

**HEC MONTRÉAL  
AFFILIÉE À L'UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL**

**Estimation de l'effet rebond du secteur résidentiel québécois:  
une application au chauffage des locaux**

**par**

**Anic Gaudreau**

**Sciences de la gestion**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention  
du grade de maîtrise ès sciences  
(M. Sc.)*

Août 2005  
© Anic Gaudreau, 2005

**AVIS DE CONFORMITÉ À LA POLITIQUE EN MATIÈRE D'ÉTHIQUE  
DE LA RECHERCHE AVEC DES ÊTRES HUMAINS DE HEC MONTRÉAL**

La présente atteste que le projet de recherche décrit ci-dessous a fait l'objet d'une évaluation en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains et qu'il satisfait les exigences de notre politique en cette matière.

***Titre du projet de recherche:***

Estimation de l'effet rebond du secteur résidentiel québécois: une application au chauffage des locaux.

***Chercheur principal:***

*Chercheur : Anic Gaudreau*

*Titre :* Étudiant(e) Maîtrise

*Service/Option :* Économie financière appliquée

*Directeur : Robert Gagné*

*Titre :* Professeur(e) titulaire

*Service/Option :* Institut d'économie appliquée

***Date de déclaration du projet au Comité d'éthique de la recherche:***

10 mars 2005

***Date d'approbation du projet:***

11 mars 2005

***Date de publication de l'avis:***

11 mars 2005

Christiane Demers

Christiane Demers, présidente  
Comité d'éthique de la recherche

## Sommaire

L'efficacité énergétique est un sujet qui est au cœur de plusieurs débats actuellement et qui s'inscrit particulièrement bien dans le contexte actuel où "développement durable" et "sécurité énergétique" sont des concepts qui font pratiquement partie de notre quotidien. Or, si l'efficacité énergétique est vue par plusieurs écologistes comme une solution miracle aux problèmes de surconsommation, c'est qu'ils ne tiennent pas compte de l'effet rebond. L'effet rebond est la proportion des économies d'énergie provenant d'une amélioration de l'efficacité énergétique qui sera réinvestie sous forme d'une augmentation de la demande de service. D'une part, cette étude vise à présenter la revue de la littérature concernant l'effet rebond ainsi que les principaux résultats empiriques obtenus pour le secteur résidentiel. Dans un second temps, un modèle à équations simultanées est utilisé afin d'estimer l'effet rebond du secteur résidentiel pour le chauffage des locaux des ménages québécois se chauffant à l'électricité. Les résultats montrent que l'effet rebond est significatif. Des simulations de changements technologiques effectués sur le modèle permettent d'estimer un effet rebond lié aux périodes de construction des habitations de 43%. Les résultats de l'étude démontrent qu'une partie des économies d'énergie résultant de mesures d'efficacité énergétique sera annulée par le comportement des ménages. Par conséquent, il convient de réviser les calculs des impacts que pourraient avoir certaines mesures d'efficacité énergétique afin d'inclure l'effet rebond et de parvenir à des économies d'énergie potentielles plus réalistes.

## TABLE DES MATIÈRES

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| SOMMAIRE .....                                                                               | I  |
| TABLE DES MATIÈRES .....                                                                     | II |
| LISTE DES TABLEAUX .....                                                                     | IV |
| LISTE DES GRAPHIQUES.....                                                                    | IV |
| REMERCIEMENTS.....                                                                           | V  |
| INTRODUCTION .....                                                                           | 1  |
| CHAPITRE 1.- MISE EN CONTEXTE .....                                                          | 2  |
| 1.1.- L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET LE DÉVELOPPEMENT DURABLE .....                             | 2  |
| 1.2.- L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS UNE PERSPECTIVE DE SÉCURITÉ<br>ÉNERGÉTIQUE .....         | 3  |
| 1.3.- LES IMPLICATIONS .....                                                                 | 5  |
| CHAPITRE 2.- REVUE DE LITTÉRATURE ET RÉSULTATS EMPIRIQUES<br>.....                           | 7  |
| 2.1.- INTRODUCTION À L'EFFET REBOND .....                                                    | 7  |
| 2.2.- DÉFINITIONS .....                                                                      | 8  |
| 2.3.- DES EXEMPLES D'EFFETS REBOND .....                                                     | 9  |
| 2.3.1.- <i>Le secteur du transport des personnes</i> .....                                   | 9  |
| 2.3.2.- <i>Le secteur des technologies de l'information</i> .....                            | 9  |
| 2.3.3.- <i>Le secteur résidentiel</i> .....                                                  | 10 |
| 2.4.- REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE L'EFFET REBOND, APPLIQUÉE AU CHAUFFAGE<br>DES LOCAUX ..... | 10 |
| 2.5.- UN PEU D'HISTOIRE .....                                                                | 12 |
| 2.5.1.- <i>Le modèle à une seule utilisation de Khazzoom</i> .....                           | 12 |
| 2.5.2.- <i>Le modèle à utilisations multiples</i> .....                                      | 14 |
| 2.6.- TYPOLOGIE .....                                                                        | 16 |
| 2.6.1.- <i>L'effet rebond direct</i> .....                                                   | 17 |
| 2.6.2.- <i>L'effet rebond indirect</i> .....                                                 | 18 |
| 2.6.3.- <i>L'effet rebond macroéconomique</i> .....                                          | 19 |
| 2.7.- LA DÉMATÉRIALISATION .....                                                             | 20 |
| 2.8.- LE PARADOXE DE L'ÉCONOMIE DE TEMPS .....                                               | 20 |
| 2.9.- LES RÉSULTATS EMPIRIQUES .....                                                         | 21 |
| 2.9.1.- <i>Chauffage des locaux</i> .....                                                    | 23 |
| 2.9.2.- <i>Les autres utilisations finales</i> .....                                         | 27 |
| 2.9.3.- <i>Transport personnel</i> .....                                                     | 28 |
| CHAPITRE 3.- LE MODÈLE .....                                                                 | 29 |
| 3.1.- LES MODÈLES DE DEMANDE D'ÉNERGIE DANS LA LITTÉRATURE .....                             | 29 |
| 3.2.- LE MODÈLE GÉNÉRAL.....                                                                 | 32 |
| 3.3.- LE CALCUL DE L'EFFET REBOND AVEC LE MODÈLE .....                                       | 37 |
| CHAPITRE 4.- LES DONNÉES ET LES VARIABLES .....                                              | 39 |



|                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.- LES DONNÉES .....                                                                       | 39        |
| 4.2.- DESCRIPTION DE NOTRE ÉCHANTILLON .....                                                  | 40        |
| 4.3.- LES VARIABLES ET LES STATISTIQUES DESCRIPTIVES .....                                    | 42        |
| 4.3.1.- <i>Variables endogènes</i> .....                                                      | 42        |
| 4.3.2.- <i>Les variables exogènes</i> .....                                                   | 45        |
| <b>CHAPITRE 5.- RÉSULTATS.....</b>                                                            | <b>52</b> |
| 5.1.- ESTIMATION DU MODÈLE .....                                                              | 53        |
| 5.2.- COMPARAISON DU MODÈLE LINÉAIRE ET LOGARITHMIQUE .....                                   | 53        |
| 5.3.- INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS SUR LES VARIABLES UNIQUES À LA DEMANDE<br>DE SERVICE ..... | 55        |
| 5.3.1.- <i>Revenu</i> .....                                                                   | 55        |
| 5.3.2.- <i>Âge</i> .....                                                                      | 56        |
| 5.3.3.- <i>Autres variables</i> .....                                                         | 56        |
| 5.4.- INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DES VARIABLES UNIQUES À LA<br>CONSOMMATION D'ÉNERGIE ..... | 57        |
| 5.4.1.- <i>La simultanéité</i> .....                                                          | 57        |
| 5.4.2.- <i>Les caractéristiques du ménage et de l'habitation</i> .....                        | 57        |
| 5.5.- INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DES VARIABLES COMMUNES AUX DEUX<br>ÉQUATIONS.....          | 58        |
| 5.5.1.- <i>HDD</i> .....                                                                      | 58        |
| 5.5.2.- <i>Le chauffage d'appoint</i> .....                                                   | 59        |
| 5.5.3.- <i>Le système de chauffage principal</i> .....                                        | 59        |
| 5.5.4.- <i>Les périodes de construction</i> .....                                             | 60        |
| 5.5.5.- <i>Les thermostats</i> .....                                                          | 61        |
| 5.5.6.- <i>L'isolation du sous-sol ou vide sanitaire</i> .....                                | 61        |
| 5.6.- LES MANIFESTATIONS CONCRÈTES DE L'EFFET REBOND .....                                    | 62        |
| <b>CHAPITRE 6.- SIMULATIONS .....</b>                                                         | <b>63</b> |
| 6.1.- SIMULATION 1 ET 2 SUR LES PÉRIODES DE CONSTRUCTION .....                                | 65        |
| 6.2.- SIMULATIONS 3 ET 4 SUR LES THERMOSTATS .....                                            | 67        |
| 6.3.- SIMULATION 5 SUR L'ISOLATION DU SOUS-SOL OU VIDE SANITAIRE .....                        | 68        |
| 6.4.- RÉSUMÉ DES SIMULATIONS EFFECTUÉES .....                                                 | 69        |
| <b>CONCLUSION.....</b>                                                                        | <b>70</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>                                                                    | <b>73</b> |
| <b>ANNEXES.....</b>                                                                           | <b>80</b> |

## Liste des tableaux

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Tableau 1: L'expression de Khazzoom</i> .....                                        | 12 |
| <i>Tableau 2: Détail des variables utilisées</i> .....                                  | 43 |
| <i>Tableau 3: Nombre de personnes composant les ménages</i> .....                       | 50 |
| <i>Tableau 4: Comparaison des résultats du modèle linéaire et logarithmique</i> .....   | 54 |
| <i>Tableau 5: Tableau sommaire des effets rebond obtenus avec les simulations</i> ..... | 70 |

## Liste des graphiques

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Graphique 1: Représentation graphique de l'effet rebond</i> .....                                          | 11 |
| <i>Graphique 2: Un exemple d'effet de substitution</i> .....                                                  | 14 |
| <i>Graphique 3: Distribution de la température moyenne maintenue dans l'habitation</i> .....                  | 44 |
| <i>Graphique 4: Distribution de la consommation annuelle d'électricité</i> .....                              | 45 |
| <i>Graphique 5: Distribution de l'âge du système de chauffage principal des ménages</i> .....                 | 46 |
| <i>Graphique 6: Répartition du système de chauffage principal de l'habitation</i> .....                       | 46 |
| <i>Graphique 7: Consommation moyenne d'énergie en fonction des degrés-jours de chauffage</i> .....            | 48 |
| <i>Graphique 8: Répartition du revenu selon les ménages</i> .....                                             | 49 |
| <i>Graphique 9: Répartition du nombre de pièces et d'étages des habitations</i> .....                         | 51 |
| <i>Graphique 10: Répartition de la période de construction des habitations</i> .....                          | 66 |
| <i>Graphique 11: Répartition des types de thermostats utilisés par les ménages</i> .....                      | 67 |
| <i>Graphique 12: Répartition du niveau d'isolation du sous-sol ou du vide sanitaire des habitations</i> ..... | 68 |

## Remerciements

L'auteur aimerait premièrement remercier Hydro-Québec pour sa collaboration à ce projet, en ayant rendu accessible la base de données de l'étude sur l'*Utilisation de l'électricité dans le marché résidentiel (2002)*. Également, des remerciements particuliers au directeur de recherche, Robert Gagné, pour ses précieux conseils. Enfin, une mention spéciale pour le ministère des Finances du Québec, qui a fourni le financement afin de mener à terme ce projet de recherche. Le présent document a été rédigé pour satisfaire aux exigences du programme de maîtrise et le contenu n'engage que son auteur.

## INTRODUCTION

L'efficacité énergétique est devenue un sujet de plus en plus préoccupant, tant au point de vue international et national que provincial. La recherche d'efficacité énergétique vise principalement à respecter le protocole de Kyoto par le biais d'une diminution de la consommation d'énergie, afin de contrer le phénomène des changements climatiques et s'inscrit dans une perspective de développement durable et de sécurité énergétique. Le présent mémoire propose d'estimer un concept fréquemment négligé dans les études sur les impacts de l'efficacité énergétique: l'effet rebond. Selon la définition générale de ce concept, une amélioration de l'efficacité énergétique permet une diminution du coût du service pour lequel il y a eu amélioration, et occasionne donc une augmentation de la consommation. Dans un premier temps, nous verrons dans le chapitre 1 le contexte général dans lequel s'inscrit l'efficacité énergétique au Canada. Puis, nous verrons dans le chapitre 2 une revue complète de la littérature sur l'effet rebond, comprenant entre autres des explications détaillées, des exemples, une représentation graphique, la typologie, l'évolution du concept au cours de l'histoire ainsi qu'un survol des résultats empiriques obtenus en se concentrant sur le secteur résidentiel. La deuxième partie de ce mémoire vise à estimer l'effet rebond pour le chauffage des locaux dans le secteur résidentiel au Québec pour les ménages dont la source de chauffage est l'électricité. Premièrement, nous présenterons le modèle qui sera utilisé pour effectuer l'estimation de l'effet rebond sous sa forme générale au chapitre 3. Puis, nous verrons la provenance de la base de données, les caractéristiques des variables utilisées, ainsi que quelques statistiques descriptives dans le chapitre 4. Les résultats de l'estimation du modèle seront ensuite présentés dans le chapitre 5. De plus, le chapitre 6 présentera diverses simulations de changements technologiques, réalisées dans le but de quantifier l'effet rebond. Enfin, nous verrons dans la conclusion les implications des résultats de cette étude et les possibilités pour les recherches futures.

La contribution de ce mémoire est importante. D'une part, nous ferons la lumière sur la réelle existence de l'effet rebond dans le secteur résidentiel à partir de données sur les ménages québécois. En démontrant ainsi un effet rebond significatif, ceci implique que les bénéfices liés à l'efficacité énergétique pourraient ne pas être aussi



grands qu'on le pense. Par conséquent, les économies d'énergie potentielles dues à l'efficacité énergétique dont font mention de nombreuses études, qui ne considèrent pas cet effet, sont erronées et surestiment l'impact de l'efficacité sur la réduction de la consommation. Finalement, si le gouvernement estime respecter ses engagements en vertu du protocole de Kyoto en se fiant aux économies d'énergie liées à des mesures d'efficacité énergétique, il est fort à parier que les objectifs ne soient jamais atteints et que le Canada faille à son objectif en matière de réduction de ses émissions de gaz à effet de serre (GES).

## **CHAPITRE 1.- MISE EN CONTEXTE**

Le Canada a ratifié le protocole de Kyoto en 2002, s'engageant à réduire de 6% ses émissions de gaz à effet de serre entre 2008 et 2012, par rapport aux niveaux de 1990. La consommation totale d'énergie au Canada représente moins de 3% de la consommation mondiale et les émissions de GES totalisent 2% des émissions mondiales<sup>1</sup>. Toutefois, par habitant, le Canada est le plus grand consommateur d'énergie et le deuxième plus grand émetteur de GES au monde. L'Alberta produit 29% des émissions canadiennes, l'Ontario 18%, tandis que le Québec représente 13% des émissions. Plus de 80% des émissions proviennent du secteur de l'énergie et les GES attribuables au chauffage des locaux seraient estimés à 29% des émissions au niveau individuel, tel que représenté en annexe 1. Malgré l'engagement et les efforts du Canada, les émissions de GES ont augmenté et sont à ce jour de 19,6 % supérieures à celles de 1990. La grande consommation d'énergie au Canada est souvent expliquée par son vaste territoire, son climat rigoureux et la structure de son économie.

### **1.1.- L'efficacité énergétique et le développement durable**

En réponse aux changements climatiques, une des solutions largement mises de l'avant par les pays voulant réduire leurs émissions est l'application de programmes d'efficacité énergétique. Dans cette optique, on croit que de meilleures technologies ainsi que de meilleures pratiques de consommation permettront de diminuer la

---

<sup>1</sup> Association canadienne de l'hydroélectricité (ACH)

consommation énergétique et de réduire les émissions de GES. En 1998, le gouvernement du Canada a pris l'initiative de créer l'Office de l'efficacité énergétique (OEE). Cette entité de Ressources naturelles Canada affiche son mandat comme étant de « renouveler, renforcer et accroître l'engagement du Canada envers l'efficacité énergétique » (Office de l'efficacité énergétique). Puis, le 13 avril 2005, le gouvernement du Canada a publié *Aller de l'avant pour contrer les changements climatiques : un Plan pour honorer notre engagement de Kyoto*.

La recherche d'efficacité énergétique peut donc s'inscrire dans le cadre du développement durable. C'est la Commission mondiale sur l'environnement et le développement qui a popularisé cette expression en 1987, définie comme « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de satisfaire leurs propres besoins » (Ressources naturelles Canada).

En clair, la promotion de l'efficacité énergétique est un palier essentiel de l'application du développement durable, puisqu'elle contribue à contrer les changements climatiques en réduisant les émissions de GES. À première vue, il semble que les ambassadeurs de l'efficacité énergétique aient bien raison. En effet, dans le *Document de l'Évolution de l'efficacité énergétique au Canada (1990 à 2002)*, de Ressources naturelles Canada, on montre que la consommation d'énergie du secteur résidentiel a augmenté de 9% entre 1990 et 2002, mais qu'en l'absence d'efficacité énergétique, cette croissance aurait été de 28%. Ces résultats découlent d'une méthode de décomposition sur laquelle nous n'allons pas insister. On attribue donc énormément de bénéfices aux mesures d'efficacité énergétique. Ces résultats, bien que fort encourageants, ne tiennent toutefois pas compte des réponses comportementales face aux mesures d'efficacité, et c'est précisément ce point qui nous intéresse et qui sera développé ultérieurement.

### **1.2.- L'efficacité énergétique dans une perspective de sécurité énergétique**

La question de l'efficacité énergétique prend également beaucoup d'importance quand il est question de sécurité énergétique. Afin de s'assurer que la demande d'énergie va rencontrer l'offre, on tient compte des répercussions de l'efficacité

énergétique pour équilibrer le tout. Au Canada, la sécurité énergétique nous préoccupe beaucoup, étant donné la demande sans cesse croissante du pétrole en Asie ainsi que les prix élevés de celui-ci. Mais récemment, au Québec, la question de la sécurité énergétique a également fait l'objet de plusieurs études en février 2004, quand le ministre des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Sam Hamad, a demandé l'avis de Régie de l'énergie concernant la sécurité énergétique des Québécois, dont un volet devait se pencher sur l'apport des mesures d'efficacité énergétique. Dans le contexte, on cherchait à établir la nécessité ou non de mener à terme le projet du Suroît. Ainsi, dans les mois qui ont suivi, de nombreux mémoires ont été déposés à la Régie de l'énergie. Dans son avis final soumis en juin 2004, la Régie recommande notamment au gouvernement québécois « d'initier une modification profonde et durable des habitudes de consommation d'énergie des Québécois », (Régie de l'énergie, Avis\_2004\_01, p.43-44). De plus, elle estime que l'introduction de nouvelles normes en matière de construction va permettre des économies d'énergie de l'ordre de 1.3 térawattheure (TWh) jusqu'en 2010 pour tous les secteurs, et ce, sans même considérer le comportement des ménages. Toujours dans le contexte du projet de la centrale, la Régie estime qu'Hydro-Québec doit assurer la sécurité énergétique des québécois, en prenant en compte « une contribution réaliste de l'apport des mesures d'efficacité énergétique » (Régie de l'énergie, Avis\_2004\_01 p.47). Que constitue une contribution réaliste des mesures d'efficacité énergétique et comment est-elle calculée? L'avis de la Régie l'explique comme étant définie par des facteurs tels que le potentiel technico-économique d'économie d'énergie, de la portion réalisable de ce dernier et des objectifs fixés par le Distributeur en fonction de son contexte commercial. Le but visé ici n'est pas de définir chacun de ces concepts, mais seulement de démontrer au lecteur que ces calculs sont d'ordre technique, et qu'en aucun cas ils ne considèrent les réponses comportementales des consommateurs. La Régie reconnaît l'importance des efforts de sensibilisation, mais elle n'admet pas que des réactions, conscientes ou non de la part des ménages, puissent constituer des réponses intrinsèques à l'amélioration de l'efficacité énergétique et qu'elles peuvent en réduire les bénéfices.

La Régie n'est pas la seule à négliger le comportement des consommateurs. En fait, la plupart des études n'en tiennent pas compte. À titre d'exemple, mentionnons l'étude de Dunsky (2004), qui a été soumise à la Régie et qui consistait en une



analyse des coûts et bénéfices économiques, sociaux et environnementaux du projet de la centrale du Suroît, des options d'efficacité énergétique et du développement de l'énergie éolienne. Dans la partie sur l'efficacité énergétique, on estime que l'incorporation et la bonification par Hydro-Québec de ses programmes d'efficacité pourraient augmenter les économies d'énergie de 0.5 TWh en 2006, jusqu'à 5.3 TWh en 2012. Ces résultats sont, comme la plupart des résultats similaires de d'autres études, basés sur un potentiel technico-économique d'énergie, qui ne tient pas compte du comportement des consommateurs.

L'efficacité énergétique s'inscrit donc dans 2 perspectives:

1) Le développement durable: Les programmes d'efficacité énergétique constituent un instrument de taille dans l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de GES.

2) La sécurité énergétique: Afin d'équilibrer l'offre et la demande d'énergie, on tient compte des économies d'énergie attribuables à l'efficacité énergétique.

Ainsi, si les bénéfices reliés à l'efficacité énergétique sont mal évalués, les conséquences toucheront à la fois les objectifs en matière de réduction des GES et à la fois à la sécurité énergétique.

### **1.3.- Les implications**

Bien que tous s'entendent pour dire que la consommation d'énergie doit diminuer, l'efficacité énergétique pourrait ne pas être la solution miracle aux problèmes écologiques ayant mené au protocole de Kyoto. En effet, il semblerait que les impacts positifs des mesures d'efficacité soient partiellement anéantis par une consommation sans cesse croissante des secteurs du transport et du chauffage, pour ne nommer qu'eux. Comme le mentionne Herring, « *Despite many campaigns to reduce energy use over the last 25 years, national energy consumption in all of the world's industrial countries has continued to rise, not fall. Thus energy efficiency is not as 'environmentally friendly' as many claim* » (Herring, 2004, p.1).



Nous voulons bien admettre que l'efficacité énergétique puisse constituer une avenue intéressante afin de réduire la consommation d'énergie. Toutefois, nous constatons que « la plupart des études évaluant les impacts de l'efficacité surestiment les économies d'énergie, car elles négligent la partie comportementale des sujets visés par ces mesures » (traduction libre, Haas et *al.* (2000), p.403). Les économistes se sont souvent intéressés à ces questions, sans toutefois attirer d'attention particulière de la part des écologistes. En effet, les engagements du Canada pourraient bien ne pas être respectés et la sécurité énergétique compromise si les bénéfices résultant de telles mesures sont surestimés. Tout au long de ce document, nous présenterons un concept qui peut remettre en cause les bénéfices apportés à l'efficacité énergétique: l'effet rebond. Nous estimerons par ailleurs cet effet pour le chauffage des locaux des ménages québécois dont l'électricité est la source d'énergie pour toutes les utilisations finales. Nous savons cependant que l'hydroélectricité est une énergie que l'on qualifie de propre et de renouvelable, puisque sa production engendre peu d'émissions de GES et qu'elle « ne contribue pas à la pollution de l'air, ni aux pluies acides, ni à la détérioration de la couche d'ozone » (Association canadienne de l'hydroélectricité). Nous pouvons par conséquent nous demander dans quelles mesures notre estimation apportera une contribution.

D'une part, dans un contexte de développement durable, on peut considérer notre estimation comme une application seulement. Si l'effet rebond est démontré pour le chauffage des locaux des ménages fonctionnant à l'électricité, il y a de bonnes probabilités pour qu'il le soit également chez des ménages utilisant d'autres sources d'énergie plus polluantes. De plus, malgré le fait que la consommation d'électricité n'engendre pas de GES, sa production en génère, et ce, même si elle en produit 18 fois moins que le gaz naturel, par exemple. Certains vont même jusqu'à remettre en question son caractère propre, telle que l'indique la citation suivante:

Les flux d'émission atmosphériques de GES attribuables aux aménagements hydrauliques établis sur les cours d'eau furent, durant le début des années 1990, au cœur d'un débat sur l'utilisation des rivières pour la production d'énergie [...]. Ce débat s'estompe avec une reconnaissance, par la communauté internationale, des réservoirs hydroélectriques comme une source non négligeable de GES (WCD, 2000). (Duchemin, 2001)

D'autre part, dans un contexte de sécurité énergétique, si nous n'anticipons pas bien les bénéfices de l'efficacité énergétique, et que la production de l'hydroélectricité est gérée en conséquence, il est possible que l'offre d'électricité ne soit pas suffisante pour combler la demande, ce qui compromettrait la sécurité énergétique. Sans compter le fait que cela peut avoir des répercussions sur la production de d'autres sources d'énergie, celles-ci plus dommageables pour l'environnement.

Ainsi, maintenant que nous avons vu le contexte global dans lequel s'inscrit l'efficacité énergétique au Canada et au Québec, les prochaines sections viseront à présenter de façon détaillée le concept qui a été à l'origine de ce projet de recherche: l'effet rebond.

## **CHAPITRE 2.- REVUE DE LITTÉRATURE ET RÉSULTATS EMPIRIQUES**

### **2.1.- Introduction à l'effet rebond**

Depuis fort longtemps, on prétend que l'efficacité énergétique diminue nécessairement la consommation d'énergie puisqu'à un niveau de service égal, une même utilisation finale requiert moins d'énergie. Or, déjà en 1865, dans le livre de Stanley Jevons, *The Coal Question*, on soulève que l'apparition de machines plus efficaces fonctionnant au charbon a mené à une augmentation de la consommation de celui-ci par le biais d'une diminution de son coût, ce qui a également rendu cette source d'énergie plus attrayante pour d'autres utilisations. C'est à ce moment qu'est né le concept de l'effet rebond, souvent appelé « *rebound effect* », « *takeback effect* » ou « *offsetting behavior* ». C'est relativement au secteur de l'énergie qu'a d'abord été introduit le concept de l'effet rebond. Toutefois, on peut l'appliquer de plus en plus à d'autres secteurs touchant à l'environnement et au développement durable, comme le transport aérien et le transport automobile. Dans ce mémoire, nous allons nous intéresser plus particulièrement au secteur de l'énergie.

## 2.2.- Définitions

Beaucoup d'études se sont penchées sur la question de l'effet rebond. Cependant, tous les auteurs ne s'entendent pas sur sa définition exacte. Si certains adoptent la définition générale selon laquelle l'effet rebond « nous apprend que l'efficacité et le progrès technologique sont fondamentalement liés à une augmentation de la consommation » (Schneider, 2002), d'autres optent pour une définition plus pointue.

Pour Binswanger, l'effet rebond est la réponse comportementale qui émane de l'amélioration de l'efficacité qui fait en sorte qu'une efficacité supérieure de 1% va amener une diminution de l'utilisation de la ressource de beaucoup moins de 1%, et peut parfois même l'augmenter (traduction libre, Binswanger, 2001, p.119).

Dans plusieurs études, on définit l'effet rebond comme étant l'augmentation de la consommation qui suit l'introduction de nouvelles technologies plus efficaces, parce qu'elle auront causé une baisse du prix de revient de l'utilisation du service. Cette augmentation annule en partie la réduction initiale de la consommation que devaient apporter les mesures d'efficacité. Les études de Khazzoom (1980,1987), Brookes (1990), Wirl (1997), Bentzen (2004), Grepperud et *al.* (2004) et Schipper et *al.* (2000) sont en accord avec cette définition. Dans le domaine de l'énergie plus précisément, l'effet rebond est la réponse comportementale devant la réduction du prix unitaire d'un service énergétique qui résulte d'un gain en efficacité énergétique. En résumé, si le progrès technologique fait en sorte d'accroître l'efficacité d'un appareil, alors moins d'énergie est nécessaire pour retirer de l'appareil le même niveau de service qu'auparavant. Toutefois, puisque le coût unitaire du service a implicitement diminué, une réponse comportementale va faire en sorte d'accroître la demande pour l'utilisation de ce service, ce qui est une application de base de la loi de la demande (traduction libre, Binswanger, 2001, p.120).

De manière plus générale, d'autres le définissent comme étant tout simplement la différence entre les économies d'énergie potentielles et les économies d'énergie réellement observées suite à une amélioration de l'efficacité énergétique (Gottron, 2001, p.2). Cette définition est très large, puisque l'effet rebond va englober tous les



facteurs pouvant expliquer cette différence, sans qu'ils soient nécessairement liés à une augmentation de la demande de service.

L'effet rebond est généralement présenté sous forme de pourcentage. On le mesure par le ratio de la différence entre les économies d'énergie potentielles et réelles sur les économies d'énergie potentielles. Un effet rebond de 20% signifie que 20% des économies d'énergie auxquelles on s'attendait après une mesure d'efficacité énergétique ont été réinvesties sous forme d'une augmentation de la consommation.

### **2.3.- Des exemples d'effets rebond**

Peu importe le secteur dans lequel il prend forme, l'effet rebond s'inscrit toujours dans le même mécanisme et peut survenir chaque fois que nous sommes en présence d'une amélioration de l'efficacité. Nous allons maintenant présenter des exemples concrets de situations dans lesquelles l'effet rebond peut se manifester.

#### *2.3.1.- Le secteur du transport des personnes*

Prenons l'exemple d'une voiture qui consomme peu d'essence. Cette voiture efficace peut parcourir une distance supérieure à celle d'une autre voiture moins efficace à quantité d'essence égale. Ainsi, simplement en changeant de véhicule, un conducteur observerait une diminution du coût de l'essence par kilomètre parcouru. Une manifestation possible de l'effet rebond serait de constater un accroissement de la distance parcourue avec cette nouvelle voiture plus efficace. On comprend ainsi pourquoi certains l'ont nommé « le pervers effet rebond », puisque l'apparition de voitures plus efficaces peut en fait occasionner une augmentation de la consommation, ici exprimée en distance parcourue. Dans les faits, les conducteurs peuvent utiliser les bénéfices de l'efficacité pour en faire des économies, ou selon le concept de l'effet rebond, les utiliser en parcourant plus de distance ou en augmentant leur vitesse de conduite.

#### *2.3.2.- Le secteur des technologies de l'information*

On peut puiser un autre exemple de l'effet rebond dans le secteur des technologies de l'information. Les propos d'un article paru dans *Alternatives Economiques* en

apportent une bonne illustration: «... elles [les technologies] devaient permettre de limiter la consommation de papier. Or, c'est l'inverse qui est constaté : du fait de ces technologies, jamais autant de choses n'ont été imprimées » (Duval, 2005, p. 54). Il semble bien évident ici qu'une amélioration technologique ait provoqué une réponse comportementale des utilisateurs, s'étant traduit par une augmentation des documents imprimés. Il s'agit d'une autre manifestation de l'effet rebond.

### *2.3.3.- Le secteur résidentiel*

Dans le secteur résidentiel, plusieurs utilisations finales peuvent être associées à l'effet rebond, que ce soit le chauffage de l'eau, des locaux, l'éclairage ou l'utilisation d'appareils électriques. Tous les effets rebond respectent le même mécanisme, mais l'exemple ci-après fera référence au chauffage des locaux, puisque ce sera cette utilisation finale qui nous préoccupera tout au long de ce mémoire. Supposons qu'on veuille lancer un programme d'isolation des maisons qui réduit les pertes de chaleur de 50%. Sans l'inclusion de l'effet rebond dans les calculs, la consommation d'énergie pour le chauffage serait également diminuée de 50%. Toutefois, en considérant l'effet rebond, les occupants de la maison peuvent se permettre d'augmenter la température intérieure étant donné que leur facture d'énergie sera réduite. Une portion des économies d'énergie dues à l'efficacité est donc réinvestie en une augmentation de confort. Ainsi, la différence entre l'économie potentielle d'énergie qui devait avoir lieu avec l'amélioration de l'efficacité et l'économie d'énergie effectivement observée constitue l'effet rebond. Concrètement, pour le chauffage des locaux, nous considérons que l'effet rebond peut provenir de tout progrès technologique, comme par exemple d'une amélioration de la qualité thermique de l'habitation (normes de construction, niveau d'isolation), de l'efficacité ou du remplacement du système de chauffage et d'un changement de combustible.

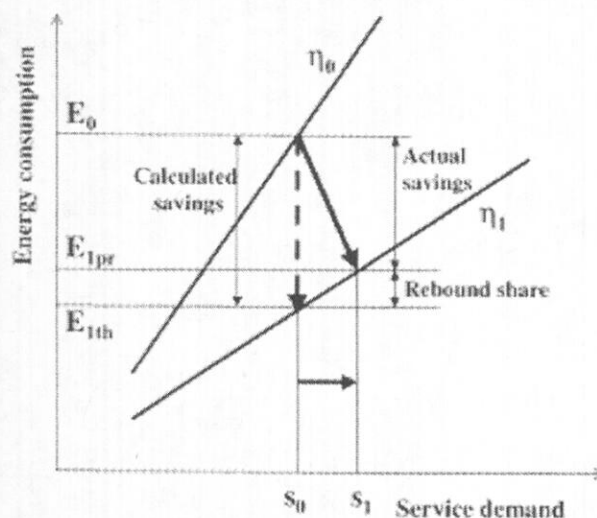
### **2.4.- Représentation graphique de l'effet rebond, appliquée au chauffage des locaux**

Afin de bien comprendre l'effet rebond, il convient de représenter graphiquement la définition que nous avons préalablement présentée. Le graphique 1, qui illustre bien l'effet rebond et sur lequel nous allons baser nos explications, est reproduit d'une étude de Haas et al. (2000).

D'une part, doit bien distinguer la demande de service en abscisse, de la consommation d'énergie en ordonnée. Dans notre exemple précédent sur l'isolation des maisons, la demande de service ou de confort correspond à la température maintenue dans l'habitation tandis que la consommation d'énergie est le nombre de kW consommés dans une période de temps. Les ménages sont évidemment davantage intéressés par les services qu'ils peuvent retirer de l'énergie que par leur consommation en tant que tel. Au départ, à un niveau d'efficacité énergétique  $\eta_0$ , on obtient, pour un niveau de service donné  $S_0$ , une consommation d'énergie de  $E_0$ . Une augmentation de l'efficacité énergétique fait pivoter la droite représentant l'efficacité de  $\eta_0$  à  $\eta_1$ . Ceci permet, pour le même niveau de service  $S_0$  de consommer moins, c'est-à-dire  $E_{1th}$ . On observe toutefois que les ménages ajustent leurs comportements, puisqu'ils constatent une baisse de leur facture d'énergie, causée par l'augmentation de l'efficacité. Ainsi, les ménages augmentent leur niveau de confort, en passant de  $S_0$  à  $S_1$ . En rapportant cette nouvelle demande de service sur l'axe des ordonnées, on se rend compte que la consommation d'énergie qui sera réellement observée sera de  $E_{1pr}$ . Si la demande de service augmente dans une proportion raisonnable, on constate que la consommation d'énergie observée sera tout de même inférieure à celle précédant la nouvelle

mesure d'efficacité énergétique. Toutefois, elle est supérieure à la consommation prévue par l'amélioration de l'efficacité. Sans inclure l'effet rebond, les économies d'énergie potentielles de l'introduction d'une mesure d'efficacité énergétique sont de  $(E_0 - E_{1th})$ . Toutefois, la modification du comportement des

Graphique 1: Représentation graphique de l'effet rebond



Source: Haas et al., 2000, p.404



ménages devant cette baisse de prix implicite va faire en sorte que les économies réalisées seront de  $(E_0 - E_{1pr})$ . L'effet rebond constitue donc  $(E_{pr} - E_{1th})$ , ou en pourcentage,  $(E_{pr} - E_{1th}) / (E_0 - E_{1th}) * 100$ . C'est précisément ce pourcentage que nous tenterons d'estimer dans une section ultérieure.

## 2.5.- Un peu d'histoire

Tel que mentionné précédemment, c'est en 1865 que Jevons a évoqué pour la première fois les fondements de ce qu'allait constituer l'effet rebond. Dans son livre, *The Coal Question*, on peut notamment y lire que:

*It is wholly a confusion of ideas to suppose that the economical use of fuel is equivalent to a diminished consumption. The very contrary is the truth. [...] the reduction of the consumption of coal, per ton of iron, to less than one third of its former amount, was followed, in Scotland, by a ten fold increase in total consumption, between the years 1830 and 1863, not to speak of the indirect effect of cheap iron in accelerating other coal-consuming branches of industry. (Jevons, 1865, chapitre 7 et 8).*

Le phénomène avait donc été observé il y a fort longtemps. Nous verrons maintenant comment l'effet rebond a évolué au cours de l'histoire et ce que les successeurs de Jevons ont apporté comme contribution.

### 2.5.1.- Le modèle à une seule utilisation de Khazzoom

**Tableau 1: L'expression de Khazzoom**

$$\eta_E(e) = \frac{e \partial v}{v \partial e} - 1 = \frac{P_E/P}{v} \frac{\partial v}{\partial (P_E/P)} - 1$$

$$= -\eta_P(v) - 1.$$

Source: Khazzoom, 1987

Dans les années 80, Khazzoom s'intéresse au phénomène qu'avait évoqué Jevons. Selon le concept développé par Khazzoom, l'effet rebond s'inscrit dans le cadre du modèle à une seule utilisation, qui constitue le service énergétique. En se référant à l'expression mathématique qu'a popularisée l'auteur, l'élasticité de

l'efficacité de la demande d'énergie,  $\eta_e(e)$ , est égale à l'élasticité-prix de la demande de service,  $\eta_P(v)$ , multipliée par -1, à laquelle on retranche une valeur unitaire. L'expression est représentée sur le tableau 1.

Sans modification du comportement devant la réduction implicite des prix suite à l'efficacité énergétique ( $\eta_P(v)=0$ ), on observerait une valeur de -1. Ceci ferait en sorte qu'aucune économie d'énergie ne serait annulée par la réponse comportementale, et  $\eta_e(e)$  serait égale à -1. Toutefois, puisqu'en temps normal l'élasticité-prix de la demande de service devrait être négative,  $\eta_e(e)$  ne sera plus égale à -1 et deviendra de moins en moins négative. Comme le mentionnent Berkhout et *al.* (2000), cette expression implique nécessairement qu'en présence d'une grande élasticité-prix se trouve également un important effet rebond. « Khazzoom a conclu, sur la base de ses recherches et de quelques résultats empiriques, que l'effet rebond était d'une ampleur significative et qu'il avait un impact non négligeable sur la consommation d'énergie » (traduction libre, Binswanger, 2001, p.125)

L'expression de Khazzoom s'inscrit dans le cadre du modèle à une seule utilisation, lequel est soumis à d'importantes critiques puisqu'il sous-tend des hypothèses fortes. Entre autres, il néglige toutes les possibilités d'effets de substitution entre les différents services ainsi que les effets revenu (traduction libre, Binswanger, 2001, p. 121). Le modèle considère également que l'énergie est le seul intrant pour le niveau de service, alors que d'autres facteurs peuvent s'avérer pertinents, tels que le capital et le temps.

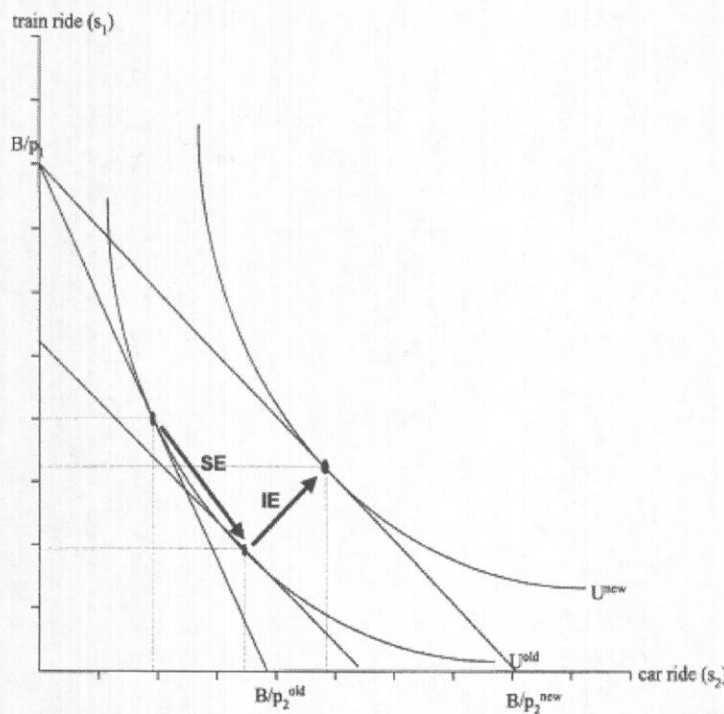
Enfin, une des dernières critiques adressées à ce modèle est qu'il suppose que l'élasticité-prix résultant d'une hausse de prix est la même que celle résultant d'une baisse. Nous verrons plus tard quand nous présenterons les résultats empiriques qu'une étude s'est penchée sur cette hypothèse afin de l'infirmier. On appelle également cette critique l'hypothèse de réversibilité des investissements. Si les prix de l'énergie augmentent, un ménage sera tenté d'investir dans des technologies plus efficaces afin de sauver des coûts. En revanche, si les prix diminuent, les investissements qui auront été faits sont de nature irréversible, ce qui fait en sorte que les ménages ne peuvent pas s'ajuster dans les mêmes proportions que dans le

cas d'une baisse de prix. « Donc, le modèle surestime probablement la flexibilité des ménages, qui réagiront dans les faits de façon plus modérée aux changements de prix que le modèle le laisse anticiper » (traduction libre, Binswanger, 2001, p.123).

### 2.5.2.- Le modèle à utilisations multiples

Puis, dans les années 80, on a assisté à un débat dans *Energy Journal* entourant l'effet rebond, principalement entre Khazzoom (1980, 1987, 1989) et Lovins (1988). Il faut mentionner que cette vague d'intérêt pour le concept de l'effet rebond coïncide avec la période de la première crise pétrolière, ce qui a engendré des débats autour des questions d'efficacité énergétique. Contrairement à Khazzoom, Lovins croit que l'amplitude théorique maximale que peut prendre l'effet rebond est d'à peine 2%, et que l'effet est donc non significatif. Selon Lovins, l'effet rebond est davantage un effet revenu qu'un effet prix, ce qui devrait provoquer beaucoup moins de réactions de la part des consommateurs. Il remet en question le modèle à une seule utilisation et propose le modèle à utilisations multiples.

**Graphique 2: Un exemple d'effet de substitution**



Source: Binswanger, 2001

L'article de Binswanger (2001) fournit 2 exemples évoquant les propos de Lovins, un avec un niveau de substitution élevé entre les services, l'autre avec un niveau de substitution faible. Nous allons en présenter qu'un seul, puisque les fondements sont essentiellement les mêmes. La situation est la suivante et est représentée sur le graphique 2: on suppose



qu'un ménage a une contrainte budgétaire reliée au voyageant qu'il peut soit effectuer en train ( $s_1$ ) ou en voiture ( $s_2$ ), et que 1 kilomètre en train nécessite moins d'énergie par personne que 1 kilomètre en voiture. La fonction d'utilité du ménage dépend du niveau de service obtenu en train et en voiture ( $\mu(s_1, s_2)$ ). On suppose également qu'il survient une amélioration de l'efficacité de l'essence, de sorte que le voyageant par automobile nécessite moins d'énergie qu'auparavant. L'amélioration fait en sorte que les prix relatifs changent, ce qui occasionne une augmentation de la demande pour le voyageant en voiture au détriment de la demande pour le voyageant en train. Cet effet de substitution est représenté par la flèche SE sur le graphique 2. Puis, il y aura également un effet revenu, représenté par la flèche IE, causé par le fait que le budget alloué pour le transport permet maintenant d'effectuer davantage de kilomètres en voiture. C'est cet effet revenu en lequel Lovins croit, qui le distingue et l'oppose au modèle proposé par Khazzoom. Dans cet exemple, le sens des effets de substitution et de revenu font en sorte que la consommation d'énergie augmente et l'effet rebond serait grand.

Dans le deuxième exemple présenté dans Binswanger (2001), on exprime une situation similaire entre les loisirs intensifs en énergie nécessitant l'usage d'un véhicule, et ceux ne requérant pas l'usage d'un véhicule, à l'exception près que les 2 services ont un faible degré de substitution. « L'exemple montre simplement l'argument de Lovins, selon lequel l'effet revenu va augmenter la demande de l'activité qui nécessite moins d'énergie, puisque le voyageant en automobile devient un bien inférieur à partir d'un certain seuil de revenu » (traduction libre, Binswanger, 2001, p.126).

*In this case, the rebound effect derived from the single-service model would be insignificant in reality because the income effect would work in favor of a reduction in energy use and the substitution effect would be very low.*  
(Binswanger, 2001, p.126)

« Le point de Lovins repose donc essentiellement sur l'existence ou non d'un niveau de revenu au-delà duquel les services nécessitant beaucoup d'énergie deviennent un bien inférieur et si la majorité des ménages sont dans les faits au-dessus de ce seuil critique de revenu » (traduction libre, Binswanger, 2001, p.126). Les 2 exemples ne montrent donc pas d'évidence relativement à l'effet rebond. « Dans le

cadre de ce modèle, l'effet net d'une augmentation de l'efficacité énergétique sur la consommation dépend du degré de substitution entre les différents services considérés et la direction de l'effet revenu » (traduction libre: Binswanger, 2001, p.126). Les exemples montrent que la consommation d'énergie pourrait soit être inférieure ou supérieure à celle prévue par le modèle à un seul service de Khazzoom.

Tandis qu'aux États-Unis, le débat avait eu lieu entre Khazzoom et Lovins, au Royaume-Uni, c'est majoritairement entre Grubb et Brookes qu'il s'effectuait. On appelle parfois le concept de l'effet rebond le postulat Khazzoom-Brookes, puisque les 2 économistes en question s'entendaient sur la nature du phénomène. Ils ont d'ailleurs publié une étude ensemble, en s'attardant toutefois davantage au côté macroéconomique à long terme de l'effet rebond, qui sera expliqué lorsque nous aborderons la typologie. À l'opposé de Khazzoom toutefois, Brookes croit qu'il n'est pas possible de parvenir à une diminution de la consommation sans subir une perte économique. Selon lui, l'interaction à long terme entre une taxe sur l'énergie et une recherche d'efficacité mène à des niveaux d'offre et de consommation supérieurs à ce qu'ils auraient été autrement.

Outre ces affrontements directs entre les auteurs, les pressions insistantes causées par le réchauffement planétaire relancent le débat sur l'effet rebond dans les années 90, particulièrement dans *Energy Policy* et *Energy Journal*. Les environnementalistes, qui croient toujours que des améliorations de l'efficacité énergétique s'accompagnent toujours d'une diminution de la consommation, s'opposent aux économistes, qui tentent de leur prouver le contraire. Nous présenterons d'ailleurs dans la section 2.9 les principaux résultats empiriques de ces études.

## 2.6.- Typologie

Lorsque les journaux scientifiques ont mentionné pour la première fois le concept de l'effet rebond, on parlait plutôt d'un effet rebond fort. Selon cette hypothèse:

*[...] improved efficiency leads to effects that erase most of the expected savings (a strong rebound) or indeed stimulates greater energy use than if no*

*improvements had taken place at all (a backfire) by lowering the cost of energy services and by stimulating economic activity*  
(Schipper et al., 2000, p.367)

Toutefois, on a également exploré l'existence d'un effet rebond faible, supposant que les économies d'énergie causées par l'efficacité énergétique pouvaient ne pas être aussi importantes que les économies anticipées, sans toutefois les anéantir totalement.

Afin de déterminer l'amplitude de l'effet rebond, nous devons d'abord nous entendre sur le phénomène précis que nous voulons mesurer. Dans notre revue de littérature, nous avons réalisé que plusieurs auteurs se réfèrent à l'étude de Greening et al. (2000) afin d'établir la typologie des effets rebond possibles. Nous allons donc reprendre les mêmes termes et discuter brièvement de chacune des catégories observées. L'effet rebond peut généralement être divisé en 3 différentes catégories: les effets directs ou de premier ordre, les effets indirects ou secondaires et les effets à la hauteur de l'économie. Les deux premières catégories sont des effets microéconomiques, tandis que le dernier est d'ordre macroéconomique.

#### 2.6.1.- L'effet rebond direct

« L'effet rebond direct est tout simplement un effet prix pur, selon lequel une amélioration de la technologie ou de l'efficacité va permettre une réduction du prix du service, de sorte qu'il y aura une augmentation de la demande d'énergie » (traduction libre, Bentzen, 2004, p.124). Dans une autre étude, on note même que « *This works exactly as would the reduction in price of any commodity* » (Herring, 2004, p.3). Dans Berkhout et al. (2000), on donne l'exemple d'un réfrigérateur qui deviendrait moins coûteux à utiliser suite à une amélioration de son efficacité énergétique. « Certains consommateurs vont se permettre de garder la température plus basse, tandis que d'autres seront moins vigilants et n'éteindront tout simplement pas l'appareil lorsqu'ils s'absentent pour des vacances » (traduction libre, Berkhout et al., 2000, p.425). L'exemple des voitures plus efficaces présenté précédemment entrerait dans cette catégorie. On note également que: « *This first-order effect is almost certainly negative, it will reduce the benefit.* » (Berkhout et al., 2000, p.425). L'effet direct est limité dans la plupart des cas, car un effet de saturation survient.



Par exemple, dans le cas des réfrigérateurs, il vient un point où on ne désire plus abaisser la température davantage, tandis que dans le cas des voitures, une contrainte de temps s'impose d'elle-même puisqu'un utilisateur ne peut augmenter sa distance parcourue indéfiniment. De plus, l'effet rebond direct ne tient pas compte des arbitrages que le consommateur peut faire avec d'autres utilisations requérant de l'énergie. Toutefois, l'effet rebond direct est beaucoup plus facile à mesurer, ce qui explique pourquoi il est également le plus documenté.

#### 2.6.2.- L'effet rebond indirect

Puis, on a élargi le concept de l'effet rebond pour inclure les effets indirects. Les effets indirects ou secondaires se rapportent aux impacts sur la demande de tous les services énergétiques, excluant celui pour lequel il y a eu amélioration de l'efficacité énergétique. Ils sont principalement constitués des effets substitution et revenu. Dans la section sur le modèle à utilisations multiples, nous avons expliqué comment se manifestaient ces effets. Lorsqu'une amélioration de l'efficacité énergétique survient pour un service en particulier, le consommateur peut décider de profiter de ces économies d'énergie pour accroître l'utilisation qu'il fait d'un autre service requérant de l'énergie. En théorie, l'effet rebond indirect est très difficile à calculer, puisqu'il devrait tenir compte d'une multitude de services pouvant s'avérer des substituts au service initialement consommé. Dans Gottron (2001), on note l'exemple d'une personne qui constate une réduction de sa facture d'électricité suite à une efficacité accrue de son appareil de climatisation et qui profite de cette baisse de coût pour s'acheter des appareils électroniques. Dans Berkhout et al. (2000), on présente l'exemple de l'utilisation d'un réfrigérateur plus efficace, qui fait soudainement augmenter la demande d'énergie pour l'éclairage, la cuisson ou la conduite. Ou bien, par exemple, une maison mieux isolée réduit les dépenses en énergie, donc les économies peuvent être réinvesties dans l'achat d'une deuxième voiture. Se sont tous là des exemples d'effets rebond indirects. Selon Greening et al. (2000):

*The size of these secondary effects for a consumer is dependent on the share of the consumer's total income or total expenditures spent on energy services. Since energy is a relatively minor share of an individual consumer's total expenditures, the secondary effects are probably insignificant.*  
(Greening et al., 2000, p.391)

### 2.6.3.- *L'effet rebond macroéconomique*

Ensuite, plusieurs auteurs ont évoqué la possibilité d'un effet rebond macroéconomique. Les effets macroéconomiques, ou comme d'autres les appellent, à la hauteur de l'économie, se rapportent à tous les ajustements qui ont lieu dans les autres marchés de l'économie, et qui touchent à la fois les producteurs et les consommateurs (traduction libre, Bentzen, 2004, p.125). L'effet rebond dans une perspective macroéconomique suppose que l'efficacité énergétique, en stimulant le taux de croissance économique, peut engendrer une augmentation de la consommation d'énergie au niveau national. Si l'efficacité énergétique permet d'utiliser moins d'énergie pour une même demande de service, et qu'en réaction à cette baisse de la demande le coût de l'énergie diminue, alors la source d'énergie peut devenir plus attrayante pour d'autres utilisations. Le cas parfois utilisé pour représenter la situation est celui de l'électricité, d'abord utilisée pour l'éclairage, puis ensuite utilisée pour une multitude d'utilisations finales. Un autre exemple, cette fois apporté par le canadien William Rees, concerne les ordinateurs, dont l'efficacité de plus en plus démontrée a permis d'en réduire les coûts à l'achat et de pénétrer le marché de façon faramineuse.

Avec l'effet rebond macroéconomique, on cherche à savoir s'il y a un lien ou une causalité entre l'efficacité énergétique et l'activité économique. Selon les adeptes, on ne doit pas regarder l'effet rebond seulement au niveau de chacun des consommateurs, mais on doit plutôt considérer la consommation d'énergie totale afin de tenir compte des facteurs macroéconomiques importants. D'autres parlent plutôt d'un effet structurel, transformationnel ou d'équilibre général, selon lequel « les effets de substitution et les effets revenu vont se propager dans toute l'économie, pour ainsi changer les niveaux d'offre et de demande dans tous les secteurs de l'économie » (traduction libre, Binswanger, 2001, p.122). Ainsi, c'est la consommation totale d'énergie au niveau national qui sera atteinte. Toutefois, selon Berkhout et *al.* (2000), l'effet net peut être soit une augmentation, soit une diminution de la consommation totale.

Le postulat Khazzoom-Brookes, dont nous avons précédemment discuté, concerne plus spécifiquement l'effet rebond macroéconomique. Selon eux, une augmentation de l'efficacité énergétique au niveau résidentiel va mener à une diminution de l'utilisation de l'énergie par chacun des ménages, mais va toutefois mener à une augmentation de la consommation d'énergie au niveau national ou macroéconomique.

Si plusieurs économistes reconnaissent qu'un effet rebond de premier ou de deuxième ordre puisse survenir, tous ne s'entendent cependant pas sur l'effet macroéconomique. En effet, l'estimation de l'effet rebond pour inclure les effets de 3e ordre est jugée théoriquement possible, mais très difficile à effectuer en pratique.

## **2.7.- La dématérialisation**

L'augmentation générale de la consommation d'énergie malgré une amélioration de l'efficacité énergétique des dernières années n'est contestée par personne. Toutefois, plusieurs écologistes croient en la thèse de la « dématérialisation de l'économie des pays industrialisés pour le futur, c'est-à-dire que toujours plus sera accompli avec une consommation moindre » (traduction libre, Herring, 1999, p.212). Dans le cœur de ce débat figurent Grubb et Lovins, qui maintiennent « qu'une économie plus tertiaire au détriment du secteur manufacturier ainsi que le grand potentiel d'efficacité énergétique vont se traduire par une réduction de la consommation d'énergie au niveau national si certaines barrières peuvent être surmontées » (Herring, 1999, p.216). Il semble que cette affirmation n'ait pas été confirmée, comme l'indique un rapport publié par la World Resources Institute:

*[...] in most, a gradual rise in per capita natural resource use and meaningful dematerialization, in the sense of an absolute reduction in natural resource use, is not yet taking place.*  
(World Resources Institute, 1997)

## **2.8.- Le paradoxe de l'économie de temps**

Dans son sens extrêmement large, l'effet rebond peut être défini comme « l'augmentation de consommation liée à la réduction des limites à l'utilisation d'une



technologie, ces limites pouvant être monétaires, temporelles, sociales, physiques, liées à l'effort, au danger, à l'organisation...» (Schneider, 2003). Dans une perspective temporelle donc, il y a un paradoxe relié à l'économie de temps, qui peut être divisé en 2 effets. D'une part, les nouvelles technologies dont la fonction première est de nous faire économiser du temps sont des appareils nécessitant davantage d'énergie pour obtenir une unité de service. Ainsi, l'efficacité technologique correspond dans ces circonstances à une augmentation de la consommation d'énergie du ménage, car les nouvelles technologies sont plus énergivores. D'autre part, il existe un effet rebond par rapport au temps qui fait en sorte qu'une nouvelle technologie plus efficace en termes de temps va mener à un accroissement dans l'utilisation de cette technologie. On appelle ce concept un paradoxe, puisque la technologie devant permettre d'économiser du temps va dans les faits mener les ménages à aucune économie de temps réelle. L'exemple le plus fréquent pour illustrer ce paradoxe est celui des moyens de transport rapides. Ces moyens de transport devaient réduire le temps de voyage des passagers. Toutefois, la diminution du coût du voyage, engendrée par une meilleure efficacité, amène un accroissement des distances parcourues qui annule les économies de temps et qui augmente l'usage du moyen de transport ultra-rapide.

Maintenant que nous avons vu l'effet rebond sous plusieurs angles, la prochaine section propose de présenter les principaux résultats empiriquement obtenus relativement à l'effet rebond.

## **2.9.- Les résultats empiriques**

Empiriquement, que ce soit de 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup> ou 3<sup>e</sup> ordre, l'ampleur de l'effet rebond calculé a varié entre 10% et 50%. Globalement, un programme d'efficacité énergétique aurait donc un taux de réussite en termes de diminution de la consommation de 50 à 90%. Les méthodes employées pour en estimer son amplitude et les utilisations finales sur lesquelles portent ces estimations sont diverses. Afin d'y voir un peu plus clair, cette section vise donc à identifier les principaux résultats empiriques de l'effet rebond selon les différentes catégories d'utilisations finales. Les résultats empiriques présentés dans cette section seront tirés des principales études traitant de l'effet rebond réalisées dans les 10 dernières années et s'appliqueront au secteur

résidentiel. Bien que le modèle présenté dans la prochaine section sera uniquement lié au chauffage des locaux, nous pensons qu'il est pertinent d'illustrer l'amplitude de l'effet rebond qui a été mesuré pour diverses utilisations finales. Le lecteur intéressé par l'effet rebond relié aux firmes pourra consulter Greening et al., (2000).

D'une part, certains auteurs se basent sur les élasticités-prix pour estimer l'amplitude de l'effet rebond direct, puisque l'efficacité énergétique mène à une diminution implicite des prix. Comme nous l'avons vu dans la section sur le modèle à un seul service de Khazzoom, son postulat repose sur l'hypothèse que l'élasticité obtenue par une diminution implicite des prix est la même que celle d'une augmentation des prix de l'énergie. Or, dans Haas et al. (1998), les auteurs utilisent des données agrégées du secteur résidentiel de 10 pays de l'OCDE entre 1970 et 1993, et parviennent à une élasticité résultant d'une hausse de prix différente de celle résultant d'une baisse de prix. Cette dernière se voit même attribuer une valeur très près de 0, ce qui permet aux auteurs de conclure à un effet rebond très bas pour le secteur résidentiel. Dans Berkhout et al. (2000), on conclut, après une analyse des élasticités-prix empiriquement obtenues dans les Pays-Bas, à un effet rebond faible, soit entre 0 et 15%. Toutefois, les résultats de De Groot et al. (1998) montrent que quand on met l'emphasis sur les ménages qui fonctionnent à l'électricité, l'élasticité-prix à court terme se situerait entre 0 et -0.25, tandis que celle à long terme se situerait entre -0.30 et -0.45. On note toutefois que:

*Based on the results of a study performed by the Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis (CPB), the steering committee concluded also that the price level affects the price elasticity: the elasticity is an increasingly upward sloping function of the energy price.*  
(Berkhout et al., 2000, p.413)

L'étude de Greening et al. (2000) parue dans *Energy Policy*, présente une revue de littérature exhaustive sur les effets rebond, soit mesurés de façon directe ou à partir d'un modèle économétrique, mais toujours avec des micro données. La revue de la littérature est cependant uniquement basée sur les études américaines. Les auteurs ont révisé 68 études du secteur résidentiel, dont 26 reliées au chauffage des locaux, 5 au chauffage de l'eau, 9 à la climatisation, 4 à l'éclairage, puis 2 reliées aux appareils ménagers. La balance est attribuée au secteur du transport automobile.

Les auteurs s'intéressent également aux firmes et aux effets plus large sur l'économie, portion que nous allons négliger dans notre revue de la littérature. L'annexe 2 présente le tableau sommaire de Greening et *al.* (2000) qui résume les effets rebond obtenus dans chacune des catégories. Ils concluent que les comportements microéconomiques des consommateurs tendent vers un effet rebond qu'ils qualifient de bas à modéré. Entre autres, ils situent l'effet rebond pour le chauffage des locaux du secteur résidentiel entre 10 et 30%. Dans les autres catégories, comme la climatisation, un effet rebond allant jusqu'à 50% a même été observé, mais le petit nombre d'études portant sur ce sous-secteur ne permet pas d'appuyer fermement ce résultat.

Dans Schipper et *al.* (2000), on parvient à la conclusion que « les effets rebond sont minimes dans les secteurs matures de l'économie et potentiellement grands dans quelques rares cas, et qu'il est faux de dire que l'effet rebond annule la plupart des économies d'énergie provenant des mesures d'efficacité énergétique » (traduction libre, Schipper et *al.*, 2000, p.368). Les résultats des effets rebond obtenus à partir des élasticités étaient de l'ordre de 5 à 15%, ce qui est quand même non négligeable. Cette étude confirme les résultats précédents obtenus par Greening et *al.* (2000) et Schwartz et *al.* (1995) selon lesquels dans le secteur résidentiel, les effets rebond sont faibles.

Bien que beaucoup d'études aient été publiées sur l'effet rebond, une grande partie d'entre elles sont appelées des études partielles, c'est-à-dire qu'elles se réfèrent à une utilisation finale bien précise. Nous allons maintenant présenter les résultats empiriques obtenus pour chacune des utilisations finales du secteur résidentiel, telles que le chauffage des locaux, le chauffage de l'eau, l'éclairage, la climatisation, les appareils ménagers et le transport personnel.

#### *2.9.1.- Chauffage des locaux*

Les études sur l'effet rebond qui ont traité plus spécifiquement du chauffage des locaux sont les plus fréquentes. Le fait que ce soit l'utilisation finale qui constitue la majorité de la consommation d'énergie d'un ménage explique en grande partie ce phénomène. Une manifestation concrète de l'effet rebond direct pour le chauffage



des locaux serait d'observer une augmentation de la température maintenue dans l'habitation après une amélioration quelconque de l'efficacité énergétique. Cet effet est toutefois contesté avec un argument qui est bien présenté dans la citation suivante:

*This is in fact no more than expected of common sense: once houses are warm enough there is no reason why increased insulation, or income, should lead residents to raise the temperature further.*  
(Schipper et al., 2000, p.371)

Nous sommes d'accord avec ces propos, toutefois nous pensons qu'il est nécessaire d'aborder la question de façon plus large. Premièrement, cet effet de saturation ne peut intervenir que si effectivement les ménages sont à un niveau optimal de confort, ce qui n'est pas observé dans la totalité des cas. Puis, l'effet rebond peut se manifester de façon inconsciente: les ménages qui constatent une diminution de leur facture d'énergie suite à une mesure d'efficacité énergétique, peuvent, sans nécessairement augmenter la température, devenir moins responsables au niveau de leur consommation. Ils pourraient par exemple ne pas ajuster leurs thermostats à la baisse lorsqu'ils sont absents de la maison ou faire moins attention aux fuites d'air qu'il pourrait y avoir dans l'habitation. Ainsi, dans cette optique plus large, il devient possible qu'un effet rebond attribuable au chauffage des locaux existe. N'oublions pas l'effet rebond indirect, qui bien que plus difficile à détecter, pourrait facilement inciter les ménages à réinvestir les économies d'énergie reliées à l'efficacité en augmentant l'utilisation qu'ils font de d'autres appareils, par exemple.

Si on veut mesurer l'effet rebond pour le chauffage des locaux, on doit s'entendre sur le concept de service ou de confort. Comme plusieurs auteurs le notent, il est difficile de trouver la meilleure mesure d'activité qui soit pour évaluer le niveau de confort. Si plusieurs utilisent la température maintenue dans l'habitation comme une approximation de la demande de confort, d'autres argumentent que l'on doit plutôt considérer le confort thermique, qui lui-même dépendrait de d'autres paramètres techniques tels que l'attitude envers le confort thermique, les niveaux d'activité individuels, la température de l'air, la température moyenne radiante, la vitesse et l'humidité. Schwartz et al. (1995) mentionnent que « les estimations économétriques qui ont tenu compte de ces variables affichaient un effet rebond

observé sur le thermostat moindre » (traduction libre: Schwartz et *al.*, 1995). Quoique plus réaliste, une telle mesure d'activité est à toutes fins pratiques impossible à obtenir dans une base de données.

Dans leur revue de littérature concernant le chauffage des locaux résidentiel, Greening et *al.* (2000) ont présenté un tableau que vous retrouverez en annexe 3. Ils décrivent ainsi les études retenues:

*Dubin et al. (1986) is significant, because heating and cooling were metered separately, and the results were compared to engineering estimates before and afterward. The analyses presented in Klein (1985, 1987) are the only studies that consider the trade-offs between capital and fuel consumption. Further, Schwartz and Taylor (1995) explore the effects of both square footage and region. While, Hsueh and Gerner (1993) contemplate the technological aspects of heating, including degree days. Finally, Cuijpers (1995, 1996) explicitly contemplates satiation of this end use.*  
(Greening et *al.*, 2000, p.393-394)

Dans Dubin et *al.* (1986), ce sont des données sur 214 ménages participant à un programme d'efficacité pour le chauffage des locaux qui ont permis aux auteurs de conclure à un effet rebond de l'ordre de 8 à 13%. Ainsi, à la lumière des études qu'ils ont parcourues, Greening et *al.* (2000) ont conclu à un effet rebond pour le chauffage des locaux représentant de 10 à 30% des économies d'énergie provenant de l'efficacité énergétique.

D'autres études non considérées dans la revue de la littérature de Greening et *al.* (2000) présentent également des résultats intéressants. C'est le cas notamment de l'article de Haas et *al.* (1998), dans lequel on mesure un effet rebond pour le chauffage des locaux allant de 15 à 30% chez les ménages autrichiens. L'étude était basée sur des données provenant de 400 ménages autrichiens de 1993 à 1996 et cherchait à incorporer les comportements des consommateurs, donc la température maintenue, à la fonction de demande d'énergie. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour effectuer l'estimation, mais toutes semblent montrer qu'il n'y a pas de relation linéaire entre la demande d'énergie pour le chauffage et la qualité thermique du bâtiment, ce qui confirme l'existence de l'effet rebond.

Dans un article semblable de Haas et *al.* (2000), portant encore une fois sur les ménages autrichiens, on conclut à un effet situé entre 20 et 30%. L'étude présentait

2 types d'analyses, une avec des données en séries chronologiques allant de 1970 à 1995, l'autre consistait en une coupe transversale de type double-log. L'étude démontre que « ce sont l'efficacité du système de chauffage et la qualité thermique de l'habitation qui influent le plus sur la demande de confort, mise à part la surface de plancher » (traduction libre, Haas et al. 2000, p. 407).

D'autres études nous donnent un aperçu de l'amplitude de l'effet rebond. Par exemple, dans Clinch et al. (2003), on cherchait, par le biais d'« un processus dynamique de modélisation, à illustrer l'arbitrage que font les ménages après des modifications au niveau de l'efficacité énergétique » (traduction libre, Clinch et al. 2003, p.567). L'étude, dont les données provenaient de 1824 habitations différentes en Irlande, a dévoilé que:

*The results of the energy-comfort trade-off demonstrate that comfort benefits account for 21% of total benefits, while energy cost savings represent 79%, broadly in line with the results of a recent ex post study by Milne and Boardman (2000) showing similar proportions for the British housing stock.*  
(Clinch et al., 2003, p.577)

L'étude de Milne et al. (2000) citée par Clinch et al. (2003) a examiné une panoplie de projets d'efficacité énergétique lancés en Grande-Bretagne dans les 20 années qui ont précédé la publication de l'article. Parmi les résultats de cette étude figure le fait que « la température maintenue dans l'habitation est le principal facteur déterminant les bénéfices résultant des mesures d'efficacité énergétique et ces bénéfices seront pris sous une forme accrue de confort plutôt qu'en une économie d'énergie » (traduction libre, Milne et al., 2000, p.411). On y note également qu'à 14°C, 50% des bénéfices seraient annulés par une augmentation de confort, qu'à 16.5°C, ce pourcentage passe à 30% et qu'à 20°C, ce pourcentage serait pratiquement nul. Comme les auteurs affirment que la température moyenne des ménages de la Grande-Bretagne se situe à 16.5°C, on peut estimer l'effet rebond à environ 30%.

Puis, le papier de Binswanger (2001) présente un tableau fort intéressant sur les principales études empiriques des années 80 et 90 qui se sont penchées sur l'estimation de l'effet rebond pour le chauffage des locaux. À la lumière des études



parcourues, dont plusieurs des résultats ont été précédemment présentés, l'auteur estime que l'effet rebond tend à se promener entre 5 et 50%.

Dans Khazzoom (1986), un modèle économétrique de la demande d'électricité pour le chauffage des locaux du secteur résidentiel à Sacramento a permis de conclure à un effet rebond à long terme de 65%. Puis, l'étude de Dinan (1987), basée sur un échantillon de 252 ménages seulement et une analyse de l'impact des modifications dans l'efficacité énergétique des bâtiments sur la température intérieure maintenue a permis de conclure à un effet rebond petit, mais significatif. Enfin, une étude similaire de Hirst (1987) basée sur un programme d'efficacité résidentiel a permis d'obtenir un effet rebond entre 5 et 25%, en comparant le comportement des ménages ayant participé au programme à ceux n'ayant pas participé.

#### *2.9.2.- Les autres utilisations finales*

Tel que mentionné précédemment, la majorité des estimations de l'effet rebond sont reliées au chauffage des locaux. Néanmoins, certaines études se sont penchées sur d'autres utilisations finales. Par ailleurs, dans Greening et al. (2000), on présente les études de Hausman (1979) et celle de Dubin et al. (1986) comme étant les meilleures estimations de l'effet rebond pour le sous-secteur de la climatisation. Ces auteurs concluent ainsi à un effet rebond allant de 0 à 50% pour cette utilisation finale. On reproche cependant à ces résultats d'avoir été estimés dans une période où le prix des combustibles étaient élevés. Pour le chauffage de l'eau, seul le résultat de l'étude de Hartman (1984) nous donne une estimation de l'effet rebond entre 10 et 40%. L'article de Herring (1999) considère le débat autour du postulat Khazzoom-Brookes en regardant les tendances à long terme au niveau de l'efficacité et de l'utilisation de l'éclairage public au Royaume-Uni. Les résultats démontrent que la fulgurante amélioration d'efficacité des lampes pendant cette période a pris la forme d'une intensification du niveau de service, et non d'une diminution de la consommation. Sans toutefois le quantifier, l'effet rebond au niveau de l'éclairage public a été démontré. Pour l'éclairage résidentiel, 4 études parcourues par Greening et al. (2000) permettent de situer l'effet rebond entre 5 et 12%. Enfin, très peu d'études ont analysé l'effet rebond au niveau des appareils

électriques. Greening et *al.* (2000), après avoir révisé 2 études, en arrivent à la conclusion que l'effet rebond potentiel relié aux appareils électriques est près de 0%. Cependant, Khazzoom (1986) était parvenu à un résultat entre 30 et 40% en utilisant des données américaines résultant d'un programme d'efficacité spécifique aux appareils électriques. Dans Gottron (2001), on note que l'effet rebond attribué aux appareils électriques se situe entre 0 et 40%.

### 2.9.3.- *Transport personnel*

Sans vouloir insister sur ce secteur, le transport personnel a également fait couler beaucoup d'encre relativement à l'effet rebond. « Il peut se manifester par un accroissement du nombre de véhicules, par un accroissement de la consommation d'essence elle-même ou par une augmentation de la distance parcourue » (traduction libre, Greening et *al.*, 2000, p.394). La revue de la littérature de Greening et *al.* (2000) leur permet de croire que la distance parcourue après un accroissement de l'efficacité de l'essence augmente de 10 à 30%. De façon générale, peu importe la manifestation de l'effet rebond, ils estiment l'effet rebond du secteur du transport personnel entre 20 et 50%.

Cette section visait à explorer les principaux résultats empiriques de l'effet rebond. De toute évidence, si les économistes ne s'entendent pas sur son amplitude réelle, la revue de la littérature suggère que l'effet rebond existe. Si certaines études ont conclu qu'il était faible, d'autres parviennent à un effet rebond très significatif, allant même jusqu'à 50%. La variation des effets rebond estimés peut être attribuable à la méthodologie employée, à l'utilisation finale sélectionnée et au secteur géographique où les données ont été recueillies. Puisqu'à ce jour aucune estimation n'a été faite à partir du secteur résidentiel québécois, nous allons donc dans la prochaine section procéder à l'estimation de l'effet rebond pour le chauffage des locaux chez les ménages québécois se chauffant à l'électricité.

## CHAPITRE 3.- LE MODÈLE

### 3.1.- Les modèles de demande d'énergie dans la littérature

On distingue souvent dans la littérature les modèles selon qu'ils se rattachent à la demande d'énergie pour utilisation finale ou à la demande de services énergétiques. Dans Guertin et *al.* (2003), on fait la distinction entre les 2 catégories de la façon suivante : « *End uses refers to unbundled input energy into its components (e.g., space heating, water heating, appliances and lighting) while energy services are the output energy of end uses.* » (Guertin et *al.*, 2003, p.5).

Ces mêmes auteurs n'ont relevé qu'une seule étude visant à modéliser la demande de services énergétiques au niveau du secteur résidentiel. Il s'agit de Schwarz et *al.* (1995) qui expriment notamment la demande de confort comme étant la température intérieure maintenue dans l'habitation. Au niveau sectoriel toutefois, il y a l'étude de McRae (1979) qui étudie la demande de service avec une analyse en 2 étapes, sur laquelle nous ne nous attarderons pas.

En revanche, les études sur la demande d'énergie par utilisation finale sont beaucoup plus abondantes. En ce qui concerne le chauffage des locaux, il y a Douthitt (1986) « qui a déterminé la demande combinée de gaz naturel pour le chauffage des locaux et le chauffage de l'eau au Canada » (traduction libre, Guertin et *al.*, 2003, p.6). Dans le cas où un même combustible est utilisé pour davantage d'utilisations finales, comme dans Douthitt (1989), une répartition doit être effectuée. Dans Haas et *al.* (1997), les auteurs présentent la méthode de répartition qui a été employée pour les ménages autrichiens qui utilisent la même source d'énergie pour le chauffage des locaux et de l'eau. « Leur technique est basée sur une simple régression linéaire qui suppose que la consommation reliée au chauffage de l'eau est constante chaque mois et que celle reliée au chauffage des locaux est proportionnelle au degrés-jours de chauffage de ce même mois » (traduction libre, Guertin et *al.*, 2003, p.6).

Enfin, il y a une catégorie d'études basées sur la demande d'énergie de certains groupes de revenu, visant à montrer que ceux-ci réagissent différemment à des augmentations de prix. « Poyer et *al.* (1993) ont développé un modèle de



consommation totale d'énergie et sont parvenus à des élasticités-prix et revenu différentes selon le groupe d'appartenance » (traduction libre, Guertin et al., 2003, p.7). L'étude de Baker et al. (1989) montre qu'en moyenne, les ménages à haut revenu sont moins sensibles aux variations de prix que les ménages à faible revenu. Au niveau des individus toutefois, les résultats qu'ils ont obtenus n'étaient pas aussi clairs puisque les ménages à haut revenu se trouvaient avec une élasticité-revenu négative. Étonnamment, dans Nesbakken (1999), on trouve que les Norvégiens à haut revenu sont plus sensibles aux changements de prix et de revenu à long terme. « Ceci peut être causé par le fait que les ménages à bas revenu puissent déjà être dans une situation de consommation minimale et ne peuvent plus diminuer leur confort devant des augmentations de tarifs » (traduction libre, Guertin et al., 2003, p.8).

Après avoir fait la distinction entre les modèles de demande d'énergie pour utilisation finale et la demande de services énergétiques, il faut évidemment choisir la forme structurelle du modèle en question. Nous avons relevé quelques tendances dans la littérature sur les formes structurelles généralement utilisées. Premièrement, plusieurs études présentent un modèle de décisions jointes ou modèle discret/continu, dans lequel la demande d'énergie consiste d'abord en un choix quant au type d'équipement, qui influe à son tour sur l'utilisation de ce même équipement. Il s'agit d'une approche en 2 étapes que plusieurs auteurs ont utilisée, tels que Nesbakken (1999) et Bernard et al. (1996). On admet généralement que cette méthode nécessite beaucoup de données et un travail de programmation intensif peu accessible à tous. Puis, d'autres ont opté pour un « modèle de forme réduite, aussi nommé modèle conditionnel, parce que la demande d'énergie est conditionnelle au stock d'équipement et de la technologie » (traduction libre, Guertin et al., 2003, p.10). Les études telles que Green et al. (1986), Douthitt (1986, 1989) et Haas et al. (1997) utilisent ce modèle. Troisièmement, on note le modèle selon le cadre de la fonction de production des ménages, qui « exprime un modèle sous forme réduite dans un système d'équations qui permet la substitution de l'énergie avec des biens ne requérant pas d'énergie » (traduction libre, Guertin et al., 2003, p.10). L'étude de Klein (1988) en est un exemple. Finalement, l'approche économétrique pour les utilisations finales la plus présente dans la littérature est le modèle d'analyse de demande conditionnelle. Ce modèle a notamment été utilisé

par Lafrance et *al.* (1994) et Larsen et *al.* (2004). Ces derniers utilisent des variables dichotomiques pour représenter les différents appareils que possèdent les ménages. Ce modèle a l'avantage d'estimer directement les paramètres de chacune des utilisations finales, sans toutefois permettre de les estimer précisément pour les équipements que tous ou presque possèdent.

D'autre part, la question du choix de la forme fonctionnelle est également à considérer, à savoir si on utilise une forme linéaire, semi-log ou double-log. La plupart des études oscillent entre une forme linéaire ou double-log. Nous pensons qu'il convient d'estimer les résultats de plusieurs façons afin de prendre la forme qui semble la plus appropriée à nos données.

Donc, avant d'élaborer notre modèle, nous devons nous demander si nous voulons modéliser la demande de service ou la consommation d'énergie. Dans notre cas, nous voulons établir un modèle de demande d'énergie afin d'isoler l'impact de la technologie sur la demande de confort des ménages. Selon le cadre théorique de l'effet rebond, les ménages consomment des services, et non pas une quantité d'énergie. Ainsi, il semble qu'une fonction axée sur la demande de services énergétiques soit plus appropriée. Nos données, comme nous le verrons plus tard, nous permettent de le faire, puisque la température maintenue dans l'habitation à différentes plages horaires de la journée fait partie des informations disponibles. Par conséquent, la combinaison de l'objectif de l'étude et des données disponibles pointe en direction d'un modèle de demande de services énergétiques. Toutefois, nous devons absolument inclure une équation modélisant la consommation d'énergie en termes physiques afin de calculer l'effet rebond, puisque le calcul requiert la consommation d'énergie qui aurait été observée s'il y avait eu une amélioration technologique sans réponse comportementale. Ainsi, pour ces raisons, le modèle qui sera retenu pour l'estimation de l'effet rebond dans le secteur résidentiel pour le chauffage des locaux sera un modèle à équations simultanées. Nous avons choisi dans cette étude d'exprimer l'énergie en termes physiques (kWh) plutôt qu'en termes thermiques (Joules) ou monétaires (\$). D'une part, il est généralement admis que l'électricité permet une efficacité totale et donc ne nécessite pas une mesure thermique. De plus, nous verrons que la base de données contient la consommation d'énergie annuelle des ménages en

kilowattheures (kWh), ce qui justifie notre choix. On retrouve également dans la littérature plusieurs études effectuées avec des unités physiques, telles que Bernard et *al.* (1996) et Douthitt (1986). Puis, pour représenter les différentes technologies utilisées, nous adopterons une méthode semblable à celle de Douthitt (1986, 1989) qui « utilise une variable dichotomique indiquant si la fournaise a été remplacée ou entretenue pendant l'année et utilise cette variable comme une approximation de l'efficacité de la fournaise » (traduction libre, Guertin et *al.*, 2003, p.11). Enfin, pour la présentation théorique du modèle, nous utiliserons le prix moyen de l'énergie, telle que l'ont fait Green et *al.* (1986) et Nesbakken (1999), malgré le fait que la plupart des modèles économétriques d'énergie utilisent les prix marginaux, puisqu'ils sont en accord avec la théorie économique classique. Dans notre cas, le choix du prix qui sera utilisé est de moindre importance puisque tous les ménages sont confrontés aux mêmes prix de l'électricité pour la période visée, et donc le prix n'entrera pas en ligne de compte. Nous allons négliger dans cette étude le prix des autres combustibles qui pourraient s'avérer des substituts à l'électricité. Notre base de données contient uniquement des ménages qui utilisent l'électricité pour toutes les utilisations finales, telles que le chauffage des locaux et de l'eau, et nous faisons l'hypothèse qu'à court terme, il n'y a pas d'autres sources d'énergie envisagées par le ménage, hypothèse qui devrait être relâchée à long terme.

La section suivante vise donc à décrire le modèle qui sera utilisé pour estimer l'effet rebond dans le secteur résidentiel pour le chauffage des locaux pour les ménages se chauffant à l'électricité.

### 3.2.- Le modèle général

Le modèle général est représenté comme suit. Nous savons que les ménages consomment de l'énergie pour les services qu'elle procure, et sont peu préoccupés par leur consommation d'énergie en termes physiques. De cette façon, ils cherchent à maximiser l'utilité retirée des services énergétiques, permis par leur consommation d'énergie. Voici le problème auquel fait face chacun des ménages:

$$\underset{S,C,X}{MAX} U(S,C,X) \quad \text{Équation 4.1}$$



Le ménage maximise son utilité ( $U$ ), où  $S$  représente le service énergétique obtenu par la consommation d'énergie. Dans le cas du chauffage des locaux, le service est précisément le niveau de confort de l'habitation, que nous allons considérer pour la suite des choses comme étant la température intérieure moyenne à laquelle le ménage maintient l'habitation. Ainsi, dorénavant, les termes demande de confort et demande de service seront utilisés pour illustrer le même concept.  $C$  représente toutes les utilisations finales requérant de l'énergie, mais qui ne sont pas associées au chauffage des locaux. Tous les autres biens de consommation sont représentés par  $X$ .

Le consommateur doit respecter sa contrainte budgétaire, représentée par l'équation 4.2.

$$R \geq P_X X + P_E Q_E \quad \text{Équation 4.2}$$

Ici,  $R$  est le revenu du ménage,  $P_X$  est le prix de tous les autres biens de consommation,  $X$  est la quantité de ces biens,  $P_E$  est le prix de l'énergie, et  $Q_E$  est la quantité d'énergie totale consommée. Nous verrons que le modèle sera uniquement appliqué aux ménages utilisant l'électricité pour toutes les utilisations finales. Ainsi,  $Q_E$  devient uniquement la quantité d'électricité consommée en kilowattheures (kWh). À noter que  $Q_E$  n'est pas la consommation d'électricité uniquement associée au chauffage des locaux. Ces données sont très rarement disponibles et c'est pourquoi nous devons prendre la consommation totale, et ensuite l'ajuster pour les autres utilisations finales.

Puis, il existe également une contrainte technologique qui détermine la consommation d'énergie des ménages. Celle-ci est représentée par l'équation 4.3.

$$Q_E = G(S, T, C) \quad \text{Équation 4.3}$$

La quantité totale d'électricité consommée par le ménage ( $Q_E$ ), dépend du niveau de confort désiré dans l'habitation ( $S$ ), des caractéristiques technologiques de

l'habitation (T) et du niveau d'utilisation des autres équipements ou systèmes nécessitant de l'énergie destinés à d'autres fins que le chauffage ainsi que des variables de contrôle (C).

Le problème du consommateur est donc le suivant:

$$\begin{aligned} & \underset{S,C,X}{MAX} \quad U(S,C,X) \\ \text{sujet à:} \quad & R \geq P_X X + P_E Q_E \\ & Q_E = G(S,T,C) \end{aligned}$$

Afin de résoudre le problème du consommateur, nous devons bâtir le Lagrangien suivant:

$$\underset{S,C,X,\lambda_1,\lambda_2}{MAX} \quad L \quad U(S,C,X) - \lambda_1(R - P_X X - P_E Q_E) - \lambda_2(Q_E - G(S,T,C))$$

Les conditions de premier ordre (CPO) sont:

$$\frac{\partial \ell}{\partial S}: \frac{\partial U(S,C,X)}{\partial S} + \lambda_2 G(S,T,C) \frac{\partial G(S,T,C)}{\partial S} = 0$$

$$\frac{\partial \ell}{\partial X}: \frac{\partial U(S,C,X)}{\partial X} + \lambda_1 P_X = 0$$

$$\frac{\partial \ell}{\partial C}: \frac{\partial U(S,C,X)}{\partial C} + \lambda_2 G(S,T,C) \frac{\partial G(S,T,C)}{\partial C} = 0$$

$$\frac{\partial \ell}{\partial \lambda_1}: R - P_X X - P_E Q_E = 0$$

$$\frac{\partial \ell}{\partial \lambda_2}: Q_E - G(S,T,C) = 0$$

Puisque les variables de contrôle pour les autres utilisations finales (C) et pour les autres biens de consommation (X) seront considérées comme étant exogènes dans le modèle, il est suffisant de résoudre uniquement pour S. La relation est présentée par l'équation 4.4. Puis, comme nous voulons également modéliser la

consommation d'électricité, nous allons retenir la contrainte technologique comme étant l'équation de la consommation. Le système d'équations est donc le suivant:

$$S = f(P_x, P_E, T, R, C) \quad \text{Équation 4.4}$$

$$Q_E = G(S, T, C) \quad \text{Équation 4.5}$$

Pour faire référence à la revue de littérature précédente, ce qui caractérise notre modèle, c'est que nous faisons à la fois appel à la quantité d'énergie consommée et à la demande de service. Un ménage consomme des services et non pas de l'énergie en tant que tel. Par conséquent, bien que le prix de l'énergie constitue un facteur qu'il considère lorsqu'il établit son niveau de confort désiré, le nombre de KWh consommés le laisse par contre totalement indifférent. Dans la deuxième équation cependant, la quantité d'énergie consommée doit tenir compte du niveau de confort que le ménage désire maintenir dans l'habitation. C'est ici que réside la simultanéité du modèle.

Dans l'équation 4.4, le niveau de confort (S) désiré par le ménage dépend essentiellement du prix des autres biens, du prix de l'énergie, de la technologie de l'habitation, du revenu du ménage et des services retirés des autres utilisations finales requérant de l'énergie (chauffage de l'eau, climatisation, éclairage, utilisation des appareils électriques, piscine, etc...) En effet, un ménage maintient la température intérieure de son habitation à un niveau optimal selon sa contrainte budgétaire. Pourquoi la technologie apparaît-elle dans l'équation de la demande de confort? C'est que l'inclusion de cette variable nous permettra de déceler l'effet rebond. Si aucun lien n'existe entre la technologie, devant représenter une approximation de l'efficacité énergétique globale de l'habitation, et le niveau de confort choisi, alors l'existence de l'effet rebond sera remise en question. Toutefois, si un lien significatif apparaît dans nos résultats, alors nous pourrions dire que certaines modifications dans les caractéristiques technologiques de l'habitation sont associées à une réponse comportementale des ménages, qui augmenteront leur niveau de confort moyen, et donc permettra de déceler l'effet rebond. Tout au long de cette étude, nous ferons l'hypothèse que les variables de technologie sont exogènes.



L'équation 4.5 exprime la quantité d'énergie consommée en fonction du niveau de confort demandé, de la technologie de l'habitation et des variables de contrôle, incluant des caractéristiques de l'habitation et des variables qui dressent un portrait de l'utilisation de l'énergie des ménages à d'autres fins que pour le chauffage des locaux. Cette équation est purement technique. Elle permet simplement d'estimer la consommation d'énergie qui devrait être observée par chacun des ménages, compte tenu du niveau de confort demandé et des caractéristiques précises de l'habitation. Cette équation ne tient aucunement compte des éventuelles réponses comportementales des ménages face à des modifications dans la technologie, et ne permet donc pas à elle seule de détecter l'effet rebond.

Le modèle économétrique utilisé sera donc un modèle à équations simultanées, dans lequel la consommation d'énergie dépend de la demande de confort sans que cette dernière ne dépende de la consommation. Comme le modèle économétrique sera estimé à l'aide d'une coupe transversale basée sur un échantillon final contenant 1774 ménages, dont les données ont été recueillies pour l'année 2001 seulement, quelques variables présentes dans le modèle théorique peuvent être délaissées. Entre autres, nous pouvons exclure  $P_x$ , le prix de tous les autres biens, étant donné qu'il aurait été représenté par l'indice des prix à la consommation, et que cet indice aurait été le même pour tous les ménages. Il devient alors inutile d'intégrer cette variable dans notre équation de la demande de service. De façon similaire, le prix de l'électricité auquel font face les ménages est constant, et donc cette variable n'apporterait aucun pouvoir explicatif au modèle, ce qui nous permet de l'éliminer.

Le modèle économétrique sera donc le suivant:

$$S = f(T, R, C) + \mu_1 \quad \text{Équation 4.6}$$

$$Q_E = G(S, T, C) + \mu_2 \quad \text{Équation 4.7}$$

Nous allons estimer le modèle avec une forme linéaire de  $f$  et  $G$ , ainsi qu'avec une forme logarithmique de ces 2 fonctions exprimées par rapport au logarithme de la

demande de confort et de la demande de service. Nous verrons dans le chapitre 4 la description détaillée des variables contenues dans chacune des équations.

### 3.3.- Le calcul de l'effet rebond avec le modèle

Essentiellement, les calculs d'économies d'énergie reliées aux programmes d'efficacité énergétique supposent une relation linéaire entre le niveau d'efficacité de la technologie et la consommation d'énergie. Ainsi, un programme d'efficacité énergétique qui augmenterait de 50% le rendement énergétique global de l'habitation permettrait également de diminuer de 50% la consommation d'énergie. Notre modèle permet de vérifier s'il existerait un lien entre la demande de confort, la technologie et la consommation. Ceci est possible grâce à notre système d'équations simultanées qui établit une demande de confort et une demande de consommation, en incluant le confort maintenu dans l'équation de la quantité d'énergie consommée.

Comment le modèle permettra-t-il de calculer l'amplitude de l'effet rebond? Pour répondre à cette question, revenons à la définition mathématique même de l'effet rebond :

$$ER(\%) = \frac{\text{Economies d'énergie potentielles} - \text{Economies d'énergie observées}}{\text{Economie d'énergie potentielles}} * 100 \quad \text{Équation 4.8}$$

Ainsi, bien qu'une relation significative entre la technologie et le niveau de confort de la première équation va nous permettre de déceler l'effet rebond, elle ne nous permettra pas d'en mesurer l'amplitude en termes d'énergie. Ce qui intéresse les ménages, c'est le confort, mais ce qui intéresse les intervenants au niveau de l'efficacité énergétique, ce sont les impacts en termes de quantités d'énergie consommées ou dans notre cas, en terme d'électricité (kWh).

Une fois que nous aurons estimé le système d'équations, ce que nous ferons au chapitre 5, nous serons en mesure de faire des simulations de changements technologiques et d'en estimer l'impact sur la consommation d'énergie de chacun des ménages. Ainsi, nous pourrions estimer l'effet rebond.

Par exemple, supposons que le système d'équations a été estimé. Supposons également qu'on lance un ambitieux programme d'efficacité énergétique relativement à l'isolation des bâtiments et des fenêtres qui permettrait d'augmenter le rendement énergétique global des habitations de 20%. Sans effet rebond, on pourrait s'attendre à une diminution de la consommation d'énergie de 20% également. Il s'agit, dans un premier temps, de changer le paramètre exogène représentant la technologie dans l'équation 4.6. Nous obtiendrons de cette façon un nouveau niveau de confort du ménage qui réagira à cette amélioration d'efficacité, car les prix relatifs de l'énergie par rapport aux autres biens auront changé. Une fois le nouveau niveau de confort calculé, il s'agit de le substituer dans l'équation 4.7 et de modifier la technologie. Nous obtiendrons la quantité d'énergie consommée par le ménage suite au changement de technologie avec un ajustement pour la demande de confort. Sans effet rebond, nous aurions simplement inclus la technologie dans l'équation de consommation, mais maintenant, nous considérons également le niveau de service qui aura évidemment changé. Nous verrons en détail la méthodologie utilisée pour effectuer les simulations dans le chapitre 6.

Dans la littérature, on mentionne que dans le cas du chauffage des locaux, les gains en efficacité peuvent provenir de plusieurs sources, telles que :

- d'une augmentation de la qualité thermique du bâtiment
- d'une augmentation de l'efficacité du système de chauffage ou un changement de système
- d'un changement de combustible

Dans notre cas, l'efficacité ne pourra pas provenir d'un changement de combustible puisque seuls les ménages consommant de l'électricité pour chacune des utilisations finales ont été retenus, et ne pourra pas non plus provenir de l'efficacité du système de chauffage, puisqu'il est généralement admis que les systèmes de chauffage électriques sont efficaces à un niveau près de 100%. Enfin, les gains pourront provenir de normes de construction supérieures, d'une meilleure isolation et des thermostats utilisés, pour ne nommer que ces variables.



## CHAPITRE 4.- LES DONNÉES ET LES VARIABLES

### 4.1.- Les données

La banque de données à laquelle nous avons eu accès est le fruit de l'étude "Utilisation de l'électricité dans le marché résidentiel - 2002" effectuée par Hydro-Québec Distribution (HQD). Cette étude constituait la 10<sup>e</sup> édition du suivi du marché résidentiel de l'entreprise. Elle vise principalement, comme l'indique Hydro-Québec à « mesurer l'utilisation de l'électricité pour le chauffage des locaux et de l'eau, de suivre l'évolution de la diffusion des appareils à forte consommation d'électricité et finalement, d'identifier les tendances de conversion de sources d'énergie et de systèmes de chauffage » (Hydro-Québec, Utilisation de l'électricité dans le marché résidentiel - 2002).

La cueillette des données a été effectuée par sondage téléphonique, ce qui a permis de rejoindre un plus grand nombre de répondants. L'enquête a été réalisée par Ad hoc recherche qui s'en est vu accordé le mandat afin de rejoindre l'ensemble des clients résidentiels à mesurage individuel de HQD assujettis aux tarifs D, DT et DH, propriétaires ou locataires, responsables de leur facture d'électricité. Les entrevues ont eu lieu du 14 février au 18 mars 2002 et le taux de réponse a été de 68,6%.

Le sondage a été réalisé auprès de 10 047 clients résidentiels d'*Hydro-Québec* répartis sur l'ensemble du territoire québécois, à l'exception des réseaux autonomes (mais incluant les Iles-de-la-Madeleine). La sélection des répondants s'est faite de façon aléatoire à partir d'une liste d'abonnés correspondant à la distribution réelle de l'ensemble des inscriptions au fichier SGA (*Système de Gestion des Abonnements*).  
(Hydro-Québec, Utilisation de l'électricité dans le marché résidentiel - 2002)

À noter que les données sur la consommation sont celles de 2001, même si le sondage a été réalisé en 2002. Le questionnaire est essentiellement divisé en 11 sections, et contient des informations sur les caractéristiques de l'habitation, l'utilisation des équipements électriques/électroménagers, le chauffage des locaux, le chauffage d'appoint, de même que la climatisation, la ventilation et le traitement de l'air, la conversion du système de chauffage principal, le chauffage de l'eau, la piscine, la superficie de l'habitation, l'éclairage et les systèmes d'alarme anti-vol, les caractéristiques des ménages ainsi que les caractéristiques du répondant.

#### 4.2.- Description de notre échantillon

Parmi les 10 047 répondants contenus dans la base de données, nous avons dû nous concentrer sur un segment de la clientèle plus précis, étant donné que certaines questions différaient selon les caractéristiques des ménages et des habitations. Par conséquent, nous avons restreint notre analyse aux propriétaires et co-propriétaires uniquement, qui représentaient environ 60% de l'échantillon initial. De plus, nous nous sommes limités à la clientèle qui utilise l'électricité comme seule source d'énergie pour toutes les utilisations finales, telles que le chauffage des locaux, le chauffage de l'eau, l'éclairage et évidemment l'utilisation des appareils ménagers. Une fois cette sélection faite, il demeure 3943 répondants dans l'échantillon. Finalement, étant donné l'importance de la variable indiquant la catégorie de revenu, nous avons dû éliminer les répondants qui se sont abstenus de répondre à cette question, et qui constituaient une proportion considérable d'environ 25% de l'échantillon total<sup>2</sup>. Cette sélection a fait réduire la taille de l'échantillon à 2861 répondants. D'autres sélections ont été faites, comme par exemple nous avons conservé uniquement les habitations qui constituaient la résidence principale du ménage. Nous avons également retiré quelques ménages de la base de données dû à la présence de valeurs manquantes de certaines variables importantes, telles que la consommation annuelle d'électricité, la température intérieure maintenue, la période de construction de l'habitation et le système de chauffage principal. Après toutes les sélections, nous obtenons ainsi un échantillon final de 1774 ménages.

Toutes les variables utilisées pour l'estimation du modèle, que nous allons présenter dans une section ultérieure, à l'exception d'une seule, ont été puisées dans la base de données sur l'utilisation de l'énergie fournie par HQD. Plusieurs d'entre elles ont été transformées en variables binaires pour illustrer les différentes catégories de réponses.

---

<sup>2</sup> Nous sommes conscients que cette étape a pu engendrer un biais de sélection. Toutefois, étant donné l'importance de cette variable dans notre modèle, nous avons tout de même poursuivi avec cette méthodologie.

Une seule variable essentielle à l'estimation du modèle n'était pas présente dans la base de données. Il s'agit d'une variable devant représenter les conditions météorologiques. En effet, elles peuvent expliquer une partie non négligeable de la consommation des ménages. La façon communément utilisée afin d'intégrer les conditions météorologiques aux modèles de demande d'énergie est l'utilisation d'une variable appelée degrés-jours de chauffage (HDD = heating degree day). Cette variable étant absente de la base de données, nous avons dû la créer à partir d'informations essentielles sur la position géographique des habitations contenues dans la base de données principale.

La base de données relative aux degrés-jours de chauffage provient des Archives nationales d'information et de données climatiques d'Environnement Canada. Elle contient donc, pour une multitude de villes, le nombre de degrés-jours de chauffage mensuels. Les valeurs annuelles pour 2001 sont simplement obtenues en additionnant les valeurs mensuelles.

Étant donné que les villes munies d'une station météorologique ne sont pas nécessairement les mêmes que les villes où habitent les ménages de la base de données principale, nous avons dû trouver une méthode pour concilier les données. Nous avons donc décidé de procéder par secteur. En effet, pour chacun des 45 secteurs définis dans la base de données de HQD, nous avons fait la moyenne des degrés-jours de chauffage affichés par chacune des stations météorologiques présentes dans ce secteur. À noter que le jumelage des stations météorologiques aux secteurs de HQD a été possible grâce à une carte détaillée de chacun des secteurs que HQD nous a fournie. L'annexe 4 récapitule les secteurs utilisés, le nombre de stations météorologiques qui ont permis le calcul de la variable, et enfin les degrés-jours de chauffage moyens calculés.

Bien qu'il aurait été préférable d'avoir une valeur de HDD pour chacune des villes, la non disponibilité des données fait en sorte que 45 données différentes de degrés-jours de chauffage sont intégrées à notre base de données finale. Nous pensons toutefois que cela permet de capter la plupart des changements climatiques d'une région à l'autre.



### 4.3.- Les variables et les statistiques descriptives

Cette section vise à présenter les différentes catégories de variables utilisées dans chacune des 2 équations du modèle à équations simultanées. Le tableau 2 résume les principales caractéristiques.

#### 4.3.1.- Variables endogènes

Les variables endogènes du modèle sont le niveau de confort maintenu dans l'habitation ainsi que la quantité d'énergie consommée.

##### 4.3.1.1.- Demande de confort

En ce qui concerne la demande de confort, S, le questionnaire de l'étude Utilisation de l'électricité dans le marché résidentiel (2002) auquel les ménages devaient répondre ne permet pas d'obtenir directement cette donnée. En revanche, 3 questions adressées aux ménages ont permis de détecter la partie comportementale au niveau du chauffage des locaux. Plus précisément, on leur demande d'identifier la température (°C ou °F) à laquelle ils maintiennent leur habitation durant la saison de chauffage pour 3 plages horaires différentes:

- Les jours de la semaine de 7h00 à 17h00 (jour)
- Les jours de la semaine de 17h00 à 23h00 (soir)
- Les jours de la semaine de 23h00 à 7h00 (nuit)

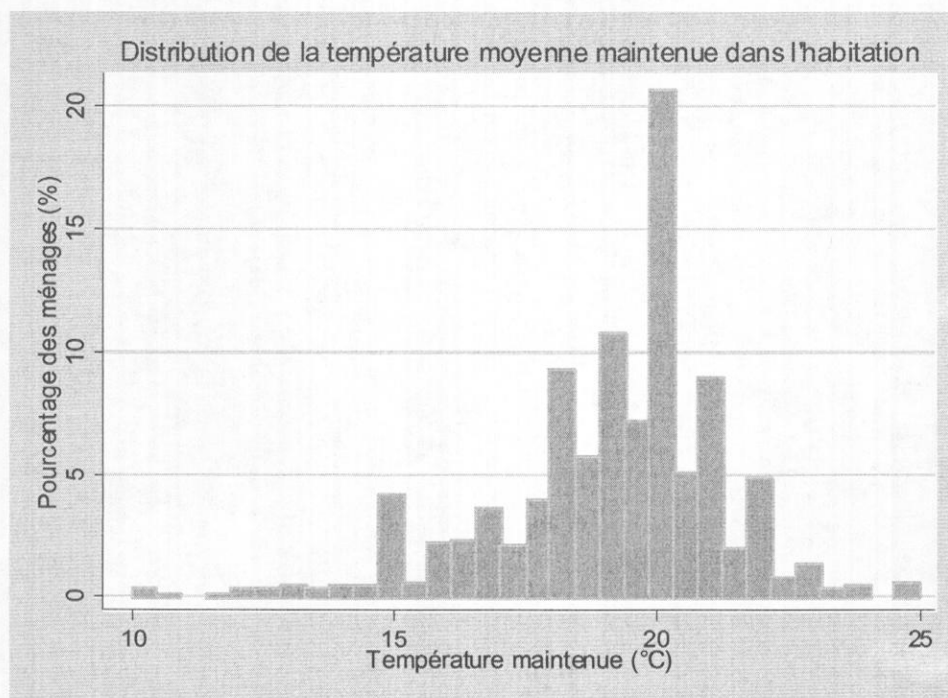
Puisque nous n'avons pas les heures de travail des ménages ou les heures pendant lesquelles les occupants sont absents de l'habitation, il convient de tenir compte de la température moyenne à laquelle ils maintiennent l'habitation. C'est pourquoi la variable finale retenue sera la température moyenne pondérée par la proportion des heures de la plage horaire. Par exemple, si un ménage maintient la température à 17 °C pendant la plage 1), à 22 °C pendant la plage 2) et à 20 °C pendant la plage 3), alors la variable S calculée sera 19.25 °C ( $17\text{ °C} \cdot 10/24 + 22\text{ °C} \cdot 6/24 + 20\text{ °C} \cdot 8/24$ ). Ceux n'ayant répondu qu'à une seule plage horaire se sont vus attribuer cette même valeur comme température moyenne. Pour ceux ayant donné 2 réponses sur 3, nous avons fait la moyenne pondérée des 2 valeurs données pour obtenir la valeur de S. Les ménages n'ayant répondu à aucune des 3 questions ont évidemment été

Tableau 2: Détail des variables utilisées

| Variable                                                                                        | Description                                                              | Type<br>B=Binaire<br>D=Discrete<br>C=Continue |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Variables endogènes</b>                                                                      |                                                                          |                                               |
| S                                                                                               | Température maintenue dans l'habitation en °Celsius                      | C                                             |
| Q <sub>E</sub>                                                                                  | Consommation annuelle d'électricité en kWh                               | C                                             |
| <b>Variables exogènes : Catégorie R (revenu)</b>                                                |                                                                          |                                               |
| R: Revenu du ménage ( R1 = moins de 10 000\$; dans la constante)                                |                                                                          |                                               |
| R2                                                                                              | de 10 000 \$ à 29 999 \$                                                 | B                                             |
| R3                                                                                              | de 30 000 \$ à 39 999 \$                                                 | B                                             |
| R4                                                                                              | de 40 000 \$ à 59 999 \$                                                 | B                                             |
| R5                                                                                              | de 60 000 \$ à 79 999 \$                                                 | B                                             |
| R6                                                                                              | de 80 000 \$ à 99 999 \$                                                 | B                                             |
| R7                                                                                              | plus de 100 000\$                                                        | B                                             |
| <b>Variables exogènes : Catégorie T (technologie)</b>                                           |                                                                          |                                               |
| PER: Période de construction de l'habitation ( PER1 = avant 1960; dans la constante)            |                                                                          |                                               |
| PER2                                                                                            | Dans les années 60                                                       | B                                             |
| PER3                                                                                            | Dans les années 70                                                       | B                                             |
| PER4                                                                                            | Dans les années 80                                                       | B                                             |
| PER5                                                                                            | Dans les années 90                                                       | B                                             |
| PER6                                                                                            | Entre 2000 et aujourd'hui                                                | B                                             |
| SYST: Indique le système principal de chauffage ( PE = plinthes électriques; dans la constante) |                                                                          |                                               |
| THERMO                                                                                          | Thermopompe                                                              | B                                             |
| FMP                                                                                             | Fournaise murale ou de plancher                                          | B                                             |
| CONV                                                                                            | Unités convecteurs, plancher ou plafond radiant                          | B                                             |
| SCAC                                                                                            | Système central à air chaud                                              | B                                             |
| SCEC                                                                                            | Système central à eau chaude                                             | B                                             |
| SYST_AGE                                                                                        | Age du système de chauffage principal                                    | D                                             |
| CHAUFF_APP                                                                                      | Nombre de chaufferettes pour chauffage d'appoint                         | D                                             |
| PLINTHES_APP                                                                                    | Nombre de plinthes électriques pour chauffage d'appoint                  | D                                             |
| CONV_APP                                                                                        | Nombre de convecteurs avec ou sans ventilateur (chauffage d'appoint)     | D                                             |
| APP_ELEC                                                                                        | Système de chauffage d'appoint à l'électricité                           | B                                             |
| APP_AUTRE                                                                                       | Système de chauffage d'appoint ne fonctionnant pas à l'électricité       | B                                             |
| SSVS_TI                                                                                         | Le sous-sol ou le vide sanitaire est totalement isolé                    | B                                             |
| SSVS_PI                                                                                         | Le sous-sol ou le vide sanitaire est partiellement isolé                 | B                                             |
| TEP                                                                                             | Nombre de thermostats électroniques programmables                        | D                                             |
| TENP                                                                                            | Nombre de thermostats électroniques non-programmables                    | D                                             |
| TR                                                                                              | Nombre de thermostats réguliers placés sur le mur                        | D                                             |
| <b>Variables exogènes : Catégorie C (contrôle)</b>                                              |                                                                          |                                               |
| *SOUS-CATÉGORIE M: CARACTÉRISTIQUE MÉTÉOROLOGIQUE                                               |                                                                          |                                               |
| HDD                                                                                             | Degrés-jours de chauffage pour 2001                                      | C                                             |
| *SOUS-CATÉGORIE I: CARACTÉRISTIQUES DES INDIVIDUS DU MÉNAGE                                     |                                                                          |                                               |
| COPROP                                                                                          | Indique s'il s'agit d'une co-propriété                                   | B                                             |
| PERSONNES                                                                                       | Nombre de personnes habitant le foyer                                    | D                                             |
| STATUT: Indique le statut du ménage ( STATUT1 = couple sans enfant; dans la constante)          |                                                                          |                                               |
| STATUT2                                                                                         | Couple avec enfant(s)                                                    | B                                             |
| STATUT3                                                                                         | Personne seule sans enfant                                               | B                                             |
| STATUT4                                                                                         | Personne seule avec enfant(s)                                            | B                                             |
| STATUT_AUTRE                                                                                    | Personne vivant avec d'autres personnes que conjoint et enfants          | B                                             |
| AGE: Indique l'âge du répondant ( A1 = de 18 à 29 ans; dans la constante)                       |                                                                          |                                               |
| A2                                                                                              | 30 à 49 ans                                                              | B                                             |
| A3                                                                                              | 50 à 64 ans                                                              | B                                             |
| A4                                                                                              | 65 ans et plus                                                           | B                                             |
| *SOUS-CATÉGORIE H: CARACTÉRISTIQUES DE L'HABITATION                                             |                                                                          |                                               |
| GENRE: Indique le type d'habitation ( INDIV = maison individuelle; dans la constante)           |                                                                          |                                               |
| DU_TRI                                                                                          | Duplex ou triplex                                                        | B                                             |
| RANGÉE                                                                                          | Maison en rangée                                                         | B                                             |
| COLLECTIVE                                                                                      | Habitation collective (immeuble)                                         | B                                             |
| GENRE_AUTRE                                                                                     | Autre type d'habitation non spécifié                                     | B                                             |
| PIECES                                                                                          | Nombre de pièces chauffées (incluant sous-sol)                           | D                                             |
| ETAGES                                                                                          | Nombre d'étages chauffés et habitables                                   | D                                             |
| *SOUS-CATÉGORIE U: CARACTÉRISTIQUES RELIÉES À L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE                        |                                                                          |                                               |
| APP_CUISSON                                                                                     | Nombre d'appareils de cuisson                                            | D                                             |
| LAVE_VAISS                                                                                      | Lave-vaisselle                                                           | B                                             |
| LAVEUSE                                                                                         | Laveuse à linge électrique                                               | B                                             |
| NBRE_TV                                                                                         | Nombre de téléviseurs utilisés                                           | D                                             |
| NBRE_ORD                                                                                        | Nombre d'ordinateurs utilisés                                            | D                                             |
| NBRE_FRIG                                                                                       | Nombre de réfrigérateurs                                                 | D                                             |
| CE                                                                                              | Age du chauffe-eau électrique actuel                                     | D                                             |
| CAP                                                                                             | Capacité du chauffe-eau électrique                                       | D                                             |
| ECLAIR                                                                                          | Système d'éclairage extérieur pour sécurité ou valorisation de propriété | B                                             |
| PISCINE                                                                                         | Piscine (hors-terre, creusée extérieure ou intérieure)                   | B                                             |
| MIN_PISC                                                                                        | Filtre de piscine est équipé d'une minuterie                             | B                                             |
| CLIM                                                                                            | L'habitation est climatisée (en partie ou totalité)                      | B                                             |

exclus du modèle. Le graphique 6.3 suivant illustre la répartition de la température moyenne maintenue dans l'habitation selon les ménages. Malgré une forte concentration autour de 20°C, on constate quand même une bonne dispersion des valeurs que peut prendre la variable.

**Graphique 3: Distribution de la température moyenne maintenue dans l'habitation**



#### 4.3.1.2.- Consommation annuelle

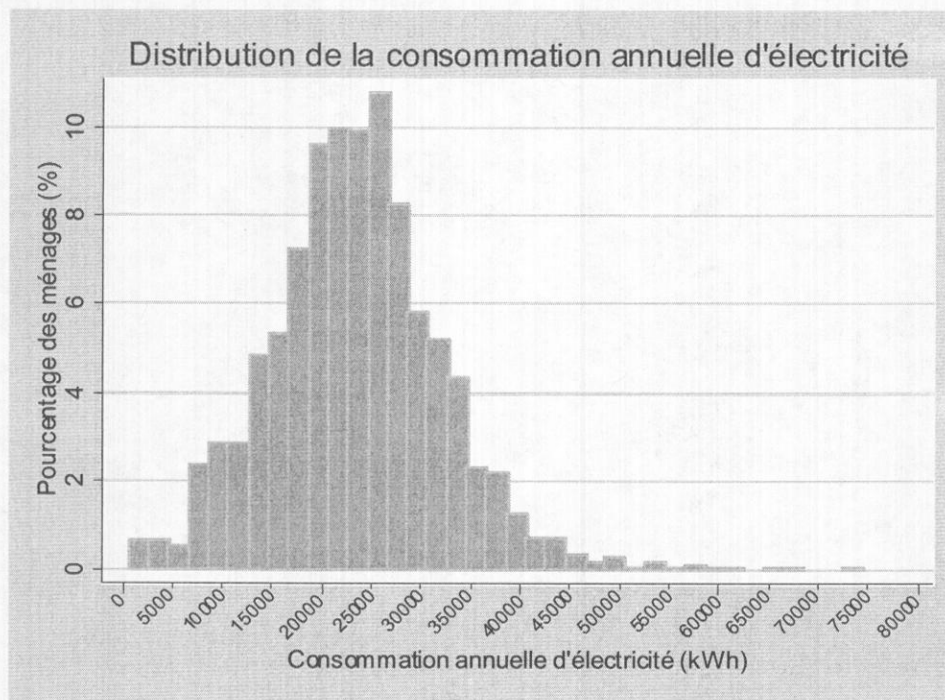
La deuxième variable endogène de notre modèle concerne la consommation annuelle d'électricité en kWh de chacun des ménages. Cette donnée a été directement fournie par HQD, comme étant la consommation annuelle du répondant des 365 derniers jours facturés au 31 décembre 2001. À noter cependant que seulement les répondants ayant un historique de facturation pour l'année de plus de 330 jours ont été retenus. Lorsque l'historique de facturation figurait entre 330 et 365 jours, la consommation a été ajustée sur une base de 365 jours au moyen d'une simple règle de 3. Le graphique 4 représente la distribution de la consommation annuelle d'électricité des ménages en kWh. On remarque que la variable est distribuée de façon presque symétrique autour de la moyenne, située à 23 342 kWh.



#### 4.3.2.- Les variables exogènes

Les variables exogènes dans ce modèle sont les variables devant représenter la technologie utilisée dans l'habitation reliée au chauffage des locaux et les variables de contrôle.

**Graphique 4: Distribution de la consommation annuelle d'électricité**



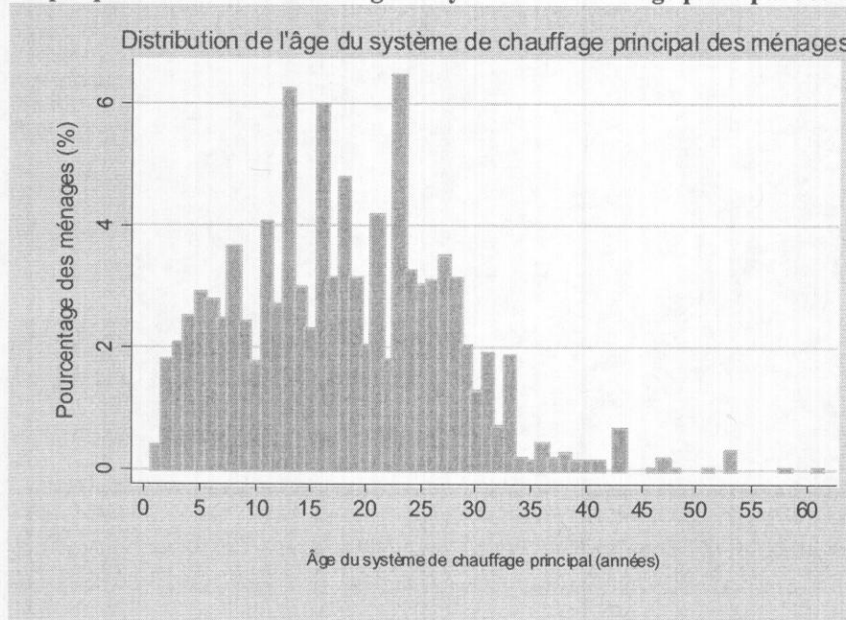
##### 4.3.2.1.- Les variables représentant la technologie

Nous savons qu'il est crucial d'intégrer des variables relatives à la technologie utilisée dans l'habitation pour l'estimation de notre modèle. Ces variables, comme nous l'avons vu, seront intégrées dans les 2 équations, car elles permettront à la fois de déceler et de quantifier l'effet rebond.

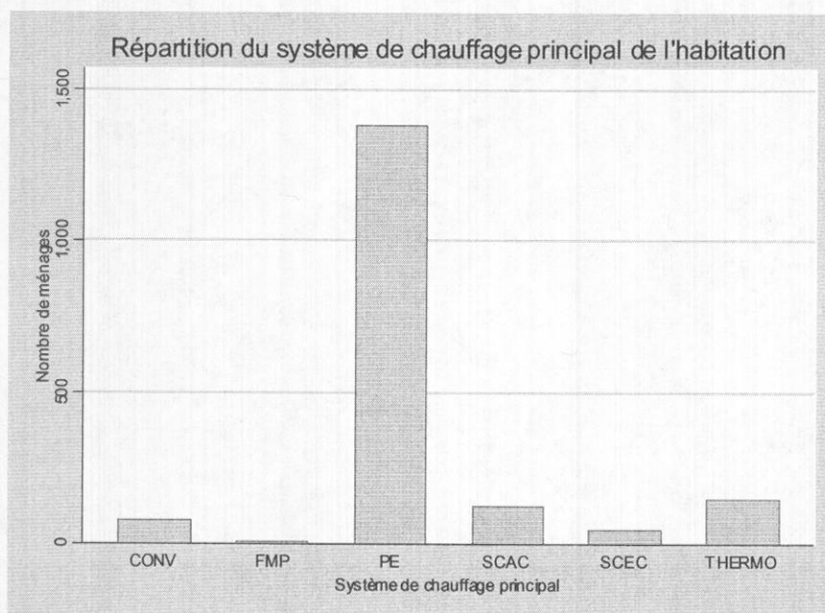
Le vecteur technologie comprend quelques variables clés donnant une idée de l'efficacité énergétique globale de l'habitation en ce qui a trait au chauffage des locaux. Elles sont d'ordre technique, c'est-à-dire qu'elles expliquent comment il est possible que 2 ménages exactement identiques et demandant le même niveau de

confort ne consomment pas la même quantité d'énergie en termes physiques. Les variables technologiques sont reliées à la période de construction de l'habitation, au système de chauffage principal utilisé ainsi qu'à son âge, au chauffage d'appoint, au niveau d'isolation du sous-sol et du vide sanitaire et enfin aux types de thermostats utilisés. Nous verrons, dans la section sur les simulations, des graphiques illustrant la distribution de quelques-unes de ces variables. Pour le moment, nous pouvons cependant observer sur le graphique 5 qu'il existe une très grande disparité quant à l'âge du système de chauffage principal des ménages. En revanche, le graphique 6 nous apprend que le système de chauffage principal le plus répandu est de loin l'usage de plinthes électriques.

**Graphique 5: Distribution de l'âge du système de chauffage principal des ménages**



Quant aux types de thermostats, le graphique détaillé sera présenté ultérieurement. On peut cependant mentionner pour le moment que beaucoup de ménages ont encore un grand nombre de thermostats réguliers. Ceux qui n'ont qu'un seul thermostat sont les ménages dotés d'un thermostat électronique programmable. On constate également que, somme toutes, les ménages possédant des thermostats électroniques programmables sont plus nombreux que ceux possédant des thermostats électroniques non programmables.



**Graphique 6:**  
Répartition du  
système de  
chauffage principal  
de l'habitation

#### 4.3.2.2.- Les variables de contrôle

Les variables de contrôle consistent en une panoplie de variables pouvant expliquer les différences de consommation entre les ménages, mais qui ne font pas partie des caractéristiques technologiques. Elles se classent en 4 catégories: une caractéristique météorologique, les caractéristiques du ménage, les caractéristiques de l'habitation, et enfin, les caractéristiques liées à l'utilisation de l'énergie à d'autres fins que pour le chauffage des locaux.

Premièrement, la caractéristique météorologique est représentée par les degrés-jours de chauffage. Nous avons vu dans la section décrivant les données comment cette variable avait été obtenue, sans toutefois expliquer ce qu'elle constituait. La définition retenue est celle rapportée sur le site Internet de Environnement Canada:

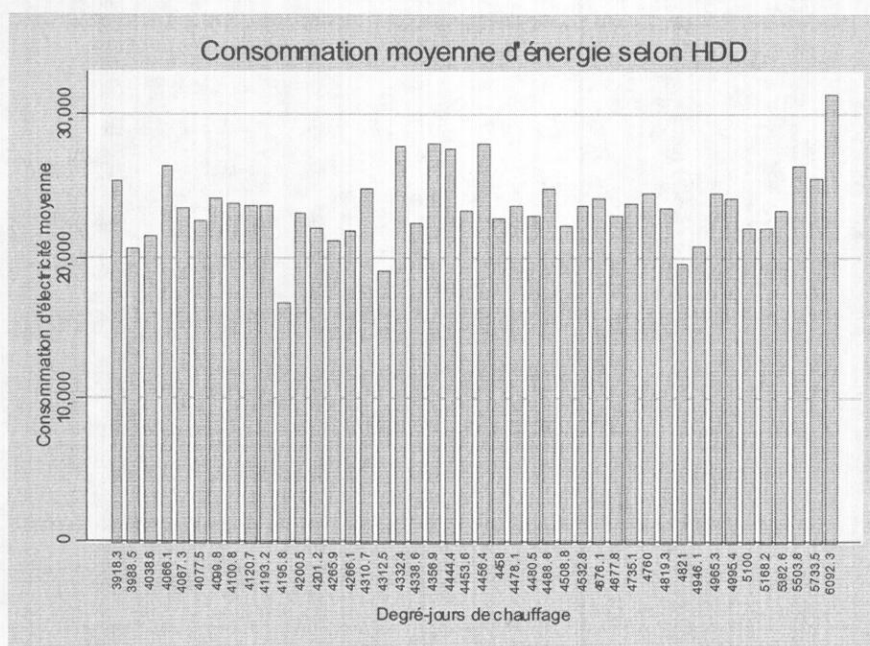
Les degrés jours d'une journée donnée représentent la différence, positive ou négative et exprimée en degrés Celsius, entre la température moyenne et un seuil donné. Par exemple, les degrés-jours de chauffage sont le nombre de degrés au-dessous de 18 °C. Si la température est égale ou supérieure à 18 °C, alors leur nombre sera de zéro. Les normales représentent l'accumulation moyenne pour un mois ou un an donné. Les valeurs supérieures ou inférieures au seuil de 18 °C sont utilisées principalement pour estimer les besoins en chauffage et en climatisation des immeubles et constituent également une indication de la consommation de combustible à ces fins.

(Source: [www.climat.meteo.ec.gc.ca](http://www.climat.meteo.ec.gc.ca))



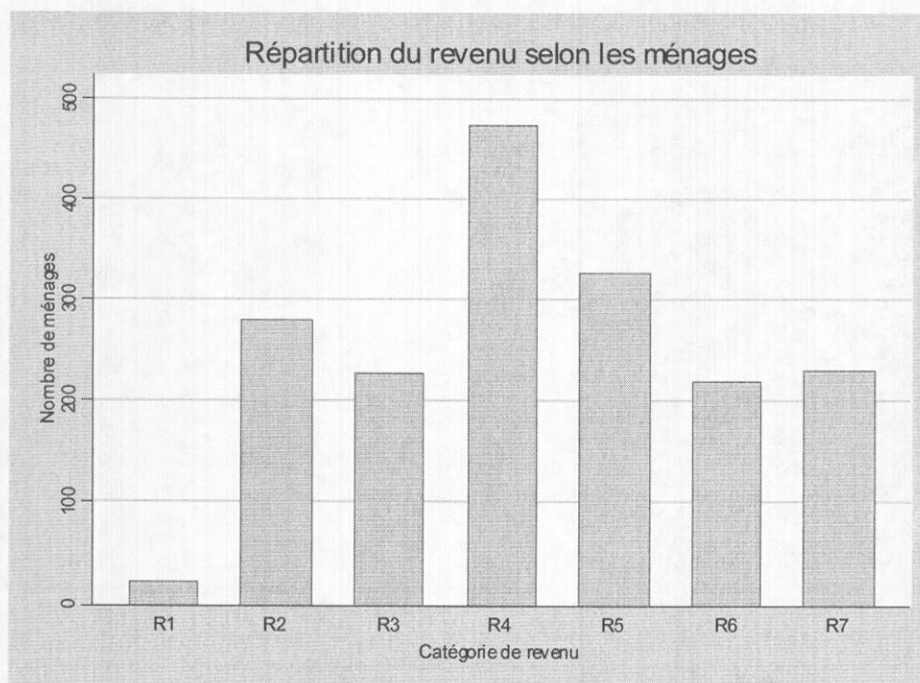
Nous rappelons que 45 valeurs différentes des degrés-jours ont été obtenues à partir des données provenant des stations météorologiques de Environnement Canada. Bien que l'on devrait observer une relation positive entre la consommation d'électricité annuelle et les degrés-jours de chauffage pour cette même année, le graphique 7 nous démontre que la relation n'est pas si évidente, malgré une légère tendance à la hausse. Ceci peut facilement être expliqué par le fait que la consommation sur le graphique est la consommation totale, et non celle attribuée uniquement au chauffage des locaux. D'où l'importance de tenir compte de la consommation d'énergie reliée aux autres utilisations finales.

**Graphique 7: Consommation moyenne d'énergie en fonction des degrés-jours de chauffage**



La deuxième catégorie de variables de contrôle concerne les caractéristiques des ménages. Font partie de cette catégorie les variables relatives au revenu des ménages, à leur mode de propriété (propriétaire versus co-propriétaire), au nombre de personnes constituant le ménage, au statut du ménage et à la catégorie d'âge de la personne responsable de la gestion de l'énergie à la maison.

Graphique 8: Répartition du revenu selon les ménages



La variable R présentée précédemment dans le chapitre 3 fait référence au revenu des ménages. Toutefois, les données recueillies ne nous renseignent pas sur le revenu exact du ménage, mais bien sur la catégorie de revenu dans laquelle il se trouve. Le graphique 8 montre le nombre de ménages qui se situent dans chacune des catégories. On remarque que la catégorie qui contient le plus de ménages est R4, soit celle représentant un revenu entre 40 000\$ et 59 999\$. Vient au second rang en termes de fréquences la catégorie R5 (entre 60 000\$ et 79 999\$), suivie de près par la catégorie R2 (entre 10 000\$ et 29 999\$).

Sans nécessairement présenter les graphiques des autres caractéristiques des ménages, nous pouvons néanmoins mentionner que seulement 5% des répondants sont co-propriétaires, la balance étant des propriétaires. Les locataires se sont vus exclus du modèle puisque la base de données ne renfermait pas suffisamment d'informations les concernant. En ce qui a trait à la catégorie d'âge du répondant, 4% des répondants de l'échantillon ont moins de 30 ans, 51% ont entre 30 et 49 ans, 33% ont entre 50 et 64 ans, et enfin 12% ont 65 ans ou plus. Puis, le tableau 3, tiré de Stata, nous informe du nombre de personnes vivant dans l'habitation. Les ménages composés entre 2 et 4 individus forment 80% de l'échantillon.

**Tableau 3: Nombre de personnes composant les ménages**

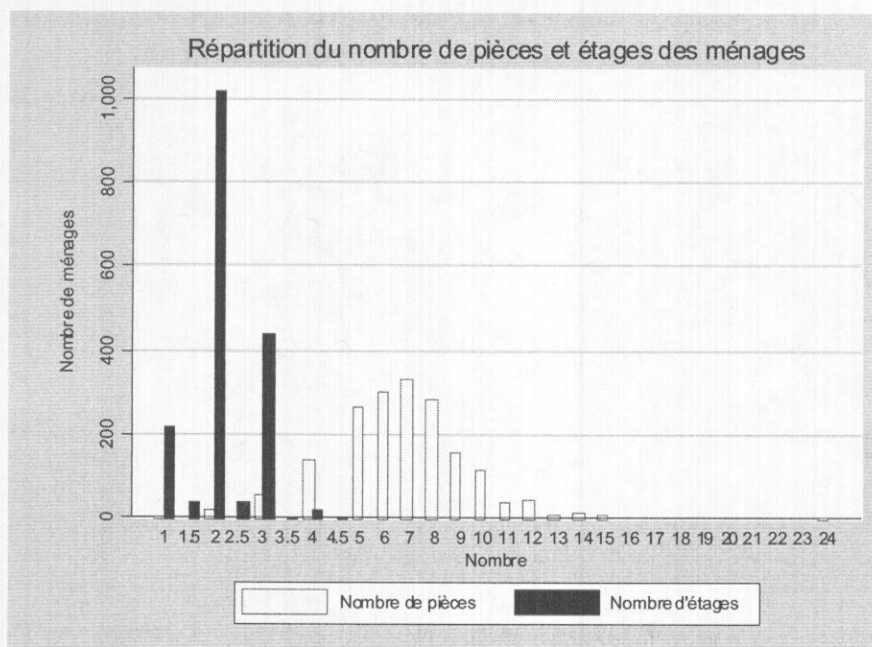
| Nombre de<br>personnes<br>au domicile | Freq. | Percent | Cum.   |
|---------------------------------------|-------|---------|--------|
| 1                                     | 212   | 11.95   | 11.95  |
| 2                                     | 633   | 35.68   | 47.63  |
| 3                                     | 364   | 20.52   | 68.15  |
| 4                                     | 419   | 23.62   | 91.77  |
| 5                                     | 116   | 6.54    | 98.31  |
| 6                                     | 21    | 1.18    | 99.49  |
| 7                                     | 4     | 0.23    | 99.72  |
| 8                                     | 2     | 0.11    | 99.83  |
| 10                                    | 2     | 0.11    | 99.94  |
| 12                                    | 1     | 0.06    | 100.00 |
| Total                                 | 1,774 | 100.00  |        |

Finalement, les couples sans enfants représentent 31% de l'échantillon, ceux avec enfants 49%, les personnes seules sans enfants 13%, les personnes seules avec enfants 5% et les personnes vivant avec d'autres personnes 2%.

Puis, la troisième catégorie de variables de contrôle se rapporte aux caractéristiques de l'habitation. Ces variables, sans être de nature technologique, peuvent expliquer des variations de consommation. Cette catégorie inclut le nombre de pièces, le nombre d'étages et le genre de l'habitation. Dans un modèle de demande d'énergie pour le chauffage, on cherche toujours à intégrer la surface de plancher, car elle est nécessairement associée à une consommation supérieure. Très peu de répondants du sondage connaissaient la superficie chauffée de leur habitation. En revanche, la plupart d'entre eux ont répondu aux questions concernant le nombre de pièces et d'étages. Nous allons donc considérer ces 2 variables comme des approximations de la superficie. Le graphique 9 illustre d'ailleurs la répartition de ces 2 variables. Beaucoup d'habitations comportent 2, et même 3 étages, tandis que la majorité de celles-ci ont entre 5 et 8 pièces. Il sera intéressant de constater dans quelles mesures ces variables affecteront la consommation d'électricité selon le modèle que nous estimerons.



Graphique 9: Répartition du nombre de pièces et d'étages des habitations



Enfin, une autre variable qu'on ne peut passer sous silence est le genre de l'habitation en question. Les maisons individuelles sont généralement plus énergivores que les autres types d'habitations, puisque la présence d'un mur mitoyen par exemple, comme c'est le cas dans les maisons en rangée, permet de diffuser la chaleur d'une unité à une autre. L'échantillon est largement dominé par les maisons individuelles, qui représentent 87% de l'échantillon. Les duplex et triplex comptent pour 7%, les maisons en rangée pour 1%, les habitations collectives pour 3%. Enfin, quelques ménages sont inclus dans une catégorie à part, `GENRE_AUTRE`, puisqu'ils n'ont pas inclus leur habitation dans l'un ou l'autre des genres que nous venons de mentionner.

Enfin, la dernière catégorie de variables de contrôle concerne les caractéristiques reliées à l'utilisation de l'énergie à d'autres fins que pour le chauffage des locaux. Ces variables visent à dresser un portrait assez précis de l'utilisation de l'énergie par les ménages. Nous avons une liste des appareils électriques que possèdent les ménages, ainsi que les caractéristiques des autres utilisations finales telles que le chauffage de l'eau, l'éclairage, la climatisation et la piscine. À noter cependant

qu'aucune variable ne représente l'utilisation d'une sècheuse à linge électrique, puisque cette variable était pratiquement identique à la variable se rapportant à la laveuse à linge électrique. Les statistiques détaillées de chacune de ces variables sont présentées en annexe 5.

En résumé, les principales conclusions que nous pouvons tirer de ces statistiques sur cette dernière catégorie de variables sont les suivantes:

- Près de 80% des ménages de l'échantillon ont seulement 1 appareil de cuisson et autant d'entre eux ont un lave-vaisselle.
- La quasi-totalité des ménages ont une laveuse à linge électrique.
- Plus des 2/3 des ménages ont de 2 à 3 téléviseurs à la maison et le tiers ont 2 réfrigérateurs et plus.
- 62% des ménages ont de 1 à 2 ordinateurs.
- Plus de la moitié des ménages ont un chauffe-eau électrique âgé de 6 ans ou moins, tandis que ce sont 10% d'entre eux qui en ont un âgé de plus de 16 ans.
- Un peu moins de 38% des ménages ont un chauffe-eau d'une capacité de 40 gallons, tandis que 58% d'entre eux en ont un d'une capacité de 60 gallons.
- 54% des ménages ont un système d'éclairage extérieur visant à assurer la sécurité de leur propriété ou à la mettre en valeur.
- Près de 31% des ménages ont une piscine, et seulement 34,5% de ceux-ci ont équipé leur filtre de piscine d'une minuterie.
- Enfin, 26% des ménages disent climatiser leur habitation. Nous rappelons que les données recueillies se réfèrent à l'an 2001 et que probablement le pourcentage en date d'aujourd'hui serait plus élevé.

## **CHAPITRE 5.- RÉSULTATS**

Dans cette section, nous allons estimer et présenter les résultats du modèle introduit dans le chapitre 3 nous permettant de déceler l'effet rebond pour le chauffage des locaux des ménages québécois se chauffant à l'électricité.

### 5.1.- Estimation du modèle

Pour l'estimation du modèle, nous avons d'abord étudié les diverses possibilités. Lorsqu'on veut estimer un système à équations simultanées, on peut utiliser la méthode des moindres carrés indirects (MCI), des doubles moindres carrés (2SLS), des triples moindres carrés (3SLS) ou du maximum de vraisemblance. Les 2 premières méthodes estiment équation par équation, tandis que les 2 dernières estiment le système d'équations. L'estimation avec les triples moindres carrés, comparativement à celle des doubles moindres carrés, utilise la matrice de covariance des termes d'erreur. C'est pourquoi elle mène à des écarts-types plus petits. Puisque Stata permet facilement de le faire, le modèle a été estimé avec les triples moindres carrés. Comme un problème souvent occasionné par l'estimation d'un modèle est l'omission de variables, nous avons intégré dans le modèle la plupart des variables qui étaient disponibles dans la base de données et cohérentes.

Le modèle a été estimé avec une forme linéaire et une forme logarithmique. Dans le cas de la forme logarithmique, seulement les variables continues et discrètes mais n'ayant aucune valeur nulle ont été transformées sous leur forme logarithmique.

### 5.2.- Comparaison du modèle linéaire et logarithmique

Le modèle linéaire et le modèle logarithmique ont été estimés avec Stata avec les triples moindres carrés, à partir d'observations sur 1774 ménages différents. Afin de choisir le modèle le plus approprié, nous avons analysé les résultats du modèle linéaire, présentés sur le tableau 4, et du modèle logarithmique, présentés en annexe 6. D'une part, la comparaison seule des coefficients de détermination des 2 équations ne permet pas de discriminer entre les 2 modèles, puisque les résultats sont similaires. Les variables de revenu dans le cas de l'équation  $\ln(S)$  pour le modèle logarithmique sont toutes significatives à un degré de confiance de 95%, tandis que 2 d'entre elles le sont uniquement à 90% pour le modèle linéaire. Toutefois, plusieurs variables de l'équation de la consommation ne sont pas significatives dans le modèle logarithmique tandis qu'elles le sont dans le modèle linéaire, ou sont significatives avec un degré de confiance moindre. Mentionnons



Tableau 4: Comparaison des résultats du modèle linéaire et logarithmique

Résultats du modèle linéaire (Taille de l'échantillon = 1774 observations)

| Modèle linéaire                       |                                 |                 |    |                                  |                 |
|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------|----|----------------------------------|-----------------|
| Équation S :                          | R-sq = 0.0700                   |                 |    | P = 0.00                         |                 |
| Équation QE :                         | R-sq = 0.2111                   |                 |    | P = 0.00                         |                 |
| Variables communes<br>aux 2 équations | Coefficients de<br>l'équation S | Écart-<br>types |    | Coefficients de<br>l'équation QE | Écart-<br>types |
| PER2                                  | 0,36798                         | 0,20348         | *  | -634,63                          | 808,77          |
| PER3                                  | 0,33150                         | 0,15888         | ** | -229,13                          | 631,85          |
| PER4                                  | 0,17411                         | 0,15911         |    | -538,05                          | 616,25          |
| PER5                                  | 0,49877                         | 0,19505         | ** | -1711,18                         | 818,96          |
| PER6                                  | 0,92390                         | 0,44003         | ** | -3239,24                         | 1850,08         |
| THERMO                                | 1,07186                         | 0,23121         | ** | -434,36                          | 1143,82         |
| FMP                                   | 0,41508                         | 1,20898         |    | 8697,41                          | 4574,06         |
| CONV                                  | 0,46480                         | 0,26003         | *  | 601,13                           | 1025,35         |
| SCAC                                  | 0,20876                         | 0,23703         |    | 2002,49                          | 931,55          |
| SCEC                                  | 0,16105                         | 0,34502         |    | 4675,19                          | 1332,72         |
| SYST_AGE                              | 0,01219                         | 0,00717         | *  | -11,03                           | 28,64           |
| SSVS_TI                               | 0,13481                         | 0,14718         |    | -256,80                          | 647,59          |
| SSVS_PI                               | 0,59962                         | 0,27627         | ** | 1359,46                          | 1143,62         |
| TEP                                   | 0,06645                         | 0,02803         | ** | 62,29                            | 113,55          |
| TR                                    | -0,04292                        | 0,01769         | ** | 232,42                           | 82,35           |
| TENP                                  | 0,10389                         | 0,03060         | ** | -8,96                            | 132,51          |
| HDD                                   | -0,00004                        | 0,00012         |    | 1,36                             | 0,48            |
| CHAUFF_APP                            | -0,30712                        | 0,16500         | *  | 1116,44                          | 661,39          |
| PLINTRES_APP                          | -0,03411                        | 0,04528         |    | 629,07                           | 174,74          |
| CONV_APP                              | 0,02741                         | 0,05661         |    | 21,48                            | 216,00          |
| APP_ELEC                              | -0,26159                        | 0,52752         |    | 2420,82                          | 2017,51         |
| APP_AUTRE                             | -0,12801                        | 0,10165         |    | -871,64                          | 407,22          |
| Variables uniques à<br>l'équation S   | Coefficients                    | Écart-<br>types |    |                                  |                 |
| Équation S                            |                                 |                 |    |                                  |                 |
| R2                                    | 0,76377                         | 0,43323         | *  |                                  |                 |
| R3                                    | 0,99580                         | 0,44193         | ** |                                  |                 |
| R4                                    | 0,98878                         | 0,43482         | ** |                                  |                 |
| R5                                    | 0,93022                         | 0,44081         | ** |                                  |                 |
| R6                                    | 0,85213                         | 0,44891         | *  |                                  |                 |
| R7                                    | 1,24996                         | 0,45146         | ** |                                  |                 |
| STATUT2                               | 0,06505                         | 0,12453         |    |                                  |                 |
| STATUT3                               | -0,21975                        | 0,16275         |    |                                  |                 |
| STATUT4                               | -0,11802                        | 0,22239         |    |                                  |                 |
| STATUT_AUTRE                          | -0,07610                        | 0,36867         |    |                                  |                 |
| COPROP                                | -0,27535                        | 0,21571         |    |                                  |                 |
| A2                                    | -0,88882                        | 0,25318         | ** |                                  |                 |
| A3                                    | -0,41792                        | 0,25788         |    |                                  |                 |
| A4                                    | -0,25295                        | 0,28992         |    |                                  |                 |
| _cons                                 | 18,42555                        | 0,75071         | ** |                                  |                 |
| Variables uniques à<br>l'équation QE  | Coefficients                    | Écart-<br>types |    |                                  |                 |
| S                                     | 1568,86                         | 680,04          | ** |                                  |                 |
| PERSONNES                             | 972,07                          | 175,44          | ** |                                  |                 |
| PIECES                                | 470,29                          | 107,89          | ** |                                  |                 |
| ETAGES                                | 1485,89                         | 375,57          | ** |                                  |                 |
| DU_TRI                                | -3400,83                        | 752,98          | ** |                                  |                 |
| RANGEE                                | -3964,12                        | 1647,81         | ** |                                  |                 |
| COLLECTIVE                            | -3335,18                        | 1276,94         | ** |                                  |                 |
| GENRE_AUTRE                           | -5504,12                        | 1704,19         | ** |                                  |                 |
| APP_CUISSON                           | 860,81                          | 278,94          | ** |                                  |                 |
| LAVE_VAISS                            | -263,40                         | 479,00          |    |                                  |                 |
| LAVEUSE                               | 5103,46                         | 4638,80         |    |                                  |                 |
| CLIM                                  | 653,81                          | 477,81          |    |                                  |                 |
| NBRE_TV                               | 165,49                          | 205,71          |    |                                  |                 |
| NBRE_ORD                              | 688,48                          | 266,20          | ** |                                  |                 |
| NBRE_FRIG                             | 1078,00                         | 360,59          | ** |                                  |                 |
| ECLAIR                                | 777,75                          | 359,07          | ** |                                  |                 |
| CE                                    | 3,58                            | 29,91           |    |                                  |                 |
| CAP                                   | 479,51                          | 174,71          | ** |                                  |                 |
| PISCINE                               | 2989,08                         | 483,35          | ** |                                  |                 |
| MIN_PISC                              | -1934,52                        | 679,15          | ** |                                  |                 |
| _cons                                 | -34021,47                       | 15502,85        | ** |                                  |                 |

Légende:

\* = Variable significative avec un degré de confiance de 90%

\*\* = Variable significative avec un degré de confiance de 95%

entre autres les variables PER5, PER6, FMP, SCAC, HDD, CHAUFF\_APP, RANGEE, NBRE\_ORD, ECLAIR, MIN\_PISC. Il est raisonnable de croire que ces variables ont un impact direct sur la consommation d'énergie et nous croyons donc que le modèle linéaire nous donne les meilleurs résultats.

De plus, le modèle consiste en un système d'équations simultanées dans lequel la demande de service explique la consommation d'énergie. Cependant, on observe que dans le cas du modèle logarithmique, bien que la relation soit positive entre les 2 variables, elle n'est pas statistiquement significative. Il est intuitivement raisonnable de penser que, comme les résultats du modèle linéaire le montrent, plus un ménage maintient la température de son habitation à un niveau élevé, plus la consommation d'énergie sera importante. Pour ces raisons, nous allons uniquement retenir le modèle linéaire et poursuivre l'analyse des résultats de l'estimation basée sur ce modèle seulement.

Dans un premier temps, on remarque que les coefficients de détermination ( $R^2$  ajusté) de chacune des 2 équations du modèle linéaire ne sont pas très élevés, étant de 0.07 et de 0.2111 pour les équations respectives de la demande de service et de la consommation d'énergie. Ces résultats ne constituent pas un problème dans la mesure où plusieurs variables sont significatives et compte tenu du fait que le but de l'étude n'est pas de prédire la consommation d'énergie mais plutôt de capter les effets rebond possibles.

### **5.3.- Interprétation des résultats sur les variables uniques à la demande de service**

#### **5.3.1.- Revenu**

Nous notons premièrement que toutes les variables de revenu de l'équation de la demande de service sont significatives avec un degré de confiance de 90%, et que 4 d'entre elles le sont à un degré de 95%. Les coefficients obtenus sont tous positifs, ce qui signifie que toutes les catégories de revenu présentent une demande de service supérieure à la catégorie de référence contenue dans la constante, soit celle des ménages affichant un revenu de moins de 10 000\$. Jusqu'à la 4e catégorie, on remarque que la demande de service augmente au fur et à mesure que le revenu

augmente. Cependant, comme nous avons vu dans la revue de la littérature, il devrait y avoir un effet de saturation pour la demande de service, de sorte qu'à partir d'un certain niveau de revenu, les ménages atteignent un niveau de confort optimal. Nos résultats montrent que les ménages faisant partie des catégories de revenu 5 et 6 augmentent également leur demande de confort, mais dans une proportion légèrement moindre que l'augmentation constatée pour les classes inférieures. L'effet de saturation est donc illustré par ces résultats. Il existe toutefois une seule ombre au tableau concernant la catégorie de revenu de 100 000\$ et plus, qui affiche une augmentation de la demande de service supérieure à celle enregistrée par toutes les autres catégories. Nous ne pouvons pas expliquer ce résultat.

### 5.3.2.- Âge

Au niveau de la catégorie d'âge des répondants, on observe une relation négative entre la catégorie d'âge et la demande de service. Par contre, le coefficient n'est significatif que pour la catégorie des 30 à 49 ans. Clairement, les 30 à 49 ans maintiennent la température de leur habitation à un niveau plus bas que leurs compères âgés de 18 à 29 ans. Cette relation pourrait être expliquée par un effet de responsabilisation dans la gestion de l'énergie des ménages plus âgés ou tout simplement par de meilleures habitudes de consommation. Il est généralement admis que les personnes plus âgées ont tendance à maintenir la température de leur habitation à un niveau plus élevé. Les coefficients négatifs devant les catégories des 50-64 ans et des 65 ans et plus ne permettent pas de confirmer cette théorie, mais ne permettent pas non plus de l'infirmer, puisqu'ils sont non significatifs.

### 5.3.3.- Autres variables

Il n'apparaît aucun résultat intéressant dans l'équation de la demande de service relativement au mode de propriété et au statut des ménages. Les résultats semblent indiquer une baisse dans la demande de service des personnes seules avec ou sans enfants par rapport aux couples sans enfants, mais aucun coefficient statistiquement significatif ne permet de démontrer cette tendance.



## **5.4.- Interprétation des résultats des variables uniques à la consommation d'énergie**

### *5.4.1.- La simultanéité*

Essentielle dans notre modèle à équations simultanées, la variable représentant la demande de service (S) est positive et significative dans l'équation de la consommation d'électricité (QE). Donc, toutes choses étant égales par ailleurs, une augmentation de la température intérieure de l'habitation de 1°C correspond à une augmentation de la consommation annuelle d'électricité de 1569 kWh.

### *5.4.2.- Les caractéristiques du ménage et de l'habitation*

Le genre de l'habitation a également une bonne influence sur la consommation annuelle d'électricité des ménages. La base de données ne permet pas de déterminer les caractéristiques précises des habitations faisant partie de la catégorie `GENRE_AUTRE`. Toutefois, on remarque que toutes les catégories affichent une consommation annuelle inférieure à celle des habitations individuelles. Parmi les catégories connues, se sont les maisons en rangée qui semblent nécessiter le moins d'énergie, soit près de 3964 kWh de moins annuellement que les maisons individuelles.

Le nombre de pièces et d'étages dans l'habitation sont évidemment des variables permettant d'évaluer la superficie chauffée de l'habitation. Dans les 2 cas, la relation est positive et clairement significative entre ces variables et la consommation d'électricité. À chaque étage on attribue une consommation additionnelle de 1485 kWh, tandis qu'une pièce serait responsable d'une augmentation moyenne de la consommation de 470 kWh. Bien qu'elles demeurent une approximation de la superficie totale, les résultats montrent une relation très claire.

Quant au nombre de personnes constituant le ménage, la variable est statistiquement significative. Il apparaît donc que pour chaque personne supplémentaire dans l'habitation, il faut ajouter une consommation annuelle de 972

kWh. Cette relation était facile à anticiper, puisque chacune des personnes dans l'habitation va vaquer à une multitude d'activités qui requerront de l'énergie.

#### *5.4.3.- Les appareils et autres utilisations de l'énergie*

Parmi les variables représentant les appareils électriques utilisés par les ménages, on note également des relations intéressantes. Par exemple, le nombre d'appareils de cuisson, le nombre d'ordinateurs et le nombre de réfrigérateurs sont toutes des variables significatives et positivement liées à la consommation d'énergie. À noter qu'en moyenne, un réfrigérateur additionnel ferait augmenter la consommation de 1078 kWh, tandis qu'un appareil de cuisson supplémentaire la ferait augmenter de 860 kWh par année. Toutefois, on ne parvient pas à des résultats significatifs pour le nombre de téléviseurs ainsi que pour des appareils tels que lave-vaisselle, laveuse et climatiseurs. Tel qu'invoqué dans la littérature, une difficulté supplémentaire consiste à évaluer l'impact d'appareils que presque tous les ménages possèdent, ce qui peut expliquer les résultats concernant le lave-vaisselle et la laveuse à linge électrique. En ce qui concerne le chauffe-eau, il semble que l'âge de celui-ci ne soit pas relié à la consommation d'énergie, mais que sa capacité l'influence de façon significative. L'existence d'un système d'éclairage extérieur pour assurer la sécurité ou pour la valorisation de son terrain est également une variable positivement reliée à la consommation d'énergie. Finalement, tel qu'anticipé, les ménages ayant une piscine affichent une consommation d'énergie supérieure aux ménages n'en possédant pas de plus de 2989 kWh. Les piscines équipées d'une minuterie permettraient cependant de diminuer cette consommation de 1934 kWh.

### **5.5.- Interprétation des résultats des variables communes aux deux équations**

#### *5.5.1.- HDD*

La variable représentant les conditions météorologiques, les degrés-jours de chauffage, a été incluse dans les 2 équations. Une relation entre la demande de confort et les degrés-jours n'est pas démontrée par les résultats. Il se peut donc que la température maintenue à l'intérieure de l'habitation soit pratiquement constante

pendant l'année, et qu'elle ne soit pas influencée par le climat extérieur. Toutefois, la relation entre les degrés-jours de chauffage et la consommation d'électricité annuelle est statistiquement positive, ce qui constitue un résultat cohérent. À chaque degré-jour de chauffage est associé une consommation annuelle d'électricité de 1.355 kWh. À titre informatif, notons que parmi tous les secteurs du Québec couverts dans la base de données, les degrés-jours de chauffage pour l'année 2000 vont de 3918 à 6092 degrés-jours. Cette importante variation est expliquée par la grande superficie du territoire couvert, d'où l'importance de tenir compte des variations climatiques.

#### *5.5.2.- Le chauffage d'appoint*

Relativement au chauffage d'appoint, nous observons qu'à un niveau de confiance de 95%, aucune des variables n'explique de façon significative la demande de service. Avec un niveau de confiance de 90%, on peut cependant noter une légère relation négative entre les nombre de chaufferettes électriques et la demande de confort. Une relation entre certaines des variables relatives au chauffage d'appoint et la consommation d'électricité est un peu plus démontrée par les résultats. Notamment, chacune des plinthes électriques utilisées en appoint serait associée à une consommation de 629 kWh, tandis que le recours à un appareil de chauffage d'appoint ne fonctionnant pas à l'électricité permettrait d'économiser 871 kWh. Finalement, une dernière relation, significative à un niveau de confiance de 90% cette fois, nous indique que chacune des chaufferettes utilisées en appoint consommerait en moyenne 1116 kWh annuellement.

#### *5.5.3.- Le système de chauffage principal*

Dans l'équation de la demande de service, on note une relation significative entre la demande de service et les variables relatives aux ménages dotés d'une thermopompe ou d'unités convecteurs pour le chauffage principal de l'habitation. Les ménages chauffant leur habitation principalement au moyen d'une thermopompe affichent une demande de confort supérieure de 1.07°C à ceux munis de plinthes électriques. À un niveau de confiance de 90% cette fois, les ménages se chauffant



aux moyens d'unités convecteurs présenteraient une température de  $0.465^{\circ}\text{C}$  de plus que la catégorie de référence, soit les plinthes électriques. Quant aux impacts du type de système sur la consommation d'électricité, les résultats montrent que les ménages équipés d'une fournaise murale ou de plancher, d'un système central à air chaud ou d'un système central à eau chaude consomment respectivement 8697, 2002 et 4675 kWh de plus que les ménages équipés de plinthes électriques. Aucune relation n'est démontrée pour les autres types de systèmes de chauffage. Enfin, l'inclusion de la variable de l'âge du système de chauffage principal ne permet pas d'établir un lien entre l'âge et la consommation. À un degré de confiance de 90% cependant, on observe qu'à chaque année supplémentaire du système principal serait associée une augmentation de confort équivalant à  $0.012^{\circ}\text{C}$ , ce qui est très peu élevé.

#### *5.5.4.- Les périodes de construction*

En ce qui concerne les périodes de construction des habitations, plusieurs résultats sont intéressants. D'une part, toutes les catégories, à l'exception des habitations construites dans les années 80, sont significatives et positives dans l'équation de la demande de service. Par exemple, en moyenne, les ménages dont l'habitation a été construite dans les années 70 maintiennent leur habitation à  $0.332^{\circ}\text{C}$  de plus que les ménages dont les habitations ont été construites avant 1960. Cet écart augmente à  $0.499^{\circ}\text{C}$  pour les ménages dont les habitations ont été construites dans les années 90, puis il atteint  $0.924^{\circ}\text{C}$  dans le cas des habitations neuves. Les résultats démontrent donc une tendance généralisée selon laquelle la demande de confort augmente plus la période de construction est récente. En revanche, on constate, toutes choses étant égales par ailleurs, que les habitations neuves et celles construites dans les années 90 consomment significativement moins d'énergie que les constructions de la catégorie de référence, soit de 3239 et de 1711 kWh respectivement.

#### 5.5.5.- Les thermostats

Un des résultats les plus intéressants de l'estimation du modèle consiste en l'analyse des variables relatives au thermostats. De façon générale, on peut voir que le nombre de thermostats électroniques programmables et non programmables est significativement et positivement relié à la demande confort. En termes clairs, chaque thermostat électronique programmable additionnel serait associé à une augmentation de la température de  $0.07^{\circ}\text{C}$ , tandis que pour chaque thermostat électrique non programmable, cette hausse serait de  $0.1039^{\circ}\text{C}$ . Une multiplication par le nombre de thermostats est naturellement nécessaire pour connaître l'impact total sur la demande de service. Les thermostats réguliers seraient pour leurs parts associés à une diminution du confort équivalant à  $0.429^{\circ}\text{C}$  pour chacun d'eux. Seuls les thermostats réguliers ont apparemment un impact significatif sur la consommation d'électricité de 232 kWh par thermostat. En résumé, les thermostats électroniques programmables et non programmables ont une influence à la hausse sur la demande de service, tandis que les thermostats réguliers en ont une à la baisse. En revanche, les ménages ayant des thermostats réguliers consommeraient davantage d'électricité que les autres.

#### 5.5.6.- L'isolation du sous-sol ou vide sanitaire

Enfin, comme de récents chiffres de l'Office de l'efficacité énergétique nous l'apprennent, le sous-sol représente entre 20 et 35% des pertes thermiques d'une maison. C'est la raison pour laquelle les variables disponibles dans la base de données décrivant l'état de l'isolation du sous-sol ou du vide sanitaire ont été intégrées au modèle. Aucune relation claire n'est toutefois démontrée dans notre modèle entre la consommation d'électricité annuelle et le niveau d'isolation du sous-sol ou du vide sanitaire. Néanmoins, il y aurait une relation significative entre la demande de confort et un niveau d'isolation partiel, qui ferait en sorte que les ménages ayant des habitations munies d'un sous-sol ou d'un vide sanitaire partiellement isolé maintiendraient leur habitation à près de  $0.6^{\circ}\text{C}$  de plus que ceux

n'ayant aucun niveau d'isolation. Le même impact n'est pas observé pour les habitations avec un niveau d'isolation total.

### **5.6.- Les manifestations concrètes de l'effet rebond**

Que nous apprennent tous ces résultats sur l'effet rebond? En fait, ils nous démontrent 4 manifestations. Si l'effet rebond n'existait pas, nous ne devrions constater aucune relation significative entre les variables de technologie et la demande de confort. Or, des relations entre le type de système de chauffage principal, les périodes de construction, les types de thermostats et le niveau d'isolation du sous-sol ou vide sanitaire avec la demande de service nous montrent que les ménages ont effectivement une réponse comportementale face à la technologie. Les 4 points suivants résument dans quelles mesures l'effet rebond se manifeste dans notre modèle:

- 1- Il existe une relation entre le type de système de chauffage et la demande de confort. Bien que nous n'ayons pas de données sur l'efficacité des systèmes, le simple fait que les ménages ajustent leur demande de confort selon le système de chauffage principal utilisé est une manifestation concrète de l'effet rebond.
- 2- Clairement, une période de construction plus récente de l'habitation, malgré le fait qu'elle soit associée à une consommation d'énergie moindre, correspond à une demande de confort accrue. Il s'agit d'un exemple direct de l'effet rebond, selon lequel les bénéfices reliés à une technologie de construction supérieure sont réinvestis en partie en une augmentation de la demande de confort.
- 3- On observe un effet rebond relié aux thermostats. On peut voir les thermostats réguliers comme une technologie désuète, et les thermostats électroniques (programmables ou non) comme une nouvelle technologie. Les résultats démontrent que les ménages ayant opté pour la nouvelle technologie maintiennent en fait la température de leur habitation à un niveau plus élevé que les autres. Dans ce cas, une portion significative des avantages procurés par la technologie des thermostats digitaux est réinvestie sous une demande accrue de confort et l'effet rebond est démontré.



4- Les résultats montrent qu'une isolation partielle du sous-sol ou du vide sanitaire est également associée à une augmentation de la température maintenue dans l'habitation. Il s'agit d'un autre cas où les bénéfices résultant d'une meilleure efficacité sont en partie réinvestis dans une demande de confort plus élevée.

Certes, nous ne pouvons nier qu'il existe un lien entre les caractéristiques technologiques de l'habitation et la demande de service reliée au chauffage des locaux. L'efficacité globale influence le comportement des ménages, qui ajustent leur demande de confort. L'estimation du modèle nous permet de détecter 4 manifestations de l'effet rebond. Toutefois, les résultats ne permettent pas de quantifier l'amplitude de l'effet rebond en termes de pourcentage. Il s'agit précisément du but visé par la prochaine section, dans laquelle nous ferons 5 simulations afin d'en évaluer l'amplitude.

## **CHAPITRE 6.- SIMULATIONS**

Nous savons maintenant que certains coefficients devant les variables représentant la technologie de l'équation de la demande de service sont significatifs. Ceci tend à prouver l'existence de l'effet rebond. Toutefois, nous n'avons pas encore d'idées sur l'ampleur de celui-ci. Cette section vise à effectuer différentes simulations sur des changements au niveau de la technologie afin de quantifier l'effet rebond au niveau des ménages. Notons que les simulations visent à obtenir une idée globale de l'amplitude de l'effet, et qu'elles ne constituent pas des applications de programmes réels d'efficacité énergétique. À partir des résultats de la section précédente, nous allons effectuer 5 simulations, dont 2 relatives aux périodes de construction, 2 reliées aux thermostats et enfin une concernant le niveau d'isolation du sous-sol ou du vide sanitaire.

Le calcul de l'effet rebond pour chacune des simulations sera sensiblement le même. C'est pourquoi, avant de voir plus en détails chacune d'elles, nous devons faire la distinction entre les 3 variables suivantes:

$Q_E$ : Consommation annuelle d'électricité (kWh) réelle du ménage avec sa technologie actuelle. Il s'agit de la variable contenue dans la base de données originale.

$Q_P$ : Consommation annuelle d'électricité potentielle (kWh) prévue par le modèle après une modification de la technologie, en supposant que les ménages ne changent pas leurs comportements au niveau de la température maintenue. Il s'agit de la consommation calculée par l'équation 4.7 avec la nouvelle technologie en maintenant le niveau de service fixe constant.

$Q_0$ : Consommation annuelle d'électricité (kWh) qui serait réellement observée au niveau du ménage selon le modèle à équations simultanées estimé précédemment après un changement de la technologie. Cette consommation tient compte de la réponse comportementale des ménages, donc ce sont les nouvelles valeurs de  $S$ , calculées par l'équation 4.6 et la nouvelle technologie qui déterminent la consommation selon l'équation 4.7.

Puis, nous utiliserons l'équation suivante, déjà présentée auparavant, afin de calculer l'effet rebond (ER):

$$ER(\%) = \frac{\text{Economies d'énergie potentielles} - \text{Economies d'énergie observées}}{\text{Economie d'énergie potentielles}} * 100 \quad \text{Équation 4.8}$$

De façon plus précise, en utilisant les variables que nous venons de définir, les économies potentielles d'énergie après une modification de la technologie sont de  $(Q_1 - Q_P)$ , tandis que les économies réellement observées seront de  $(Q_1 - Q_0)$ . L'effet rebond en pourcentage sera donc représenté de la façon suivante:

$$ER(\%) = ((Q_1 - Q_P) - (Q_1 - Q_0)) / (Q_1 - Q_P) * 100 \quad \text{Équation 8.1}$$

$$ER(\%) = (Q_0 - Q_P) / (Q_1 - Q_0) * 100 \quad \text{Équation 8.2}$$

La méthodologie pour effectuer les simulations est la suivante:

-On estime le modèle de base

- On simule le changement de technologie sur l'équation 4.7 afin de trouver la consommation prédite par le modèle sans réponse comportementale du ménage. Ceci permettra d'évaluer les économies d'énergie potentielles.
- On tient compte de la réponse comportementale en intégrant le changement de technologie dans l'équation 4.6, puis on recalcule les consommations d'énergie avec la nouvelle demande de service. Ceci permet de calculer les économies d'énergie qui seront réellement observées.
- On calcule l'effet rebond moyen sur tous les ménages touchés par le changement de technologie selon l'équation 8.2.

### **6.1.- Simulation 1 et 2 sur les périodes de construction**

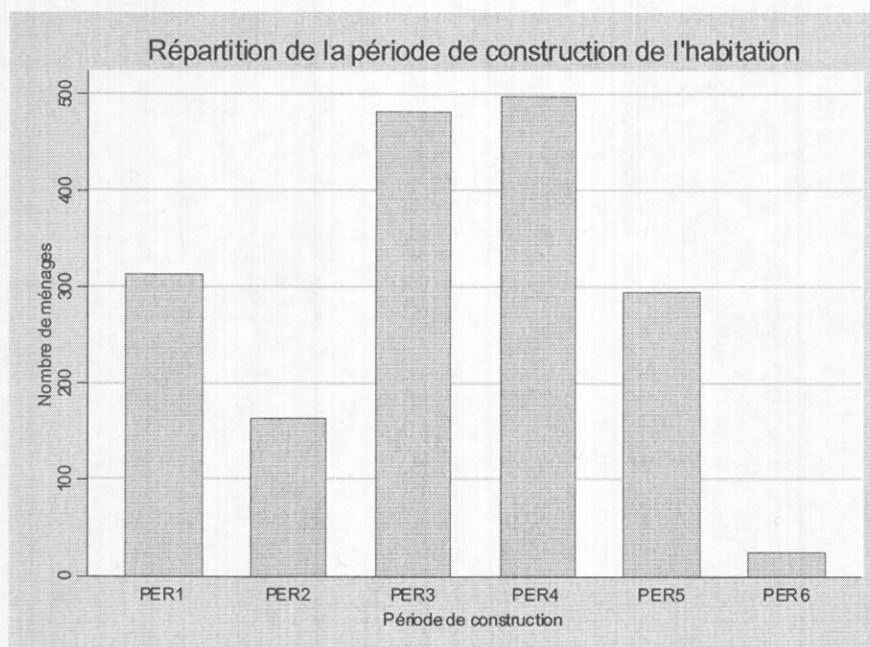
La première simulation effectuée sur le modèle d'équations simultanées linéaire concerne les périodes de construction. Bien qu'on ne puisse associer directement un programme d'efficacité à cette simulation, on peut très certainement faire un lien entre l'évolution des normes de construction, l'efficacité énergétique des enveloppes thermiques des habitations et les périodes de construction.

Nous pouvons nous demander ce qui adviendrait de l'effet rebond en supposant des changements importants dans le parc d'habitations au Québec. Nous pouvons raisonnablement penser que plus une habitation est récente, plus son enveloppe thermique est efficace, étant donné l'évolution des techniques et des normes de construction. Le graphique 10 illustre la distribution des périodes de construction des habitations selon les ménages.

Les résultats de la section précédente ont démontré que les ménages dont les périodes de construction étaient dans les catégories 2,3,5 et 6 présentaient une demande de confort significativement plus élevée que la période de référence (PER1). Nous prendrons donc les 2 catégories significatives qui impliquent un grand nombre de ménages afin d'effectuer nos simulations, soit la catégorie 3 et la catégorie 5. Ces catégories réfèrent aux habitations construites dans les années 70 et 90 respectivement.



Graphique 10: Répartition de la période de construction des habitations



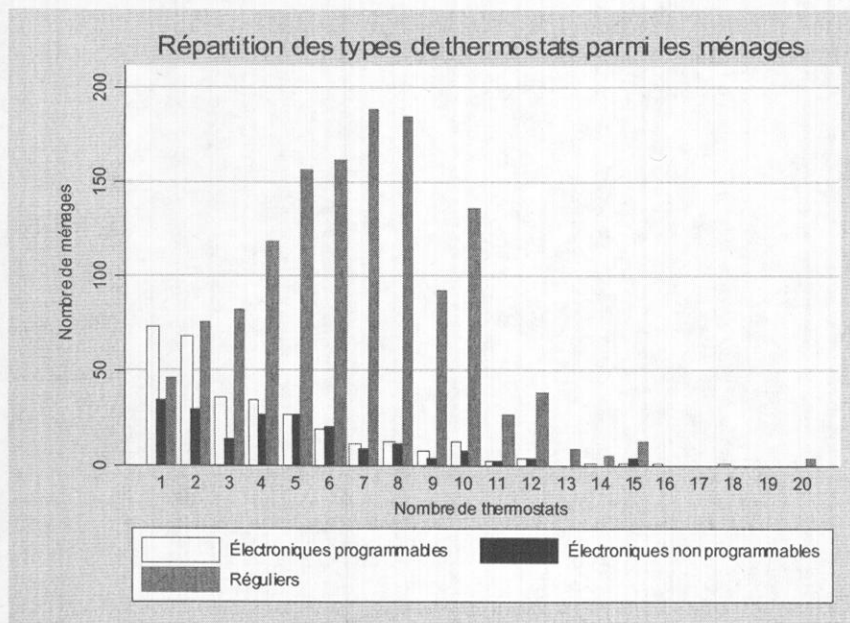
Dans un premier temps, nous supposons qu'il y aurait eu par le passé une augmentation fulgurante des habitations construites dans les années 90, de sorte que tous les ménages dont les habitations étaient construites dans les années 70 se retrouvent avec une habitation construite dans les années 90. Pour tous les autres ménages, rien ne change au niveau de leur technologie, donc rien n'affectera leur consommation. L'impact se fera simplement au niveau des 480 ménages passant soudainement de la catégorie PER3 à la catégorie PER5. En suivant la méthodologie que nous venons de décrire, nous parvenons à un effet rebond moyen chez les ménages touchés par ce changement de 17.7%.

Puis, nous faisons la même chose cette fois en supposant que tous les ménages dont les habitations ont été construites dans les années 90, optent, toutes choses étant égales par ailleurs, pour des maisons neuves. Les 294 ménages touchés passent donc de la catégorie PER5 à la catégorie PER6. La même méthodologie a été utilisée, de sorte que nous parvenons à un effet rebond de 43%.

## 6.2.- Simulations 3 et 4 sur les thermostats

Les simulations sur les thermostats sont des mesures d'efficacité qui seraient les plus envisageables dans la réalité. En effet, nous savons, entre autres, qu'Hydro-Québec encourage fortement les ménages à se doter de thermostats électroniques. Sur son site Internet, on y mentionne notamment que les thermostats électroniques peuvent permettre d'économiser jusqu'à 10% des frais d'électricité. La raison majeure de ces économies est que les thermostats électroniques sont beaucoup plus précis, détectant de très petites variations de température. Hydro-Québec, dans le cadre du programme "Mieux Consommer", offre même des bons de réduction à partir d'un certain niveau pour l'achat de thermostats électroniques programmables ou non.

**Graphique 11: Répartition des types de thermostats utilisés par les ménages**



Le graphique 11 représente la distribution des types de thermostats utilisés par les ménages. Imaginons un instant que tous les ménages substituent leurs thermostats réguliers pour des

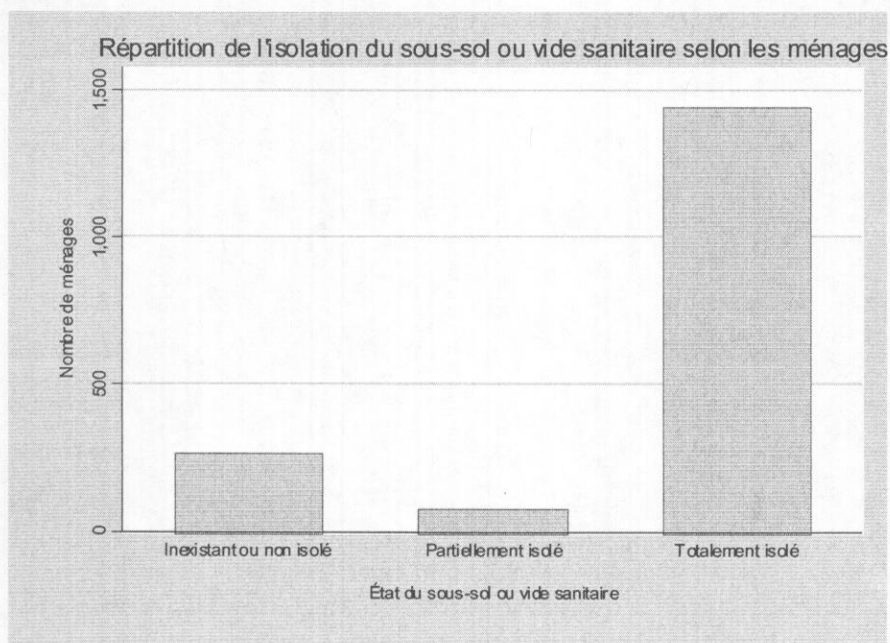
thermostats électroniques programmables, toutes choses étant égales par ailleurs. Il s'agit alors de remplacer le nombre de thermostats réguliers de chacun des ménages par un nombre équivalent de thermostats électroniques programmables pour chacun des 1332 ménages qui possèdent 1 ou plusieurs thermostats réguliers. La même méthodologie que celle employée dans les simulations précédentes nous permet d'évaluer un effet rebond de 100.85%. Ce résultat très intéressant sous-entend que toutes les économies d'énergie causées par l'introduction des

thermostats électroniques programmables seront absorbées par une augmentation du niveau de confort des ménages, et vient mettre un bémol à la pertinence des mesures d'efficacité énergétique liées aux thermostats électroniques.

Enfin, nous pouvons nous demander s'il existe une différence entre les thermostats électroniques programmables et non programmables. Nous remplaçons donc, chez les ménages possédant des thermostats réguliers, leurs équipements par des thermostats non programmables. Le résultat de cette simulation nous informe que dans ce cas, l'effet rebond moyen observé serait de 95.41%. Encore une fois, une très grande partie des économies d'énergie seraient en fait anéanties par une augmentation du niveau de confort des ménages.

### 6.3.- Simulation 5 sur l'isolation du sous-sol ou vide sanitaire

Graphique 12: Répartition du niveau d'isolation du sous-sol ou du vide sanitaire des habitations



Le graphique 12 représente le niveau d'isolation ou du vide sanitaire de chacun des ménages. Admettons que le gouvernement veuille insérer une mesure

d'efficacité concernant les normes d'isolation du sous-sol ou du vide sanitaire. Regardons ce qui se passerait au niveau de l'effet rebond en supposant que les 260 habitations dont le sous-sol ou le vide sanitaire n'est pas isolé ont maintenant un niveau d'isolation partiel. Précisons que nous ne prenons pas un niveau d'isolation totale, car les résultats non significatifs de l'estimation du modèle rendrait cette simulation dénuée de sens. En appliquant la même méthodologie, nous parvenons



à un effet rebond pour l'isolation partielle du sous-sol ou du vide sanitaire de - 69.19%. Dans ce cas-ci il n'y aurait donc pas d'effet rebond, et les économies d'énergie réelles seraient supérieures aux économies potentielles.

#### **6.4.- Résumé des simulations effectuées**

Nous venons d'effectuer 5 simulations visant à modifier la technologie des habitations afin de quantifier un éventuel effet rebond. Nous avons d'une part supposé une modification dans le parc d'habitations au niveau des périodes de construction. Puis, nous avons effectué 2 simulations visant à effectuer le remplacement de tous les thermostats réguliers et électroniques non programmables par des thermostats électroniques programmables. Enfin, nous avons simulé un niveau partiel d'isolation du sous-sol ou du vide sanitaire chez tous les ménages dont l'isolation était totalement absente.

Les résultats des simulations nous montrent des effets rebond d'une très grande amplitude. Si les résultats de l'estimation du modèle permettent de conclure à un effet rebond significatif pour plusieurs catégories de variables technologiques, les simulations ne permettent pas d'en évaluer précisément l'amplitude pour la majorité des cas. Le fait que certaines variables de la catégorie technologie soient significatives dans l'équation de la demande de service sans l'être dans l'équation de la consommation explique ce manque de précision. En effet, l'ajustement de la demande de service est estimé avec relativement de précision pour les changements de technologie. Si, toutefois, les coefficients de la consommation d'énergie pour les variables qui subissent des modifications ne sont pas significatifs, alors le calcul des économies potentielles n'est pas précis. Nous pensons toutefois que la deuxième simulation concernant les périodes de construction est la simulation qui nous donne le résultat le plus probant de l'effet rebond, puisque les coefficients des 2 équations reliés à ces variables sont estimés avec précision. Ainsi, l'effet rebond pour le chauffage des locaux dans le cas d'un changement de périodes de construction d'une décennie plus récente, soit de 1990 à 2000, serait évalué à plus de 43%. Le tableau 5 suivant résume les caractéristiques de la seule simulation qui donnent un résultat concluant au niveau de l'estimation de l'effet rebond.

**Tableau 5: Tableau sommaire des effets rebond obtenus avec les simulations**

| Simulation                                          | Nombre de ménages visés | Effet rebond (%) |
|-----------------------------------------------------|-------------------------|------------------|
| Période de construction<br>(des années 90 à neuves) | 294                     | 43%              |

Ce résultat soulève de quoi remettre en doute les calculs d'économies d'énergie prévus par les études d'efficacité énergétique. Les simulations relatives au remplacement des thermostats réguliers par des thermostats électroniques programmables ou non ont également dévoilé des résultats intéressants. Si les effets rebond obtenus de 100.85% et 95.41% respectivement n'ont pas été estimés précisément, il n'en demeure pas moins qu'ils sont fortement significatifs et qu'ils nous permettent de remettre en question l'efficacité des mesures visant le remplacement des thermostats. Quant à la dernière simulation, le niveau d'isolation du sous-sol ou vide sanitaire ne semble pas provoquer d'effet rebond.

## CONCLUSION

Certes, les conséquences des changements climatiques peuvent être désastreuses et le Canada a reconnu sa responsabilité en matière environnementale en s'engageant à réduire ses émissions de gaz à effet de serre. Afin d'y parvenir, le Canada a, entre autres, mis l'emphase sur divers programmes d'efficacité énergétique. Toutefois, s'il entend respecter ses engagements en se basant sur les calculs d'économies d'énergie actuels dus à l'efficacité énergétique sans tenir compte de l'effet rebond, il pourrait bien faire fausse route.

Nous avons, dans cette étude, présenté le concept général de l'effet rebond, avec des exemples concrets, des graphiques, ainsi qu'une approche historique du concept et sa typologie. On peut résumer l'effet rebond comme un phénomène selon lequel une amélioration de l'efficacité se traduit par une augmentation de la demande de service découlant de la baisse du prix de revient perçue par le consommateur. Puis, nous avons montré les principaux résultats empiriques concernant l'amplitude de l'effet rebond dans le secteur résidentiel. Il en ressort

que plusieurs études ont démontré l'existence d'effet rebond, mais que son amplitude est encore parsemée de mystère.

La deuxième partie de ce mémoire tentait de démontrer l'existence d'un tel effet, avec une application particulière au chauffage des locaux chez les ménages québécois se chauffant à l'électricité. Pour se faire, nous avons présenté un modèle à équations simultanées, dont l'une des équations constituait la demande de confort, tandis que l'autre se rapportait à la consommation d'énergie. Les résultats montrent que l'effet rebond est significatif. Également, des simulations effectuées démontrent un effet rebond de 43% relié aux périodes de construction des habitations. Les autres simulations effectuées n'ont pas permis d'estimer de façon précise l'amplitude de l'effet rebond, et ce malgré le fait que son existence soit démontrée.

En somme, les résultats de l'étude ne permettent pas de reléguer l'effet rebond aux oubliettes. Toutefois, il est important de préciser que même si l'effet rebond a été démontré par nos résultats, son existence ne signifie pas que toutes les économies d'énergie potentielles seront absorbées par l'augmentation de la demande de service. Il peut cependant en éliminer une partie considérable. C'est pourquoi nous devons mesurer son amplitude et en tenir compte dans les calculs d'économies d'énergie potentielles découlant d'une mesure d'efficacité énergétique.

Afin d'éviter l'effet rebond, il importe de créer des incitatifs aux utilisateurs d'énergie afin qu'ils ne relâchent pas leurs comportements. À cet effet, nous pensons que certaines actions menées par le gouvernement du Canada visant directement le comportement de la population, tel que son programme Défi d'une tonne, permet une cohérence dans la gestion de sa politique énergétique. Toutefois, bien que ces programmes de sensibilisation puissent présenter de bons résultats, il ne faut pas sous-estimer le pervers effet rebond dans les études sur les impacts de l'efficacité énergétique. L'efficacité énergétique à elle seule ne résoudra certainement pas tous les abus en matière d'utilisation énergétique.

Pour des recherches futures, il serait intéressant d'estimer l'effet rebond au chauffage des locaux dont la source d'énergie est autre que l'électricité. Si l'effet est démontré pour le chauffage à l'électricité, il devrait également exister pour d'autres sources d'énergie, dont les productions sont beaucoup plus dommageables pour



l'environnement. De plus, l'effet pourrait être estimé pour d'autres utilisations finales, telles que le chauffage de l'eau, l'éclairage, la climatisation ainsi que l'utilisation des appareils électriques. De nombreuses questions doivent nécessiter une attention particulière, comme le choix de la mesure d'activité. Nous avons considéré la température intérieure moyenne maintenue dans l'habitation comme étant un bon indicatif du niveau de confort. Toutefois, si les données nous l'avaient permis, nous aurions pu intégrer d'autres paramètres comme le taux d'humidité afin de mieux définir le confort. Enfin, bien que notre modèle à équations simultanées témoigne bien de la dynamique de l'effet rebond, d'autres efforts pourront viser à en améliorer la performance, notamment en matière de prédiction de la consommation d'énergie, qui permet de quantifier l'effet rebond.

## BIBLIOGRAPHIE

BAKER, P., BLUNDELL, R., (1989), « *The Microeconomic Approach to Modeling Energy Demand: Some Results for UK Households* », *Oxford Review of Economic Policy* 7 (2): 54-76.

BENTZEN, J., (2004), « *Estimating the rebound effect in US manufacturing energy consumption* », *Energy Economics* 26, 123-134.

BERKHOUT, H.G.P., MUSKENS, VELTHUIJSEN, J.W., (2000) « *Defining the rebound effect* », *Energy Policy* 28, 425-432.

BERNARD, J-T., GOSSELIN, A., (2001), « *Changement de l'efficacité énergétique pour fins de chauffage dans le secteur résidentiel au Québec, 1989-1998* », Université Laval.

BERNARD, J-T., BOLDUC, D., BELANGER, D., (1996), « *Quebec Residential Electricity Demand: A Microeconomic Approach* », *The Canadian Journal of Economics*, Vol. 29, No.1, 92-113.

BINSWANGER, M., (2001), « *Technological progress and sustainable development: what about the rebound effect?* », *Ecological Economics* 36, 119-132.

BROOKES, L., (2000), « *Energy fallacies revisited* », *Energy Policy* 28.

BROOKES, L.G., (1978), « *Energy policy, the energy price fallacy and the role of nuclear energy in the U.K* », *Energy Policy* 6, 94-106.

BROOKES, L.G., (1990), « *The greenhouse effect: Fallacies in the energy efficiency solution* », *Energy Policy* (3), 199-201.

BROOKES, L.G., (1992), « *Energy efficiency and economic fallacies: a reply* », *Energy Policy* 20, 390-392.

BROOKES, L.G., (1993), « *Energy efficiency fallacies: the debate concluded* », *Energy Policy* 21, 346- 347.

CLINCH, J.P., HEALY, J.D., (2003), « *Valuing improvements in comfort from domestic energy-efficiency retrofits using a trade-off simulation model* », *Energy Economics* 25, 565–583.

DE GROOT, A., MUSKENS, J., VELTHUIJSEN, J.W., (1998), « *De prijselasticiteit van de energie vraag: stand van zaken* », SEO-support 483, Stichting voor Economisch Onderzoek, Amsterdam.

DINAN, T.M., (1987), « *An Analysis of the Impact of Residential Retrofit on Indoor Temperature Choice* », Oak Ridge National Laboratory.

DOUTHITT, ROBIN A., (1989), « *An Economic Analysis of the Demand for Residential Space Heating Fuel in Canada* », *Energy* 14(4): 187-197.

DOUTHITT, ROBIN A., (1986), « *The Demand for Residential Space and Water Heating Fuel by Energy Conserving Households* », *The Journal of Consumer Affairs* 20 (2): 231-248.

DUBIN, J.A., MIEDEMA, A.K., CHANDRAN, R.V., (1986), « *Price effects of energy-efficient technologies: a study of residential demand for heating and cooling* », *Rand Journal of Economics* 17(3), 310-325.

DUCHEMIN, É., (2001), « *Hydroélectricité et gaz à effet de serre* », *VertigO - La revue en sciences de l'environnement sur le WEB* », Vol 2 No1

DUNSKY, P., (2004), « *La centrale du Suroît, l'efficacité énergétique et l'énergie éolienne : analyse comparative des options* », Mémoire déposé à la Régie de l'énergie, Dossier no R-3526-2004

DUVAL, G., (2005), « *Décroissance ou développement durable ?* », *Alternatives Economiques (HS)*, n°63, p. 53.



GOTTRON, F., (2001), « *Energy Efficiency and the Rebound Effect: Does Increasing Efficiency Decrease Demand?* », CRS Report for Congress.

GREEN, RODNEY D., ARLESE G. SALLEY, R. GAIL GRASS, ANTHONY A. OSEI, ANTHONY A., (1986), « *The Demand for Heating Fuels: A Disaggregated Modeling Approach* », Atlantic Economic Journal 14: 1-14.

GREENING, L., GREENE D.L., DIFIGLIO, C., (2000), « *Energy efficiency and consumption – The Rebound Effect – a survey* », Energy Policy 28.

GREPPERUD, S., RASMUSSEN, I., (2004), « *A general equilibrium assessment of rebound effects* », Energy Economics 26, 261–282.

GUERTIN, C., KUMBHAKAR, S.C., DURAIAPPAH, A., (2003), « *Determining Demand for Energy Services: Investigating income-driven behaviours* », International Institute for Sustainable Development.

HAAS, R., AUER, H., BIERMAYR, P., (1998), « *The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating* », Energy and buildings, Volume 27.

HAAS, R., SCHIPPER, (1998), « *Residential energy demand in OECD-countries and the role of irreversible efficiency improvements* », Energy Economics 20.

HAAS, R., BIERMAYR, P., (2000), « *The rebound effect for space heating, Empirical evidence from Austria* », Energy Policy, Volume 28.

HARTMAN, R.S., (1984), « *The importance of technology and energy in the analysis of utility-sponsored conservation strategies for residential water heating* », The Energy Journal 5(3), 99-118.

HAUSMAN, J.A., (1979), « *Individual discount rates and the purchase and utilization of energy-using durables* », Bell Journal of Economics 10(1), 33-54.

HERRING, H., (1999), « *Does energy efficiency save energy? The debate and its consequences* », Applied Energy 63.

HERRING, H., (2004), « *Energy efficiency—a critical view* », Energy.

HERTWICH, E., (2003), « *Consumption and the rebound effect: The consideration of information and communication technology* », Programme for Industrial Ecology, Norwegian University of Science and Technology.

JEVONS, S., (1866), « *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal-Mines* », Published: London: Macmillan and Co..

LARSEN, M.B., NESBAKKEN, R., (2004), « *Household electricity end-use consumption: results from econometric and engineering models* », Energy Economics 26, 179–200.

KHAZZOOM, J.D., (1980), « *Economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances* ». Energy Journal 1(4), 21-40.

KHAZZOOM, J.D., (1982), « *Response to Besen and Johnson's comment on economic implications of mandated efficiency standards for household appliances* », Energy Journal 3(1), 117-124.

KHAZZOOM, J.D., (1987), « *Energy savings from the adoption of more efficient appliances* », Energy Journal 8(4), 85-89.

KHAZZOOM, J.D., (1989), « *Energy savings from more efficient appliances: a rejoinder* », Energy Journal 10(1), 157-165.

KHAZZOOM, J.D., MILLER, S., (1982), « *Economic implications of mandated efficiency standards for household appliances: response to Besen and Johnson's comments* », Energy Journal 3(1), 117-124.

KLEIN, YEHUDA L., (1988), « *An Econometric Model of the Joint Production and Consumption of Residential Space Heat* », *Southern Economic Journal* 55(2): 351-359.

LAFRANCE, G., PERRON, D., (1994), « *Evoloution of Residential Electricity Demand by End-Use in Québec 1979-1989: A Conditional Demand Analysis* », *Energy Studies Review*, 6(2): 164-173.

MCRAE, R., (1979), « *Primary Energy Demand in Canada* », *Energy Economics* (October): 203-210.

NATIONS UNIES, (1992), « *Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques* ».

NESBAKKEN, R., (1999), « *Price sensitivity of residential energy consumption in Norway* », *Energy Economics* 21, 493-515.

POYER, DAVID A., HENDERSON, L., TEOTIA, ARVIND P.S., (1997), « *Residential Energy Consumption Across Different Population Groups: Comparative Analysis for Latino and Non-Latino Households in USA* », *Energy Economics* 19: 445-463.

POYER, DAVID A., WILLIAMS, M., (1993), « *Residential Energy Demand: Additional Empirical Evidence by Minority Household Type* », *Energy Economics* (April): 93-100.

RESSOURCES NATURELLES CANADA, OEE, (2004), « *Guide de données sur la consommation d'énergie, 1990 et 1996 à 2002* ».

RESSOURCES NATURELLES CANADA, OEE, (2004), « *Évolution de l'efficacité énergétique au Canada, 1990 à 2002* ».

RESSOURCES NATURELLES CANADA, OEE, (2003), « *Méthodologie pour l'analyse de factorisation de la consommation d'énergie, division de l'analyse et de l'élaboration de la politique de la demande* ».



SCHIPPER, L., GRUBB, M., (2000), « *On the rebound? Feedback between energy intensities and energy uses in IEA countries* », *Energy Policy* 28, 367-388.

SCHNEIDER, F., HINTERBERGER, F., MESICEK, R., LUKS, F., « *ECO-INFO SOCIETY: Strategies for an Ecological Information Society* », *Sustainability in the Information Society*, Hilty, M.L., P.W.Gilgen (Eds.), part 2, p.831-839,

SCHNEIDER, F., (2003), « *L'effet rebond* », *l'Ecologiste*, Edition française de The Ecologist n°11, Vol 4, n°3, p45.

SCHNEIDER, F., (2002), « *Point d'efficacité sans sobriété : Mieux vaut débondir que rebondir* », *le Silence* numéro 280.

STATISTIQUE CANADA, (2003), « *Guide de l'utilisateur , Enquête sur les dépenses des ménages, 2001* », Division de la statistique du revenu.

SCHWARZ, P.M., TAYLOR, T.N., (1995), « *Cold Hands, Warm Hearth? Climate, Net Takeback, and Household Comfort* », *The Energy Journal* 16(1): 41-54.

VAAGE, K., (2000), « *Heating technology and energy use: a discrete/continuous choices approach to Norwegian household energy demand* », *Energy Economics* 22, 649-666.

WIRL, F., (1994), « *On the unprofitability of utility demand-side conservation programmes* », *Energy Economics*, 16(1), 46-53.

WIRL, F., (1997), « *The Economics of Conservation Programs* », Boston: Kluwer Academic Publishers.

WORLD RESOURCES INSTITUTE, (1997), « *Resource flow: the material basis of industrial economies* », Washington (DC): World Resource Institute.

Sites Internet consultés:

Agence de l'efficacité énergétique: <http://www.aee.gouv.qc.ca/>

Association canadienne de l'hydroélectricité (ACH): <http://www.canhydropower.org/>

Environnement Canada: [http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/Welcome\\_f.html](http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/Welcome_f.html)

National Council for Science and the Environment: <http://www.ncseonline.org/>

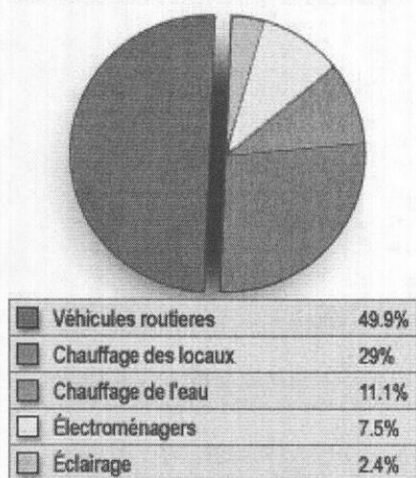
Office de l'efficacité énergétique: <http://www.oeo.nrcan.gc.ca/>

Ressources naturelles Canada: [http://www.nrcan.gc.ca/sd-dd/index\\_f.html](http://www.nrcan.gc.ca/sd-dd/index_f.html)

## ANNEXES

## Annexe 1

Sources d'émissions  
individuelles de GES au Canada



Source: Gouvernement du Canada : <http://www.climatechange.gc.ca/>



## Annexe 2

Table 3  
Summary of empirical evidence for rebound effects

| Economic actor       | End use                       | Potential size of the rebound <sup>a</sup> | Comments                                                                                                                                                                          | Number of studies <sup>b</sup>                       |
|----------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Consumers            | Space heating                 | 10-30%                                     | The unmeasured part of this effect includes an increase in space conditioned and an increase in comfort.                                                                          | 26 <sup>++</sup>                                     |
|                      | Space cooling                 | 0-50%                                      | The unmeasured part of this effect includes an increase in space conditioned and an increase in comfort.                                                                          | 9 <sup>+</sup>                                       |
|                      | Water heating                 | < 10-40%                                   | Reports of increased shower length or the purchase of increased water heating unit size indicate some indirect effects, which cannot be measured.                                 | 5 <sup>-</sup>                                       |
|                      | Residential lighting          | 5-12%                                      | An indirect effect in terms of an increase in operating hours was reported.                                                                                                       | 4 <sup>-</sup>                                       |
|                      | Appliances ("White Goods")    | 0%                                         | Indirect effects in terms of the purchase of larger units with more features were reported.                                                                                       | 2 <sup>-</sup>                                       |
|                      | Automotive transport          | 10-30%                                     | The unmeasured part of this effect includes changes in automotive attributes, particularly the shifts toward attributes such as increases in weight, horsepower and acceleration. | 22 <sup>-</sup>                                      |
| Firms                | Process uses (Short-run)      | 0%-20%                                     | Although increases in output occurred for less than 20% of the study participants, no values were reported.                                                                       | 1 <sup>-</sup>                                       |
|                      | Lighting (Short-run)          | 0-2%                                       | Changes in output were not reported. However, labor productivity probably improved.                                                                                               | 4 <sup>-</sup>                                       |
|                      | Long-run aggregate impacts    | < 100-0%                                   | Changes in output show a great deal of variability in the literature.                                                                                                             | Any number of studies with a variety of conclusions. |
| Economy-wide effects | Change in total output growth | 0.48%                                      | Postulated effects include an increase in standard of living and consumption of more energy-consuming "luxury" goods.                                                             | 1 <sup>-</sup>                                       |

<sup>a</sup>These estimates are expressed as a percentage increase in consumption estimated to result from a 100% increase in energy efficiency (i.e., the estimated elasticity of demand times -100%).

<sup>b</sup>Grading system used for the quality of estimate:

<sup>++</sup>These studies are done with a number of methods that provide good correspondence of estimates.

<sup>+</sup>These studies are done with only a moderate number of different methods that show some variability in estimates.

<sup>-</sup>These studies are done with only one or two methods and are inconclusive in results.

Note: All estimates assume a 10% increase in efficiency of fuel consumption.

Source: Greening et al. (2000)

## Annexe 3

Table 1  
Recent studies for residential space heating

| Study authors              | Method                                                                                                               | Sample size | Indication of response                                                                       | Presence of a control group |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Dubin <i>et al.</i> (1986) | Econometric analysis: Cooling was metered separately from other end uses and was accompanied by an engineering study | 252         | - 0.52 to - 0.81 Take-back was estimated at 8-12% below engineering estimates (winter only). | Yes                         |
| Klein (1985, 1987)         | "Lifestyles and Household Energy Use," 1973 and 1981                                                                 | 2157        | - 0.4 Note: Cross-price elasticities between energy and capital.                             | No                          |
| Hsueh and Gerner (1993)    | RECS 1981                                                                                                            | 1028        | - 0.35                                                                                       | No                          |
| Schwartz and Taylor (1995) | RECS 1984                                                                                                            | 1188        | - 0.987 to - 0.966 Take-back estimated at 1-3%.                                              | No                          |
| Cuijpers (1995, 1996)      | 1987-1988 Belgian Household Expenditure survey                                                                       | 2075        | - 0.31                                                                                       | No                          |

Source: Greening *et al.* (2000)

## Annexe 4

## Le jumelage des secteurs pour les degrés-jours de chauffage

| Secteurs                            | Sous-secteurs   | Nombre de stations<br>météorologiques | Degrés-jour de<br>chauffage moyen<br>pour 2001 |
|-------------------------------------|-----------------|---------------------------------------|------------------------------------------------|
| Secteurs de la région du St-Laurent |                 |                                       |                                                |
|                                     | sous-secteur 21 | 1                                     | 4038.6                                         |
|                                     | sous-secteur 22 | 1                                     | 4195.8                                         |
|                                     | sous-secteur 24 | 1                                     | 3988.5                                         |
|                                     | sous-secteur 26 | 2                                     | 4066.1                                         |
| Secteur Antoine-Labelle             |                 |                                       |                                                |
|                                     | sous-secteur 51 | 2                                     | 4456.4                                         |
|                                     | sous-secteur 53 | 5                                     | 4760.0                                         |
|                                     | sous-secteur 59 | 1                                     | 4100.8                                         |
| Secteur Lanaudière                  |                 |                                       |                                                |
|                                     |                 | 9                                     | 4453.6                                         |
| Secteur Laval                       |                 |                                       |                                                |
|                                     |                 | 2                                     | 3918.3                                         |
| Secteur Mille-Îles                  |                 |                                       |                                                |
|                                     |                 | 4                                     | 4193.2                                         |
| Secteur le Nord                     |                 |                                       |                                                |
|                                     | sous-secteur 71 | 3                                     | 4819.3                                         |
|                                     | sous-secteur 72 | 1                                     | 5503.8                                         |
|                                     | sous-secteur 74 | 1                                     | 5993.0                                         |
| Secteur Outaouais                   |                 |                                       |                                                |
|                                     | sous-secteur 52 | 4                                     | 4332.4                                         |
|                                     | sous-secteur 56 | 3                                     | 4488.8                                         |
|                                     | sous-secteur 57 | 4                                     | 4444.4                                         |
|                                     | sous-secteur 58 | 2                                     | 4312.5                                         |
| Secteur Appalaches                  |                 |                                       |                                                |
|                                     | sous-secteur 48 | 4                                     | 4478.1                                         |
|                                     | sous-secteur 49 | 9                                     | 4676.1                                         |
| Secteur Jacques Cartier             |                 |                                       |                                                |
|                                     |                 | 4                                     | 4480.5                                         |
| Secteur Lévis                       |                 |                                       |                                                |
|                                     |                 | 8                                     | 4677.8                                         |
| Secteur Orléans                     |                 |                                       |                                                |
|                                     |                 | 2                                     | 4338.6                                         |
| Secteur Saint-Maurice               |                 |                                       |                                                |
|                                     | sous-secteur 66 | 5                                     | 4508.8                                         |
|                                     | sous-secteur 67 | 2                                     | 4735.1                                         |
|                                     | sous-secteur 68 | 2                                     | 4995.4                                         |
| Secteur Bas Saint-Laurent           |                 |                                       |                                                |
|                                     |                 | 8                                     | 4946.1                                         |
| Secteur Côte-Nord                   |                 |                                       |                                                |
|                                     | sous-secteur 13 | 5                                     | 5168.2                                         |
|                                     | sous-secteur 14 | 5                                     | 5733.5                                         |
| Secteur Gaspésie                    |                 |                                       |                                                |
|                                     | sous-secteur 82 | 2                                     | 5100.0                                         |
|                                     | sous-secteur 83 | 1                                     | 4821.0                                         |
| Secteur Saguenay                    |                 |                                       |                                                |
|                                     | sous-secteur 91 | 3                                     | 4965.3                                         |
|                                     | sous-secteur 92 | 5                                     | 5382.6                                         |
|                                     | sous-secteur 95 | 1                                     | 6092.3                                         |
| Secteur Îles-de-la-Madeleine        |                 |                                       |                                                |
|                                     |                 | 2                                     | 4356.9                                         |
| Secteur Belles-Rives                |                 |                                       |                                                |
|                                     | sous-secteur 32 | 2                                     | 4266.1                                         |
|                                     | sous-secteur 33 | 7                                     | 4120.7                                         |
|                                     | sous-secteur 69 | 6                                     | 4532.8                                         |
| Secteur des Cantons                 |                 |                                       |                                                |
|                                     | sous-secteur 37 | 5                                     | 4265.9                                         |
|                                     | sous-secteur 38 | 8                                     | 4545.9                                         |
| Secteur Ozias-Leduc                 |                 |                                       |                                                |
|                                     | sous-secteur 36 | 7                                     | 4200.5                                         |
|                                     | sous-secteur 39 | 2                                     | 4201.2                                         |
| Secteur Pointe-au-Moulin            |                 |                                       |                                                |
|                                     | sous-secteur 30 | 1                                     | 4099.8                                         |
|                                     | sous-secteur 31 | 1                                     | 4310.7                                         |
|                                     | sous-secteur 35 | 7                                     | 4077.5                                         |
| Secteur Seigneuries                 |                 |                                       |                                                |
|                                     |                 | 2                                     | 4067.3                                         |



## Annexe 5

Statistiques descriptives sur les autres utilisations finales non reliées au chauffage des locaux.

| Nombre<br>d'appareils<br>de cuisson | Freq. | Percent | Cum.   |
|-------------------------------------|-------|---------|--------|
| 0                                   | 1     | 0.06    | 0.06   |
| 1                                   | 1,419 | 79.99   | 80.05  |
| 2                                   | 168   | 9.47    | 89.52  |
| 3                                   | 186   | 10.48   | 100.00 |
| Total                               | 1,774 | 100.00  |        |

| Lave-vaisselle | Freq. | Percent | Cum.   |
|----------------|-------|---------|--------|
| 0              | 361   | 20.35   | 20.35  |
| 1              | 1,413 | 79.65   | 100.00 |
| Total          | 1,774 | 100.00  |        |

| Machine à<br>laver le<br>linge | Freq. | Percent | Cum.   |
|--------------------------------|-------|---------|--------|
| 0                              | 3     | 0.17    | 0.17   |
| 1                              | 1,771 | 99.83   | 100.00 |
| Total                          | 1,774 | 100.00  |        |

| Nombre de<br>téléviseurs | Freq. | Percent | Cum.   |
|--------------------------|-------|---------|--------|
| 0                        | 4     | 0.23    | 0.23   |
| 1                        | 382   | 21.53   | 21.76  |
| 2                        | 743   | 41.88   | 63.64  |
| 3                        | 461   | 25.99   | 89.63  |
| 4                        | 138   | 7.78    | 97.41  |
| 5                        | 35    | 1.97    | 99.38  |
| 6                        | 10    | 0.56    | 99.94  |
| 8                        | 1     | 0.06    | 100.00 |
| Total                    | 1,774 | 100.00  |        |

| Nombre<br>d'ordinateurs | Freq. | Percent | Cum.   |
|-------------------------|-------|---------|--------|
| 0                       | 580   | 32.69   | 32.69  |
| 1                       | 973   | 54.85   | 87.54  |
| 2                       | 185   | 10.43   | 97.97  |
| 3                       | 27    | 1.52    | 99.49  |
| 4                       | 6     | 0.34    | 99.83  |
| 5                       | 2     | 0.11    | 99.94  |
| 10                      | 1     | 0.06    | 100.00 |
| Total                   | 1,774 | 100.00  |        |

Nombre de  
réfrigérateurs

|       | Freq. | Percent | Cum.   |
|-------|-------|---------|--------|
| 0     | 1     | 0.06    | 0.06   |
| 1     | 1,157 | 65.22   | 65.28  |
| 2     | 582   | 32.81   | 98.08  |
| 3     | 33    | 1.86    | 99.94  |
| 4     | 1     | 0.06    | 100.00 |
| Total | 1,774 | 100.00  |        |

Age du  
chauffe-eau  
si  
électrique

|       | Freq. | Percent | Cum.   |
|-------|-------|---------|--------|
| 1     | 35    | 1.97    | 1.97   |
| 2     | 184   | 10.37   | 12.34  |
| 3     | 207   | 11.67   | 24.01  |
| 4     | 157   | 8.85    | 32.86  |
| 5     | 145   | 8.17    | 41.04  |
| 6     | 186   | 10.48   | 51.52  |
| 7     | 100   | 5.64    | 57.16  |
| 8     | 96    | 5.41    | 62.57  |
| 9     | 84    | 4.74    | 67.31  |
| 10    | 39    | 2.20    | 69.50  |
| 11    | 153   | 8.62    | 78.13  |
| 12    | 27    | 1.52    | 79.65  |
| 13    | 78    | 4.40    | 84.05  |
| 14    | 34    | 1.92    | 85.96  |
| 15    | 29    | 1.63    | 87.60  |
| 16    | 72    | 4.06    | 91.66  |
| 17    | 17    | 0.96    | 92.62  |
| 18    | 22    | 1.24    | 93.86  |
| 19    | 15    | 0.85    | 94.70  |
| 20    | 8     | 0.45    | 95.15  |
| 21    | 17    | 0.96    | 96.11  |
| 22    | 4     | 0.23    | 96.34  |
| 23    | 14    | 0.79    | 97.13  |
| 24    | 8     | 0.45    | 97.58  |
| 25    | 9     | 0.51    | 98.08  |
| 26    | 8     | 0.45    | 98.53  |
| 27    | 6     | 0.34    | 98.87  |
| 28    | 7     | 0.39    | 99.27  |
| 29    | 4     | 0.23    | 99.49  |
| 30    | 3     | 0.17    | 99.66  |
| 31    | 2     | 0.11    | 99.77  |
| 32    | 1     | 0.06    | 99.83  |
| 33    | 1     | 0.06    | 99.89  |
| 41    | 1     | 0.06    | 99.94  |
| 46    | 1     | 0.06    | 100.00 |
| Total | 1,774 | 100.00  |        |

Capacité du  
chauffe-eau

|       | Freq. | Percent | Cum.   |
|-------|-------|---------|--------|
| 1     | 14    | 0.79    | 0.79   |
| 2     | 4     | 0.23    | 1.01   |
| 3     | 13    | 0.73    | 1.75   |
| 4     | 666   | 37.54   | 39.29  |
| 5     | 13    | 0.73    | 40.02  |
| 6     | 1,034 | 58.29   | 98.31  |
| 7     | 30    | 1.69    | 100.00 |
| Total | 1,774 | 100.00  |        |

Systeme  
d'éclairage  
extérieur  
pour  
sécurité ou  
valorisation

|       | Freq. | Percent | Cum.   |
|-------|-------|---------|--------|
| 0     | 816   | 46.00   | 46.00  |
| 1     | 958   | 54.00   | 100.00 |
| Total | 1,774 | 100.00  |        |

Piscine  
(hors-terre  
creusée  
interieure  
ou  
exterieure)

Filtre de piscine  
avec minuterie

|       | 0     | 1   | Total |
|-------|-------|-----|-------|
| 0     | 1,226 | 0   | 1,226 |
| 1     | 359   | 189 | 548   |
| Total | 1,585 | 189 | 1,774 |

Indique si  
habitation  
climatisée

|       | Freq. | Percent | Cum.   |
|-------|-------|---------|--------|
| 0     | 1,310 | 73.84   | 73.84  |
| 1     | 464   | 26.16   | 100.00 |
| Total | 1,774 | 100.00  |        |



## Annexe 6

Résultats du modèle logarithmique (Taille de l'échantillon = 1774 observations)

| Modèle logarithmique                     |                                     |                 |    |                                      |                 |
|------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|----|--------------------------------------|-----------------|
| Équation ln(S) :                         | R-sq = 0.0695                       |                 |    | P = 0.00                             |                 |
| Équation ln(QE) :                        | R-sq = 0.2061                       |                 |    | P = 0.00                             |                 |
| Variables communes<br>aux 2 équations    | Coefficients de<br>l'équation ln(S) | Écart-<br>types |    | Coefficients de<br>l'équation ln(QE) | Écart-<br>types |
| PER2                                     | 0,02158                             | 0,01145         | *  | -0,01893                             | 0,04383         |
| PER3                                     | 0,01902                             | 0,00899         | ** | 0,00929                              | 0,03438         |
| PER4                                     | 0,00690                             | 0,00890         |    | -0,01728                             | 0,03271         |
| PER5                                     | 0,02286                             | 0,01075         |    | -0,04257                             | 0,04227         |
| PER6                                     | 0,04709                             | 0,02571         | *  | -0,14050                             | 0,10232         |
| THERMO                                   | 0,05984                             | 0,01316         | ** | -0,03199                             | 0,06115         |
| FMP                                      | 0,02793                             | 0,06822         |    | 0,34314                              | 0,24778         |
| CONV                                     | 0,02423                             | 0,01474         | *  | 0,01008                              | 0,05507         |
| SCAC                                     | 0,01618                             | 0,01338         |    | 0,08196                              | 0,05058         |
| SCEC                                     | 0,01361                             | 0,01942         |    | 0,15302                              | 0,07202         |
| lnSYST_AGE                               | 0,00430                             | 0,00555         |    | -0,00217                             | 0,02056         |
| SSVS_TI                                  | 0,00955                             | 0,00831         |    | 0,00283                              | 0,03622         |
| SSVS_PI                                  | 0,03532                             | 0,01558         | ** | 0,10102                              | 0,06265         |
| TEP                                      | 0,00423                             | 0,00158         | ** | 0,00137                              | 0,00616         |
| TR                                       | -0,00213                            | 0,00100         | ** | 0,01054                              | 0,00456         |
| TENP                                     | 0,00576                             | 0,00173         | ** | -0,00239                             | 0,00703         |
| lnHDD                                    | -0,00904                            | 0,03089         |    | 0,20288                              | 0,12169         |
| CHAUFF_APP                               | -0,01830                            | 0,00931         | ** | 0,02835                              | 0,03598         |
| PLINTHES_APP                             | -0,00228                            | 0,00255         |    | 0,02893                              | 0,00942         |
| CONV_APP                                 | 0,00183                             | 0,00319         |    | 0,00157                              | 0,01166         |
| APP_ELEC                                 | -0,01300                            | 0,02976         |    | 0,10049                              | 0,10925         |
| APP_AUTRE                                | -0,00588                            | 0,00574         |    | -0,07005                             | 0,02206         |
| Variables uniques à<br>l'équation ln(S)  | Coefficients                        | Écart-<br>types |    |                                      |                 |
| Équation ln(S)                           |                                     |                 |    |                                      |                 |
| R2                                       | 0,05651                             | 0,02536         | ** |                                      |                 |
| R3                                       | 0,06637                             | 0,02581         | ** |                                      |                 |
| R4                                       | 0,06814                             | 0,02541         | ** |                                      |                 |
| R5                                       | 0,06308                             | 0,02580         | ** |                                      |                 |
| R6                                       | 0,05954                             | 0,02631         | ** |                                      |                 |
| R7                                       | 0,07312                             | 0,02643         | ** |                                      |                 |
| STATUT2                                  | 0,00106                             | 0,00725         |    |                                      |                 |
| STATUT3                                  | -0,01240                            | 0,00956         |    |                                      |                 |
| STATUT4                                  | -0,00677                            | 0,01307         |    |                                      |                 |
| STATUT_AUTRE                             | -0,00233                            | 0,02170         |    |                                      |                 |
| COPROP                                   | -0,01347                            | 0,01268         |    |                                      |                 |
| A2                                       | -0,04547                            | 0,01473         | ** |                                      |                 |
| A3                                       | -0,02075                            | 0,01517         |    |                                      |                 |
| A4                                       | -0,01527                            | 0,01707         |    |                                      |                 |
| _cons                                    | 2,95640                             | 0,26221         | ** |                                      |                 |
| Variables uniques à<br>l'équation ln(QE) | Coefficients                        | Écart-<br>types |    |                                      |                 |
| lnS                                      | 0,99011                             | 0,64777         |    |                                      |                 |
| lnPERSONNES                              | 0,14385                             | 0,02553         | ** |                                      |                 |
| lnPIECES                                 | 0,08226                             | 0,04174         | ** |                                      |                 |
| lnETAGES                                 | 0,12440                             | 0,04259         | ** |                                      |                 |
| DU_TRI                                   | -0,22556                            | 0,04278         | ** |                                      |                 |
| RANGEE                                   | -0,17193                            | 0,09303         | *  |                                      |                 |
| COLLECTIVE                               | -0,30817                            | 0,07059         | ** |                                      |                 |
| GENRE_AUTRE                              | -0,33990                            | 0,09799         | ** |                                      |                 |
| APP_CUISSON                              | 0,03142                             | 0,01573         | ** |                                      |                 |
| LAVE_VAISS                               | -0,01758                            | 0,02712         |    |                                      |                 |
| LAVEUSE                                  | 0,35863                             | 0,25940         |    |                                      |                 |
| CLIM                                     | 0,01981                             | 0,02690         |    |                                      |                 |
| NBRE_TV                                  | 0,00652                             | 0,01144         |    |                                      |                 |
| NBRE_ORD                                 | 0,02780                             | 0,01498         | *  |                                      |                 |
| NBRE_FRIG                                | 0,04090                             | 0,02038         | ** |                                      |                 |
| ECLAIR                                   | 0,03781                             | 0,02030         | *  |                                      |                 |
| lnCE                                     | -0,00627                            | 0,01362         |    |                                      |                 |
| lnCAP                                    | 0,09041                             | 0,04131         | ** |                                      |                 |
| PISCINE                                  | 0,12266                             | 0,02718         | ** |                                      |                 |
| MIN_PISC                                 | -0,06161                            | 0,03821         |    |                                      |                 |
| _cons                                    | 4,31106                             | 2,350553        | *  |                                      |                 |

Légende:

\* = Variable significative avec un degré de confiance de 90%

\*\* = Variable significative avec un degré de confiance de 95%