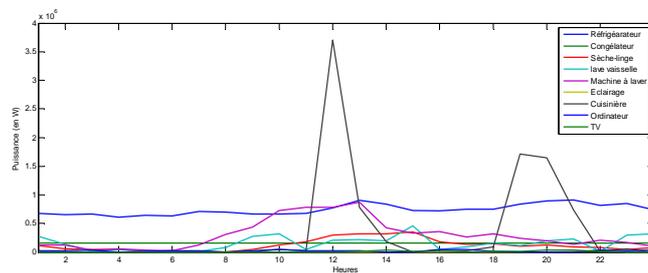


Figure 32 : Courbe de charge journalière différenciant les postes de consommation pour l'IRIS 101

Grâce à une échelle logarithmique en abscisse on peut voir l'impact de ces pics journaliers à plus long terme (Figure 33).

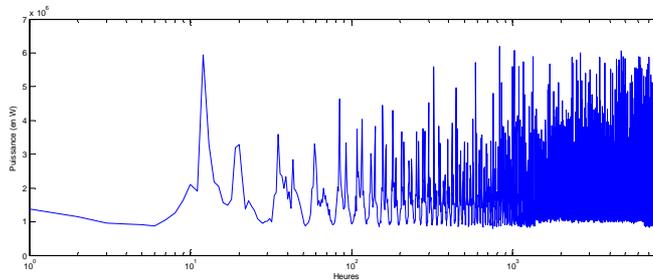


Figure 33 : Courbe de charge sur une année en échelle logarithmique pour l'IRIS 101

Une étude plus précise des équipements est désormais nécessaire. Elle permettra de comprendre la participation des équipements à la réduction des pics de consommation. Chaque équipement est classé en usages différables⁹, effaçables ou en stockage d'électricité.

6 L'étude des équipements différables, effaçables et le stockage électrique

Afin de déterminer la participation de chaque appareil à la réduction des pics de consommation, nous nous appuyons sur l'étude Projet PROBAT 4 sur la « maîtrise de la demande d'électricité et contrôle des courbes de charge ».

Les études réalisées dans le cadre de la tâche XI de l'AIE (FORMY, 2007) donnent des indications sur l'acceptabilité des utilisateurs à moduler leurs usages. Les conclusions sont présentées dans le document du projet PROBAT4.

En ce qui concerne les équipements que nous étudions, les appareils de loisirs tel que la télévision et l'ordinateur, et les appareils de cuisson et de froid, ont une acceptabilité nulle. Le lave-linge, le sèche-linge et le lave vaisselle ont une acceptabilité moyenne. L'effacement de ces appareils est donc possible avec la condition que ce ne soit qu'un décalage dans le temps. L'éclairage connaît une bonne acceptabilité car, bien souvent, l'usage n'est pas nécessaire. Néanmoins les ménages doivent avoir le contrôle sur leur éclairage. Ce poste de consommation n'est pas différable car son usage n'est pas reporté dans le temps mais est supprimé pendant les moments de pics de consommation. Ce poste est compté dans les postes effaçables.

Il existe un autre moyen permettant de réduire les pics de consommation, il s'agit du stockage de l'électricité. Ainsi, les équipements de type loisir (télévision, ordinateur) qui ne peuvent pas être différés ou effacés et ceux de faible puissance tel que l'éclairage peuvent bénéficier d'une batterie de stockage.

7 Conclusion

Le modèle ainsi créé permettrait d'évaluer les effets du *Smart Grid*. On constate que seul 3 équipements sur 9 sont différables. Ce nombre est assez faible néanmoins il représente 26% de l'énergie totale consommée sur une année par l'ensemble des équipements considérés pour le logement. Au vu de la figure ci-dessous, l'effacement des deux pics de consommation dus à la cuisinière demandera une consommation nulle des appareils différables aux moments de ces pics. Cet effet que pourrait avoir le *Smart Grid* ne suffira pas à effacer la totalité des pics mais uniquement 31% du premier pic et 46% du second. L'effet du *Smart Grid* semble donc être limité par le nombre insuffisant d'appareils différables.

⁹ Usage dont la consommation peut être différée ans le temps sans nuire trop fortement au confort des utilisateurs (Projet PROBAT4, 2010)

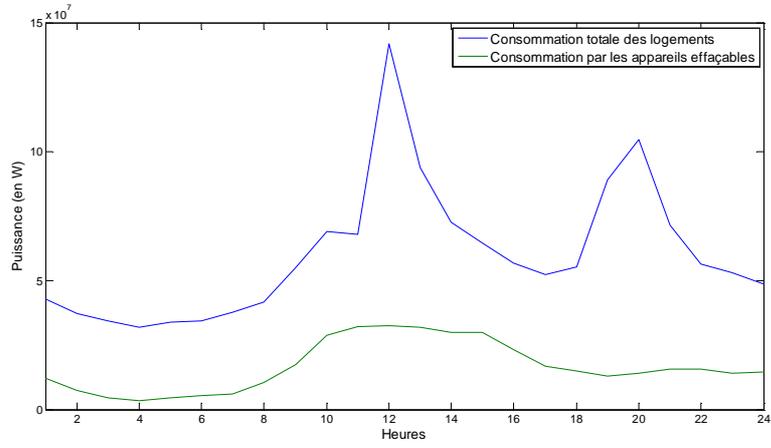


Figure 34 : Courbes de charge totale des logements et des appareils différables

Partie 5. Détermination des usages effaçables des supermarchés et des boucheries d'une ville

Lucie MAITRE

1 La gestion de la demande des consommations du secteur tertiaire : un enjeu du *Smart Grid*

La mise en place d'un *Smart Grid* sur une ville pourrait amener à une meilleure gestion locale des productions d'énergie renouvelable et de la demande en électricité. Ceci devrait diminuer les impacts environnementaux liés à la consommation de la ville, tout en permettant des gains économiques (cf. Partie 1).

Le *Smart Grid* doit gérer la demande de tous les consommateurs, c'est-à-dire des sites résidentiels, mais aussi des sites non résidentiels. En effet, en France, bien que les sites non résidentiels ne représentent que 14,1% du total des sites de consommation d'électricité, ils sont à l'origine de 68% de la consommation (CRE, NC).

Cette étude s'intéresse à la consommation électrique en milieu urbain, c'est-à-dire que seuls les commerces et services de proximité du secteur tertiaire sont pris en compte parmi les sites non résidentiels. Le secteur tertiaire peut être classé en différentes catégories en fonction des activités. Ainsi, une catégorie de commerces ou services peut être définie pour chaque profession. Dès lors, une catégorie correspond par exemple à « Boucherie », « Librairie », « Pharmacie », « Supermarché », « Poste », etc. Chaque métier étant particulier, les équipements de chaque établissement sont spécifiques à une catégorie de commerces ou services. On étudie ici deux catégories : les supermarchés et les boucheries. Ces deux activités ont été choisies car elles nécessitent toutes deux l'utilisation d'appareils frigorifiques énergivores. En outre, elles font partie des activités urbaines qui consomment le plus d'électricité et sont, par conséquent, de bons exemples pour la mise en place d'une méthode d'étude de activités tertiaires.

Les *Smart Grids* pouvant notamment agir sur la demande en énergie en effaçant certains usages (cf. § Partie 2.3), on peut se demander si le contexte du secteur tertiaire est propice à son utilisation ? C'est-à-dire les usages des commerces sont-ils effaçables ? Il s'agit donc ici de déterminer quels sont les usages des supermarchés et des boucheries qui peuvent être effacés. Ainsi, pour connaître tous les usages effaçables liés aux activités tertiaires d'une ville, ce travail devra être effectué pour l'intégralité de ses commerces et services.

Partant de l'hypothèse qu'il existe certains usages pouvant être effacés par un *Smart Grid*, l'objectif est de connaître de quelle façon les équipements des commerces et services sont utilisés au cours d'une journée, d'une semaine et de l'année. La connaissance de ces usages rend compte du profil de consommation des établissements et se traduit par le tracé de différentes courbes de charge journalières, hebdomadaire et annuelle.

2 Recensement des équipements de chaque commerce ou service

Afin de connaître les profils de consommation électrique de chaque commerce ou services, et donc d'en déduire leur courbe de charge, un recensement des équipements électriques présents le plus fréquemment dans ceux-ci est essentiel. Ce recensement doit permettre de connaître non seulement quels sont ces équipements, mais aussi leur temps et leurs horaires d'utilisation, ainsi que leur puissance.

Un recensement a déjà été effectué pour les supermarchés. En effet, la société ENERTECH et l'ADEME Picardie ont réalisé, en 2001, un *Diagnostic électrique d'un supermarché de moyenne surface*. Le but de cette étude était de « connaître avec précision le détail des consommations d'énergie d'un supermarché de moyenne surface non climatisé » (ENERTECH; ADEME Picardie, 2001). La liste des équipements électriques d'un supermarché, leur puissance, leur temps d'utilisation au cours de l'année, mais aussi toutes leurs courbes de charge sont disponibles dans ce diagnostic. De plus, pour chacune des deux périodes estivale et hivernale, les courbes de charge de chaque jour de la semaine ont été construites pour chaque équipement (cf. Annexe 6). Ces courbes de charge ont été obtenues grâce à une campagne de mesure sur l'ensemble des appareils d'un supermarché. Les consommations de chacun des appareils ont été mesurés avec un pas de dix minutes pendant six mois (ENERTECH; ADEME Picardie, 2001).

D'autres études portant sur les consommations électriques des commerces et services semblent avoir déjà été effectuées. Cependant, ces études ne sont pas accessibles au public car confidentielles, c'est notamment le cas pour les boucheries. EDF, en collaboration avec la Confédération Nationale des Boucheries, a effectivement étudié les différents usages électriques de ce type de commerce. Les données accessibles de cette étude se limitent à une plaquette de présentation des résultats d'une enquête réalisée au près d'une quinzaine de professionnels (ARDATmv, 2009). Cette plaquette liste, en outre, les différents équipements utilisés dans une boucherie, leur puissance et leur temps d'utilisation, soit au cours de la journée, soit au cours de la semaine (cf. Annexe 7).

Si l'étude bibliographique ne permet pas d'obtenir ces informations pour une autre catégorie de commerce, la réalisation d'une enquête au près des commerçants peut être une solution pour palier ce déficit d'informations.

3 Reconstitution des courbes de charges « réelles » des supermarchés et des boucheries

La construction des courbes de charge des commerces et services d'une ville a été réalisée en suivant la méthode décrite ci-après. Elle est composée de différentes étapes aboutissant aux différentes courbes : celles de chaque équipement de chaque catégorie de commerce ou de services, puis celles de chaque catégorie, et enfin celles représentant tous les commerces et services présents dans un quartier de la ville.

3.1 Prise en compte des types urbains

Cette étude cherche notamment à montrer les différences de consommation d'un quartier à l'autre en fonction de leur type urbain. Chaque catégorie de commerce possède donc un profil de consommation par type. Ce profil résulte du cumul des profils des usages de l'établissement (cf. Partie 2.2). Pour le cas du secteur tertiaire, les différences entre les formes urbaines ne sont pas dues aux équipements mais aux jours et aux heures d'ouverture et aux fermetures dues aux congés des commerçants. Ainsi, pour chaque équipement on établit une courbe de charge pour chaque type urbain.

3.2 Sélection des équipements les plus énergivores de chaque type de commerces ou services

Afin d'obtenir une parfaite analyse de chacun des types de commerces et services, il serait idéal de considérer l'intégralité de leurs équipements. Cependant, étant donné leur grand nombre d'appareils (48 pour le supermarché, 20 pour la boucherie), il n'est pas nécessairement utile de les analyser tous. Effectivement, la prise en compte de tous les équipements n'est pas forcément pertinente : certains équipements sont beaucoup plus énergivores ou beaucoup plus souvent utilisés que d'autres. C'est pourquoi, pour chaque catégorie de commerce, seuls les équipements qui influencent le plus la consommation globale de l'établissement sont analysés.

Pour sélectionner ces équipements, on utilise leur puissance et leur durée d'utilisation. Ces deux informations permettent de connaître la quantité d'énergie consommée par un équipement sur une période de temps donnée. En comparant leur consommation d'énergie on détermine quels appareils sont négligeables par rapport aux autres.

Pour le cas du supermarché, la consommation annuelle de chaque équipement est disponible sur le rapport de la société ENERTECH. La comparaison des machines se fait donc en fonction de cette donnée (Figure 35). Pour les boucheries, la puissance et le temps d'utilisation journalier sont disponibles, la comparaison se fait donc sur la consommation journalière des équipements (Figure 36).

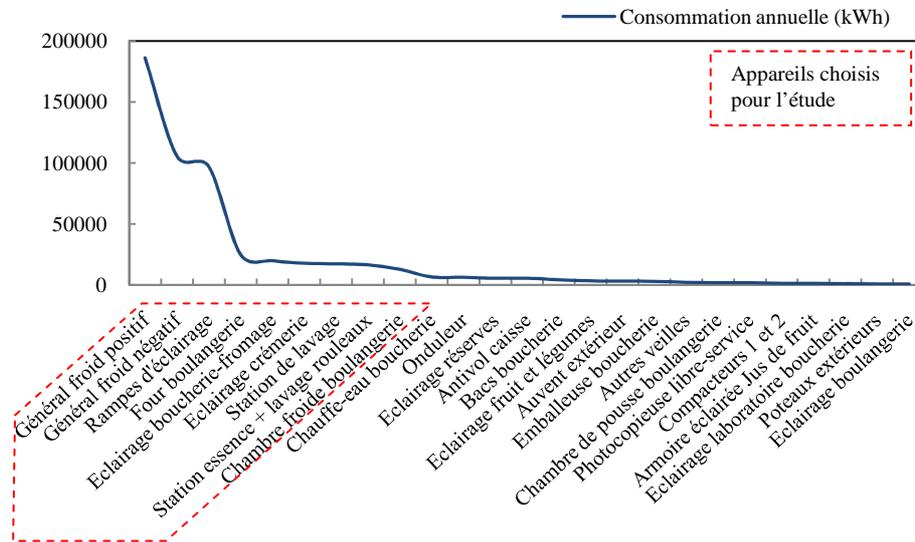


Figure 35 : Consommation annuelle des 26 appareils les plus énergivores d'un supermarché (en kWh) (ENERTECH, 2001)

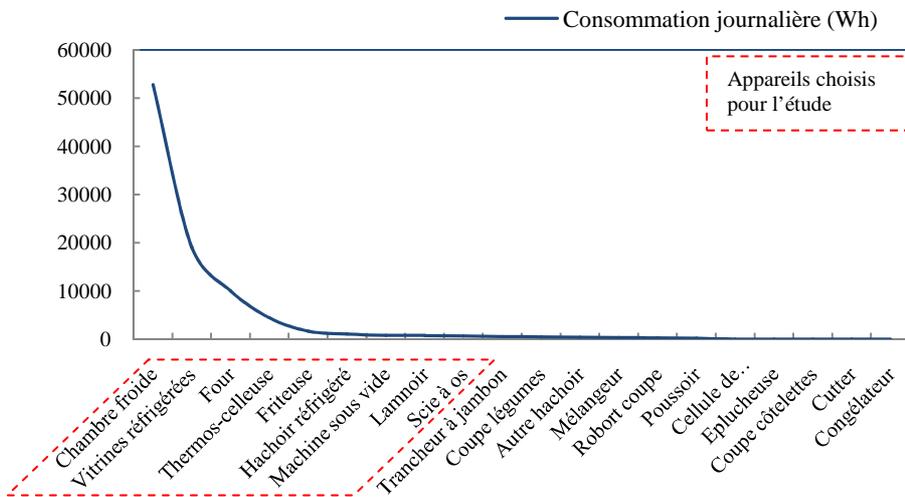


Figure 36 : Consommation journalière des appareils d'une boucherie (en Wh) (ARDATmv, 2009)

Ces graphiques permettent d'avoir une vision d'ensemble sur les consommations de chaque appareil électrique d'une catégorie de commerce. Les 9 équipements les plus énergivores d'un supermarché et d'une boucherie sont alors connus. Les équipements représentant 90% de la consommation annuelle d'un supermarché et 98% de la consommation journalière d'une boucherie sont donc analysés dans cette étude.

3.3 Construction des courbes de charges journalières de chaque équipement

Appareils fonctionnant 24h/24. Il s'agit des appareils frigorifiques. Afin de préserver les aliments qu'ils contiennent d'une rupture de la chaîne du froid, ces équipements sont perpétuellement en fonctionnement. La puissance qu'ils appellent au cours de la journée varie pour maintenir une température adéquate dans leur enceinte.

Les appareils appartenant à cette catégorie sont : le système général de froid positif, de froid négatif et la chambre froide de la boulangerie pour le supermarché ; la chambre froide et les vitrines réfrigérées pour la boulangerie. N'ayant pas d'indications précises quant aux appels de puissance générés par les équipements de la boucherie, on suppose que la chambre froide de celle-ci fonctionne de la même façon que celle de la boulangerie du supermarché. De même, on considère que les vitrines réfrigérées d'une boucherie fonctionnent comme les bacs de la boucherie des supermarchés.

La figure ci-dessous représente les courbes de charge de ces cinq appareils.

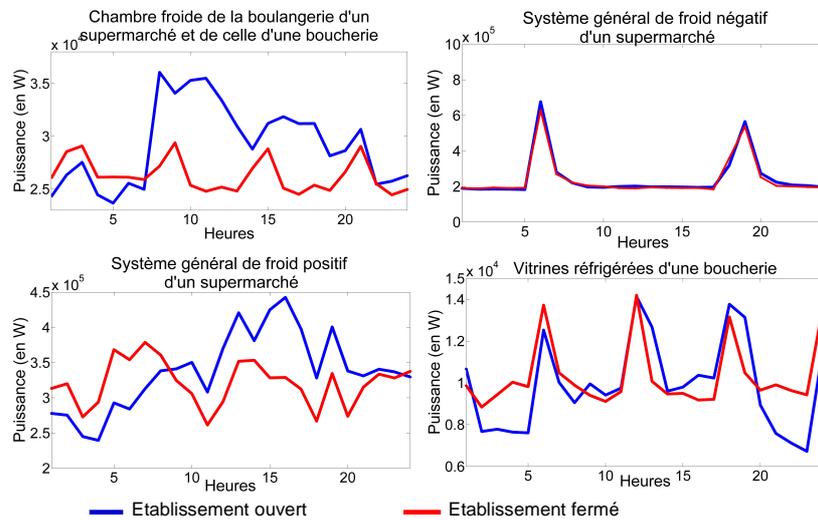


Figure 37 : Courbes de charges journalières des appareils frigorifiques d'un supermarché ou d'une boucherie

On constate que la puissance appelée au cours de la journée par ces cinq appareils est irrégulière et occasionne des pics de consommation. Ils peuvent atteindre jusqu'à plus du double de la consommation de base pendant moins de deux heures (système générale de froid négatif du supermarché). De plus, on constate qu'il existe des disparités de consommation entre les jours d'ouverture et les jours de fermeture, excepté pour le système général de froid négatif. La différence entre les deux types de profil est la plus grande pour le système de froid positif qui appelle jusqu'à 1 000 W de plus les jours d'ouverture. Les chambres froides présentent également des écarts important entre les jours d'ouverture et de fermeture, avec une différence d'appel de puissance atteignant 700 W. Ces disparités provoquent des pics et des creux de consommation au cours de la semaine voire au cours de l'année (cf. § 3.4).

Il existe plusieurs types de contrôle des appareils frigorifiques. Cependant, les usages de ces équipements ne sont pas « différables » mais « dégradables ». C'est-à-dire que la puissance appelée peut être contrôlée en modifiant sa température réelle tout en respectant la chaîne du froid (Bonduelle, et al.).

Appareils fonctionnant de manière continue lorsque le magasin est ouvert. Il s'agit des éclairages se trouvant dans les espaces destinés aux clients. En effet, pour le confort de la clientèle les éclairages sont allumés dès l'ouverture du magasin jusqu'à sa fermeture. Il s'agit également des appareils des boucheries décrits comme utilisés « toute la journée » dans le recensement des appareils de cette catégorie de commerce (cf. Annexe 7). Dans ce cas, on suppose que l'appareil est allumé à l'ouverture du magasin, éteint à sa fermeture et que durant toute sa période d'utilisation il fonctionne à sa puissance maximale. On suppose également que ces appareils ne sont pas éteints pendant la pause déjeuner.

Les appareils appartenant à cette catégorie sont : les rampes d'éclairage, l'éclairage boucherie-fromage et l'éclairage crèmerie du supermarché ; le hachoir réfrigéré et la thermos-celleuse de la boucherie.

La figure ci-après représente les courbes de charge de ces cinq appareils.

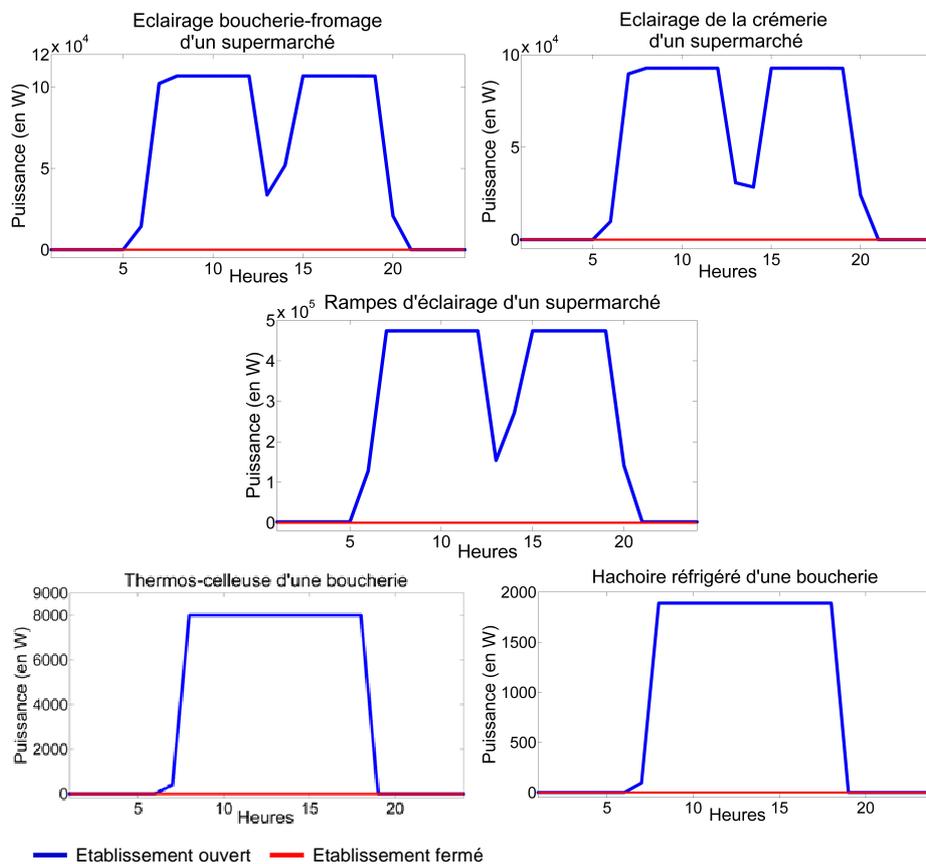


Figure 38 : Courbes de charge des appareils fonctionnant de manière continue lorsque le supermarché ou la boucherie est ouvert

Au cours de la journée la puissance appelée par ces cinq appareils est régulière et culmine autour de 100 kW pour les appareils du supermarché et à 8 ou 1,9 kW pour ceux de la boucherie. Cependant, on observe des creux de consommation dus à la pause déjeuner pour les appareils du supermarché. Ces creux correspondent à une baisse d'environ 60% de l'appel de puissance. De plus, on constate que tous ces appareils ne consomment pas d'électricité lorsque l'établissement est fermé. Ces disparités provoquent donc des pics et des creux de consommation au cours de la semaine voire au cours de l'année (cf. § 3.4).

Il est possible de moduler l'utilisation de l'éclairage. En effet, d'une façon générale il fait partie des quatre grandes catégories d'usages modulables (Bonduelle, et al.). Néanmoins, dans un supermarché le stockage d'électricité pour ce type d'usage n'est pas envisageable, puisque cette modulation est destinée aux appareils de faibles puissances (Bonduelle, et al.), ce qui n'est pas le cas de ces éclairages dont les puissances varient entre 4 et 24 kW (ENERTECH; ADEME Picardie, 2001). Par ailleurs, la surface de vente d'un supermarché est comprise entre 400 et 2 500 m² (INSEE, 2011) et les puits de lumières naturelles y sont souvent réduits, un arrêt total de la lumière dans ce type de commerce paraît donc difficile. Par conséquent, les éclairages du supermarché ne peuvent être considérés comme un usage « remis en cause », ni comme un usage « différé ». Cependant, une réduction de la puissance lumineuse ne semblant pas être nuisible pour le confort des clients et du personnel, cet usage est « dégradable ». C'est-à-dire que la puissance appelée peut être contrôlée en modifiant la luminosité.

Le hachoir frigorifique et la thermos-celleuse sont allumés tout au long de la journée, cependant leur utilisation concrète par le boucher est liée au client et à ces besoins. Ainsi, l'usage de ces deux appareils n'est pas « différé », car un décalage de l'utilisation au cours de la journée est impossible sans nuire très fortement aux exigences du client. Une étude complémentaire pourrait montrer si les autres types de modulation des usages sont possibles pour ces deux équipements.

Appareils fonctionnant de façon aléatoire au cours de la journée. Il s'agit des équipements dont l'usage dépend du besoin du client ou du commerçant. Leur usage au cours de la journée n'est donc pas constant. Pour la construction des courbes de charge des appareils de la boucherie, on suppose qu'ils sont utilisés de façon aléatoire lorsque l'établissement est ouvert et le cumul des périodes d'utilisation est égal à la moyenne du temps d'utilisation journalière.

Les appareils appartenant à cette catégorie sont : la station essence et de lavage à rouleaux, le four de la boulangerie et la station de lavage pour le supermarché ; le four, la friteuse, la machine sous vide, le laminoir et la scie à os pour la boucherie.

La figure ci-après représente les courbes de charge de ces huit appareils.

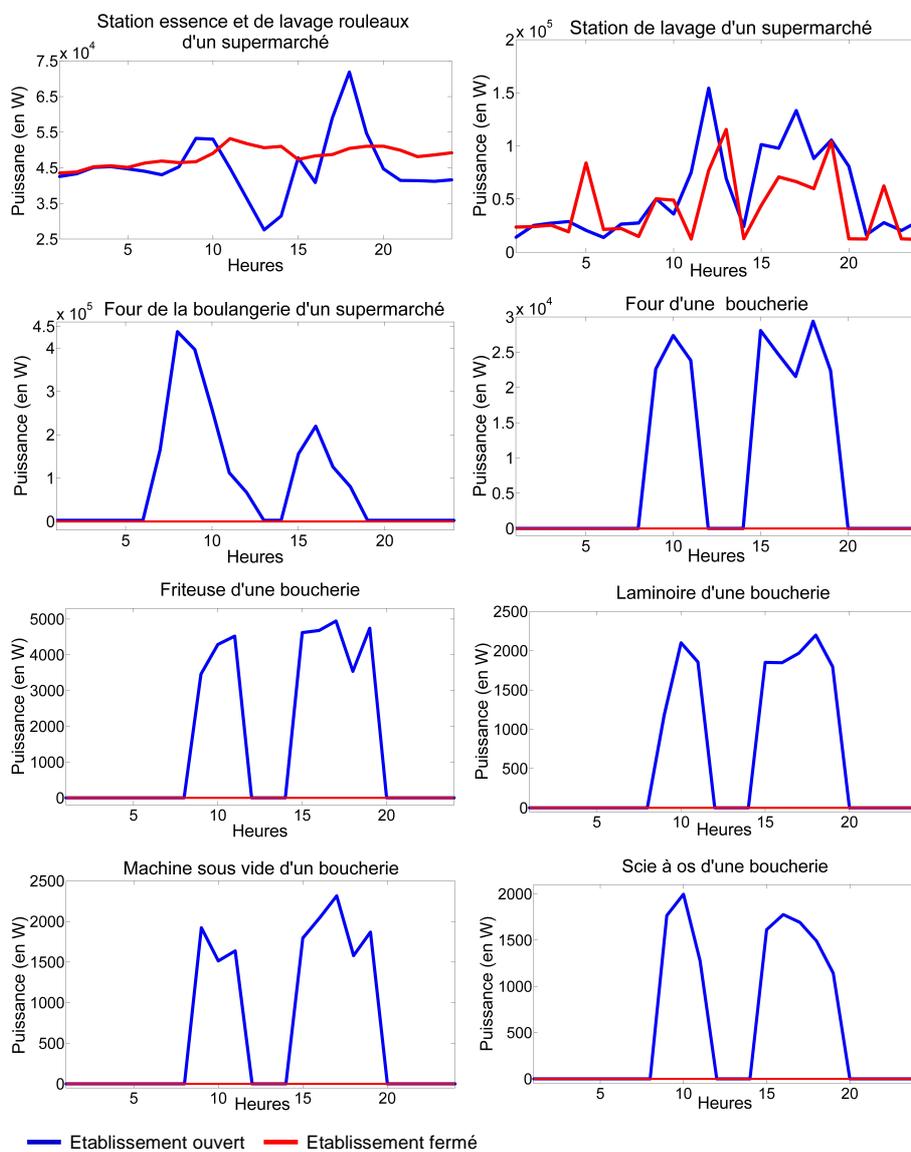


Figure 39 : Courbes de charge journalières des appareils d'un supermarché ou d'une boucherie fonctionnant de façon aléatoire au cours de la journée

La puissance appelée au cours de la journée par ces huit appareils est irrégulière et occasionne des pics de consommation au cours de la journée. De plus, on constate que la plupart de ces appareils ne consomment pas d'électricité lorsque l'établissement est fermé (excepté les stations d'essence et de lavage). Ainsi, les pics de consommations sont principalement de courtes durées (quelques heures, lorsque les boutiques sont ouvertes) et l'appel de puissance qu'ils représentent varie très rapidement de 0 à au moins 2 kW. Ces disparités entre les jours d'ouverture et de fermeture provoquent des pics et des creux de consommation au cours de la semaine voire au cours de l'année (cf. § 3.4).

L'utilisation des stations essences et de lavage et de la machine sous vide est liée aux clients et à leurs besoins. Ainsi, leur usage n'est pas « différable », car un décalage de l'utilisation au cours de la journée est impossible sans nuire très fortement aux besoins du client. Il doit être servi lorsqu'il est dans la boutique. L'utilisation des cinq autres appareils est prescrite par les objectifs de production du commerçant, c'est-à-dire par les exigences de sa clientèle. Ces équipements ne sont donc pas « différables ». Une étude complémentaire pourrait montrer si les autres types de modulation des usages sont possibles pour ces huit derniers équipements.

Bilan. Les dix-huit appareils présentés ici ne sont pas « différables ». Le *Smart Grid* ne peut donc pas effacer leur usage selon le modèle étudié ici. La consommation de tous ces appareils fait donc partie de la consommation fixe de la ville, elle reste identique après correction du *Smart Grid*. Cependant, certains de ces équipements ont un fonctionnement et une utilisation propice à d'autres types de modulation des usages.

Courbe de charge les jours où l'établissement n'est ouvert que le matin. Pour chaque équipement, un troisième type de courbe de charge peut être construit : la courbe de charge typique des jours d'ouverture exclusivement matinale. On suppose que cette courbe de charge est construite à partir d'une combinaison du profil des jours d'ouverture (de 0h à l'heure de fermeture) et du profil des jours de fermeture (de l'heure de fermeture à 24h). Ci-après l'exemple de l'éclairage de la crémèrie du supermarché.

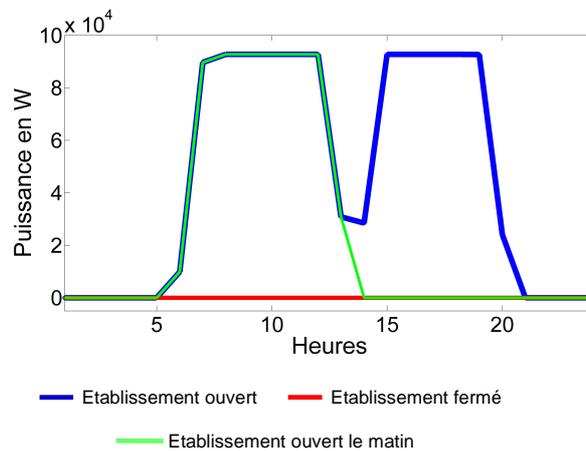


Figure 40 : Courbes de charge journalière de l'éclairage crémèrie d'un supermarché

3.4 Construction des courbes de charge hebdomadaire et annuel de chaque catégorie de commerce ou service

Courbes de charge hebdomadaire et annuelle des équipements. La construction de chacune des courbes de charge hebdomadaire ou annuelle de chaque équipement résulte de la juxtaposition des trois types de profils présentés dans le paragraphe précédent. Pour toutes les catégories de commerces, en fonction du type urbain, la correspondance entre les jours de la semaine et l'un des trois types d'ouverture (ouvert toute la journée, ouvert le matin, fermé) a été établie grâce à une enquête. Par exemple, les supermarchés de centre ancien sont ouverts toute la journée du lundi au samedi, fermé le dimanche, et ne sont jamais ouverts seulement le matin. Le profil hebdomadaire des appareils de ces supermarchés sera alors la juxtaposition de six profils d'une journée d'ouverture, suivie d'un profil d'une journée de fermeture complète. Il en est de même pour le profil annuel. Le modèle est basé sur l'année 2010, l'enchaînement des profils dépend donc du calendrier de cette année.

Courbes de charge hebdomadaire et annuelle des catégories de commerces. Le profil de consommation d'un établissement résulte de l'addition des courbes de charge des équipements utilisés dans cet établissement. Les courbes ci-après représentent les courbes de charge d'un supermarché et d'une boucherie en fonction du type urbain (Figure 41, Figure 43, Figure 45 et Figure 46).

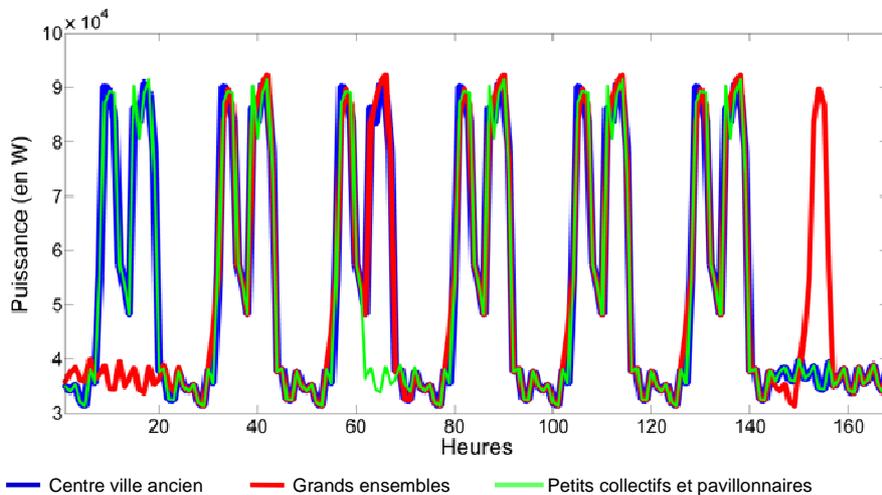


Figure 41 : Courbes de charge hebdomadaires d'une boucherie en fonction de sa localisation

On peut appréhender grâce à ces courbes les consommations électriques d'une boulangerie au cours de la semaine. On observe un double pic de consommation électrique de 900 kW les jours où elle est ouverte toute la journée, un seul pic de consommation les jours d'ouverture matinale et une base de consommation d'environ 350 kW les jours où elle est fermée.

L'influence du type urbain sur la consommation électrique des boucheries est principalement marquée par la présence ou l'absence de pic de consommation. Les horaires d'ouvertures étant similaires, l'amplitude et la forme des pics est semblables d'un type à l'autre. Cependant, les jours d'ouverture étant différents d'une typologie à l'autre, on observe que les jours sans pics de consommation sont également distincts. C'est-à-dire que les jours où il y a un déficit de consommation sont différents en fonction de type de quartier, il s'agit du dimanche pour les IRIS de type « centre ville ancien » et « petits collectifs et pavillonnaires » et du lundi pour les « grands ensembles ». De plus, si l'on considère l'intégralité des IRIS d'un même type urbain, on observe des disparités entre leur consommation induites par ce commerce de proximité (Figure 42). En effet, les pics des « grands ensembles » sont plus de cinq fois inférieurs à ceux des deux autres types urbains (400 kW contre environ 2200 kW pour le « pavillonnaires et petit collectif »). Ceci est dû au fait que les boucheries sont les moins nombreuses dans ce type de quartier (cf. Partie 3) et a pour conséquence que les deux autres types effacent celui-ci.

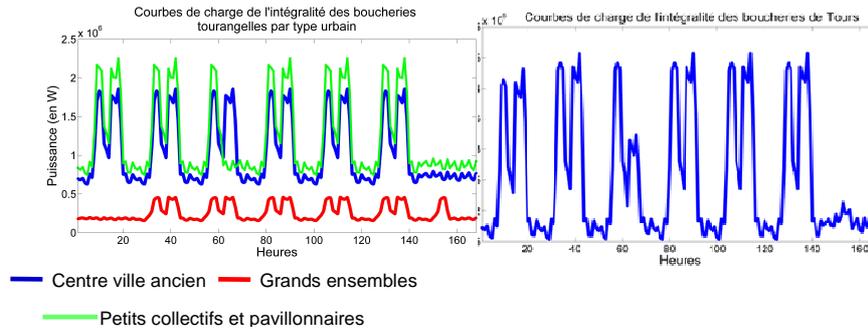


Figure 42 : Courbes de charge de l'ensemble des boucheries

Contrairement aux boucheries, les supermarchés ont des profils d'ouverture très similaires d'un type de quartier à un autre. Ici on ne peut donc pas espérer de compensation. Ces courbes permettent d'appréhender le fait les grandes surface ferment le dimanche après-midi, voire toute la journée, quelque soit le type de quartier dans lesquels ils se trouvent. La consommation électrique de la ville due aux supermarchés fera donc l'objet d'un creux de consommation tous les dimanches.

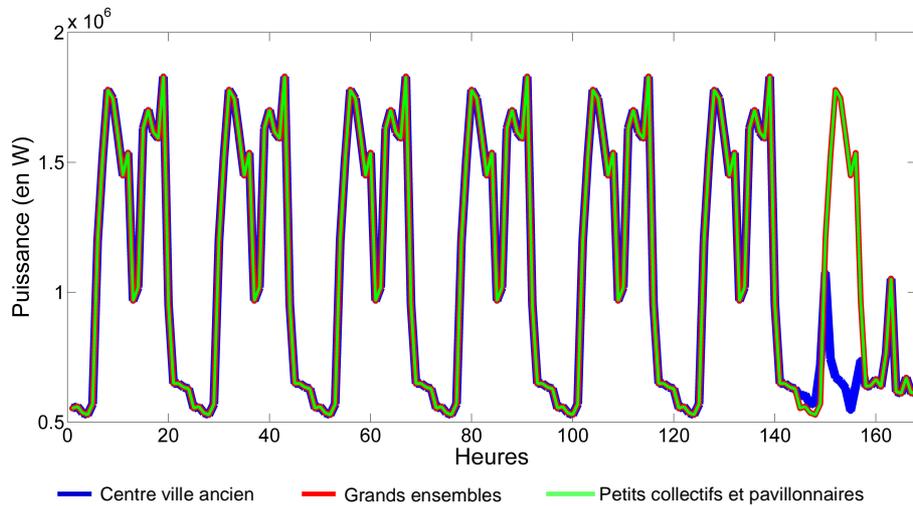


Figure 43 : Courbes de charge hebdomadaires d'un supermarché en fonction de sa localisation

Les pics de consommations engendrés par l'ensemble des supermarchés ont donc la même forme d'un type de quartier à l'autre, mais des amplitudes différentes (Figure 44). Les supermarchés des quartiers « pavillonnaires et de petits collectifs » provoquent des pics atteignant 21 000 kW, soit quatre fois plus que ceux des autres quartiers. La consommation totale des supermarchés tourangeaux est identique d'un jour à l'autre excepté le dimanche.

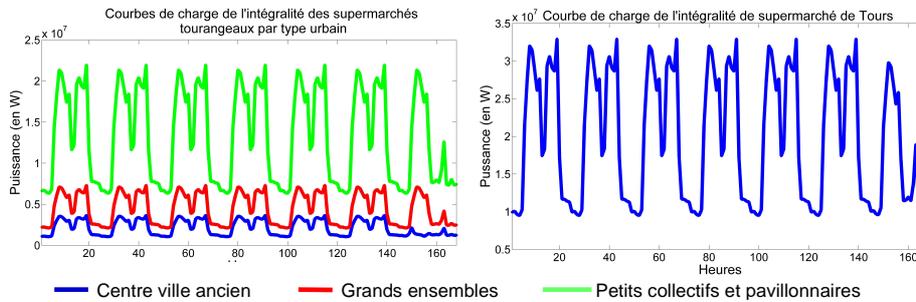


Figure 44 : Courbes de charge de l'ensemble des supermarchés

Les deux figures ci-dessous représentent respectivement les courbes de charge annuelles des boucheries et des supermarchés.

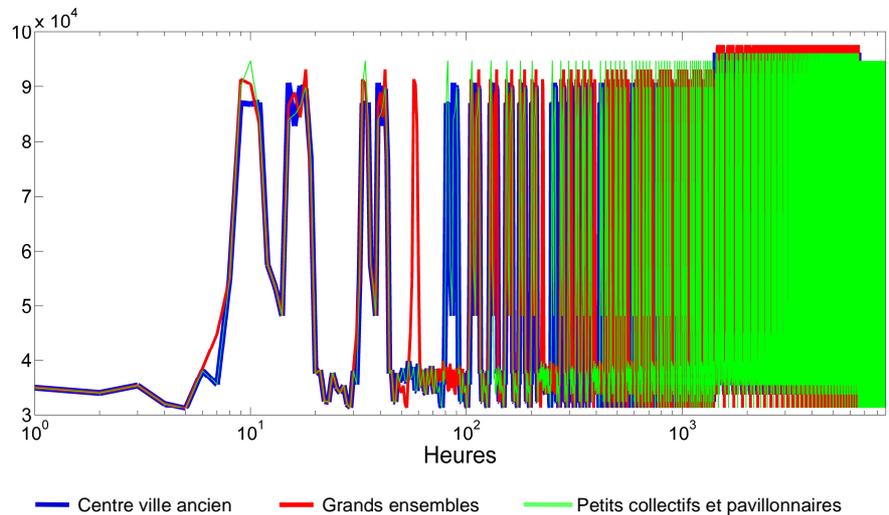


Figure 45 : Courbes de charge annuelles des boucheries en fonction de leur localisation

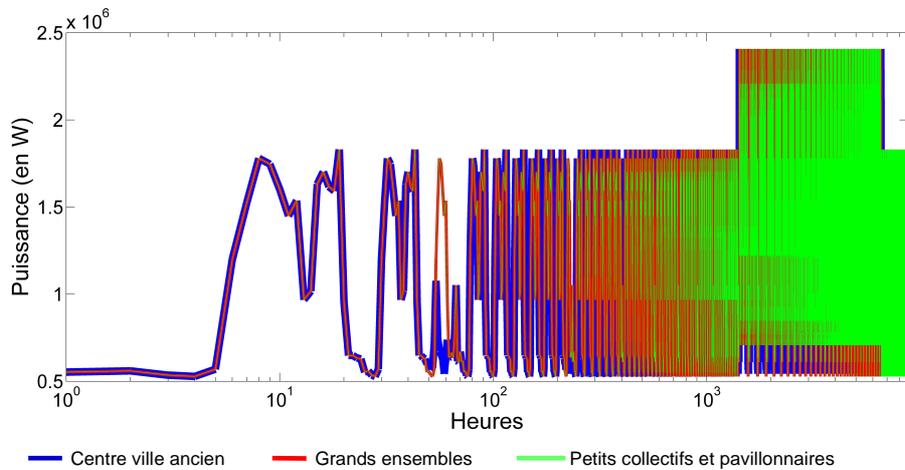


Figure 46 : Courbes de charge annuelles des supermarchés en fonction de leur localisation

Quelque soit le type de forme urbaine il apparait sur ces courbes que les boucheries et les supermarchés consomment plus d'électricité en période estivale qu'en période hivernale. Ceci est du aux appareils frigorifiques dont le besoin en énergie augmente avec la température. Cependant, l'augmentation de consommation entre ces deux périodes est beaucoup plus importante pour les supermarchés que pour les boucheries : de l'ordre de 25% d'augmentation contre environ 5%.

3.5 Construction des courbes de charge hebdomadaire et annuel d'un quartier et d'une ville

La courbe de charge d'un quartier correspond au cumule des courbes de charge des établissements présents sur son territoire. De même, la courbe de charge de la ville se fait en additionnant les courbes de tous les quartiers la composant (cf. Partie 2.2).

Afin de donner une dimension saisonnière aux courbes de charges annuelles, deux périodes de vacances au cours de l'année sont pris en compte : l'une pour la période hivernale, l'autre pour la période estivale. On suppose que ces vacances se traduisent par une consommation électrique nulle pour tous les équipements de l'établissement, y compris les appareils frigorifiques. On suppose également que ces vacances commencent de façon aléatoire pour chaque établissement. La durée et les périodes durant lesquelles elles peuvent se dérouler ne sont pas aléatoires et sont déterminées par une enquête.

Les courbes ci-après représentent les courbes de charge hebdomadaire et annuelle de la ville de Tours (Figure 47 et Figure 48).

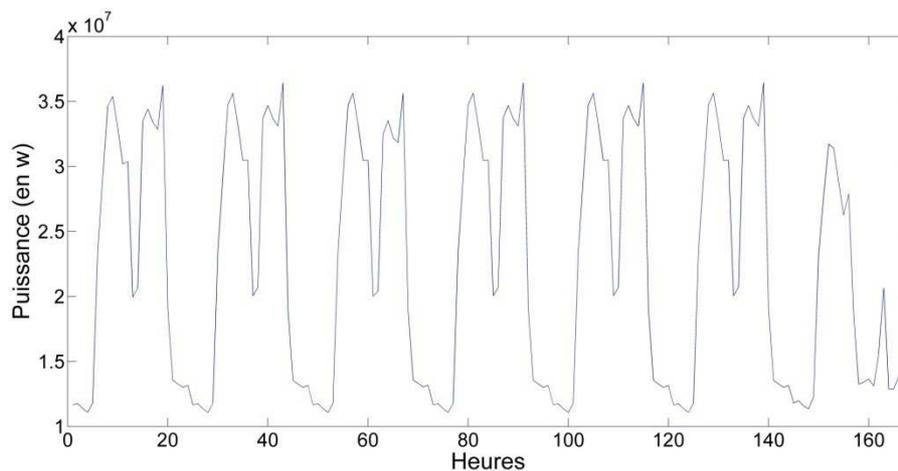


Figure 47 : Courbe de charge hebdomadaire de l'ensemble des supermarchés et boucheries de la ville de Tours

D'après la lecture de cette courbe, la consommation électrique de l'ensemble des supermarchés et boucheries de la ville de Tours est globalement identique tous les jours de la semaine, excepté le dimanche. Ces commerces ont une consommation régulière les six premiers jours de la semaine et sont à l'origine d'un creux de consommation le dimanche. Ce profil est très semblable à celui des supermarchés, la consommation de cette catégorie de commerce semble effacer celle des boucheries. Ceci s'explique par le fait que la consommation journalière de la grande surface est environ vingt fois plus grande que celle du commerce de proximité ($1,33^E6$ contre $2,74^E7$ Wh). Ainsi, bien que les boucheries soient majoritaires sur Tours (49 pour 18), leur consommation totale reste minime par rapport à celle des supermarchés.

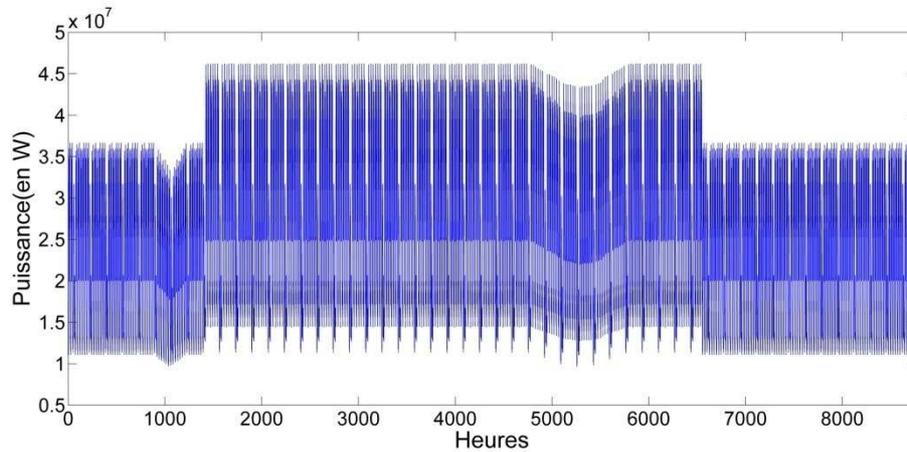


Figure 48 : Courbe de charge annuelle de l'ensemble des supermarchés et boucheries de la ville de Tours

La consommation électrique de l'ensemble des supermarchés et boucheries de la ville de Tours, représentée sur cette courbe, est irrégulière tout au long de l'année. Comme vu précédemment l'appel de puissance est plus important en période estivale qu'en période hivernale à cause des appareils frigorifiques. De plus, on observe que les périodes de vacances en février et en juillet-août provoquent des creux de consommation.

4 Conclusion

Cette étude a permis de montrer que les neufs équipements des supermarchés et des boucheries, respectivement responsables de 90% et 98% de la consommation de leur établissement, n'ont pas des usages « différables ». Le *Smart Grid* modélisé ici ne peut donc pas avoir d'effet sur ces deux catégories de commerces. Ces dernières font alors partie de la base fixe de la consommation de la ville et ne participent pas au lissage de la courbe de charge globale de la ville qui permettrait de répondre aux enjeux économiques et environnementaux recherchés.

Cependant, ce travail n'a pris en compte qu'un seul type d'effacement des usages. Il serait donc pertinent de compléter ce travail en étudiant les autres types de modulation. En effet, on a montré dans le paragraphe 3 que certains équipements de ces deux catégories de commerces possédaient des usages flexibles. Si ils sont modulés, alors les supermarchés et les boucheries ne font plus entièrement partie de la base fixe de la consommation de la ville et participent au lissage de la courbe de charge de la ville.

De plus, bien que les équipements à l'origine de la majorité de la consommation aient été étudiés, d'autres équipements ne l'ont pas été. Ces équipements peuvent avoir un usage « différé », ou être modulable d'une autre façon. Dans ce cas, même de façon minimale, ils peuvent participer au lissage de la courbe de charge globale de la ville.

Enfin ce travail doit être réitéré pour chaque catégorie de commerces présents dans une ville. Effectivement, étant donné que chaque profession a son propre matériel électrique, l'étude de chacune est essentielle. La simple étude des supermarchés et des boucheries ne permet donc pas de conclure de façon globale sur les effets d'un *Smart Grid* sur le secteur tertiaire.

Effet du type urbain sur les consommations des supermarchés et boucheries. Il ressort de cette étude que les consommations dues au secteur tertiaire de chaque type de quartier sont surtout influencées par le nombre de commerces implantés dans chacun d'entre eux et par leurs jours d'ouverture. Effectivement, les horaires sont très similaires d'une typologie à l'autre, elles créent donc peu de disparités. Le quartier comportant le plus grand nombre d'établissements effacera les autres types de quartier en imposant son profil dépendant des jours d'ouverture qui y sont pratiqués.

Partie 6. Simulation d'une production d'électricité à partir des énergies photovoltaïques et éoliennes à l'échelle de la ville de Tours, et conséquences en termes de charge sur le réseau.

Florian BOSCHET

1 Introduction

En électricité, l'offre doit satisfaire à tout moment la demande. En dépit de modèles de prévision de la consommation, la morphologie des courbes de charge nationales actuelles font que les producteurs d'électricité ont recours à des moyens de production peu flatteurs sur le plan environnemental, notamment en période de pointe de consommation. Le *Smart Grid*, technologie actuellement à l'étude et en phase de test voudrait révolutionner, la manière d'aborder l'énergie. Face aux enjeux environnementaux, énergétiques et économiques, ce réseau dit « intelligent » donnerait une flexibilité que le réseau électrique ne possède pas à l'heure actuelle. Un des objectifs serait d'intégrer de façon plus efficace les énergies renouvelables, par nature, intermittentes. De plus, une communication et une automatisation accrues des systèmes devraient déboucher sur un effacement possible de certains usages, afin d'adapter la demande à une production moins émissive en gaz à effet de serre.

La production d'électricité à partir d'énergies renouvelables comme l'éolien ou le photovoltaïque est venue troubler le dimensionnement des réseaux. Auparavant, l'électricité ne circulait que dans un sens, du distributeur au consommateur. Maintenant que ces mêmes consommateurs sont devenus producteurs, le réseau doit supporter une charge supplémentaire non prévue initialement. L'étude suivante va donc mettre en lumière les changements structurels apportés par l'intégration des énergies renouvelables produites en local. Elle s'appuiera sur la ville de Tours afin de spatialiser le propos et de donner des conclusions sur les formes urbaines.

2 Présentation des modèles

L'objectif de cette partie est de donner à l'échelle de l'Iris¹⁰ pour toute la ville de Tours la production en énergie renouvelable heure par heure sur toute l'année 2010 et la charge du réseau électrique lors de situations critiques. On considère ici les productions éolienne et photovoltaïque en faisant l'hypothèse que ces deux modes de production soient parfaitement intégrés dans tout le tissu urbain, en tenant compte de certaines limitations techniques intrinsèques à ces technologies.

¹⁰ Entité de découpage statistique de l'Insee

2.1 Détermination de la production photovoltaïque en milieu urbain

Pour déterminer le potentiel de production photovoltaïque de la ville de Tours, le modèle se base sur la surface bâtie de chaque Iris $S_{Bâti}$. (source : Direction Générale des Impôts, cadastre en fichier shape). Selon Luca Bergamasco et Pietro Asinari¹¹, plusieurs coefficients vont venir réduire ce potentiel de surface de toit.

Tout d'abord, on considère que l'installation de modules se fait uniquement sur le côté du toit le plus exposé, ce qui réduit de 50% la surface potentielle de pose des panneaux. On nomme ce coefficient $C_{pan} = 0,5$. Pour des toits plats ou en forme de dent de scie, ce coefficient de réduction serait plus élevé. Or, ces typologies de toits sont peu nombreuses sur Tours (source : vues satellites de *Google Earth*) ; ainsi à l'échelle de la ville, on considère seulement des toits à deux pans.

Un autre facteur limitant la surface de toit exploitable est la surface déjà utilisée par les cheminées, les bouches d'aération et les fenêtres de type velux ou chien assis. On estime à 5% la perte de surface disponible. D'où le coefficient $C_{couverte} = 0,05$.

Un dernier coefficient limitant le potentiel de surface pour le photovoltaïque est les ombres projetées de certains bâtiments sur le bâti alentour ou sur les toits eux-mêmes. La hauteur du bâti à Tours reste assez régulier suivant les quartiers (sources : PLU de la ville de Tours et vues satellites de *Google Earth*). Il sera admis une diminution de 10% de la surface exploitable. On pose le coefficient $C_{ombre} = 0,1$.

En ce qui concerne les panneaux en eux-mêmes, l'hypothèse émise pour leur rendement est de 10% en incluant le rendement global de l'installation, soit $\eta_{panneaux} = 0,1$.

Au final, connaissant la radiance R (en W/m^2) et la surface bâtie de la ville de Tours (ou par Iris), les coefficients ci-dessus sont appliqués pour obtenir le potentiel photovoltaïque en urbain grâce à la relation suivante :

$$Prod_{PV} = S_{Bâti} * R * C_{pan} * C_{couverte} * C_{ombre} * \eta_{panneaux}$$

Eq. 23

¹¹ Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Application to Piedmont Region (Italy), Luca Bergamasco, Pietro Asinari

2.2 Estimation de la production éolienne en milieu urbain

Pour déterminer la production éolienne possible au sein de la ville de Tours, deux paramètres sont pris en compte : le nombre de toits exploitables pour l'installation d'une éolienne et le coefficient d'emprise au sol du bâti. Suivant la densité du tissu urbain, deux modèles différents d'éoliennes sont installés. Dans les Iris du centre-ville, des micro-éoliennes¹² sont disposées uniquement sur les toits compte tenu du coefficient d'emprise au sol très élevé des bâtiments. Dans les Iris à l'extérieur du centre-ville, le coefficient d'emprise au sol plus faible laisse une plus grande surface de terrain non bâti. Des mini-éoliennes¹³ sont disposées sur ces sols non-bâties en plus des micro-éoliennes sur les toits. On fait l'hypothèse qu'aucune production n'est possible pour une vitesse de vent inférieure à 2,2m/s.

2.3 Détermination des situations critiques du réseau électrique à l'échelle de la ville de Tours¹⁴

La précision des données exploitées pour déterminer les consommations électriques implique que le réseau électrique soit défini par le découpage de la ville de Tours en Iris par l'Insee. Il est établi que chaque centroïde d'Iris rassemble la production et la consommation totale de tous les bâtiments présents au sein de celui-ci. Pour relier ces centroïdes au réseau, il est fait l'hypothèse que ces nœuds sont reliés aux nœuds les plus proches sur le réseau global de la ville de Tours. Un nœud supplémentaire est placé à l'extérieur de la ville de Tours pour désigner le réseau de distribution d'électricité.

Les scénarios incluant l'effacement de certains usages ne seront pas pris en compte. Les résultats obtenus par l'application du *Smart Grid* sur les postes de consommation (cf. Partie 2) montrent un faible impact sur la charge du réseau pendant les pics de consommation. Cette étude se basera uniquement sur l'intégration des énergies renouvelables.

Les trois situations à comparer sont l'état initial du réseau, l'application des types 1 et 2 du *Smart Grid*. Le type 1 configure le réseau de telle sorte que la production de chaque Iris est intégralement transmise au réseau central. Toute la demande est satisfaite par le réseau central. Le type 2 impose au sein de chaque Iris la consommation de la production d'énergie renouvelable faite au sein de celui-ci. Le type 3 fondé sur la mutualisation de l'énergie entre Iris n'est pas pertinent. Nous verrons dans les résultats (cf. § Partie 6.3.3) que la production d'énergie renouvelable (éolien et photovoltaïque) réalisée au sein de la ville sera supérieure à la demande seulement pendant 95 heures sur les 8760 heures de l'année, soit à peine plus de 1%.

¹² Caractéristiques de la micro-éolienne *Série Air X* : rotor de 1,2m de diamètre pour une surface balayée de 1,07m². Sa puissance nominale est de 0.4kW pour un rendement de 31%.

¹³ Caractéristiques de la mini-éolienne *Whisper H40* : rotor de 2,1m de diamètre pour une surface balayée de 3,58 m². Sa puissance nominale est de 0.72 kW.

¹⁴ Voir l'annexe 8 sur la création du réseau à l'échelle de la ville de Tours.

Plusieurs moments clés vont être à étudier pour le réseau : la charge de celui-ci sera observée, d'une part, à des moments extrêmes comme les pics de consommation (Scénario 1) et de production (Scénario 2), et d'autre part, à l'instant où la somme de la consommation et de la production est maximale (Scénario 3). L'énergie annuelle cumulée sur le tronçon le plus chargé sera également comparée entre les 3 situations, afin de déterminer l'efficacité d'intégration des énergies renouvelables au sein du réseau (Scénario 4).

3 Une production insuffisante vis-à-vis des besoins d'une ville

3.1 Une production photovoltaïque qui satisfait difficilement les besoins, même aux heures les plus ensoleillées de l'année.

Grâce au scénario de recouvrement des toits de la ville de Tours, une surface de 1 536 560m², soit 154ha, est mobilisable pour la production photovoltaïque. La production photovoltaïque possède un effet de saison, dû à l'ensoleillement et à la durée du jour plus importante en haute saison. Cet effet se retrouve également sur la courbe journalière, traduction de la trajectoire solaire quotidienne.

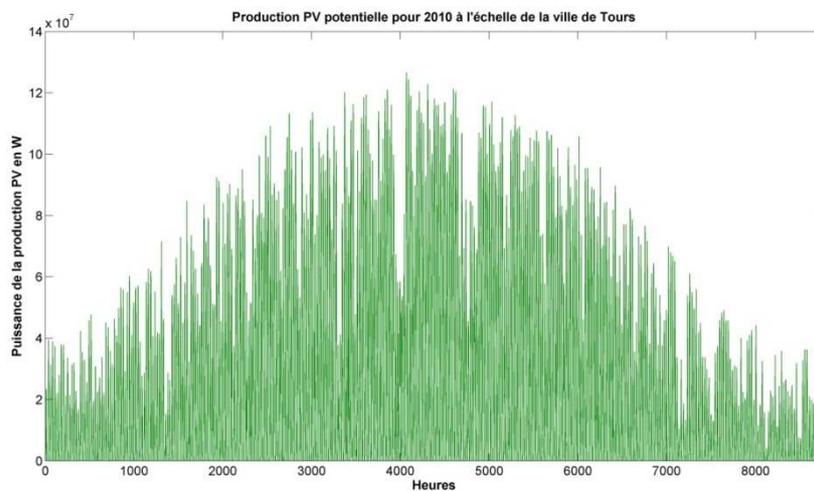


Figure 49 Production PV potentielle pour 2010 à l'échelle de la ville de Tours

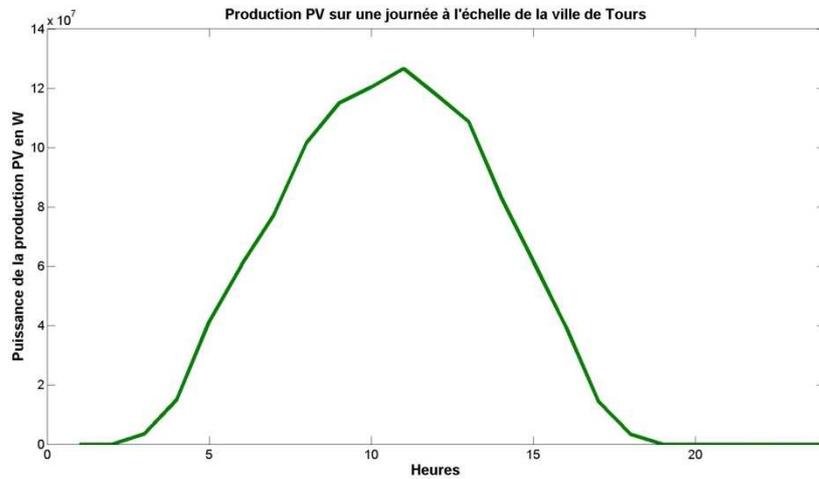


Figure 50 : Production PV sur une journée à l'échelle de la ville de Tours

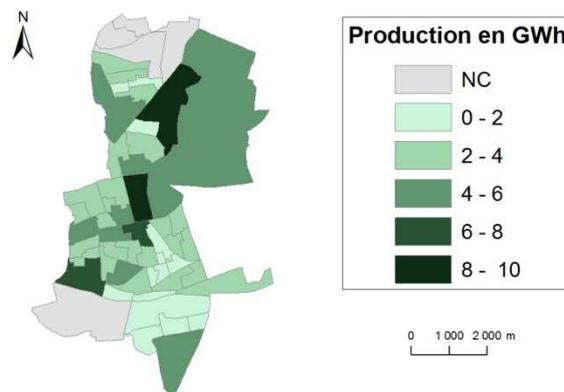


Figure 51 - Energie annuelle produite par le photovoltaïque en 2010 par Iris

D'après la carte ci-dessus, les quartiers composés de grands ensembles comme Le Sanitas, les Rives du Cher ou Les Fontaines ont une production très faible. La surface exploitable pour poser des panneaux est très faible, de par la morphologie des quartiers. Si la hauteur des immeubles est élevée, l'Iris qui se base sur le nombre d'habitants possèdera moins d'immeubles pour accueillir un nombre équivalent de ménages. Par conséquent, la surface de toits sera moindre que dans des Iris recevant la même population, avec une hauteur de bâti moins élevé. La production de l'iris central de Tours est importante malgré le fait que le tissu urbain soit dense. Cet écart est dû à la présence de commerces et de services au sein des bâtiments, apportant ainsi une surface de toit exploitable plus importante pour un nombre d'habitants similaires.

En milieu dense, les besoins ne peuvent être satisfaits. En se plaçant dans des milieux plus ouverts où le bâti a moins de chances de générer de l'ombre sur lui-même, il y aurait possibilité d'accroître la production. Des panneaux supplémentaires pourraient recouvrir en plus des toits des pans de murs verticaux correctement orientés et lorsqu'il n'y a pas de mitoyenneté des immeubles, dépasseraient des toits d'une certaine longueur (de l'ordre de 1m). Une difficulté supplémentaire qui apparaît est l'acceptabilité par la population et les élus d'un tissu urbain recouvert de ces panneaux.

3.2 Une production éolienne urbaine très insuffisante

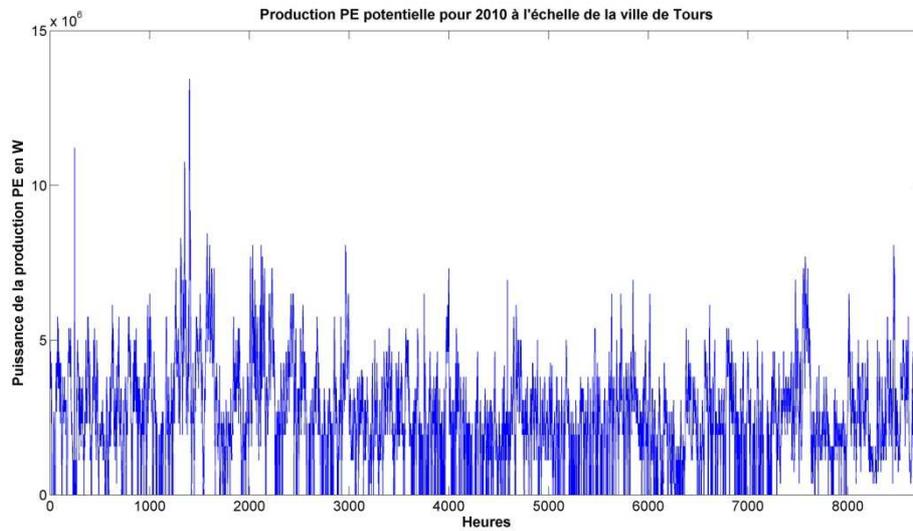


Figure 52 : Production PE potentielle pour 2010 à l'échelle de la ville de Tours

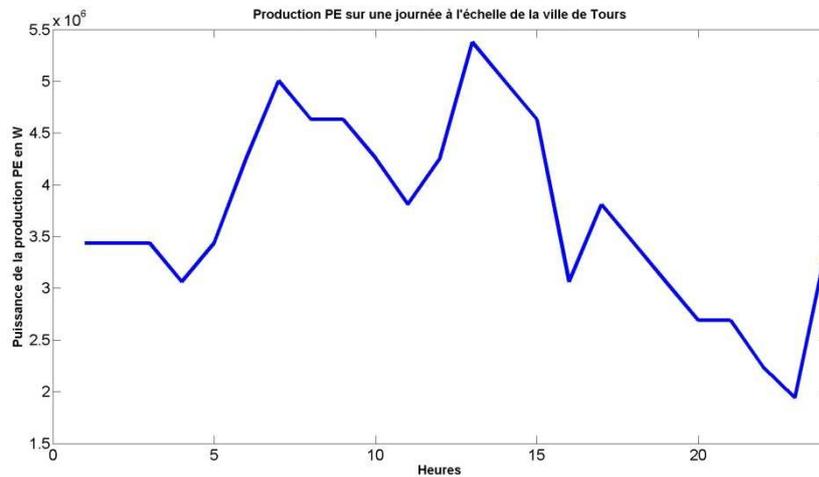


Figure 53 : Production PE sur une journée à l'échelle de la ville de Tours

La production acquise reste très faible comparée à la technologie photovoltaïque et aux consommations de la ville. L'éolien en urbain n'est pas une solution envisageable vis-à-vis de la densité d'habitants. Il ne peut répondre seulement qu'à quelques Iris selon les moments de la journée sur les 53 constituants Tours. Néanmoins, la production éolienne est plus étendue sur une journée que celle utilisant la technologie photovoltaïque. En effet, d'après les hypothèses de production de l'éolien et du photovoltaïque, on obtient respectivement 2808 et 4428 heures d'inactivité, soit 32 % contre 51 % du temps annuel.

La carte ci-dessous montre la quantité d'énergie produite par l'éolien urbain pour l'année 2010 à Tours. En installant des micro-éoliennes dans les tissus denses, la production est anecdotique. Le coefficient d'emprise au sol du bâti étant important, il n'est pas possible d'améliorer la situation pour ces quartiers. Le quartier Sainte-Radegonde possède le plus grand potentiel dans les conditions de l'étude, car le scénario propose sur les parties de terrain non-bâties des mini-éoliennes, plus productives que les micro-éoliennes.

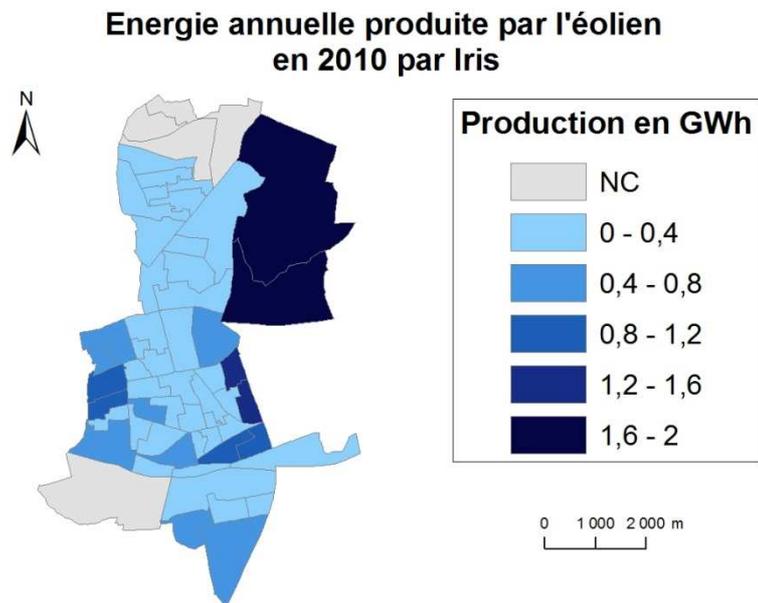


Figure 54 - Energie annuelle produite par l'éolien en 2010 par Iris

3.3 La somme des deux productions, dominée par le photovoltaïque

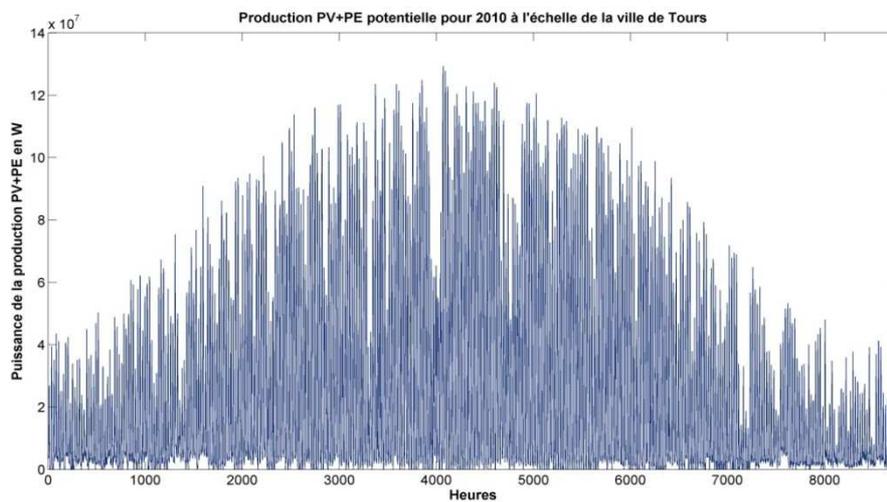


Figure 55 : Production PV+PE potentielle pour 2010 à l'échelle de la ville de Tours

Le premier point est que globalement, la production provenant de l'éolien ne change pas la puissance totale obtenue. En revanche, on note que la production est surélevée et qu'elle est plus fréquemment non nulle. En effet, le photovoltaïque ne pourra fonctionner que pendant la journée alors que le vent souffle plus régulièrement, quel que soit le moment de la journée. L'énergie produite à partir de sources renouvelables ne suffit pas à donner l'indépendance énergétique. Même en additionnant l'éolien et le photovoltaïque, aucune énergie n'est produite sur 876 heures, soit 10% du temps annuel. Certes, la cumulation de ces deux énergies donne plus de chances d'apporter une solution d'appoint fréquente, mais c'est la seule possibilité à envisager si on se fixe sur un seul territoire.

Deuxièmement, en comparaison avec la courbe de consommation, l'énergie produite arrive à satisfaire la demande d'électricité sur un laps de temps très court pendant l'année, de l'ordre de 95 heures sur les 8760 heures de l'année. La ville ayant satisfait ses besoins, le reste de la production doit être distribuée au réseau global. La charge du réseau reste très modeste dans ces conditions, de l'ordre de 4 Mw.

Le troisième point est qu'il paraît difficile pour le *Smart Grid* de procéder à des effacements pour adapter la demande à l'offre dans ces conditions. Les courbes de production obtenues ont une forme chaotique. En intégrant la production à la consommation, il semble peu plausible de ne pas toucher au confort des consommateurs lorsque les usages seront différés.

3.4 La charge induite par la production et la consommation sur le réseau électrique : un gain important dans le cas d'une mutualisation

La charge du réseau se concentre sur l'arc qui fait la jonction entre la ville de Tours et le réseau central, point de destination (voir figure ci-dessous). L'intégration des énergies renouvelables sans consommation locale ajoute une contrainte supplémentaire au réseau électrique. Celui-ci était prévu initialement pour la distribution. Le type 1 du *Smart Grid* n'est pas avantageux sur ce principe. Dès le moment où de la production est possible, la charge est plus importante que dans l'état initial, sans les énergies renouvelables. L'instant où le maximum de la somme de la consommation et de la production est atteint est la situation la plus désavantageuse pour le type 1, qui cumule les deux charges. La puissance appelée à cet instant sur le tronçon du réseau le plus contraint passe de 107 MW à l'état initial à 237 MW.

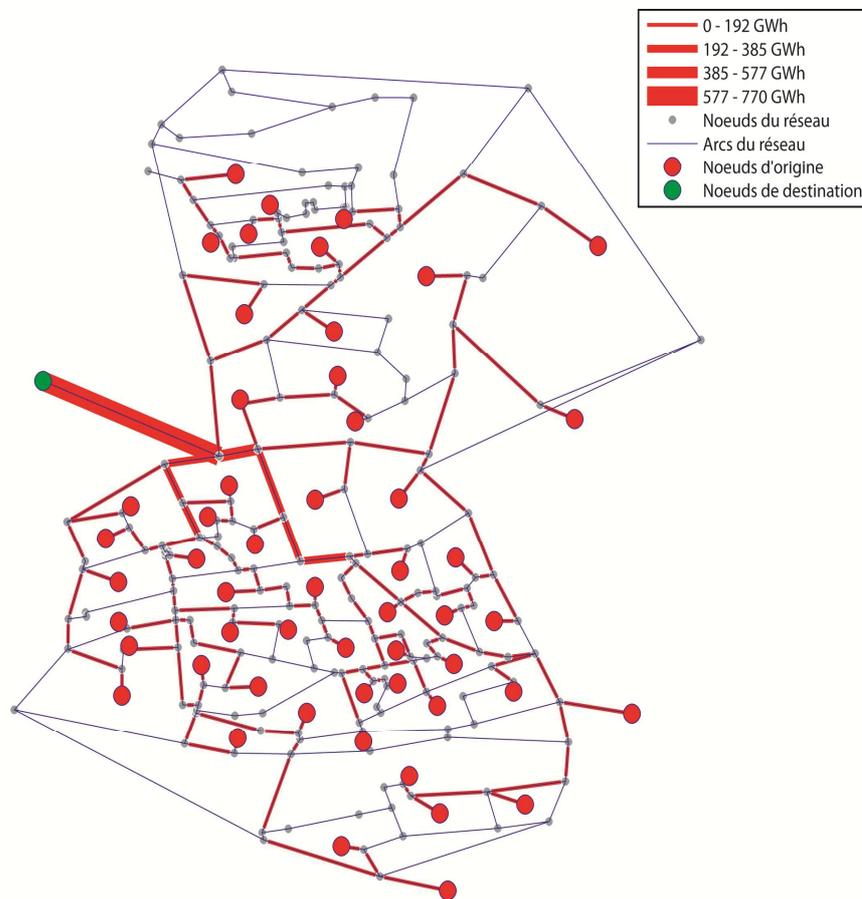


Figure 56 - Energie annuelle cumulée sur les tronçons du réseau électrique de la ville de Tours

Le type 2 rend possible une consommation locale et instantanée des énergies renouvelables grâce à une mesure plus fine de la demande en électricité à tout instant. Les résultats, récapitulés dans le tableau ci-dessous, montrent qu'un nouvel investissement des réseaux pour faire face à l'augmentation de la consommation électrique n'est pas nécessaire lorsque la production est consommée localement. En effet, l'appel de puissance au réseau central n'est plus aussi important dans ces conditions. Dans la situation critique de la pointe de consommation, le Type 2 permet de réduire de près de 20% la charge du tronçon le plus sollicité du réseau, grâce aux énergies renouvelables utilisée en local.

Tableau 6 - Récapitulatif des différents scénarios d'intégration du *Smart Grid* avec leurs gains respectifs

Scénarios	Type <i>Smart Grid</i>	Charge du réseau induite par	Max. Charge réseau (MW)	Gain/ Etat Initial	Gain/Type de SG1
Scénario 1 - Pointe Consommation T=6396h	Aucun	Consommation	199		
	1	Consommation + Production	238	- 19.57%	
	2	Consommation - Production	160	19.58%	32.74%
Scénario 2 - Pointe Production T=4069h	Aucun	Consommation	107		
	1	Consommation + Production	237	- 120.45%	
	2	Consommation - Production	58	46.37%	75.67%
Scénario 3 - Maximum (Conso. + Prod.) T=4453h	Aucun	Consommation	124		
	1	Consommation + Production	310	- 150.07%	
	2	Consommation - Production	47	61.83%	84.74%

Scénarios	Type <i>Smart Grid</i>	Charge du réseau induite par	Energie Charge réseau (GWh)	Gain/ Etat Initial	Gain/Type de SG1
Scénario 4 - Energie annuelle cumulée	Aucun	Consommation	770		
	1	Consommation + Production	961	- 24.73%	
	2	Consommation - Production	609	20.94%	36.62%

4 Détermination de la puissance d'une centrale de production basée sur une énergie renouvelable en dehors de la ville de Tours

Il sera envisagé dans cette partie de construire une centrale de production à partir d'énergies renouvelables à l'extérieur de la ville de Tours. Dans la suite du rapport, elle sera nommée « production régionale ». D'après les valeurs de consommation et de production urbaine obtenues par le modèle (cf. parties individuelles), la puissance de production à considérer pour répondre aux besoins de Tours en plus de la production urbaine est $P_{régionale} = 6.638 * 10^7 W$. Cependant, l'énergie produite à l'aide des énergies renouvelables photovoltaïques et éoliennes ne peut suffire à donner l'indépendance énergétique de la commune. En effet, sur les 8760 heures de l'année, aucune énergie n'est produite sur 876 heures, soit 10% du temps. Il est donc impossible de se baser uniquement sur cette centrale. En revanche, et c'est l'objet de cette partie, la surface requise pour recourir uniquement aux énergies renouvelables sur un certain nombre d'heures dans l'année va être déterminée.

4.1 Installation d'une centrale basée uniquement sur une production photovoltaïque

Dans cette partie est considérée qu'une centrale de production d'électricité constituée de panneaux photovoltaïques est installée à l'extérieur de la ville de Tours. Soit $S_{centralePV}$ la surface de la centrale en ha.

Dans le premier scénario, la puissance $P_{régionale} = 6.638 * 10^7 W$ pour assurer à Tours son indépendance énergétique est souhaitée seulement au moment où la production photovoltaïque rencontre les meilleures conditions. $P_{régionale} = 6.638 * 10^7 W$ est atteinte le 19 juin à 12h avec $S_{centralePV} = 80,5 ha$. Sachant que la ville de Tours a une surface de 3303 ha, $S_{centralePV}$ représente 2,4% de la surface de la commune. Cette situation paraît plausible si l'on considère uniquement la surface brute requise, mais le projet perd tout son sens quand on sait que la production répondra aux consommations à un instant unique dans l'année et sera sous-dimensionnée le reste du temps.

Dans le deuxième scénario, la puissance requise $P_{régionale} = 6.638 * 10^7 W$ est voulue dès le moment où la production photovoltaïque est possible, c'est-à-dire 49,4% du temps sur l'année 2010. $P_{régionalePV} = 6.638 * 10^7 W$ est obtenue sur 4332 heures avec $S_{centralePV} = 221 266 ha$. Une telle surface est évidemment totalement absurde à envisager car elle représente près de 67 fois la surface de la ville de Tours et 1/3 de la surface moyenne d'un département français.

Le tableau ci-dessous présente des cas intermédiaires en fonction du % de temps annuel sélectionné.

Tableau 7 - Présentation des surfaces requises pour le champ photovoltaïque en fonction du % de temps annuel choisi

Puissance de production à atteindre : $6.638 * 10^7$ W			
% du temps annuel où cette puissance est atteinte	Limite de la radiance (W/m ²)	Surface requise de panneaux photovoltaïques(ha)	% de la surface de la ville de Tours
0.001%	82.44	81	2.44%
1%	71.25	93	2.82%
10%	44.4	150	4.53%
20%	26.5	250	7.58%
30%	14.7	452	13.67%
40%	5.64	1 177	35.63%
49%	0.03	221 267	6698%

Le meilleur ratio production/surface de panneaux photovoltaïques à installer se situe aux alentours de 20% du temps annuel. Au-delà, la consommation de terrain explose car en considérant un laps de temps plus grand, la luminance moyenne reçue diminue fortement. Enfin, il reste à savoir comment gérer les moments de surproduction qui vont générer des charges dans le réseau alors que la demande en électricité au sein de la ville aura été satisfaite.

4.2 Installation d'une centrale basée uniquement sur une production éolienne

Dans cette partie est considérée qu'une centrale de production d'électricité constituée de d'éoliennes est installée à l'extérieur de la ville de Tours. Soit $S_{centralePE}$ la surface de la centrale en ha. Pour les besoins de ce scénario, les éoliennes sont dimensionnées avec un rotor de 50m de diamètre et elles ne produisent pas d'énergie en dessous d'une vitesse de vent de 3m/s. Elles sont espacées d'une distance de 223m¹⁵ et disposées suivant un plan en damier. Une éolienne réquisitionne ainsi une surface $S_{éolienne}=49\ 729m^2$.

D'après la loi de Betz, la puissance maximale P récupérable par les pales d'une éolienne sont fonction du diamètre du rotor et de la vitesse du vent. Ces paramètres sont liés par l'équation suivante :

$$P = 0,29 * D^2 * V^3$$

Eq. 24

A la relation ci-dessus s'applique le rendement du mécanisme lors de la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique pour extraire la puissance de sortie de l'éolienne. Ce coefficient sera nommé $\eta_{système}$.

¹⁵ A. Laali (EDF - R&D - Flux, revue des ingénieurs Supélec, N° 213 avril 2001)

$$\eta_{\text{système}} = \eta_{\text{hélice}} * \eta_{\text{réducteur}} * \eta_{\text{alternateur}} * \eta_{\text{transformateur}} * \eta_{\text{redresseur}} * \eta_{\text{batteries}} * \eta_{\text{pertes de lignes}}$$

Eq. 25

Tableau 8- Valeurs retenues pour les différents rendements du système

$\eta_{\text{système}}$	0,25
$\eta_{\text{hélice}}$	0,5
$\eta_{\text{réducteur}}$	0,9
$\eta_{\text{alternateur}}$	0,9
$\eta_{\text{transformateur}}$	0,95
$\eta_{\text{redresseur}}$	0,95
$\eta_{\text{batteries}}$	0,7
$\eta_{\text{pertes de lignes}}$	0,95

Il sera fait l'hypothèse d'une linéarité des rendements de chaque élément, quelle que soit la vitesse de rotation de l'hélice. La puissance de production provenant d'une éolienne est obtenue grâce à l'expression suivante.

$$P_{\text{éolienne}} = 0,29 * D^2_{\text{Rotor}} * V^3_{\text{vent}} * \eta_{\text{système}}$$

Eq. 26

Dans le premier scénario, la puissance $P_{\text{régionale}} = 6.638 * 10^7 W$ pour assurer à Tours son indépendance énergétique est souhaitée seulement au moment où la production éolienne rencontre les meilleures conditions. $P_{\text{régionalePE}} = 6.638 * 10^7 W$ est atteinte le 28 février à 17h avec $S_{\text{centralePE}} = 312 ha$. Sachant que la ville de Tours a une surface de 3303 ha, $S_{\text{centralePV}}$ représente 9,45% de la surface de la commune. Dans ce scénario, le projet n'a pas de sens vis-à-vis de l'espace consommé.

Dans le deuxième scénario, la puissance requise $P_{\text{régionale}} = 6.638 * 10^7 W$ est voulue dès le moment où la production éolienne est possible, c'est-à-dire 57% du temps sur l'année 2010. $P_{\text{régionalePE}} = 6.638 * 10^7 W$ est obtenue sur 4963 heures avec $S_{\text{centralePE}} = 67 454 ha$. Une telle surface est évidemment totalement absurde à envisager car elle représente plus de 20 fois la surface de la ville de Tours et 11% de la surface moyenne d'un département français.

Le tableau ci-dessous présente des cas intermédiaires en fonction du % de temps annuel sélectionné.

Tableau 9 - Présentation des surfaces requises pour le champ éolien en fonction du % de temps annuel choisi

Puissance de production à atteindre : $6.638 * 10^7$ W				
% Temps annuel où cette puissance est atteinte	Minimum Vitesse du vent (m/s)	Nombre éoliennes requises	Surface requise par le champ éolien (ha)	% de la surface de la ville de Tours
0.001%	18	63	312	9.45%
1%	9.3	455	2 264	68.5%
10%	6.2	1537	7 642	231%
20%	5.1	2761	13 730	416%
30%	4.1	5314	26 425	800%
40%	3.6	7850	39 036	1182%
50%	3.1	12293	61 134	1851%
57%	3.0	4894	67 454	2042%

Le meilleur ratio production/surface du champ éolien se situe aux alentours de 20% du temps annuel. Contrairement au champ constitué de panneaux photovoltaïques, la surface requise est très élevée dès le départ, mais la distribution des vents fait que l'éolien devient moins consommateur d'espace que le photovoltaïque à partir de 46% du temps annuel où l'indépendance énergétique est assurée.

Dans les deux cas de figure, que ce soit avec l'éolien ou le photovoltaïque, il n'est pas raisonnable de consommer de l'espace vierge pour une production qui ne répondra pas en permanence aux besoins des usagers. Ce sont des énergies intermittentes et elles ne peuvent être qu'une source d'appoint. Il est nécessaire de se concentrer sur l'espace déjà urbanisé pour ces deux types d'installations.

Conclusion

La production d'énergies renouvelables ne peut remplacer les autres sources pour deux raisons : la première, c'est que la courbe obtenue est beaucoup trop chaotique et il paraît impossible de générer autant d'effacements des usages sans toucher au confort des consommateurs. La deuxième, c'est que cette production ne pourra satisfaire la demande et ce, quelle que soit la puissance de l'installation. En effet, l'éolien et le photovoltaïque ne peuvent produire 100% du temps de par la nature des conditions météorologiques. Les énergies renouvelables en urbain ne peuvent donc servir que d'appoint. Il est plus pertinent d'utiliser l'espace déjà urbanisé et d'exploiter les surfaces de toit, invisibles aux yeux des habitants dans des milieux denses et plats comme le centre-ville de Tours, surtout lorsque les hauteurs de bâtiment sont homogènes par quartier. Le Plan Local d'Urbanisme peut donc jouer sur ce tableau pour rendre plus discret les installations solaires et éoliennes.

En ce qui concerne le réseau électrique et la charge de celui-ci, l'application du *Smart Grid* donne des résultats convaincants. Un investissement pour augmenter la capacité des infrastructures de transport d'électricité ne serait plus nécessaire à moyen terme. Si l'intégration des énergies renouvelables est assurée, l'augmentation continue de la demande en électricité pourra être absorbée.

Le modèle développé établit une production d'énergies renouvelables dans le cas le plus optimiste. En effet, il ne tient pas compte des coûts des installations. De plus, il faut prendre en considération le fait que les nuisances sonores et esthétiques dues aux installations d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques peuvent impliquer des réticences auprès du grand public et/ou des élus. Dans ces conditions, la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables est réduite. Enfin, certaines approximations sont faites dans les facteurs de correction dans la production, notamment les ombres projetées des immeubles sur des panneaux photovoltaïques. Il serait intéressant d'affiner ces données pour approcher un modèle de production plus réaliste.

Partie 7. Les scénarios : évaluation des effets du *Smart Grid* (Tableau 10)

1 Détermination des scénarios selon le type de production renouvelable

Les scénarios présentés dans cette partie ont pour objectif d'évaluer les effets du *Smart Grid* sur l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau et sur la réduction des pics de consommation.

Deux types de production renouvelable peuvent être mise en place pour la ville: une production urbaine et éventuellement une production régionale (photovoltaïque et éolienne). La production urbaine est une production au sein des espaces urbanisés sous la forme de panneaux solaires sur les toits, de microéoliennes et d'éoliennes domestiques. Une production régionale peut être ajoutée à cette production urbaine par la mise en place de champs photovoltaïques et éoliens en dehors de la ville (cf. Partie 1). Quatre grandes catégories de scénarios résultent du type de production renouvelable :

- Catégorie 1 : pas de production renouvelable
- Catégorie 2 : une production photovoltaïque et éolienne en milieu urbain
- Catégorie 3 : une production photovoltaïque et éolienne en milieu urbain, à laquelle une production régionale éolienne est ajoutée.
- Catégorie 4 : une production photovoltaïque et éolienne en milieu urbain, à laquelle une production régionale solaire est ajoutée.

Chaque catégorie présente un état initial sans *Smart Grid* permettant d'évaluer son effet sur l'effacement des pics de consommation. Un état initial commun aux catégories (Etat initial 1) sans production renouvelable, ni *Smart Grid* permet de voir l'impact de l'intégration des énergies renouvelables.

Deux types d'effacement auraient pu être réalisés, l'un à l'échelle de l'IRIS et l'autre de la ville. La catégorie 1 évalue l'impact de ces deux types d'effacement. On constate qu'un effacement à l'IRIS est plus avantageux. Néanmoins, les deux situations ont une différence d'indicateurs de dispersion faible compris entre 0 et 1,5%. L'échelle d'effacement est donc négligeable. Les autres scénarios seront réalisés à l'échelle de Tours car le modèle présente moins d'hypothèses de calcul.

Tableau 10 : Description des scénarios et résultats

		Consommation de la ville de Tours	Production photovoltaïque en milieu urbain	Production éolienne en milieu urbain	Production Régionale éolienne	Production Régionale solaire	Type de <i>Smart Grid</i>	Indicateur de dispersion	Effacement des pics de consommation	Intégration des énergies renouvelables
CAT 1	Etat initial 1	+	-	-	-	-	Pas de SG	8,981E +14	/	/
	Scénario 1	+	-	-	-	-	Effacement Tours	8,961E +14	0,22%	/
	Scénario 1 bis	+	-	-	-	-	Effacement IRIS	8,859E +14	1,36%	/
CAT 2	Etat initial 2	+	+	+	-	-	Pas de SG	7,97E+ 14	/	/
	Scénario 2	+	+	+	-	-	Type 3 (Tours)	7,944E +14	0,33%	11,55%
CAT 3	Etat initial 3	+	+	+	-	+	Pas de SG	1,441E +15	/	/
	Scénario 3	+	+	+	-	+	Type 3 (Tours)	1,438E +15	0,21%	-60,12%
CAT 4	Etat initial 4	+	+	+	+	-	Pas de SG	7,998E+14	/	/
	Scénario 4	+	+	+	+	-	Type 3 (Tours)	7,961E +14	0,46%	11,36%

2 L'indicateur de dispersion, évaluateur des effets du *Smart Grid*

L'indicateur de dispersion mesure l'écart entre la courbe de charge d'un scénario et la courbe de référence (cf. §Partie 2.1.3).

Effet du *Smart Grid* sur l'effacement. La différence entre les indicateurs d'un scénario et celui de son état initial permet d'évaluer l'effet du *Smart Grid* sur l'effacement des pics de consommation. Ces valeurs sont comprises entre 0,21% et 1,36%. L'effet du réseau intelligent sur l'effacement des pics est donc faible. La figure ci-dessous illustre son effet.

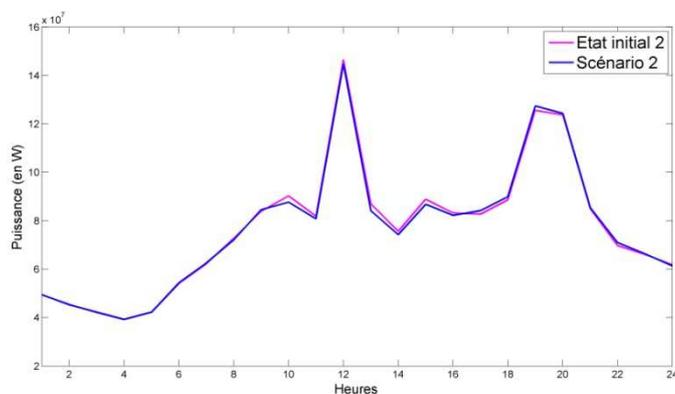


Figure 57 : Courbe de charge journalière du scénario 2 et de son état initial à l'échelle de Tours

Cette inefficacité peut s'expliquer par un faible nombre d'appareils « différables » : trois sur vingt-sept, en raison de la prise en compte du confort des consommateurs. Ces appareils différables représentent 18,8% de l'énergie totale appelée en un an. Bien que l'énergie que représentent ces équipements soit non négligeable, le nombre d'appareils et donc le nombre de reports possibles reste faible. D'autres types d'effacement pourraient être envisagés pour d'autres appareils tels que la remise en cause, la dégradation et le stockage des usages.

Effet du *Smart Grid* sur l'intégration des énergies renouvelables. La comparaison des indicateurs de dispersion des scénarios à celui de l'état initial 1 (pas de production renouvelable, ni de *Smart Grid*) permet d'évaluer l'intégration des énergies renouvelables. Ces valeurs sont approximativement de 11% pour les scénarios 2 et 4. Ceci s'explique par une réponse à la demande couverte en partie par les énergies renouvelables. Pour le scénario 3 l'indicateur est de -60%. Cette dernière valeur est due à une production en énergie renouvelable qui dépasse la demande à certaines heures de l'année. Comme l'illustre la Figure 58, les scénarios 2 et 4 ont une production renouvelable raisonnable, contrairement au scénario 3 où elle est trop importante. L'intégration de cet excédant déstabilise le réseau. Le *Smart Grid* permet donc d'intégrer une certaine quantité d'énergie renouvelable, mais cette intégration est limitée sous peine de le rendre inefficace.

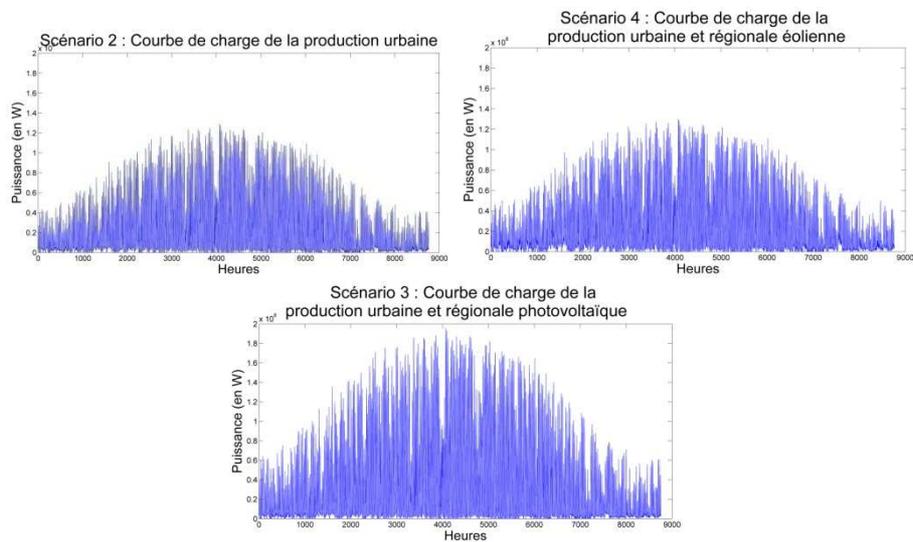


Figure 58 : Courbes de charges des productions renouvelables selon les scénarios

La figure ci-dessous montre les courbes de charge des différents scénarios.

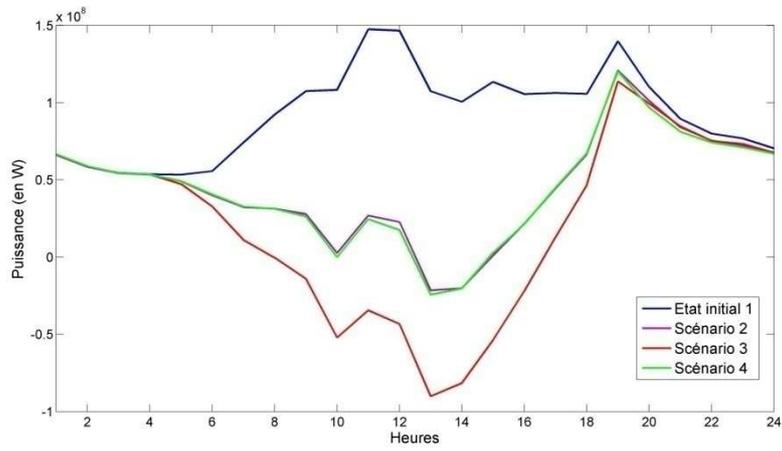


Figure 59 : Courbe de charge du jour le plus ensoleillé de l'année après application des différents scénarios

Le scénario 3 comprend une production régionale photovoltaïque qui dépasse largement la consommation pour le jour le plus ensoleillé de l'année. Cette surproduction crée un pic inversé.

Conclusion

Le modèle développé dans cette étude prend en compte la consommation des logements, des supermarchés et des boucheries, ainsi qu'une production renouvelable urbaine et/ou régionale. Le *Smart Grid* a trois effets: l'intégration des énergies renouvelables, qui est limitée ; l'effacement des pics de consommation, qui est peu efficace ; et le soulagement de la charge sur le réseau, ce qui éviterait un surdimensionnement de celui-ci.

Le modèle a pour vocation de représenter les consommations réelles d'une ville. Néanmoins, sa réalisation a nécessité des simplifications, telles que la seule prise en compte des équipements les plus énergivores. Parmi ces équipements, seuls ceux ne modifiant pas le confort des usagers ont été différés, ce qui représente une part faible d'appareils. De même, tous les commerces et services n'ont pas été pris en compte. Ceci limite les possibilités d'effacement et donc l'efficacité du système. De plus, un seul moyen de réduction des pics a été utilisé, alors que les équipements qui ne sont pas « différables » peuvent parfois être modulés d'autres manières (dégradation, remise en cause, stockage). Tous ces types de modulation pourraient être accompagnés de systèmes d'automatisation simplifiant au consommateur la régulation de sa demande. Ces technologies sont à développer et à commercialiser. En outre, l'effacement annuel a été la seule méthode retenue pour cette étude, d'autres périodes auraient pu être envisagées (hebdomadaires, saisonnières).

Le consommateur est une composante essentielle du *Smart Grid* par sa capacité à effacer ses usages. Néanmoins, elle est faible en raison du mode de vie actuel que les consommateurs ne sont pas prêts à changer. Dans de telles conditions, l'efficacité du système est minime. Au-delà du développement de nouvelles technologies, la population doit être davantage impliquée dans le fonctionnement du réseau intelligent. Ainsi, la maîtrise de la demande en énergie, en passant par l'information de l'utilisateur, doit-elle être un service public ? Cette question soulève l'enjeu de la précarité énergétique. Les services d'affichage de l'information peuvent être définis par le privé, mais être financés, pour les moins solvables, par une politique à vocation sociale de l'énergie. Les nouvelles technologies ne sont souvent accessibles qu'aux populations les plus aisées, alors que le *Smart Grid* apporterait davantage de bénéfices aux populations les plus démunies. Une autre interrogation soulevée concerne la vie privée du consommateur. Qui doit avoir accès aux informations collectées par les compteurs communicants ? Il est essentiel que la population accède à ces informations, car c'est grâce à elles qu'elle pourra mieux maîtriser sa consommation. De plus, ces informations doivent respecter la vie privée, car elles donnent des indications sur le mode de vie de l'utilisateur. Ces dernières peuvent facilement être utilisées comme moyen de surveillance ou autres actes malveillants. Alors que les discussions actuelles tendent vers une installation obligatoire des compteurs communicants pour 2017, une législation pour la protection des données personnelles devrait être inévitable.

La libéralisation du marché de l'électricité en Europe entraîne une multiplication des acteurs et donc une gestion plus complexe que dans le cas d'un acteur unique. La privatisation modifie la logique du marché laissant tous les acteurs tirer un profit monétaire, soit au niveau de la production, de la distribution, de l'information, ou de l'effacement.

Cette libéralisation du marché et l'arrivée du *Smart Grid* soulèvent une question de taille, celle de savoir qui doit gérer l'ensemble de ce système. Ne faudrait-il pas qu'il soit géré par une personne neutre afin que son jugement ne soit pas faussé par des motivations économiques ?

Le mode de production permettant de déterminer la courbe de référence est le nucléaire car il est le moins émissif en gaz à effet de serre. Néanmoins, ce type de production présente d'autres inconvénients : la pollution des sols par le stockage des déchets ou par les fuites de réacteurs ; la contamination des cours d'eau et l'augmentation de leur température mettant en péril leurs écosystèmes. De plus, ces installations présentent des risques d'accidents majeurs pouvant avoir des conséquences écologiques et économiques mondiales.

La disparition des énergies fossiles entraînera une augmentation de l'utilisation de l'électricité, notamment avec la généralisation de la voiture électrique. Ce nouveau poste de consommation pourrait engendrer des pics supplémentaires. Cependant, la voiture électrique peut représenter un avantage pour le réseau intelligent, en offrant de nouvelles conditions d'effacement par le stockage. Dès lors, quel serait l'impact du véhicule électrique sur l'efficacité du *Smart Grid* ?

Bibliographie

ADF, ADEME, Enertech. Avril 2008. *Campagne de mesures des appareils de production de froid et des appareils de lavage dans 100 logements, PROJET : AEE2008.* Avril 2008.

Alan S. Fung, Adam Aulenback, Alex Ferguson, V. Ismet Ugursal. 2003. *Standby power requirements of household appliances in Canada.* 2003.

Antoine BONDUELLE, David DA SILVA, Bruno DUPLESSIS, Pascale LE STRAT. 2009. *PROJET PROBAT 4 : Maîtrise de la demande d'électricité et contrôle des courbes de charge.* 2009.

ARDATmv. 2009. Etat de lieux des équipements et de la consommation électrique. [Fiche d'information des actualités d'ARDATmv]. Paris : s.n., Mars 2009. 1, p. 6.

Beauvisage, Thomas. 2009. *Computer usage in daily life.* 2009.

Bonduelle, Antoine, et al. Projet PROBAT 4 - Maitrise de la demande d'électricité et contrôle des courbes de charge. *Energies Demain - Amine.* p. 93.

—, *Projet PROBAT 4 - Maitrise de la demande d'électricité et contrôle des courbes de charge.* *Energies Demain - Amine.* p. 93.

Brown, Hilary E., Suryanarayanan, Siddharth et Heydt, Gerald T. 2010. Some characteristics of emerging distribution systems considering the Smart Grid initiative. *The Electricity Journal.* Juin 2010, Vol. 23, 5, pp. 64-75.

Chassin, David P. 2010. What can the Smart Grid do for you? And what can you do for the Smart Grid? *The Electricity Journal.* Juin 2010, Vol. 23, 5, pp. 57-63.

Consommation et mode de vie : Le modèle alimentaire français contribue à limiter le risque d'obésité. **Gabriel TAVOULARIS, Thierry MATHÉ. Septembre 2010.** Septembre 2010, CREDOC.

CRE. NC. Smart Grids - CRE. [En ligne] NC NC NC. <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?rubrique=monde&srub=europe>.

—, **2010.** Observatoire des marchés. *CRE - Commission de Régulation de l'Energie.* [En ligne] Quatrième trimestre 2010. [Citation : 21 Avril 2011.] http://www.cre.fr/fr/marches/observatoire_des_marches.

Dessajan, Séverine. Faire la cuisine : analyses pluridisciplinaires d'un nouvel espace de modernité. pp. 78-87.

EDF veut faire payer les économies d'énergie réalisées par ses clients. **Bezot, Jean-Michel. 2009.** s.l. : Le Monde, 21 Juillet 2009.

EDF, ADEME, Enertech. Mars 2005. *Campagne de mesure éclairage : 50 logements dans un immeuble à Bordeaux et parties communes.* Mars 2005.

ENERTECH; ADEME Picardie. 2001. *Diagnostic électrique d'un supermarché de moyenne surface.* Amiens : s.n., 2001. p. 82.

Hledik, Ryan. 2009. How green is the Smart Grid? *The Electricity Journal.* Avril 2009, Vol. 22, 3, pp. 29-41.

INSEE. 2011. Définitions - Supermarché. *INSEE.* [En ligne] 17 Mars 2011. [Citation : 11 Mai 2011.] <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/supermarche.htm>.

—, 2011. Définitions - Supermarché. *INSEE*. [En ligne] 17 Mars 2011. [Citation :
11 Mai 2011.]
<http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/supermarche.htm>.

—, 2011. Définitions e - Supermarché. *INSEE*. [En ligne] 2011.

Laville, Sophie et Lesgards, Valérie. 2009. Vers la 5^e énergie. Clamart : EDF R&D, Avril 2009.

Lukas G. Swan, V. Ismet Ugursal. 2009. *Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques*. 2009.

MEDDTL. 2011. Energie et climat - Production d'énergie. *Ministère de l'écologie, du développement durable, des transport et du logement*. [En ligne] 10 Mars 2011. [Citation : 3 Mai 2011.] Le parc électrique français est dans son ensemble, grâce au nucléaire, l'un des moins émetteurs en Europe avec annuellement 0,4t. CO2/habitant, contre 3,6t. CO2/habitant pour l'Allemagne..

—, 2011. Energie et climat - Production d'énergie. *Ministère de l'écologie, du développement durable, des transport et du logement*. [En ligne] 10 Mars 2011. [Citation : 3 Mai 2011.] Le parc électrique français est dans son ensemble, grâce au nucléaire, l'un des moins émetteurs en Europe avec annuellement 0,4t. CO2/habitant, contre 3,6t. CO2/habitant pour l'Allemagne..

Médiamétrie. Février 2010. *Les façons de regarder la télévision changent, la mesure d'audience avance*. Février 2010.

Michael Cochran, Jared Goodnight, Bruce Babin, Steve Eckels. 2009. *Condensing dryers with enhanced dehumidification using surface tension elements*. 2009.

Miller, Eric. 2009. Renewables and the Smart Grid. *Renewable Energy Focus*. Mars-Avril 2009, Vol. 10, 2, pp. 67-69.

NC. 2009. Smart grids - a smart idea? *Renewable Energy Focus*. Septembre-Octobre 2009, Vol. 10, 5, pp. 62-67.

Persson, Tomas. 2007. *Dishwasher and washing machine heated by a hot water circulation loop*. 2007.

RTE. 2009. *Bilan prévisionnel : de l'équilibre offre-demande d'électricité en France*. 2009.

Sénat. 2010. Sénat - Vidéo. *Sénat - Un site au service des citoyens*. [En ligne] 1 Décembre 2010. <http://videos.senat.fr/video/videos/2010/video6835.html>.

SNPTV. 2009. *bilan de l'audience TV et de la publicité TV du 1er semestre 2009*. 2009.

Sofres, OCHA, Taylor Nelson. Juin 2002. *Repas de famille*. Juin 2002.

tns. 2010. *La cuisine "fait maison" et sa relation avec le PME*. 2010.

Table des figures

Figure 1 : Schématisation des trois types de <i>Smart Grid</i>	30
Figure 2 : Courbe de charge de la production électrique nucléaire en France en 2010 (Source : RTE).....	31
Figure 3 : Exemples de courbes de charge reconstruites grâce au modèle.....	32
Figure 4 : Modèle de mise en place d'un <i>Smart Grid</i>	33
Figure 5 : Schéma simplifié du modèle.....	37
Figure 6 : Taux d'équipement par décile en 2006 (INSEE, Enquête Budget de famille)	39
Figure 7 : Répartition des déciles par IRIS (INSEE, 2007).....	40
Figure 8 : Nombre de ménage fiscaux par IRIS (INSEE, 2007)	41
Figure 9 : Consommation annuelle des logements par IRIS	42
Figure 10 : Répartition des types urbains de la ville de Tours	43
Figure 11 : Répartition et consommation électrique annuelles des boucheries sur l'agglomération de Tours (INSEE, 2009)	43
Figure 12 : Répartition et consommation électrique annuelle des supermarchés à Tours (INSEE, 2009).....	44
Figure 13 : Consommation des boucheries et des supermarchés de Tours par IRIS	45
Figure 14 : Consommation totale de la Tours par IRIS.....	46
Figure 15 . Classement des équipements en fonction de la Puissance multipliée par la durée d'utilisation	51
Figure 16 : Courbe de charge horaire des réfrigérateurs avec distinction entre les saisons et les lieux d'implantation. SOURCE: ADEME, EDF, ENERTECH, AVRIL 2008	52
Figure 17 : Profil d'usage du réfrigérateur sur l'année	53
Figure 18 : Courbe de charge horaire des congélateurs avec distinction entre les saisons et les lieux d'implantation des appareils. Source: ADEME, EDF, ENERTECH, Avril 2008.....	53
Figure 19 : Profil d'usage du congélateur sur l'année.....	54
Figure 20 : Loi de probabilité du lave-linge. Source: ADEME, EDF, ENERTECH, Avril 2008.....	54
Figure 21 : Profil d'usage de la machine à laver sur 24 heures pour l'IRIS 101	55
Figure 22 : Profil d'usage du sèche-linge sur 24 heures pour l'IRIS 101	55
Figure 23 : Loi de probabilité du lave-vaisselle. Source: ADEME, EDF, ENERTECH, Avril 2008.....	56
Figure 24 : Profil d'usage du lave-vaisselle sur 24 heures pour l'IRIS 101	56
Figure 25 : Loi de probabilité de l'éclairage. Source: ADEME, EDF, ENERTECH, Mars 2005	57
Figure 26 : Profil d'usage de l'éclairage sur 24 heures pour l'IRIS 101	57
Figure 27 : Profil de prise des repas des français (en abscisse les heures et en ordonné le pourcentage). Source: CREDOC, enquête CCAF 2007.....	58
Figure 28 : Profil d'usage de la cuisinière sur 24 heures en semaine (à gauche) et en weekend (à droite) pour l'IRIS 101	58

Figure 29 : Profil d'usage de l'ordinateur sur 24 heures pour l'IRIS 101	59
Figure 30 : Profil d'usage de la télévision sur 24 heures en semaine (à gauche) et en weekend (à droite) pour l'IRIS 101	60
Figure 31 : Courbe de charge journalière pour l'IRIS 101	61
Figure 32 : Courbe de charge journalière différenciant les postes de consommation pour l'IRIS 101	61
Figure 33 : Courbe de charge sur une année en échelle logarithmique pour l'IRIS 101	62
Figure 34 : Courbes de charge totale des logements et des appareils différables..	63
Figure 35 : Consommation annuelle des 26 appareils les plus énergivores d'un supermarché (en kWh) (ENERTECH, 2001)	68
Figure 36 : Consommation journalière des appareils d'une boucherie (en Wh) (ARDATmv, 2009).....	68
Figure 37 : Courbes de charges journalières des appareils frigorifiques d'un supermarché ou d'une boucherie.....	69
Figure 38 : Courbes de charge des appareils fonctionnant de manière continue lorsque le supermarché ou la boucherie est ouvert	71
Figure 39 : Courbes de charge journalières des appareils d'un supermarché ou d'une boucherie fonctionnant de façon aléatoire au cours de la journée.....	73
Figure 40 : Courbes de charge journalière de l'éclairage crèmerie d'un supermarché	75
Figure 41 : Courbes de charge hebdomadaires d'une boucherie en fonction de sa localisation.....	76
Figure 42 : Courbes de charge de l'ensemble des boucheries	77
Figure 43 : Courbes de charge hebdomadaires d'un supermarché en fonction de sa localisation.....	78
Figure 44 : Courbes de charge de l'ensemble des supermarchés	78
Figure 45 : Courbes de charge annuelles des boucheries en fonction de leur localisation.....	79
Figure 46 : Courbes de charge annuelles des supermarchés en fonction de leur localisation.....	79
Figure 47 : Courbe de charge hebdomadaire de l'ensemble des supermarchés et boucheries de la ville de Tours	80
Figure 48 : Courbe de charge annuelle de l'ensemble des supermarchés et boucheries de la ville de Tours	81
Figure 49 Production PV potentielle pour 2010 à l'échelle de la ville de Tours ...	86
Figure 50 : Production PV sur une journée à l'échelle de la ville de Tours.....	87
Figure 51 - Energie annuelle produite par le photovoltaïque en 2010 par Iris	87
Figure 52 : Production PE potentielle pour 2010 à l'échelle de la ville de Tours..	88
Figure 53 : Production PE sur une journée à l'échelle de la ville de Tours	89
Figure 54 - Energie annuelle produite par l'éolien en 2010 par Iris	90
Figure 55 : Production PV+PE potentielle pour 2010 à l'échelle de la ville de Tours.....	90
Figure 56 - Energie annuelle cumulée sur les tronçons du réseau électrique de la ville de Tours.....	92
Figure 57 : Courbe de charge journalière du scénario 2 et de son état initial à l'échelle de Tours	101

Figure 58 : Courbes de charges des productions renouvelables selon les scénarios	102
Figure 59 : Courbe de charge du jour le plus ensoleillé de l'année après application des différents scénarios	103

Table des tableaux

Tableau 1 : Tranche de revenu des déciles en 2006 (INSEE).....	40
Tableau 2 : Pourcentage de la population de Tours par IRIS.....	41
Tableau 3 : Horaires des boucheries en fonction du type urbain.....	44
Tableau 4 : Horaires des supermarchés de Tours en fonction du type urbain.....	44
Tableau 5 . Caractérisation des équipements par leur puissance et leur durée d'utilisation par jour	51
Tableau 6 - Récapitulatif des différents scénarios d'intégration du <i>Smart Grid</i> avec leurs gains respectifs.....	93
Tableau 7 - Présentation des surfaces requises pour le champ photovoltaïque en fonction du % de temps annuel choisi	95
Tableau 8 - Valeurs retenues pour les différents rendements du système.....	96
Tableau 9 - Présentation des surfaces requises pour le champ éolien en fonction du % de temps annuel choisi	97
Tableau 10 : Description des scénarios et résultats	100

Table de annexes

Annexe 1.:	Carte des IRIS de Tours	121
Annexe 2.:	Détermination du nombre d'équipement par IRIS	122
Annexe 3.:	Détermination du profil d'usage de la machine à laver.....	123
Annexe 4.:	Détermination du profil d'usage de l'éclairage	125
Annexe 5.:	Détermination du profil d'usage de la cuisinière	125
Annexe 6.:	Fiches descriptive des équipements étudiés	126
Annexe 7.:	la création du réseau électrique	144

Table des matières

Avertissement.....	9
Formation par la recherche et projet de fin d'études en Génie de l'Aménagement	11
Remerciements.....	13
Sommaire	15
Introduction.....	19
Partie 1. Introduction au <i>Smart Grid</i>	21
1 Le <i>Smart Grid</i> : une réponse aux enjeux environnementaux, énergétiques et économiques ?	21
2 Les objectifs du <i>Smart Grid</i>	22
3 Le <i>Smart Grid</i> et son développement dans le monde	23
3.1 Les <i>Smart Grids</i> , une technologie innovante.....	23
3.2 Le lancement de la technologie aux Etats-Unis.....	24
3.3 Le bilan en Europe.....	25
3.4 Le développement en France.....	26
3.5 Retour sur la technologie <i>Smart Grid</i>	27
4 Les objectifs de l'étude	28
Partie 2. Modélisation dynamique des consommations et des productions électriques d'une ville.....	29
1 Un modèle simulant l'implantation d'un <i>Smart Grid</i>	29
1.1 ...intégrant la production renouvelable locale.....	29
1.2 ...limitant les émissions de gaz à effet de serre.....	30
1.3 ...Conceptualisant une dynamique de la demande	31
2 Schématisation du modèle	32
2.1 Modélisation à l'échelle d'une ville	32
Echelle du site de consommation :	34
Echelle de l'îlot :	34
Echelle de la ville :	35
2.2 Modélisation à d'autres échelles.....	36
3 De l'usage à l'effacement	37
Partie 3. Analyse du territoire selon les données d'entrée du modèle.....	39
1 Les logements, des consommateurs d'énergie	39

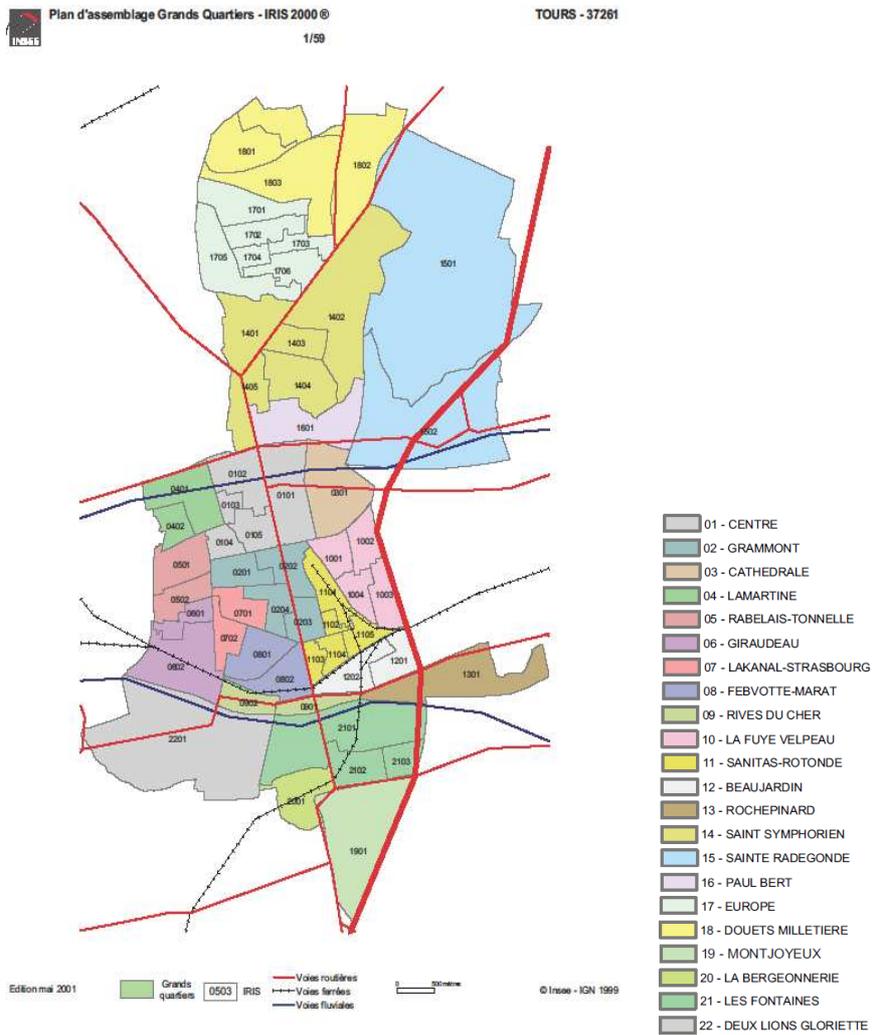
1.1	Tours, une commune aisée induisant un taux d'équipement élevé...	39
1.2	Une consommation dépendant du nombre d'équipements des ménages	41
2	L'étude des commerces et services, d'autres composant de la consommation d'une ville.....	42
3	La consommation totale à l'échelle urbaine, fortement marquée par les supermarchés	45
Partie 4.	Simulation de la consommation des usages spécifiques au sein d'un IRIS	47
1	Introduction.....	47
2	Les modèles existants : deux grands groupes dépendant des données d'entrée	47
2.1	L'approche "Top down"	48
2.2	L'approche "Bottom-up"	48
2.3	Exemple de modèles "Top down"	49
2.4	Exemples de modèles Bottom-up	49
3	Les appareils électriques les plus énergivores d'un ménage.....	50
4	Le profil d'usage des équipements	52
4.1	Le réfrigérateur	52
4.2	Le congélateur	53
4.3	Le lave-linge.....	54
4.4	Le sèche-linge.....	55
4.5	Le lave-vaisselle	55
4.6	L'éclairage.....	56
4.7	La cuisinière	57
4.8	Le multimedia.....	58
5	Les courbes de charge.....	60
6	L'étude des équipements différables, effaçables et le stockage électrique	62
7	Conclusion	62
Partie 5.	Détermination des usages effaçables des supermarchés et des boucheries d'une ville.....	65
1	La gestion de la demande des consommations du secteur tertiaire : un enjeu du <i>Smart Grid</i>	65
2	Recensement des équipements de chaque commerce ou service	66

3	Reconstitution des courbes de charges « réelles » des supermarchés et des boucheries.....	66
3.1	Prise en compte des types urbains.....	67
3.2	Sélection des équipements les plus énergivores de chaque type de commerces ou services.....	67
3.3	Construction des courbes de charges journalières de chaque équipement.....	69
	Appareils fonctionnant 24h/24.....	69
	Appareils fonctionnant de manière continue lorsque le magasin est ouvert.....	70
	Appareils fonctionnant de façon aléatoire au cours de la journée.....	72
	Bilan.....	75
	Courbe de charge les jours où l'établissement n'est ouvert que le matin... ..	75
3.4	Construction des courbes de charge hebdomadaire et annuel de chaque catégorie de commerce ou service.....	76
	Courbes de charge hebdomadaire et annuelle des équipements.....	76
	Courbes de charge hebdomadaire et annuelle des catégories de commerces.....	76
3.5	Construction des courbes de charge hebdomadaire et annuel d'un quartier et d'une ville.....	80
4	Conclusion.....	81
	Effet du type urbain sur les consommations des supermarchés et boucheries.....	82
Partie 6.	Simulation d'une production d'électricité à partir des énergies photovoltaïques et éoliennes à l'échelle de la ville de Tours, et conséquences en termes de charge sur le réseau.....	83
1	Introduction.....	83
2	Présentation des modèles.....	83
2.1	Détermination de la production photovoltaïque en milieu urbain	84
2.2	Estimation de la production éolienne en milieu urbain.....	85
2.3	Détermination des situations critiques du réseau électrique à l'échelle de la ville de Tours.....	85
3	Une production insuffisante vis-à-vis des besoins d'une ville.....	86
3.1	Une production photovoltaïque qui satisfait difficilement les besoins, même aux heures les plus ensoleillées de l'année.....	86
3.2	Une production éolienne urbaine très insuffisante.....	88

3.3	La somme des deux productions, dominée par le photovoltaïque	90
3.4	La charge induite par la production et la consommation sur le réseau électrique : un gain important dans le cas d'une mutualisation	91
4	Détermination de la puissance d'une centrale de production basée sur une énergie renouvelable en dehors de la ville de Tours	94
4.1	Installation d'une centrale basée uniquement sur une production photovoltaïque	94
4.2	Installation d'une centrale basée uniquement sur une production éolienne	95
	Conclusion	98
	Partie 7. Les scénarios : évaluation des effets du <i>Smart Grid</i> (Tableau 10) ...	99
1	Détermination des scénarios selon le type de production renouvelable..	99
2	L'indicateur de dispersion, évaluateur des effets du <i>Smart Grid</i>	101
	Effet du <i>Smart Grid</i> sur l'effacement	101
	Effet du <i>Smart Grid</i> sur l'intégration des énergies renouvelables	102
	Conclusion	105
	Bibliographie.....	107
	Table des figures	109
	Table des tableaux.....	113
	Table de annexes	115
	Table des matières.....	117
	Annexes.....	121

Annexes

Annexe 1.: Carte des IRIS de Tours



Annexe 2.: Détermination du nombre d'équipement par IRIS

Pour chaque IRIS le nombre de ménages fiscaux, ainsi que le revenu moyen des habitants, sont disponibles sur le site de l'INSEE (Tableau 11).

Tableau 11: Exemple de donnée disponible d'un IRIS de Tours (2006)

Nom de la commune	Code IRIS	Nom de la zone	revenu par ménage: moyenne (en €)	Ménages fiscaux
Tours	0101	CENTRE 1	34762,65	1679

La base de données de l'INSEE nous apporte des informations sur le taux d'équipement des ménages par décile (Tableau 12). Les déciles sont une répartition des habitants en dix catégories. Le décile 1 correspond au revenu au dessous duquel se situe 10% des revenus des habitants ; le décile 2 correspond au revenu au dessous duquel se situe 20% des revenus etc.

Tableau 12 : Taux d'équipement des ménages en lave-linge en fonction du décile

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
lave-linge	0.7793	0.8852	0.8865	0.9235	0.9229	0.9323	0.9396	0.9412	0.9385	0.953

Le niveau de vie moyen en décile en France métropolitaine est également disponible sur le site de l'INSEE (Figure 60).

D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
0 7 790	11 380	13 520	15 440	17 320	19 350	21 710	24 860	30 120	51 690

Figure 60 : Niveau de vie moyen en Decile en France métropolitaine en 2006 (en Euros)

On peut ainsi classer les IRIS de Tours en décile et déterminer un taux d'équipement pour l'ensemble des ménages d'un IRIS. Dans ce cas, nous faisons l'hypothèse que le principal critère influençant le taux d'équipement est le revenu.

Ainsi l'IRIS 101 est composé de ménages de type décile 10. Les ménages de cette IRIS ont un taux d'équipement en lave-linge de 0,953. La multiplication de ce taux d'équipement par le nombre de ménages détermine le nombre d'appareils qui sont susceptibles d'être en fonctionnement dans un IRIS. L'IRIS 101 est composé de 1679 ménages soit $0,953 \times 1679 = 1600$ lave-linges.

Annexe 3.: Détermination du profil d'usage de la machine à laver

Les ménages mettent en marche leur machine à laver de façon aléatoire mais en respectant la loi de probabilité (Figure 61, Etude AEE2008).

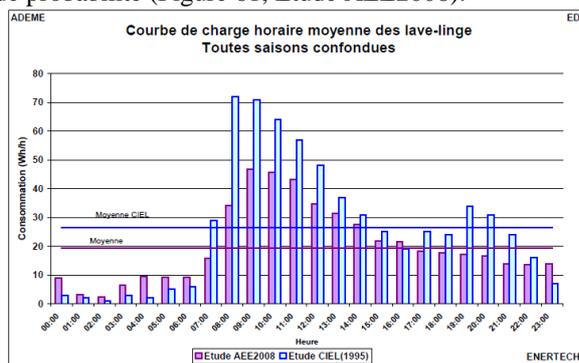


Figure 61: Loi de probabilité du lave-linge. Source: ADEME, EDF, ENERTECH, Avril 2008

Ainsi, nous créons un vecteur aléatoire de nombre compris entre 0 et 1 que nous multiplions par la loi de probabilité. On obtient un profil d'usage aléatoire prenant en compte la loi de probabilité (Figure 62 & Figure 63 & Figure 64).

Heures	0 à 1	1 à 2	2 à 3	3 à 4	4 à 5	...	8758 à 8759	8759 à 8760
Pourcentage	0,81	0,91	0,13	0,91	0,63	...	0,16	0,97

Figure 62: Profil d'usage aléatoire sur l'année de l'IRIS 101

Heures	0 à 1	1 à 2	2 à 3	3 à 4	4 à 5	...	8758 à 8759	8759 à 8760
Probabilité	0,09	0,03	0,02	0,06	0,09	...	0,13	0,14

Figure 63: Loi de probabilité par tranche horaire

Heures	0 à 1	1 à 2	2 à 3	3 à 4	4 à 5	...	8758 à 8759	8759 à 8760
Pourcentage	0,07	0,03	0,00	0,05	0,06	...	0,02	0,14

Figure 64: Profil d'usage prenant en compte la loi de probabilité de l'IRIS 101

Ce profil d'usage doit rendre compte de la tendance des ménages à réaliser 4,64 cycles par semaine, soit 241 cycles par an. On peut déterminer le nombre de cycles par IRIS en multipliant le profil d'usage par le nombre de ménages dans un IRIS.

Il y a 1679 ménages dans l'IRIS 101.

Heures	0 à 1	1 à 2	2 à 3	3 à 4	4 à 5	...	8758 à 8759	8759 à 8760	Total : Nombre de cycle dans l'IRIS
Nombre de cycles	123,1	45,6	4,3	92,0	95,6	...	34,4	228,1	350 000

Figure 65: Nombre de cycles par tranche horaire

Le total de ce nombre de cycles doit être égal à (**Figure 65**):

Nombre de cycle théorique : $4,64 \text{ cycles/semaine} * 52 \text{ semaines/an} * 1679 \text{ ménages} = 405\,109 \text{ cycles/an}$ pour l'IRIS 101.

Un facteur de multiplication permettra d'ajuster le profil d'usage.

Facteur de multiplication : nombre de cycles par IRIS théorique / nombre de cycles par IRIS

Pour l'IRIS 101, le facteur de multiplication est de 1,16. Le profil d'usage pour cette IRIS est le suivant.

Heures	0 à 1	1 à 2	2 à 3	3 à 4	4 à 5	...	8758 à 8759	8759 à 8760
Pourcentage	0,9	0,03	0,00	0,06	0,07	...	0,02	0,16

Figure 66 : Profil d'usage de la machine à laver pour l'IRIS 101 sans prise en compte de la durée du cycle

Une machine à laver réalise un cycle en 101,7 minutes. Afin de simplifier la modélisation, nous considérons que l'appareil réalise son cycle en deux heures. Cette nouvelle caractéristique est à prendre en compte dans le profil d'usage. On affecte pour chaque tranche horaire le pourcentage de l'heure précédente. Pour l'exemple choisi, la valeur entre 1h et 2h ne sera plus de 0,03 mais de $0,03+0,9$. Cette démarche est appliquée pour les 8760 heures. La première heure de l'année sera affectée du taux de la dernière heure de l'année.

Annexe 4.: Détermination du profil d'usage de l'éclairage

Afin de comprendre cette méthodologie il est important d'avoir lu au préalable l'annexe sur la détermination du profil d'usage de la machine à laver.

Comme pour le profil d'usage de la machine à laver, on crée un vecteur aléatoire compris entre 0 et 1 auquel on affecte la loi de probabilité. Par la suite, nous devons prendre en compte la tendance des ménages à avoir au moins une lumière allumée pendant 1662 heures/an. Comme pour le profil d'usage de la machine à laver, on détermine un facteur de multiplication.

Facteur de multiplication : nombre d'heures de fonctionnement de l'éclairage théorique/ nombre d'heures de fonctionnement par IRIS
--

Le nombre d'heures de fonctionnement de l'éclairage théorique correspond à $1662 \times$ nombre de ménages dans l'IRIS en question. Le nombre d'heures de fonctionnement par IRIS correspond à la somme des valeurs du profil d'usage (sans application du facteur) multiplié par le nombre de ménages dans l'IRIS.

Annexe 5.: Détermination du profil d'usage de la cuisinière

Afin de comprendre cette méthodologie il est important d'avoir lu au préalable l'annexe sur la détermination du profil d'usage de la machine à laver.

Comme pour la machine à laver, on crée un profil aléatoire de nombre compris entre 0 et 1 auquel on applique la loi de probabilité. Le nombre de fois que cuisinent les ménages d'un IRIS théoriquement par an correspond à 0,97 (taux de personnes qui cuisinent elles-mêmes) \times 730 \times nombre de ménages dans l'IRIS en question. On crée donc un facteur de multiplication permettant d'ajuster le profil d'usage.

Facteur de multiplication : nombre de fois que cuisinent les ménages d'un IRIS théorique/ nombre de fois que cuisine les ménages d'un IRIS
--

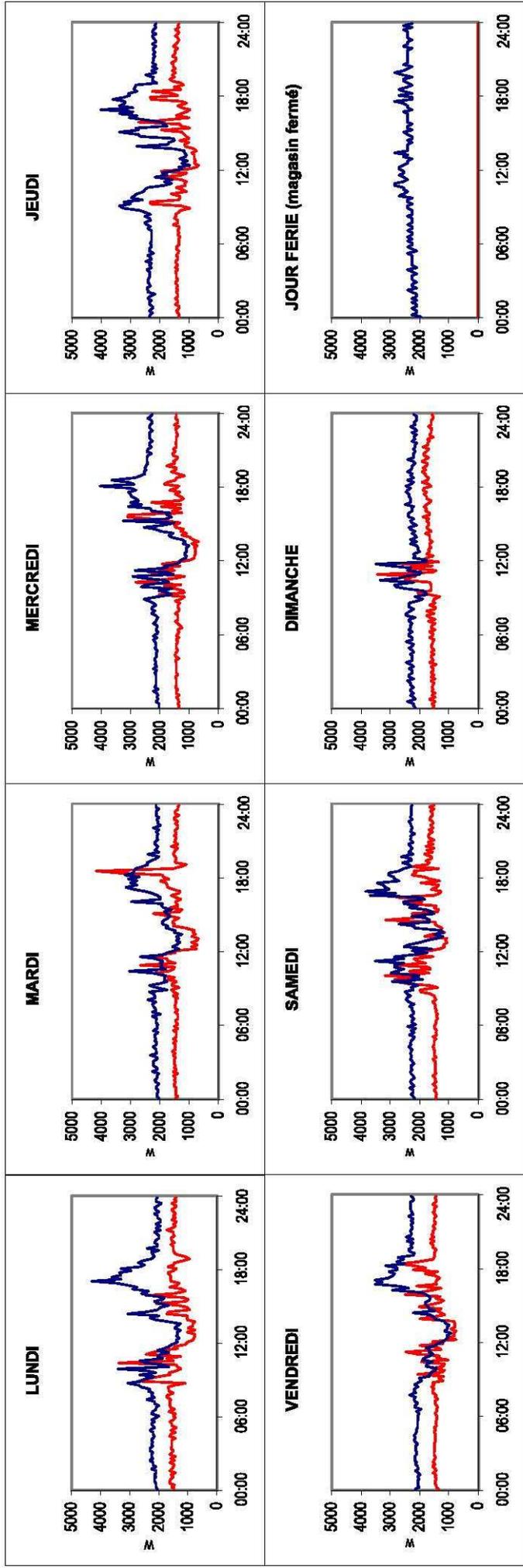
Le nombre de fois que cuisinent les ménages d'un IRIS correspond à la somme du profil d'usage sans application du facteur de multiplication multiplié par le nombre de ménages dans l'IRIS en question.

Annexe 6.: Fiches descriptive des équipements étudiés

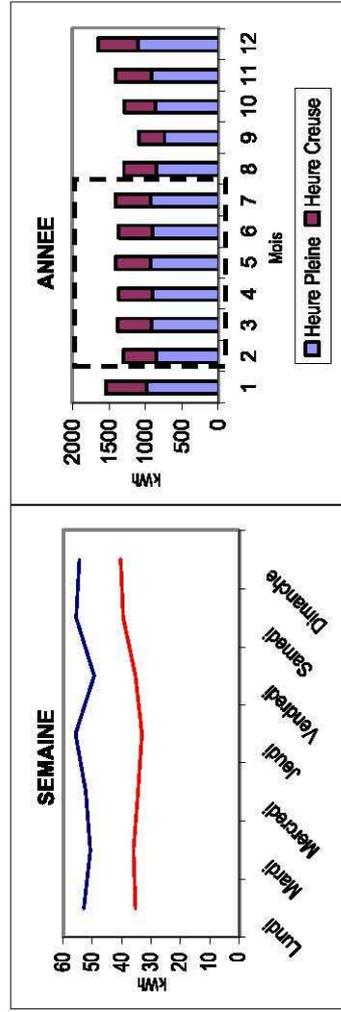
Source : Extraites de : ENERTECH ; ADEME Picardie. 2001. *Diagnostic énergétique d'un supermarché de moyenne surface*. Amiens : s.n., 2001. P. 82.

APPAREIL : Station essence + lavage rouleaux

COURBE DE CHARGE JOURNALIERE



REPARTITION HEBDOMADAIRE ET ANNUELLE



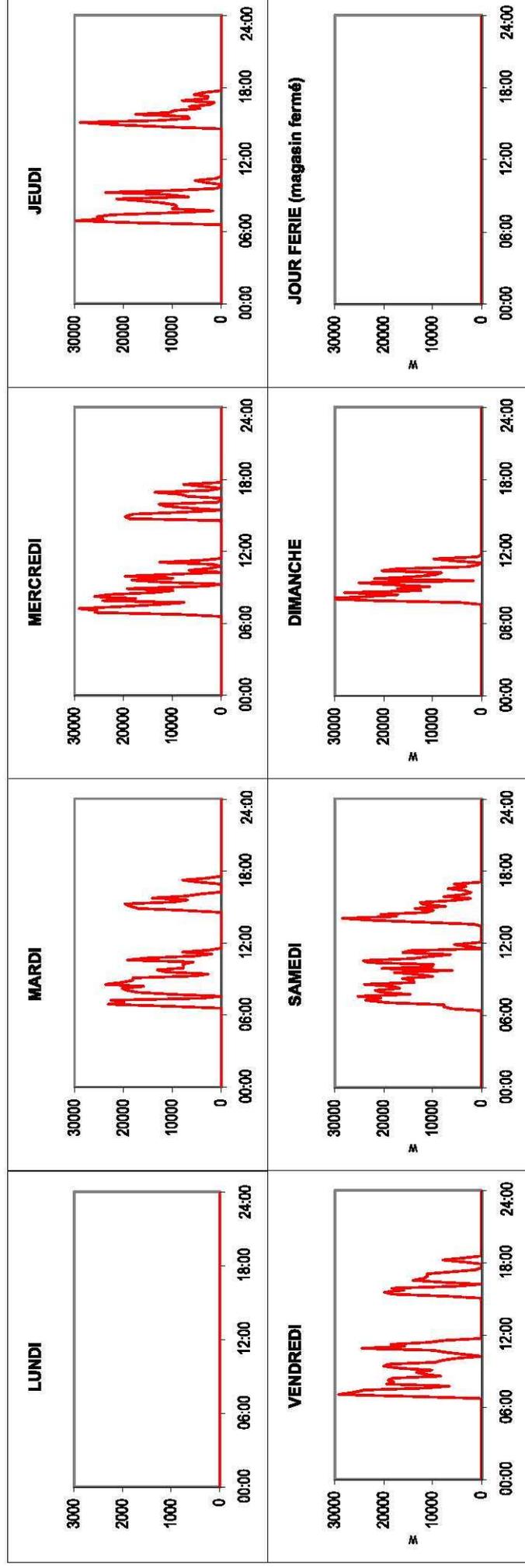
— Septembre
— Décembre

--- : Extrapolation

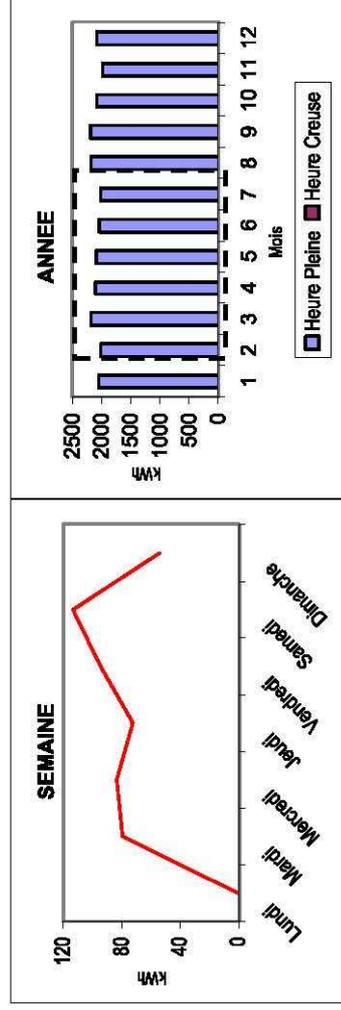
	ETE	HIVER	ANNEE
Consommation kWh (part de la consommation globale-%)	9209 (2,72%)	7272 (3,42%)	16481 (2,99%)
Coût (FHT)	Abonnement	554	949 (1,84%)
	kWh	1659	4991
Global	2054	3886	5940

APPAREIL : Four boulangerie

COURBE DE CHARGE JOURNALIERE



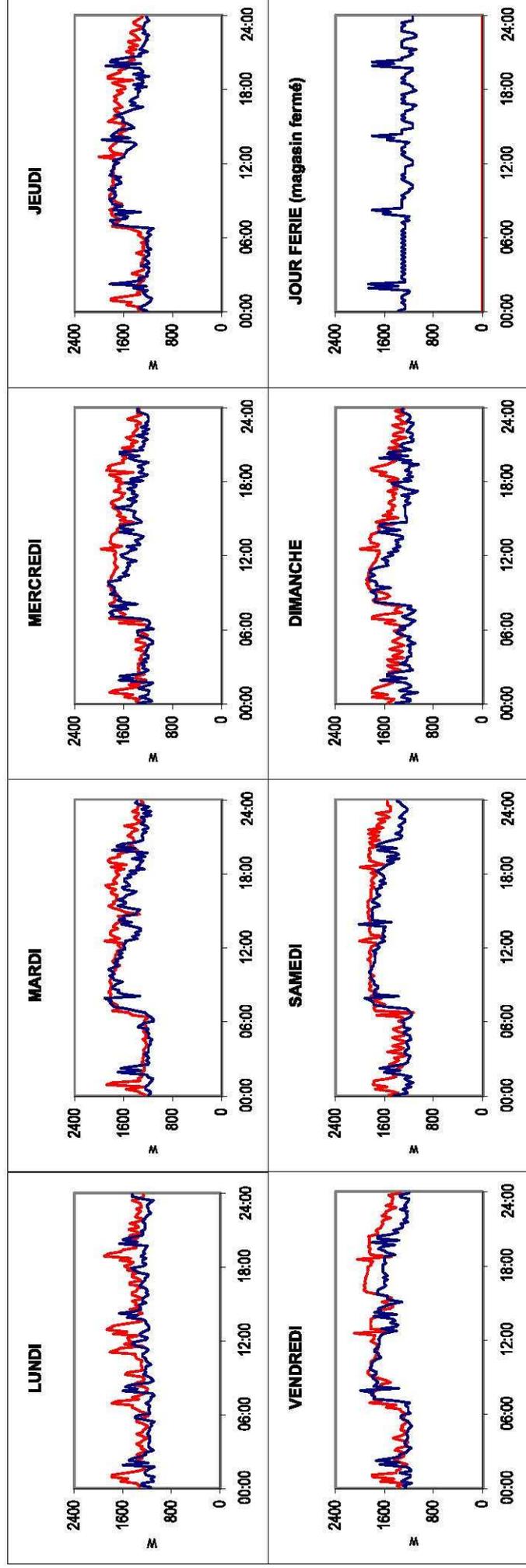
REPARTITION HEBDOMADAIRE ET ANNUELLE



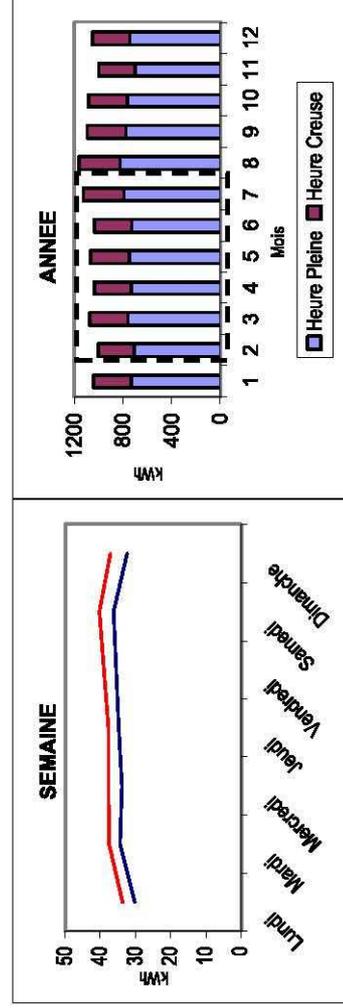
	ETE	HIVER	ANNEE
Consommation kWh (part de la consommation globale-%)	14696 (4,34%)	10300 (4,84%)	24996 (4,53%)
Coût (FHT)	Abonnement	2195	5168 (10,02%)
	kWh	2828	8049
	Global	5801	7416

APPAREIL : Chambre froide boulangerie

COURBE DE CHARGE JOURNALIERE



REPARTITION HEBDOMADAIRE ET ANNUELLE



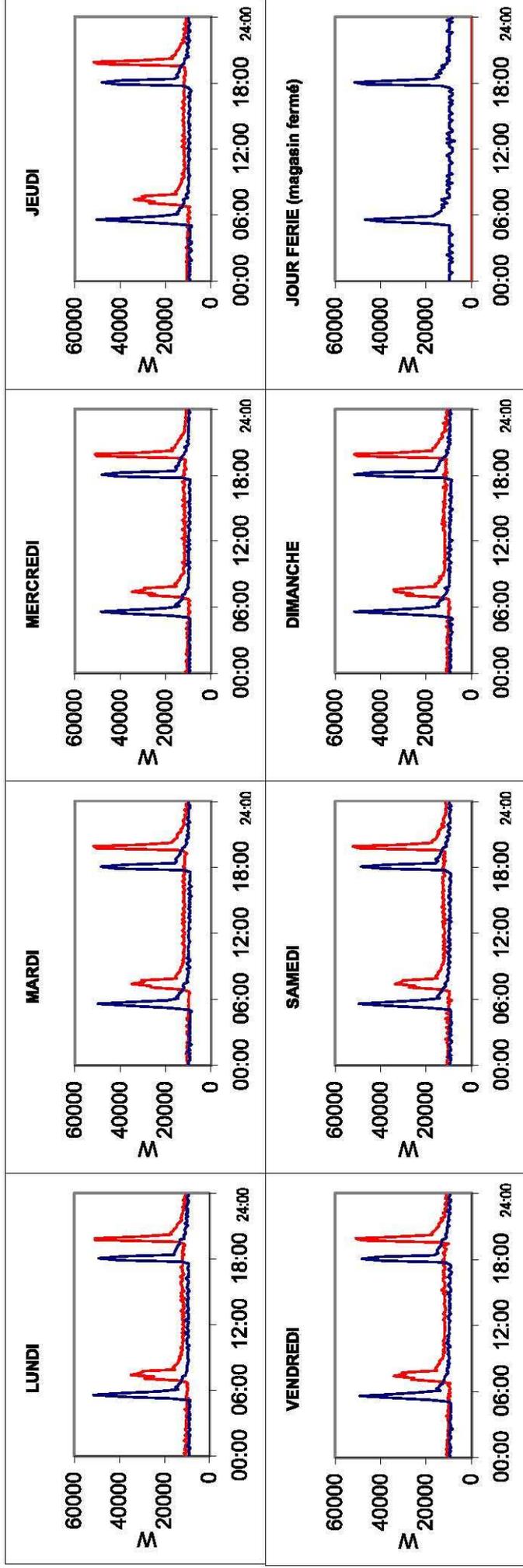
— Ete (août)
— Hiver (décembre)

---- : Extrapolation

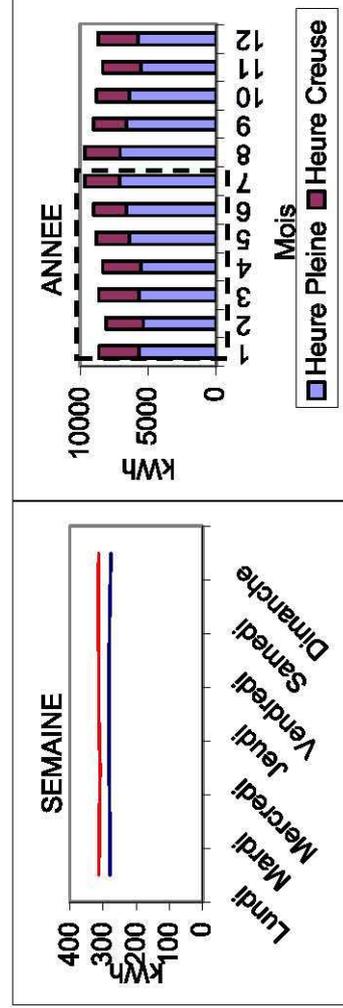
	ETE	HIVER	ANNEE
Consommation kWh (part de la consommation globale-%)	7603 (2,25%)	5169 (2,43%)	12772 (2,32%)
Coût (FHT)	317	373	690 (1,34%)
	1381	2404	3785
Global	1698	2777	4475

APPAREIL : Général froid négatif

COURBE DE CHARGE JOURNALIERE



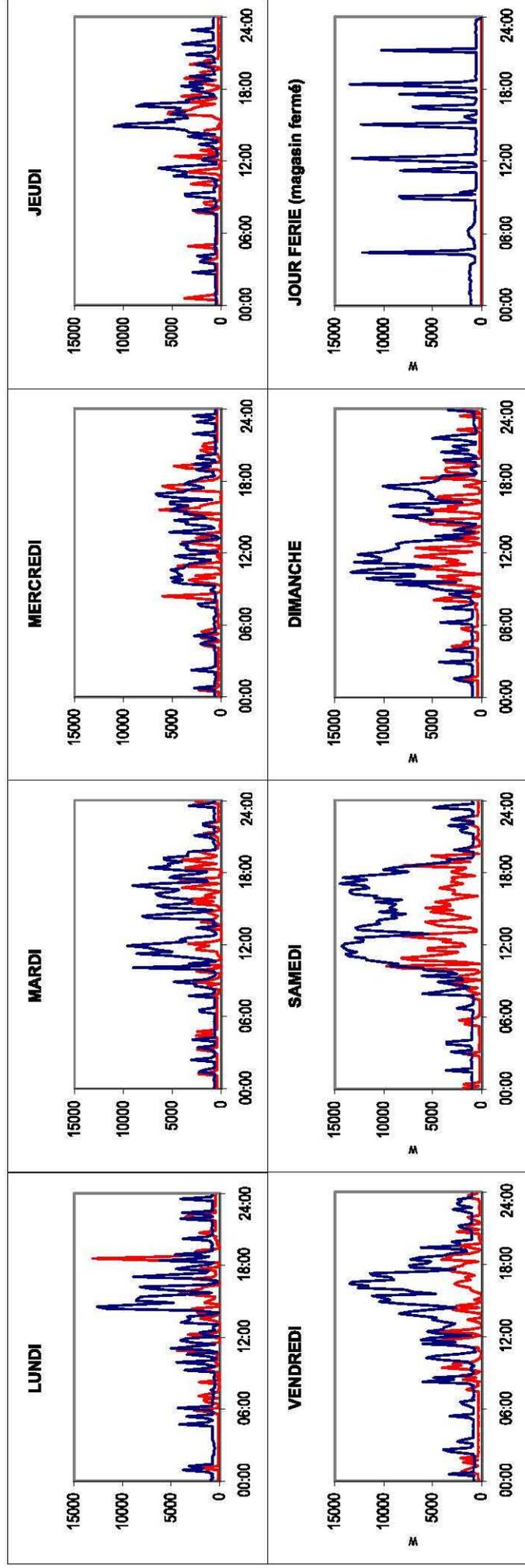
REPARTITION HEBDOMADAIRE ET ANNUELLE



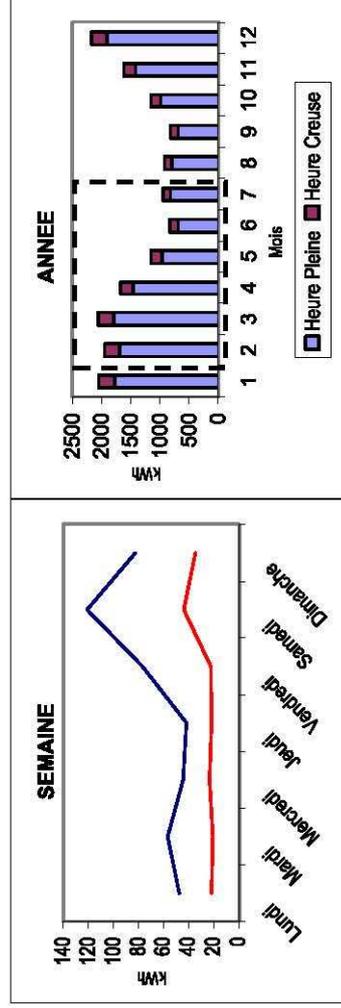
	ETE	HIVER	ANNEE
Consommation kWh (part de la consommation globale-%)	63301 (18,7%)	42314 (19,89%)	105615 (19,16%)
Abonnement	2870	6383	9253 (17,95%)
Coût (FHT) kWh	11530	19416	30946
Global	14400	25799	40199

APPAREIL : Station de lavage

COURBE DE CHARGE JOURNALIERE



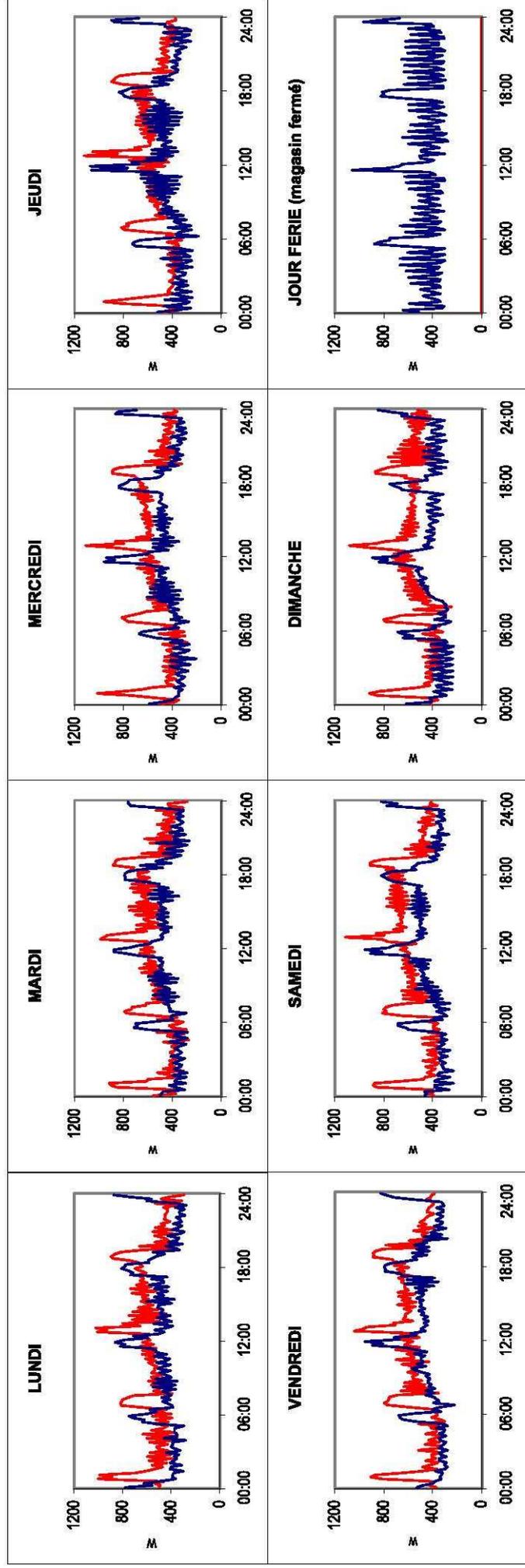
REPARTITION HEBDOMADAIRE ET ANNUELLE



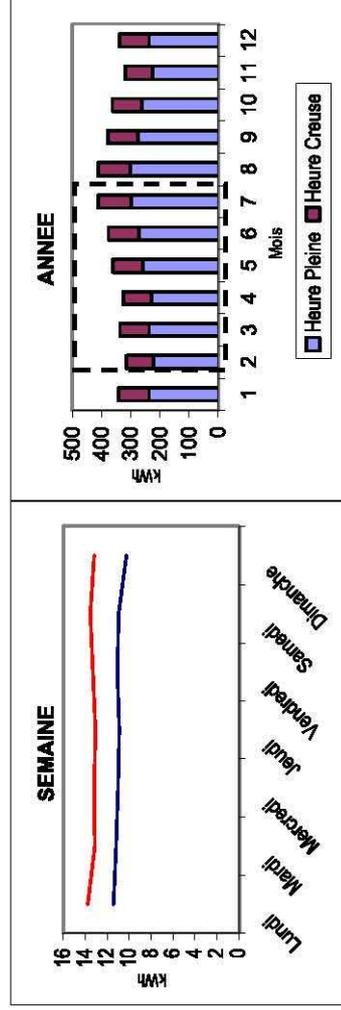
	ETE	HIVER	ANNEE
Consommation kWh (part de la consommation globale-%)	7484	9833	17317 (3,14%)
Abonnement	1805	1927	3732 (7,24%)
Coût (FHT) kWh	1400	4804	6204
Global	3205	6731	9936

APPAREIL : Bacs boucherie

COURBE DE CHARGE JOURNALIERE



REPARTITION HEBDOMADAIRE ET ANNUELLE



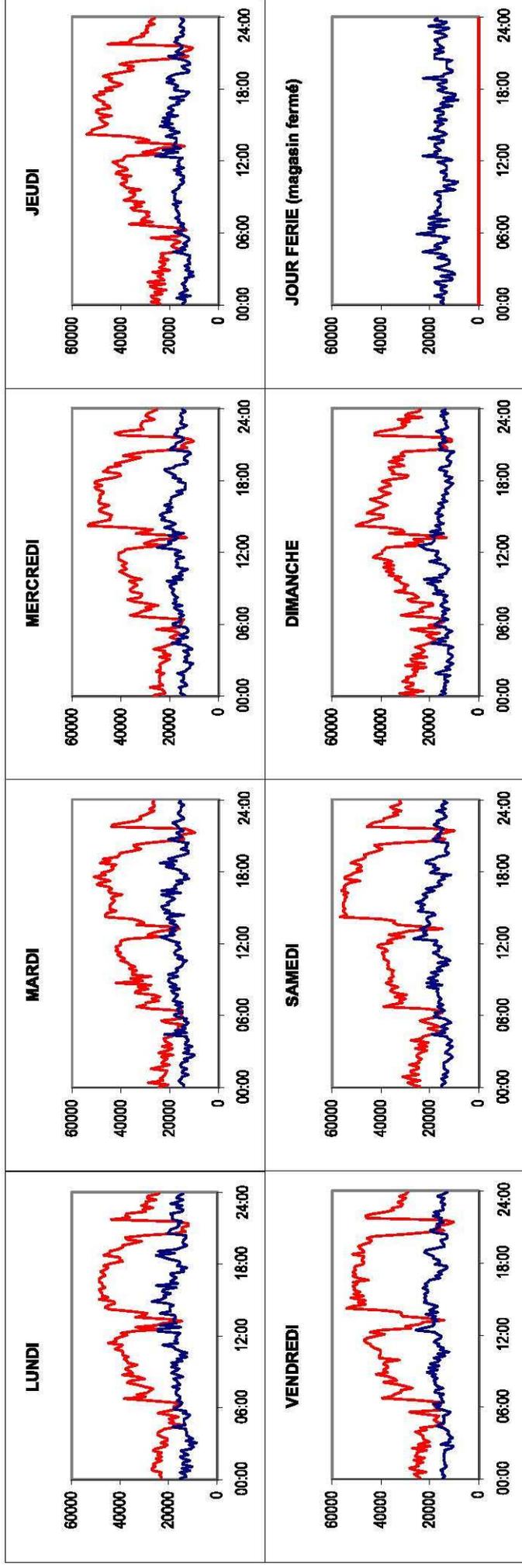
— Eté (août)
— Hiver (décembre)

---- : Extrapolation

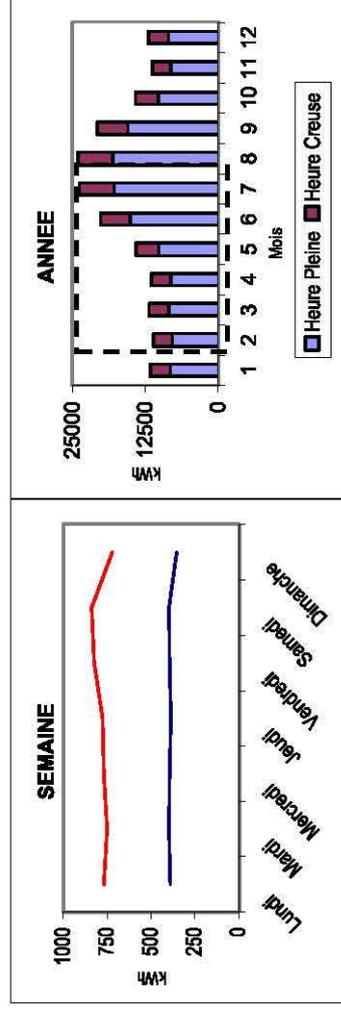
	ETE	HIVER	ANNEE
Consommation kWh (part de la consommation globale-%)	2626 (0,78%)	1651 (0,78%)	4277 (0,78%)
Coût (FHT)	Abonnement	120 (0,4%)	209 (0,4%)
	kWh	478	767
	Global	567	887
			1245
			1454

APPAREIL : Général froid positif

COURBE DE CHARGE JOURNALIERE



REPARTITION HEBDOMADAIRE ET ANNUELLE



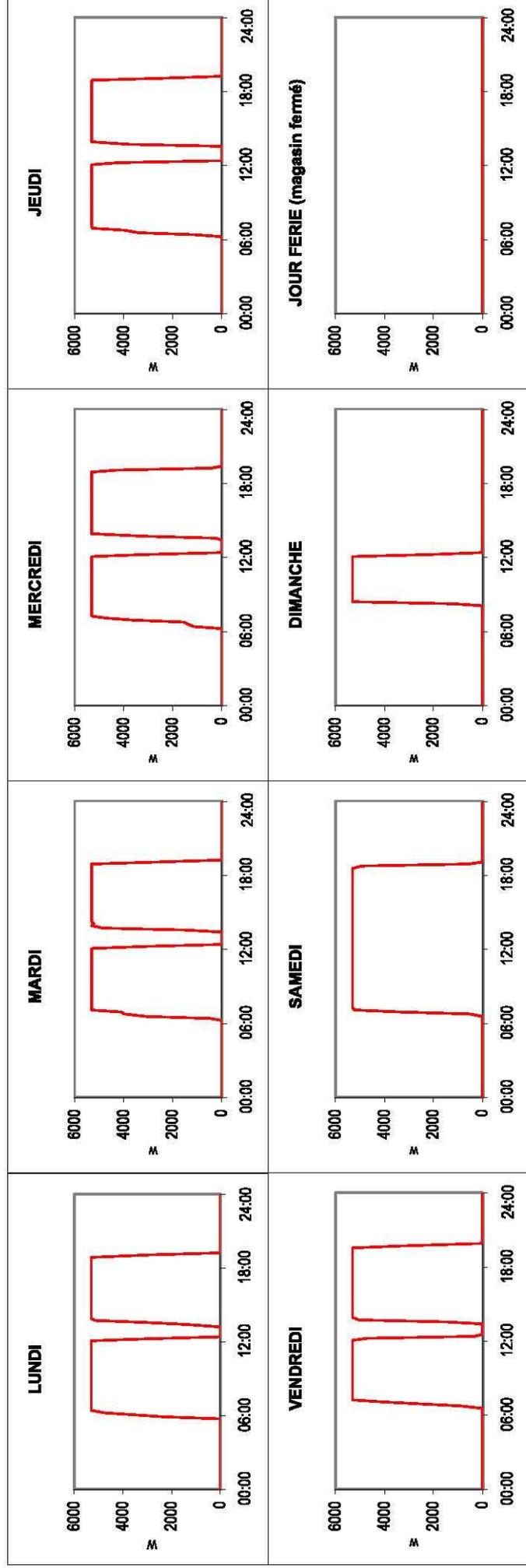
— Eté (août)
— Hiver (décembre)

--- : Extrapolation

	ETE	HIVER	ANNEE
Consommation kWh (part de la consommation globale-%)	128189 (37,87%)	57763 (27,15%)	185952 (33,73%)
Coût (FHT)	Abonnement	5180	15223 (29,53%)
	kWh	23447	50364
	Global	33490	32097

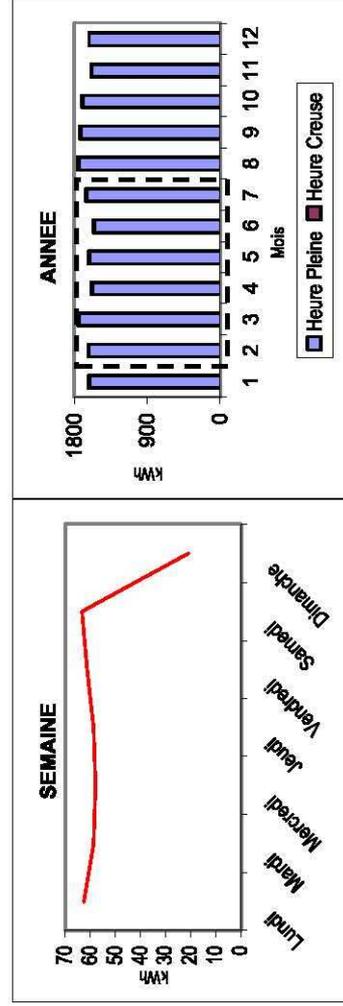
APPAREIL : Eclairage boucherie-fromage

COURBE DE CHARGE JOURNALIERE



REPARTITION HEBDOMADAIRE ET ANNUELLE

Puissance d'éclairage : 5300W

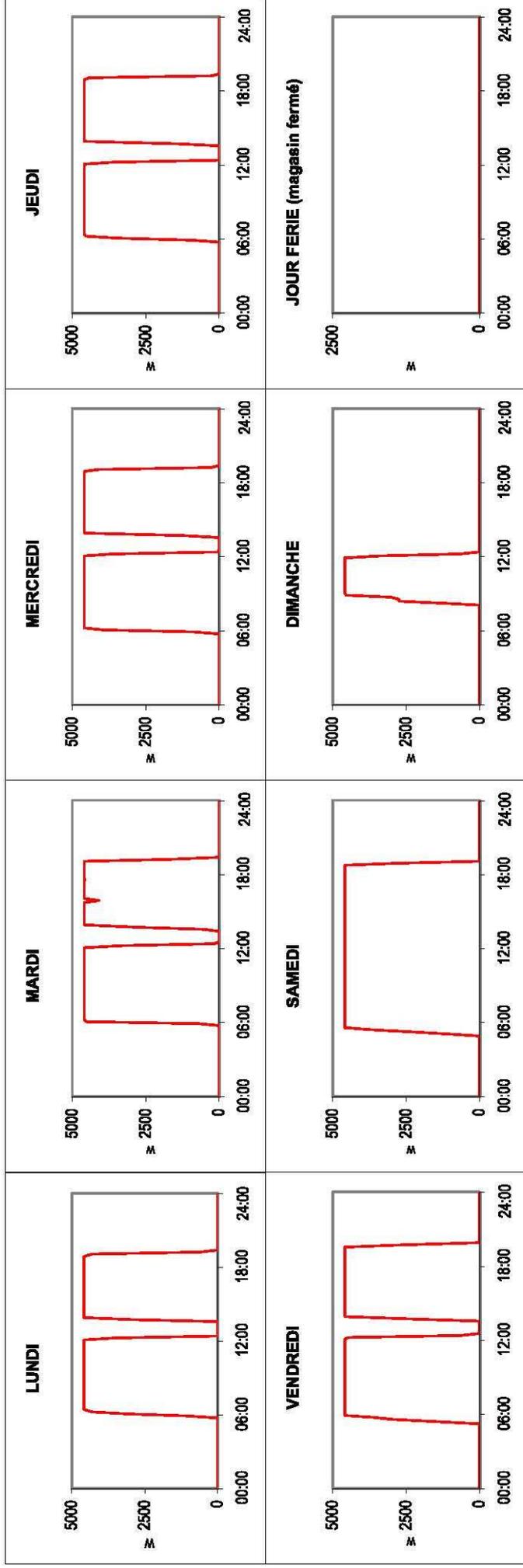


---- : Extrapolation

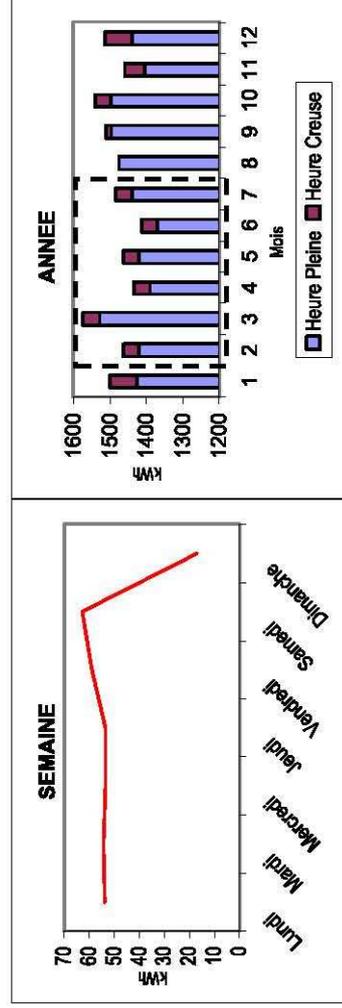
	ETE	HIVER	ANNEE
Temps de fonctionnement (h)	2196	1550	3746
Consommation kWh (part de la consommation globale-%)	11640 (3,44%)	8214 (3,86%)	19854 (3,6%)
Abonnement	925	1140	2065 (4,01%)
Coût (FHT) kWh	2236	4156	6392
Global	3161	5296	8457

APPAREIL : Eclairage cr merie

COURBE DE CHARGE JOURNALIERE



REPARTITION HEBDOMADAIRE ET ANNUELLE



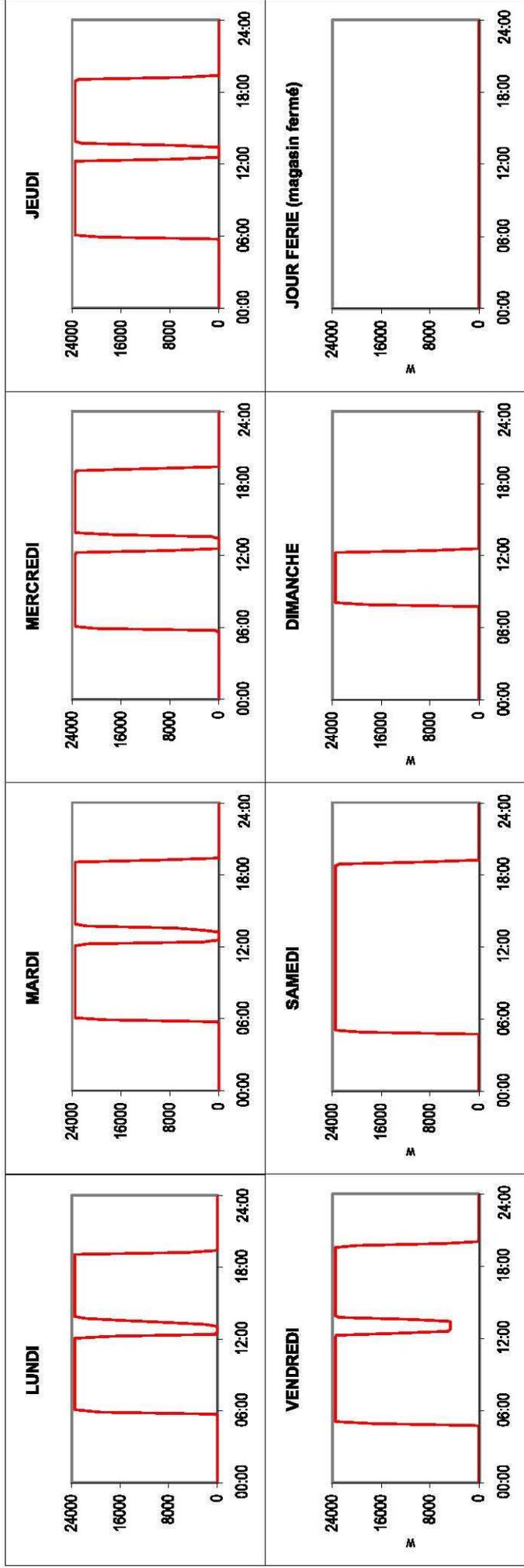
---- : Extrapolation

Puissance de l'éclairage : 4590W

	ETE	HIVER	ANNEE
Temps de fonctionnement (h)	2247	1636	3883
Consommation kWh (part de la consommation globale-%)	10316 (3,05%)	7508 (3,53%)	17824 (3,23%)
Coût (FHT)	790	974	1764 (3,42%)
	1977	3764	5741
Global	2767	4738	7505

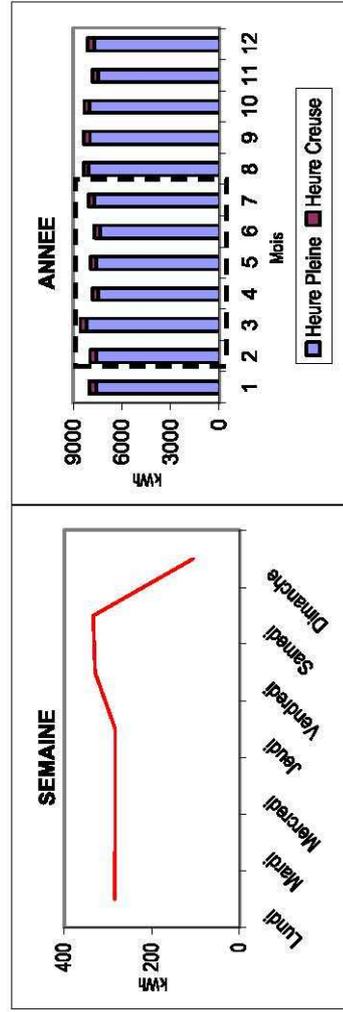
APPAREIL : Rampes d'éclairage

COURBE DE CHARGE JOURNALIERE



Puissance de l'éclairage : 23 500W

REPARTITION HEBDOMADAIRE ET ANNUELLE



---- : Extrapolation

	ETE	HIVER	ANNEE
Temps de fonctionnement (h)	2408	1719	4127
Consommation kWh (part de la consommation globale-%)	56599 (16,72%)	40403 (18,99%)	97002 (17,6%)
Abonnement	4514	4560	9074 (17,6%)
	Coût (FHT)		
kWh	10797	20207	31004
Global	15311	24767	40078

Annexe 7.: Etat des lieux des équipements et de la consommation électrique

Fiche d'information des activités d'ARDATmv. ARDATmv. 2009. Paris : s.n., Mars 2009. 1, p.6.



Mars 2009

POUR S'INFORMER DES ACTUALITES DE VOTRE PÔLE D'INNOVATION

FICHE N°1 Mars 2009

SOMMAIRE

- Les équipements des professionnels
- Les informations techniques sur les différents matériels
- Le témoignage d'un frigoriste
- Rappels : l'ouverture du marché à l'énergie



ETAT DES LIEUX DES ÉQUIPEMENTS ET DE LA CONSOMMATION ÉLECTRIQUE

Dans le cadre de la perception du marché de l'énergie, de la connaissance des usages et des équipements liés au métier de boucher, votre Pôle d'Innovation a réalisé un état des lieux des pratiques et des besoins afin que vous puissiez informer au mieux vos professionnels.

LES ÉQUIPEMENTS DES PROFESSIONNELS

Leurs critères de choix

Les professionnels ne choisissent pas d'énergie en particulier, ils s'adaptent aux raccordements disponibles. Pour les équipements, l'électricité est l'énergie principale. Lorsqu'un professionnel choisit le gaz, c'est avant tout pour un aspect technique :

- ⇒ raccordement déjà présent (chauffe eau par exemple)
- ⇒ adapté aux longues cuissons
- ⇒ aspect spectaculaire (flamme des rôtissoires par exemple)

Les contraintes d'installation

La place et les branchements disponibles dans l'entreprise sont les principales contraintes évoquées pour l'installation des équipements. L'ampérage du système électrique est également une contrainte ainsi que le respect des règles de sécurité et de bruit. En effet les équipements, tels que les groupes frigorifiques, situés en extérieur ne doivent pas être une source de nuisance pour le voisinage.

Les fournisseurs de matériels

Les professionnels achètent leur matériel chez des grossistes ou directement chez les fabricants. Cela dépend de plusieurs facteurs :

- ⇒ de l'implantation géographique des artisans par rapport aux fournisseurs
- ⇒ du type de matériel recherché : les gros équipements seront achetés plus souvent directement aux fabricants
- ⇒ des relations clients/fournisseurs existantes

Maintenance et dépannage des équipements

La maintenance est effectuée par des entreprises locales. En général, ce sont des artisans frigoristes, électriciens disponibles rapidement en cas de panne. Il n'y a pas de contrat spécifique liant les deux parties ni de fréquence d'intervention particulière sauf pour les installations frigorifiques où le frigoriste effectue un contrôle au moins une fois par an. Le coût varie en fonction du matériel en panne au cours d'une année. Les coûts évoqués par les professionnels sont de 1000 à 5000 €.

LES INFORMATIONS TECHNIQUES SUR LES DIFFÉRENTS MATÉRIELS

Le froid

Afin de respecter la chaîne du froid, dans tous les cas l'artisan possède **au moins une vitrine réfrigérée et une chambre froide**. On trouve régulièrement une deuxième chambre froide permettant de mieux séparer les produits crus (viande) des produits cuits (charcuterie, plats cuisinés) ou des légumes. Voir tableau ci-après.

Puissance frigorifique nécessaire en fonction du type de vitrine :
(Source CEMAGREF)



Meuble horizontal à convection naturelle type service traditionnel	200 à 220 w/mètre de linéaire
Meuble horizontal à convection type forcée service traditionnel	250 à 280 W/mètre de linéaire
Meuble horizontal à convection forcée type libre service	400 à 430 W/mètre de linéaire
Meuble vertical à convection forcée	1 200 à 1300W/mètre de linéaire

Puissance donnée pour une température d'évaporation du fluide frigorigène de -10°C à -15°C.

Ces informations ont également été complétées par la parution d'un document « En savoir plus sur l'optimisation des installations frigorifiques ».

Caractéristiques du matériel spécifique à la boucherie

Matériel	Nombre	Capacité moyenne	Type d'énergie	Puissance	Usage	Age moyen	Durée de vie	Commentaires
Chambres froides	1 à 2	22 m ³	Electrique	Fonction capacité	24h/24	15 ans	Plus de 20 ans	-
Vitrines réfrigérées	1	7 m de linéaire	Electrique	Fonction capacité	24h/24	15 ans	Plus de 20 ans	-
Hachoir réfrigéré	1	-	Electrique	94 - 95 W	Toute la journée	10 ans	10 à 20 ans	-
Trancheur à jambon	1 ou 2	6	Electrique	Puissances les plus courantes : 190/390 W et 0,264 kW	2 heures par jour	9 ans	Plus de 20 ans	Puissance et fiabilité : critères de choix
Scie à os	1	-	Electrique	700 à 1000 W	3/4 d'heure par jour	11 ans	Plus de 15 ans	Sécurité : un élément de choix
Machine sous vide	1	15 à 25 l	Electrique	0,75 à 2,92 kW	25 mn par jour	10 ans	Plus de 15 ans	-
Cellule de refroidissement	1	150 l à 300 l	Electrique	1,4 kW	-	9 ans	Plus de 10 ans	Rapport prix/capacité : essentiel
Eplucheuse	1	-	Electrique	-	10 heures par semaine	10 à 15 ans	Plus de 20 ans	Sécurité : un élément de choix
Coupe côtelettes	1	-	Electrique	-	1/2 heure par jour	3 ans	Plus de 5ans	

Les résultats de cette plaquette sont issus d'une enquête qualitative menée auprès d'une quinzaine de professionnels



Caractéristiques du matériel spécifique à la boucherie

Matériel	Nombre	Capacité moyenne	Type d'énergie	Puissance	Usage	Age moyen	Durée de vie	Commentaires
Poussoir	1	25 l	Electrique	0,75 kW	1 heure et demie par semaine	3 ans	?	En général utilisé une fois dans la semaine
Cutter	1	20 l	Electrique	-	45 mn par jour	20 ans	Plus de 20 ans	-
Autre hachoir	1	-	Electrique	1100 W	15 à 25 mn par jour	15 à 20 ans	10 à 20 ans	-
Mélangeur	1	20 à 30 l	Electrique	750 W	5 à 45 mn par jour	10 à 15 ans	Plus de 20 ans	-
Marmite	1	120 l	Gaz	-	Un peu plus de 3 heures par jour	12 ans	15 ans	Utilisée pour fabrication de charcuterie
Laminoir	1	-	Electrique	370 W	2 heures par jour	14 ans	Plus de 15 ans	Utilisé principalement pour l'activité traiteur
Thermocelleuse	1	-	Electrique	350 à 450 W	La journée	6 ans	Plus de 10 ans	-
Feux, Plaques de cuisson	1	3 plaques à 4 feux	Gaz (plus souvent) ou Electrique	-	Un peu plus d'une heure par jour	10 à 20 ans	Plus de 10 ans	Utilisées principalement en traiteur pour les « plats du jour »
Four	1	100 à 150 l	Electrique ou au gaz	3 à 7 kW	1 à 3 heures par jour	13 ans	Plus de 20 ans	Sécurité : un élément de choix
Robot coupe	1	-	Electrique	500 à 1200 W	10 à 30 mn par jour	5 à 10 ans	Plus de 5 ans	-
Coupe légumes	1	-	Electrique	500 W à 1000 W	30 à 45 mn par jour	10 à 15 ans	Plus de 10 ans	-
Friteuse	1	10 l	Electrique	5800 W	2 heures par semaine	30 ans	10 ans	-
Congélateur	1	1000 l	Electrique	-	24h sur 24	12 ans	Plus de 15 ans	Utilisé principalement pour l'activité traiteur



« Les professionnels investissent peu dans du nouveau matériel »

L'âge moyen du renouvellement du matériel

Le renouvellement du matériel ne se fait que si nécessaire (vétusté, sécurité, ...). Les professionnels investissent peu dans du nouveau matériel. Cette nécessité est souvent due à la diversité de l'activité.

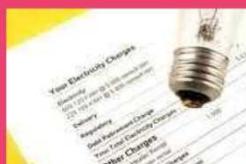
De manière générale l'âge du matériel est compris entre 10 et 20 ans.

Le petit matériel est assez récent et plus facile à changer car de moindre coût.





Les résultats de cette plaquette sont issus d'une enquête qualitative menée auprès d'une quinzaine de professionnel



Les attentes, satisfactions et insatisfactions vis-à-vis de la consommation en énergie

Les tarifs et la relation clientèle (conseil, dépannage) sont les points les plus préoccupants pour les professionnels.

SATISFACTION	INSATISFACTION
Dépannage en cas de problème	Problème d'électricité car loin du transformateur (beaucoup d'ampoules qui grillent)
Nouveau compteur électronique	Relation clientèle
Suivi des demandes clients : augmentation de l'ampérage effectuée sans problème	Tarif élevé (GDF et EDF)

Pour compléter les informations relatives à l'utilisation de l'énergie dans les boucheries artisanales, les données concernant les abonnements et la puissance souscrite associées ont été récoltées.

Les énergies présentes et options tarifaires associées : comparatif selon l'activité

	ELECTRICITE		GAZ
	Option tarifaire	Puissance souscrite	Option tarifaire
En boucherie pure	Pro et option base	18 kW et 6 kW	Option B1
	Pro et option EJP	18 kW	Option B0
	Pro et option Heures pleines/ Heures creuses	18 kW	/
	Tarif bleu et option Heures creuses/ Heures pleines (Poweo avantage)	24 kW	/
	Tarif jaune utilisation longue (EDF entreprises)*	42 kVA	/
En boucherie avec une activité de vente de charcuterie ou traiteur (petite quantité)	Pro et option base	6 kW, 18 kW et 24 kW	Option B1
	Pro et option EJP	18 kW	Option B0
	Pro et option Heures pleines/ Heures creuses	18 kW et 30 kVA	Gaz naturel
	Tarif bleu et option Heures creuses/ Heures pleines (Poweo avantage)	24 kW	Gaz naturel option Saphir
En boucherie avec une activité de fabrication de charcuterie ou traiteur	Essentiel Pro	15 kVA, 18 kVA et 30 kVA	Gaz naturel B2I
	Tarif bleu et option heures pleines/ Heures creuses	24 kW	Gaz naturel outremer
	Tarif bleu et option Tempo	36 kW	Gaz naturel B1
	Pro option EJP	18 kW	/

* Exemple d'une boucherie de 300 m² entièrement réfrigérée nécessitant une puissance importante

Les puissances électriques souscrites sont semblables selon l'activité. Par contre, les options pour le gaz sont des éléments de différenciations. Concernant certains contrats, le tarif, est intéressant au départ mais peut rapidement augmenter.



LE TÉMOIGNAGE D'UN FRIGORISTE—IVRY SUR SEINE

La production de « froid » nécessite de connaître divers paramètres tels que le type d'installation, la taille et l'environnement de celle-ci, la puissance souhaitée ...

Afin de concevoir au mieux les installations frigorifiques, il est préférable de recommander aux professionnels d'effectuer un bilan frigorifique complet avant l'achat de matériel, mais ceci est rarement effectué chez les artisans en raison du coût supplémentaire engendré par ce bilan.

De manière générale, afin de produire 1 kW de froid, 0.5 kW d'électricité sont consommés, il y a donc un rendement de 50%.

Le choix du compresseur est déterminant

Suivant la puissance désirée, il faut bien choisir le compresseur : c'est le cœur du système. Le calcul de la puissance de celui-ci se fait l'été car c'est lorsque la chaleur extérieure est importante que le compresseur a le plus de difficulté à tourner.

En général, chaque chambre froide fonctionne avec un groupe frigorifique, et celui-ci tourne environ 16 h sur 24 h au total.

Il est possible d'installer une centrale composée de plusieurs groupes frigorifiques dans des structures plus importantes. Celle-ci a l'avantage de consommer moins d'électricité et permet d'étagérer la consommation suivant les saisons et les besoins. Pour une chambre froide de volume inférieur à 20 m³, la consommation est en moyenne de 110 w/m³. Plus celle-ci est petite, plus la puissance nécessaire sera importante car à chaque ouverture de porte une grande quantité d'air s'échappe. De plus, d'autres facteurs sont à prendre en compte pour le choix du compresseur, notamment l'épaisseur des murs de la chambre froide, la quantité de viande reçue quotidiennement, et l'environnement.

Le choix de l'emplacement du compresseur dans l'installation est le plus important, en effet celui-ci chauffe surtout en été, il est donc nécessaire de le placer dans un endroit bien aéré. Le mieux est de le placer à l'extérieur, mais cela engendre du bruit, nuit à l'environnement proche et c'est souvent inesthétique. Aussi, il est préférable dans la mesure du possible de mettre les compresseurs dans un local peu fréquenté (cave, etc.).

Pour un même compresseur, plus la température de la chambre doit être basse, plus le compresseur perd en puissance. Enfin, plus la condensation est importante (c'est-à-dire plus la température extérieure est importante), plus la puissance diminue.

Ainsi, il existe 3 classes de compresseur déterminées par les constructeurs suivant les conditions climatiques de la région :

la classe 1 est optimale pour une température ambiante de 16°C et une hygrométrie de 82%,
la classe 2 pour 22°C - 65%
la classe 3 pour 25°C - 60%.

Dans les boucheries, on peut trouver différents modèles de compresseurs. Les plus courants sont les compresseurs air-air, les compresseurs à eau sont eux de moins en moins utilisés à cause du coût de l'eau en elle même.

Le choix de l'évaporateur

Le choix de l'évaporateur (qui va produire du froid) est également important. Les facteurs à prendre en compte sont : le débit d'air, le nombre de ventilateurs, le pas de l'ailette : plus il est petit, plus la prise de glace va être facile.



« Le choix d'un compresseur est déterminant, c'est le cœur du système »



L'ARDATmv

98 boulevard Péreire
75850 Paris cedex 17
Tél : 01 40 53 47 50
Fax : 01 43 80 23 85

C'est une équipe à votre écoute

Thomas BRUN
t.brun@boucherie-france.org
Isabelle COUDERC
i.couderc@boucherie-france.org
Muriel DROUILLAC
m.drouillac@boucherie-france.org
Grégory MAILLARD
g.maillard@boucherie-france.org
Anne SWISTAK
a.swistak@boucherie-france.org
Ghislaine TIZNITI
g.azougay@boucherie-france.org



Votre Pôle d'Innovation vous informe de ses actualités.

Pour plus de renseignements ou pour obtenir les coordonnées des différents fournisseurs d'énergie contactez l'ARDATmv au 01 40 53 47 50



Retrouvez-nous sur le Web
www.boucherie-france.org
Rubrique : ARDATmv

RAPPELS : L'OUVERTURE DU MARCHÉ DE L'ÉNERGIE À LA CONCURRENCE

La commercialisation de l'électricité et du gaz est ouverte à la concurrence alors que les activités de transport et de distribution restent un monopole des services publics. Avec cette ouverture les professionnels ont deux possibilités :

- ❶ Garder l'offre au tarif réglementé dont le prix est fixé par le ministère en charge de l'économie et de l'énergie
- ❷ Choisir une offre de marché, dont les prix sont librement fixés par les fournisseurs (y compris EDF et GDF qui peuvent également proposer les deux offres de tarifs, réglementé ou non).
 - ⇒ Si le professionnel souscrit à une offre de marché pour sa consommation de gaz naturel, il ne sera plus possible, par la suite, de souscrire une offre au tarif réglementé pour ce local (ni pour lui-même, ni pour les occupants suivants de ce local).
 - ⇒ S'il souscrit à une offre de marché pour sa consommation d'électricité, il ne lui sera plus possible, par la suite, de souscrire une offre au tarif réglementé. En revanche, il pourra bénéficier d'un tarif réglementé transitoire d'ajustement du marché (TaRTAM). Ce tarif s'applique de plein droit pour une durée allant jusqu'au 30 juin 2010. Il est égal au tarif réglementé de vente hors taxes majoré de 23% pour les tarifs verts, 20% pour les tarifs jaunes et 10% pour les tarifs bleus. S'il quitte le TaRTAM pour un site, il ne lui sera plus possible de souscrire à nouveau à cette offre pour ce site.

Pour choisir son fournisseur, que faut-il vérifier ?

Les prix de l'énergie et des services

- prix de vente de l'énergie : partie fixe (abonnement) et partie variable (consommation en KWh), en comparant les montants TTC (TTC = TVA et, pour l'électricité, la contribution au service public de l'électricité, CSPE - ainsi que les taxes locales).
- prix des services de gestion de clientèle : canaux d'accès proposés (tél, e-mail, courrier), horaires et coût du service clientèle, facturation, moyens de paiements proposés, périodicité des paiements et relevés, ...
- prix des prestations techniques effectuées par le gestionnaire de réseau de distribution
- prix des autres services techniques effectués par le fournisseur

Les conditions d'évolution des prix : prix fixes, prix indexés, périodicité d'évolution des prix

La durée d'engagement prévue au contrat et les conditions de résiliation : motifs de résiliation, durée de préavis, frais justifiés éventuellement applicables, ...

Site à consulter pour plus d'informations
<http://www.energie-info.fr/pro>

Annexe 7.: la création du réseau électrique

Pour constituer le réseau électrique simplifié de la ville de Tours, on a fait le choix de considérer comme échelle les IRIS de l'Insee : d'une part, cela permet de créer les artères principales au sein de la ville pour la distribution de l'électricité. D'autre part, c'est l'échelle la plus pertinente en termes de statistiques sur la population et sur l'habitat. En effet, les bases de données Insee permettent de définir le nombre de logements ainsi que leur type, mais aussi de donner le décile de revenu par unité de consommation et le taux d'équipement des ménages en fonction de leurs revenus. Ces caractérisations sont essentielles car elles vont permettre de générer les consommations du parc de logements et des activités et services de chaque Iris, mais aussi de définir le profil de production que ce soit de l'énergie éolienne et/ou de l'énergie photovoltaïque vis-à-vis des contraintes urbanistiques. Il est aisé de comprendre que certains bâtiments protégés du vieux Tours ne pourront prétendre à une couverture de panneaux photovoltaïques vis-à-vis du Plan Local d'Urbanisme actuel. De plus, la surface de panneaux photovoltaïque ne sera pas proportionnelle à la densité de population, suivant qu'elle occupe des barres d'immeubles en hauteur ou des habitations individuelles. Toutes ces caractéristiques nous ont donc amené à caractériser chaque Iris. Sur la ville de Tours, ils sont au nombre de 53. Pour la création du réseau, il leur est attribué un identifiant unique et un centroïde pour spatialiser le réseau. Pour cette tâche, on utilise un logiciel de système d'information géographique avec la ville de Tours découpée en Iris pour déterminer le couple (x,y) définissant le centroïde. Pour calculer le couple de coordonnées du centroïde, on ajoute les champs X et Y à la table attributaire des polygones des Iris de Tours. Une opération de calcul de centroïde est présente en utilisant la fonction Calculate Geometry de l'outil SIG.

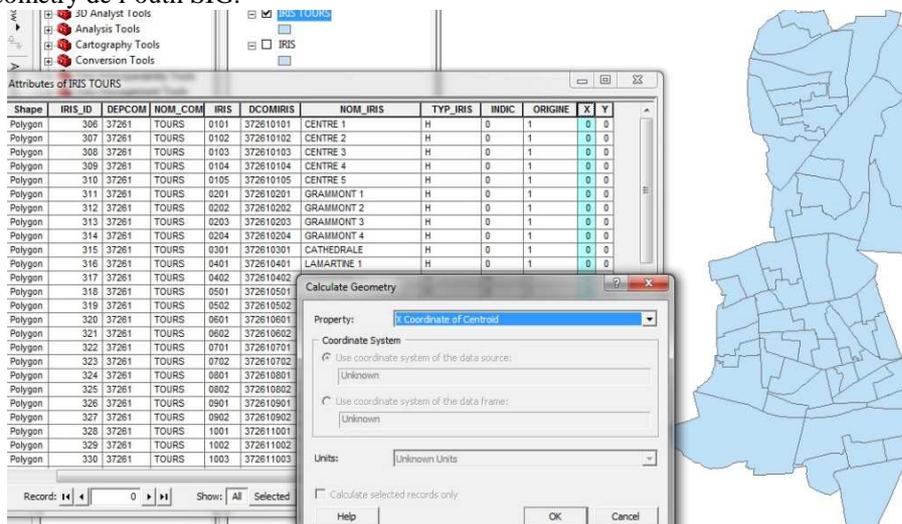


Figure 67 - Extraction des centroïdes des Iris sous ArcGis

Les contours des polygones représentant les Iris ont ensuite été convertis en polygones afin d'extraire des nouveaux nœuds qui formeront les points de distribution d'électricité entre les Iris. La difficulté est que les polygones ne sont pas encore découpés au niveau des nœuds du réseau. On utilise donc l'outil Split Lines At Vertices d'ArcMap pour pallier à ce problème. Une dernière manipulation reste à effectuer : il faut unir les polygones entre deux nœuds car ayant été découpées suivant les vertices, celles aux formes complexes géométriquement parlant sont trop découpées et ne forment plus un seul arc unique entre deux nœuds.

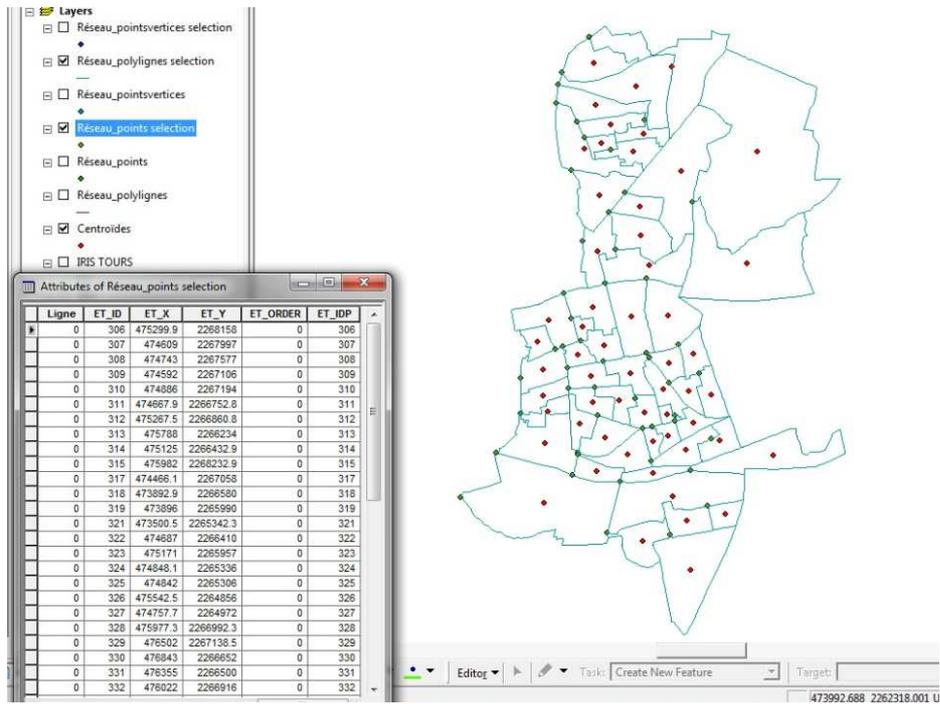


Figure 68 – Nœuds de jonction et polygones représentant les artères du réseau de la ville de Tours

Une fois les arcs correctement sectionnés, il faut extraire les coordonnées des points d'origine et de destination de ceux-ci pour créer les tables exploitables par le programme MatLab. Cette extraction va se traduire par la création de deux couples de coordonnées : X1, Y1 pour le nœud d'origine de l'arc et X2, Y2 pour le nœud de destination de l'arc. Certains nœuds vont évidemment se retrouver en double dans cette manipulation car ils seront commun à plusieurs arcs. Il suffit d'enlever les doublons de notre nouvelle base de données constituée sous Mapinfo ou Excel pour extraire nos nœuds définitifs de nos arcs. Il ne reste plus qu'à attribuer un identifiant unique aux nœuds. Cet identifiant unique va permettre de faire une jointure entre la table des arcs et la nouvelle table des nœuds et obtenir l'identifiant des nœuds origines et destinations dans la table des arcs. Cette manipulation constitue la base de données exploitable par le programme de calcul des plus courts chemins sous MatLab. Les figures ci-dessous présentent les différentes matrices ou vecteurs lignes à composer avec la base de données pour déterminer les plus courts chemins et la charge sur chaque tronçon du réseau électrique.

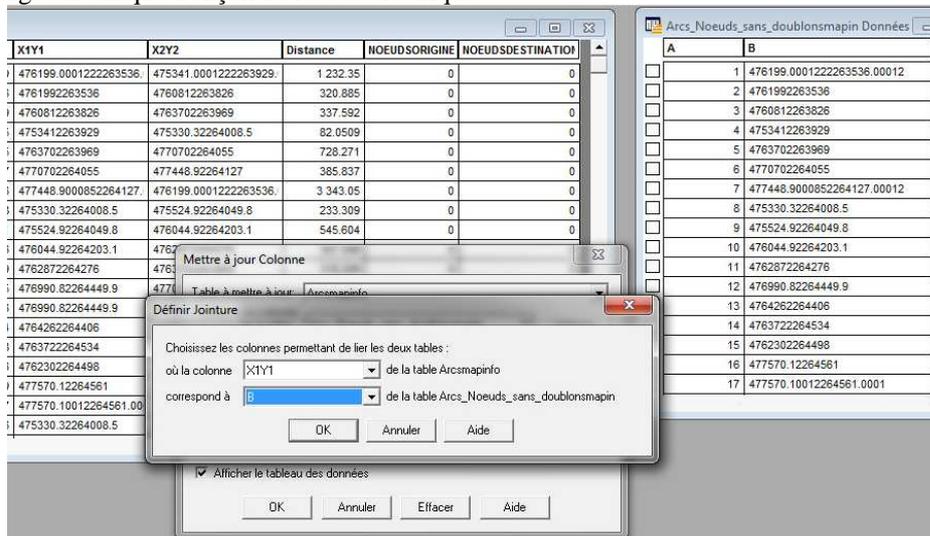


Figure 69 - Jointure des deux tables permettant d'extraire un identifiant unique pour chaque nœud

Variable Editor - noeuds_xyz

File Edit View Graphics Debug Desktop Window Hel

Stack: Base No vali

noeuds_xyz <264x3 double>

	1	2	3	4	5
1	476199	2263536	0		
2	476081	2263826	0		
3	475341	2263929	0		
4	476370	2263969	0		
5	477070	2264055	0		
6	477448	2264127	0		

Figure 70 - Table sous Matlab représentant la matrice de tous les nœuds avec leurs coordonnées x, y, et z

Variable Editor - arcs

File Edit View Graphics Debug Desktop Window Help

Stack: Base No valid p

arcs <324x3 double>

	1	2	3	4	5
1	1	3	1.2323e+03		
2	1	2	320.8800		
3	2	4	337.5900		
4	3	7	82.0500		
5	4	5	728.2700		
6	5	6	385.8300		
7	6	1	3343		
8	7	8	233.3000		
9	8	9	545.6000		
10	9	10	301.5800		
11	10	4	318.2000		
12	11	5	402.7900		
13	11	12	574.7400		
14	12	13	144.3900		
15	13	14	149.7300		
16	14	10	229.2000		

Figure 71 - Table sous Matlab représentant la matrice des arcs, avec les nœuds d'origine, de destination et la métrique

	1	2	3	4	5
1	211	212	213	214	215
2					

Figure 72 - Vecteur ligne donnant l'identifiant des nœuds d'origine du réseau (Par exemple, les points de production). La variable d'entrée des nœuds de destination est similaire

	1	2	3	4	5	6	7
1	8.2850e+04	5.6882e+04	6.3065e+04	6.3065e+04	5.6882e+04	6.3065e+04	7.6667e+04
2	1.9723e+04	1.3541e+04	1.5013e+04	1.5013e+04	1.3541e+04	1.5013e+04	1.8251e+04
3	2.3869e+04	1.6388e+04	1.8169e+04	1.8169e+04	1.6388e+04	1.8169e+04	2.2088e+04
4	3.6871e+04	2.5314e+04	2.8066e+04	2.8066e+04	2.5314e+04	2.8066e+04	3.4119e+04
5	5.0501e+04	3.4673e+04	3.8441e+04	3.8441e+04	3.4673e+04	3.8441e+04	4.6733e+04
6	8.8314e+04	6.0634e+04	6.7224e+04	6.7224e+04	6.0634e+04	6.7224e+04	8.1724e+04
7	7.2863e+04	50025	5.5463e+04	5.5463e+04	50025	5.5463e+04	67425
8	4.8177e+04	3.3077e+04	3.6672e+04	3.6672e+04	3.3077e+04	3.6672e+04	4.4582e+04

Figure 73 - Table représentant les besoins en électricité des 53 Iris sur les 8760 heures de l'année 2010

	1
1	[211, 142, 141, 140, 139, 264]
2	[212, 133, 136, 137, 139, 264]
3	[213, 125, 124, 133, 136, 137, 139, 264]
4	[214, 115, 116, 117, 112, 132, 136, 137, 139, 264]
5	[215, 128, 127, 140, 139, 264]
6	<1x12 double>
7	<1x15 double>
8	<1x17 double>
9	<1x17 double>
10	[220, 134, 138, 141, 140, 139, 264]
11	[221, 131, 135, 137, 139, 264]
12	[222, 130, 110, 112, 132, 136, 137, 139, 264]
13	[223, 111, 123, 135, 137, 139, 264]

Figure 74 - Matrice donnant les nœuds formant chemins les plus courts des points Origines vers les points Destination

K <648x8760 double>								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.6498e+06	1.3324e+06	1.3809e+06	1.2473e+06	1.2862e+06	1.3006e+06	1.4828e+06	1.5566e+06
2	7.1169e+05	5.7121e+05	5.8838e+05	531004	5.5007e+05	5.3465e+05	6.0253e+05	6.1737e+05
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1.6498e+06	1.3324e+06	1.3809e+06	1.2473e+06	1.2862e+06	1.3006e+06	1.4828e+06	1.5566e+06
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	2.2182e+06	2.0023e+06	1.9304e+06	1.7858e+06	1.9144e+06	2.6374e+06	3.0240e+06	3.4788e+06
14	1.5849e+06	1.3645e+06	1.3012e+06	1.1898e+06	1.3012e+06	2.0008e+06	2.3662e+06	2.7328e+06

Figure 75 - Matrice donnant les charges électriques des tronçons du réseau sur les 8760 heures de l'année

**CITERES
UMR 6173**

*Cités, Territoires,
Environnement et
Sociétés*

*Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement,
Paysage,
Environnement*



Département Aménagement
35 allée Ferdinand de Lesseps
BP 30553
37205 TOURS cedex 3

**Directeur de recherche :
Mindjid MAIZIA**

**BOSCHET Florian
MAITRE Lucie
OUESLATI Sémia
Projet de Fin d'Etudes
DA5
2010-2011**

Titre : *Le Smart Grid* : une réponse aux enjeux environnementaux, énergétiques et économiques liés à la consommation d'électricité à l'échelle urbaine ?

Résumé :

Face à de nouveaux enjeux environnementaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, ainsi que d'une demande en électricité qui ne cesse d'augmenter, le réseau électrique actuel a besoin de se moderniser. Pour y répondre, une nouvelle technologie de l'information et de la communication se développe dans le monde, le *Smart Grid*. Elle permettrait de maîtriser la demande en énergie en incitant les individus, par des offres tarifaires, à reporter certains de leurs usages (machine à laver, sèche linge...). Cet effet réduirait les pics de consommation causant une grande part des émissions des gaz à effet de serre du secteur de la production d'énergie. De plus, elle permettrait une consommation locale des énergies renouvelables, ce qui diminuerait l'appel de puissance et la déstabilisation du réseau causés par cette production intermittente. Face aux nombreux projets qui se développent et au fort investissement qu'ils occasionnent, les avantages du *Smart Grid* se vérifient-ils ?

Un modèle est ainsi créé permettant de simuler l'application du *Smart Grid* sur les consommations actuelles de la ville de Tours. Une courbe de charge de référence est déterminée selon une production la moins émissive possible en se basant sur les moyens de production actuels. Un indicateur de dispersion à la courbe de référence permet de chiffrer les effets du *Smart Grid*.

Courbe de charge, maîtrise de la demande, énergie, énergie renouvelable, pic de consommation, consommation, supermarché, boucherie, usages spécifiques, photovoltaïque, éolien, production urbaine, production régionale, équipement, profil d'usage, charge sur le réseau, usages différables, IRIS, Tours.