

Un modèle intégré de la demande totale d'énergie Application à la province de Québec

par Jean-Thomas Bernard

Titulaire de la Chaire en économie de l'énergie électrique
Département d'économique
Université Laval
Sainte-Foy, Québec
Canada G1K 7P4

RÉSUMÉ

À cause du cadre réglementaire et des politiques gouvernementales qui s'appliquent à la demande d'énergie, celle-ci a reçu beaucoup d'attention de la part des développeurs de modèles. Dans cet article, je présente un modèle intégré de la demande totale d'énergie. Les principaux déterminants sont les prix relatifs des sources d'énergie (charbon, électricité, gaz naturel et pétrole), le niveau d'activité économique, la formation des ménages et la température. Des effets dynamiques permettent à la demande de s'ajuster dans le temps. Ce modèle économétrique est appliqué à trois secteurs de l'économie québécoise: résidentiel, commercial et industriel. L'échantillon va de 1970 à 1997. La présentation des résultats fait ressortir les rôles joués par les élasticités-prix et revenus de court et de long terme. Ce modèle est d'usage facile pour fin de simulation et de prévision et des exemples sont présentés tout en fournissant des indicateurs de performance en tant qu'outil de prévision.

Introduction

Le fait que la quantité d'un bien ou d'un service demandée par les consommateurs change de façon inverse à la suite d'une variation de son prix est un phénomène reconnu par la plupart des analystes d'un marché. Cette perception générale relève tout aussi bien du sens commun que de la théorie économique ou de l'observation sommaire des données. Compte tenu de l'importance de ce phénomène, les économistes lui ont attaché un concept précis, qui est l'élasticité-prix. Celle-ci mesure le changement relatif (%) de la quantité demandée d'un bien ou d'un service en réponse à un changement relatif (%) de son prix. Il est facile de concevoir l'utilité des élasticités-prix pour l'étude de l'évolution attendue de la demande d'un bien ou d'un service et pour l'analyse des effets de différentes interventions gouvernementales touchant les prix comme les tarifs, les taxes ou les subsides à la consommation.

Il est également reconnu qu'il existe une relation positive entre le niveau de consommation d'un bien ou d'un service et le niveau de revenu ou d'activité de l'utilisateur. L'importance de ce lien pour fin d'analyse ou de prévision découle de sa taille relative qui, elle aussi, peut être exprimée en termes d'élasticité-revenu ou activité, c'est-à-dire le changement relatif (%) de la quantité demandée résultant d'un changement relatif (%) du niveau de revenu ou d'activité des usagers.

Les évaluations empiriques des élasticités-prix et revenus ne sont pas directement disponibles, mais elles doivent être déduites d'observations qui décrivent les comportements des utilisateurs dans leur contexte respectif. Les changements des éléments pertinents de ce contexte, qui incluent évidemment les prix et le niveau d'activité économique, induisent les changements de comportement. La principale source d'information statistique sur les comportements demeure les réalisations passées pour un marché donné. C'est sur la base de cette information que nous

tentons d'obtenir des estimés les plus fiables possible des élasticités-prix ou revenus, ou encore de tout autre facteur jugé pertinent.

Une difficulté majeure tient au fait que les observations passées ne sont pas le résultat d'expériences contrôlées, mais d'expériences réelles où tous les facteurs pertinents influencent simultanément les choix des consommateurs. C'est pourquoi les économistes ont développé des modèles cohérents de demande de biens qui peuvent être estimés avec l'aide de méthodes économétriques pour obtenir des estimateurs aux propriétés désirables comme l'absence de biais, la convergence et l'efficacité. Une fois que le modèle retenu a été estimé, il peut être utilisé pour fin d'analyse ou de prévision. C'est l'intérêt premier des usagers de ces modèles.

La demande totale d'énergie soit pour l'ensemble de l'économie, soit pour un secteur en particulier, a reçu beaucoup d'attention au cours des vingt dernières années suite aux crises pétrolières mondiales des années 1973 et 1979. Encore aujourd'hui, il existe beaucoup d'intérêt pour ce sujet dans l'optique du réchauffement de la planète, du rôle joué par les gaz à effet de serre et de leur association avec la consommation d'énergie. Des ouvrages fournissent une synthèse des travaux antérieurs, comme par exemple Ziembra et al. (1980), Bohi et Zimmerman (1984), Donnelly (1987) et Hawdon (1992).

L'objectif premier de ce texte est de présenter un résumé des recherches que j'ai réalisées en collaboration avec différents auteurs au cours des vingt dernières années sur l'analyse économétrique de la demande totale d'énergie par secteurs pour le Québec. La présentation qui suit est tirée principalement de Arsenault, Bernard, Carr et Genest-Laplante (1995), Bernard et Genest-Laplante (1995) et de quelques travaux récents¹.

Cet article comprend trois sections : la première décrit la structure du modèle de la demande totale d'énergie, la seconde montre les résultats obtenus en mettant l'accent sur l'évaluation des élasticités-prix et revenus ainsi que sur la qualité des prévisions obtenues à partir de ce modèle, et la troisième souligne les limites de l'usage de tels modèles. La conclusion contient quelques remarques sur l'utilisation actuelle des modèles de demande d'énergie dans le contexte réglementaire qui s'y applique.

1. Spécification d'un modèle intégré de demande totale d'énergie et de ses composantes

La modélisation de la demande totale d'énergie peut être appliquée soit à l'ensemble de l'économie, soit au niveau sectoriel, comme le résidentiel, le commercial et l'industriel, pour ensuite obtenir l'ensemble de l'économie par addition. C'est cette deuxième approche qui est privilégiée ici.

La modélisation de la demande totale d'énergie avec possibilité de substitution entre les sources d'énergie procède à deux niveaux: au premier niveau (agrégé), la demande totale d'énergie mesurée en joules est exprimée comme fonction de sa valeur retardée, du prix réel agrégé de l'énergie, du revenu réel et des degrés-jours de chauffage. Au second niveau (désagrégé), les parts de marché obtenues par chaque source d'énergie (charbon, électricité, gaz naturel et pétrole) sont fonction de la valeur retardée de la part correspondante et des prix relatifs des sources d'énergie. L'introduction de variables retardées tant au niveau agrégé qu'au niveau désagrégé vise à capturer des effets dynamiques qui s'étalent dans le temps. En effet, l'usage de l'énergie repose sur des équipements complémentaires et les réponses des consommateurs à des variations de prix ou de revenus peuvent s'échelonner sur plusieurs périodes à cause des coûts d'ajustement.

De façon plus formelle, le modèle intégré de la demande totale d'énergie par secteurs peut être exprimé ainsi :

$$MS\phi_t = f(MS\phi_{t-1}, PC_t, PEL_t, PGN_t, PP_t) \quad (1)$$

$$PEN_t = \sum_{\phi} MS\phi_t \times P\phi_t \quad (2)$$

$$EN_t = h(EN_{t-1}, PEN_t / IP_t, Y_t, DJ_t) \quad (3)$$

$$Q\phi_t = MS\phi_t \times EN_t \quad (4)$$

où ϕ = Charbon (C)², Électricité (EL), Gaz Naturel (GN), Pétrole (P);

$MS\phi_t$ = part de marché (%) détenue par la source d'énergie ϕ à l'année t;

PEN_t = prix (\$/joule) de l'énergie totale à l'année t;

$P\phi_t$ = prix (\$/joule) de la source d'énergie ϕ à l'année t;

EN_t = consommation d'énergie totale (joules) à l'année t;

PI_t = indice général des prix à l'année t;

Y_t = revenu réel à l'année t;

DJ_t = degrés-jours de chauffage à l'année t;

$Q\phi_t$ = consommation d'énergie (joules) de la source ϕ à l'année t.

Les expressions (1) à (4) constituent un modèle intégré à deux niveaux de la demande totale d'énergie et de sa décomposition par source. Les équations de parts (1) détenues par chaque source d'énergie dans la demande totale incorporent les possibilités de substitution entre les sources d'énergie sur la base de leurs prix relatifs. Ces équations de parts sont utilisées pour former le prix agrégé de l'énergie totale (2) qui est simplement la somme pondérée des prix des différentes sources. Ce prix agrégé détermine le niveau de la demande totale (3) conjointement avec d'autres variables comme le revenu réel et les degrés-jours³. Les équations de parts (1) et la quantité totale d'énergie (3) sont combinées pour obtenir la demande par source d'énergie (4).

Ce modèle intégré à deux niveaux fournit un outil simple d'usage pour fin de simulation ou de prévision où les effets de substitution entre les sources d'énergie (systèmes d'équations (1)) et entre l'énergie totale et l'ensemble des autres biens (équation (3)) sont pris en compte explicitement. De plus, le revenu réel influence également la consommation d'énergie⁴. Les variables exogènes qui déterminent la consommation d'énergie sont les prix relatifs des sources d'énergie et le revenu réel par secteur. À chaque période, les variables retardées sont aussi des variables connues qui affectent le niveau actuel de demande.

Pour fin d'estimation, le système de parts de marché (1) prend la forme semi-logarithmique pour les prix relatifs des sources d'énergie. Puisque ce système de parts de marché représente une partition entre les sources d'énergie, quelques restrictions doivent être imposées pour s'assurer que l'addition des parts égale l'unité :

i. chaque équation de part de marché détenue par une source d'énergie est homogène de degré zéro dans les prix des sources d'énergie;

- ii. le coefficient de la part retardée est le même pour chaque équation;
- iii. l'effet du prix de la source i sur la part de marché détenue par la source j est le même que l'effet du prix de la source j sur la part de la source i ;
- iv. la somme des interceptes et du coefficient des parts retardées est égale à l'unité.

Pour fin d'estimation, la fonction (3) prend une forme logarithmique. Ceci implique que les élasticités-prix et revenu de la demande totale d'énergie peuvent être calculées directement. Puisque les effets s'échelonnent dans le temps, il faut distinguer entre l'élasticité de court terme, qui capture l'effet réalisé durant l'année courante, et l'élasticité de long terme, qui représente l'effet cumulatif une fois que l'ajustement complet s'est manifesté sur plusieurs périodes. De manière plus formelle, l'élasticité de la demande totale d'énergie par rapport à son prix est :

$$\varepsilon_{EN:PEN} = \frac{PEN}{EN} \times \frac{dEN}{dPEN} \quad (5)$$

L'élasticité par rapport au revenu est définie de façon similaire⁵ :

$$\varepsilon_{EN:Y} = \frac{Y}{EN} \times \frac{dEN}{dY} \quad (6)$$

Il est approprié de souligner que l'énergie totale ainsi que ses composantes sont mesurées en joules, c'est-à-dire sur la base d'équivalents thermiques. Les parts de marché (%) sont donc des parts mesurées sur la base d'équivalence thermique et non des parts de dépenses. Depuis les mises en garde de Turvey et Nobay (1969), les économistes sont conscients qu'il est préférable sur le plan théorique d'utiliser les parts de dépenses⁶. L'usage des parts mesurées en équivalent thermique peut introduire des biais systématiques d'estimation dans la mesure des élasticités-prix et revenu⁷. Le choix de mesurer l'énergie sur la base d'équivalence thermique repose sur des considérations pratiques; en effet, les gouvernements fédéral et provinciaux ainsi que les organismes réglementaires utilisent les mesures thermiques de l'usage de l'énergie dans leurs analyses et leurs prévisions. L'adoption de cette approche facilite donc les comparaisons entre les autres modèles et leurs résultats.

2. Estimation et simulation

Le modèle décrit à la section précédente a été estimé à partir de séries chronologiques annuelles de 1970 à 1997 pour la province de Québec. Les données ont été recueillies par source d'énergie (charbon, électricité, gaz naturel et produits pétroliers) pour trois secteurs (résidentiel, commercial et industriel). La majeure partie de l'information statistique provient de publications officielles de Statistique Canada.

2.1 Résultats d'estimation

La méthode des moindres carrés ordinaires (MCO) a été appliquée à l'équation (3) qui représente la consommation totale d'énergie par secteurs et les résultats sont reproduits au tableau 1. À quelques exceptions près, ces résultats sont satisfaisants selon les critères statistiques usuels. Tous les effets prix et revenus ont les signes attendus *a priori*. Les coefficients des variables retardées sont fortement significatifs et ils prennent des valeurs entre zéro et l'unité; ces valeurs indiquent la présence d'ajustements dynamiques stables. Les coefficients R^2 prennent des valeurs

élevées et les statistiques Durbin-h sont faibles; la seule exception se trouve dans le secteur industriel où il y a présence d'autocorrélation dans les termes d'erreurs.

La méthode des équations liées par les erreurs à la Zellner (SUR) a été appliquée aux équations de parts de marché (1) et les résultats sont reproduits au tableau 2. Il peut être aperçu que les coefficients des variables retardées sont tous très élevés; ceci indique la présence d'ajustements très lents dans les parts de marchés. Les coefficients des variables de prix relatifs des sources d'énergie sont en général significatifs et ils indiquent la présence de substitution entre les sources d'énergie.

2.2 Élasticités-prix et revenu de la demande totale d'énergie

Les résultats d'estimation montrés au tableau 1 nous permettent de calculer directement les élasticités-prix et revenu de la demande totale d'énergie par secteur pour le court et le long terme. Le tableau 3 contient les estimés des élasticités-prix qui sont toutes inférieures à l'unité en valeur absolue pour le court et le long terme; ce fait est particulièrement marquant dans le secteur industriel et il indique que la consommation d'énergie répond faiblement à des variations de prix⁸. Les élasticités-revenus sont assez élevées dans les secteurs commercial et industriel et elles approchent l'unité à long terme. Ceci montre que pour ces deux secteurs, la consommation d'énergie suit le niveau d'activité économique à long terme.

2.3 Prévision et simulation

Le modèle intégré présenté ci-dessus peut facilement être utilisé pour des fins de simulation ou encore de prévision. Il suffit d'y introduire les variables exogènes appropriées qui, dans ce cas-ci, sont les prix des sources d'énergie, le niveau d'activité économique et la formation des ménages. Ce sont les variables qui sont considérées être les déterminants fondamentaux de l'évolution de la demande totale d'énergie.

Pour illustrer l'usage de ce modèle, deux simulations ont été réalisées sur la période d'observation, c'est-à-dire de 1970 à 1997. Dans la première simulation, les variables exogènes observées ainsi que les variables retardées calculées de l'année précédente déterminent le niveau prévu de la consommation totale d'énergie de l'année courante. Puisque nous utilisons les variables exogènes observées, les erreurs de prévisions découlent du modèle lui-même et non de variables explicatives. De plus, l'utilisation des variables retardées calculées permet une analyse de la capacité du modèle à reproduire plus ou moins rapidement le niveau réel de la consommation d'énergie. Dans la seconde simulation, nous utilisons comme variables explicatives uniquement les observations qui incluent également les variables retardées. Dans ce cas-ci, c'est la performance de prévision de court terme qui est mise en lumière.

Pour analyser la performance du modèle comme outil de prévision, nous faisons appel au coefficient de Theil (1966) ainsi que sa décomposition en trois parties. Le coefficient de Theil est défini à partir de l'erreur de prévision quadratique au carré :

$$U^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (P_t - A_t)^2}{\sum_{t=1}^T A_t^2} \quad (7)$$

où P_t = valeur prévue à la période t ;

A_t = valeur actuelle à la période t

U peut donc être interprété comme l'erreur relative (%) en moyenne par année. Theil a de plus montré que U^2 peut être décomposé en trois parties qui s'expriment ainsi en termes relatifs :

$$U^m + U^s + U^r = 1$$

où U^m = part de l'erreur de prévision attribuable à la différence des moyennes entre P_t et A_t ;

U^s = part de l'erreur de prévision due à la structure du modèle

U^r = part de l'erreur de prévision qui est de nature résiduelle.

Pour fin de prévision, il est souhaitable que U^2 soit le plus petit possible, c'est-à-dire que l'erreur relative de prévision soit la plus faible possible. Pour un U^2 donné, il est souhaitable que U^m et U^s soient près de zéro et que U^r soit près de l'unité.

Le tableau 4 fournit les évaluations de ces coefficients pour les deux simulations décrites précédemment. Il peut être aperçu que l'erreur relative moyenne de prévision est d'environ 2 % pour le résidentiel, de 4 % pour le commercial et de 6 à 11,5% pour l'industriel. À l'exception de la simulation 1 pour le secteur industriel, la principale source d'erreur est de nature résiduelle, c'est-à-dire U^r est proche de l'unité.

3. Quelques limites

La qualité des prévisions obtenues en utilisant un modèle économétrique dépend à la fois de la qualité des variables exogènes qui y sont introduites et de la stabilité de la structure du modèle dans le temps. L'information sur l'évolution attendue des variables exogènes, c'est-à-dire les prix des sources d'énergie et la situation économique, provient en général des experts. La stabilité de la structure du modèle peut être soumise à l'analyse statistique. Cependant, en utilisant des séries annuelles comme c'est le cas ici, cette information s'accumule lentement et c'est seulement avec le recul du temps que des tests concluants peuvent être appliqués à ce sujet.

Conclusion

Suite aux crises pétrolières mondiales de 1973 et 1979, les gouvernements avaient contrôlé les prix du pétrole et du gaz naturel. Depuis 1985, ces prix ont été déréglementés au Canada. Nous assistons présentement à l'ouverture de la production de l'électricité aux forces du marché. Les gouvernements ont donc réduit leur présence réglementaire dans le secteur de l'énergie et l'intérêt pour la prévision de l'évolution de la demande d'énergie à cette fin s'en trouve réduit. Par contre, de nouveaux intérêts surgissent. C'est le cas de la préoccupation à l'égard du réchauffement de la planète. L'évolution de la demande d'énergie, surtout des sources fossiles, est directement mise en cause. C'est pourquoi il demeure encore important de disposer d'outils appropriés pour analyser et prévoir la demande d'énergie. Les travaux présentés ci-dessus peuvent servir à cette fin.

TABLEAU 1
Demande totale d'énergie

VARIABLES EXPLICATIVES	RÉSIDENTIEL	COMMERCIAL	INDUSTRIEL
Intercepte	2,731 (3,81) ^a	1,794 (1,16)	1,909 (1,68)
Variable dépendante retardée	0,643 (8,79)	0,377 (2,60)	0,366 (2,08)
Prix réel de l'énergie	-0,259 (-4,90)	-0,328 (-3,53)	-0,066 (1,70)
Revenu réel disponible par ménage	0,125 (1,18)	-	-
P.I.B. commercial	-	0,577 (3,76)	-
P.I.B. industriel	-	-	0,614 (3,30)
Degrés-jours de chauffage	0,409 (4,96)	0,660 (3,13)	-
R² Durbin-h.	0,999 -0,77	0,998 -0,25	0,832 13,96
Nombre d'observations	28	28	28

a) Les statistiques-t apparaissent entre parenthèses.

TABLEAU 2
Les équations de parts de marché

Variables explicatives	Parts de marché		
	ÉLECTRICITÉ	PÉTROLE	CHARBON
I. Secteur résidentiel			
Intercepte	0,089 (6,93) ^a	-0,016 (-2,16)	-
Variable dépendante	0,929 (60,05)	0,929 (60,05)	-
Prix de l'électricité^b	-0,053 (-5,06)	0,041 (4,0)	-
Prix du pétrole^b	0,04 (4,01)	-0,06 (-4,93)	-
II. Secteur commercial			
Intercepte	0,103 (4,36)	-0,012 (-0,89)	-
Variable dépendante	0,886 (36,25)	0,886 (36,25)	-
Prix de l'électricité^b	-0,041 (-2,49)	0,035 (2,43)	-
Prix du pétrole^b	0,035 (2,43)	-0,100 (-4,79)	-
III. Secteur industriel			
Intercepte	0,038 (2,64)	-0,017 (-1,15)	0,008 (3,16)
Variable dépendante	0,941 (32,91)	0,941 (32,91)	0,941 (32,92)
Prix de l'électricité^b	-0,010 (-0,78)	0,038 (2,54)	-0,014 (-4,15)
Prix du pétrole^b	-0,038 (2,54)	-0,081 (-3,37)	0,012 (2,02)
Prix du charbon^b	-0,014 (4,15)	0,012 (2,02)	-0,003 (0,77)

a) Les statistiques-t apparaissent entre parenthèses.

b) C'est le prix relatif de la source d'énergie par rapport au prix du gaz naturel.

TABLEAU 3**Élasticités-prix et revenu de la demande totale d'énergie**

	PRIX		REVENU	
	C.T.	L.T.	C.T.	L.T.
Résidentiel	-0,25	-0,73	0,13	0,35
Commercial	-0,33	-0,53	0,58	0,93
Industriel	-0,07	-0,10	0,01	0,97

C.T. : Court terme

L.T. : Long terme

TABLEAU 4**Prévision : coefficient d'inégalité de Theil et sa décomposition**

	Résidentiel Simulation		Commercial Simulation		Industriel Simulation	
	1	2	1	2	1	2
U	0,013	0,021	0,038	0,039	0,115	0,065
U^m	0,084	0,001	0,070	0,000	0,038	0,001
U^s	0,002	0,001	0,000	0,010	0,264	0,058
U^r	0,914	0,998	0,930	0,990	0,698	0,942

NOTES

1. Je remercie Éric Boudreault, Valérie Caverivière et Pierre-Renaud Tremblay pour leur assistance de recherche.
2. Le charbon n'apparaît que dans le secteur industriel.
3. Les degrés-jours n'apparaissent pas comme variable explicative dans le secteur industriel.
4. Dans le secteur résidentiel, la demande d'énergie totale et le revenu réel disponible sont exprimés par ménage, de sorte que l'évolution de la formation des ménages est prise en compte.
5. À cause de la structure à deux niveaux où le revenu n'apparaît dans les équations de parts, les élasticités des sources d'énergie par rapport au revenu sont les mêmes que l'élasticité-revenu apparaissant dans la demande totale d'énergie (3). Les calculs des élasticités-prix sont par contre plus complexes.
6. Pour des applications des modèles de parts de dépenses en énergie dans le contexte québécois, voir Bernard, Lessard et Thivierge (1986) pour le secteur commercial, et Bernard, Lemieux et Thivierge (1987) pour le secteur résidentiel.
7. Pour une analyse de l'ampleur empirique de ces biais dans le contexte québécois, voir Bernard et Cauchon (1987).
8. Il est également possible de calculer les élasticités-prix de chaque source d'énergie. Voir Bernard et Genest-Laplante (1995).

Bibliography / Bibliographie

ARSENAULT, E., J.-T. BERNARD, C.W. CARR, E. GENEST-LAPLANTE (1995), "A Total Energy Demand Model of Québec: Forecasting Properties", *Energy Economics* **17 (2)**, 163-171.

BERNARD, J.-T., P. CAUCHON (1987), "Thermal and Economic Measures of Energy Use: Differences and Implications", *The Energy Journal* **8 (2)**, 125-135.

BERNARD, J.-T., E. GENEST-LAPLANTE (1995), *Les élasticités-prix et revenu des demandes sectorielles d'électricité au Québec : revue et analyse*, GREEN, Département d'économie, Université Laval, 44 p.

BERNARD, J.-T., M. LEMIEUX, S. THIVIERGE (1987), "Residential Energy Demand: An Integrated Two-Level Approach", *Energy Economics* **9 (3)**, 139-144.

BERNARD, J.-T., F. LESSARD, S. THIVIERGE (1986), "Demande d'énergie du secteur commercial québécois", *L'Actualité économique* **67 (1)**, 5-22.

BOHI, D.R., M.B. ZIMMERMAN (1984), "An Update on Econometric Studies of Energy Demand Behavior", *Annual Review of Energy* (**9**), 105-154.

DONNELLY, W.A. (1987), *The Econometrics of Energy Demand: A Survey of Applications*, New York, Praeger Publishers, 309 p.

HAWDON, D., ed. (1992), *Energy Demand Evidence and Expectations*, London, Surrey University Press, 255 p.

THEIL, H. (1966), *Applied Economic Forecasting*, Amsterdam, North Holland Publ. Co., 474 p.

TURVEY, R., A.R. NOBAY (1965), "On Measuring Energy Consumption", *The Economic Journal*, **75 (3)**, 787-793.

ZIEMBA, W.T., S.L. SCHWARTZ, E. KOENIGSBERG, eds. (1980), *Energy Policy Modeling: United States and Canadian Experiences*, Volume 1: *Specialized Energy Policy Models*, Boston, M. Nijhoff.