

**Choix énergétiques et consommation des ménages en bois énergie :
Une approche économétrique sur données françaises**

Stéphane Couture

**INRA, UMR 356 Economie Forestière, F-54000 Nancy, France
Agroparistech, Engref, Laboratoire d'Economie Forestière, F-54000 Nancy, France**

Serge Garcia

**INRA, UMR 356 Economie Forestière, F-54000 Nancy, France
Agroparistech, Engref, Laboratoire d'Economie Forestière, F-54000 Nancy, France**

Arnaud Reynaud

TSE (LERNA_INRA), F-31000 Toulouse, France. areynaud@toulouse.inra.fr



2èmes journées de recherches en sciences sociales

INRA SFER CIRAD

11 & 12 décembre 2008 – LILLE, France

Choix énergétiques et consommation des ménages en bois énergie : Une approche économétrique sur données françaises*

Stéphane Couture[♦], Serge Garcia[•] et Arnaud Reynaud

Résumé :

Dans un contexte international marqué par l'envolée du prix du pétrole et la prise de conscience de la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique, il apparaît que le bois devient de ce fait de plus en plus compétitif et même souhaitable pour notre environnement. La France est le premier pays consommateur en bois énergie de l'UE, principalement par sa consommation domestique et essentiellement pour le chauffage, mais la part du bois dans la consommation énergétique primaire est encore très faible (4%). Pour ces raisons, il est important de comprendre comment est déterminée la demande en bois énergie des consommateurs domestiques. Nous proposons une analyse économétrique de la consommation de bois énergie en modélisant le choix du mode d'utilisation du bois en tant que chauffage fait par les ménages et l'association possible entre une énergie utilisée comme source principale de chauffage et une énergie d'appoint. Nos estimations montrent que ce choix est principalement déterminé par le revenu. Le bois est choisi comme source d'énergie principale par les ménages les plus pauvres. La consommation est sensible au prix dans le cas d'un usage principal (élasticité prix de -0,4), mais les élasticité-prix sont plus faibles dans le cas d'un usage d'appoint et varient selon le type d'énergie utilisée comme source principale (électricité, gaz, fioul).

Mots-clés : bois énergie, mode d'utilisation, demande domestique, Logit multinomial, biais de sélection

* Les auteurs tiennent à remercier Bénédicte Rey de l'Agence Régionale Pour l'Environnement Midi-Pyrénées sans qui l'accès à la base de données utilisée dans ce travail n'aurait pas été possible. Nous sommes également redevables à Éric Nazindigouba Kéré pour son excellent travail d'assistance de recherche. Cette étude a d'autre part bénéficié d'un financement du Département SAE2 de l'INRA.

[♦] INRA, UMR 356 Economie Forestière, F-54000 Nancy, France. couture@nancy-engref.inra.fr

[•] (Auteur correspondant). INRA, UMR 356 Economie Forestière, F-54000 Nancy, France

Agroparistech, Engref, Laboratoire d'Economie Forestière, F-54000 Nancy, France

Adresse : LEF, INRA-ENGREF, 14 rue Girardet, CS 14216, 54042 Nancy. Email : garcia@nancy-engref.inra.fr
TSE (LERNA_INRA), F-31000 Toulouse, France. areynaud@toulouse.inra.fr

I. Introduction

Face aux fortes fluctuations des prix des énergies fossiles, le bois pour son utilisation énergétique devient de plus en plus compétitif et attractif pour diverses raisons. Premièrement, à la différence des énergies fossiles, le bois est une ressource énergétique renouvelable dont la disponibilité progresse notamment en Europe¹. Deuxièmement, l'utilisation du bois énergie est sans conséquence sur le changement climatique. Emetteur de dioxyde de carbone lors de sa combustion, le bois est aussi une source naturelle d'absorption de ces gaz par la croissance des forêts. Face aux montées des préoccupations environnementales, le bois s'avère un parfait substitut aux énergies fossiles sources de pollutions. Enfin, l'exploitation de la forêt pour le bois énergie crée des emplois plus nombreux que ceux générés par les autres formes d'énergie².

Toutefois, la part du bois énergie dans la consommation énergétique mondiale demeure faible. Actuellement, il ne représente que 15% de cette consommation (ADEME, 2004). Dans un souci de lutte contre le changement climatique et de diversification des sources d'énergies, la Commission européenne encourage les pays membres de l'Union européenne (UE) à recourir davantage aux sources d'énergies renouvelables en tenant compte du potentiel de production locale et de leur disponibilité durable. C'est dans ce cadre qu'elle a fixé comme objectif pour 2010 d'atteindre 12% de la consommation énergétique en Europe à partir de la biomasse, et notamment celle d'origine forestière³. Actuellement, au sein de l'UE, la part du bois dans la consommation totale énergétique ne représente que 3,2%. Principalement par sa consommation domestique, la France est le premier pays européen consommateur en bois énergie avec 4% de sa consommation primaire utilisée pour le chauffage. Le bois utilisé pour le chauffage des logements représente 20% de la consommation actuelle. Le volume de bois énergie représente 35 millions de mètres cubes par

¹ Selon UNECE/FAO (2005), les tendances à long terme des ressources forestières montrent que la superficie forestière, le matériel sur pied et l'accroissement ont constamment augmenté en Europe au cours des dernières décennies. Dans la plupart des pays européens, l'expansion en surface des forêts se poursuit en occupant notamment les espaces abandonnés par l'agriculture. De plus, le rythme auquel croissent les forêts d'Europe est supérieur à celui des abattages annuels et ce décalage s'est accentué depuis 1960. En moyenne, pour l'ensemble de l'Europe, le rapport abattages/accroissement se situe aux alentours de 45%.

² Selon le rapport Bianco (1998), à une tonne équivalent pétrole, le bois énergie permet de créer trois fois plus d'emplois que les énergies fossiles comme le gaz et le fioul importé.

³ En France, cette mesure a été renforcée en 2005 par la loi de programmation et d'orientation (dite Loi « Pope ») pour atteindre ces objectifs ambitieux. Cette loi fixe les orientations de la politique énergétique française axée sur la valorisation énergétique de la biomasse : produire 21% de la consommation de l'électricité à partir de ressources renouvelables à l'horizon 2010 ; augmenter de 50% la production de chaleur d'origine renouvelable d'ici 2010.

an dont 20 millions d'origine forestière et 15 millions issus de sous-produits de l'industrie du bois et des exploitations agricoles (SOLAGRO, 2006). La consommation actuelle en bois énergie en Europe reste faible comparée aux objectifs ciblés par la Commission européenne. De plus, durant la période 1970-2005, sont apparues de fortes variations de la consommation de bois énergie, essentiellement liées aux évolutions du comportement des ménages en usage domestique. Ces variations semblent autant dues au comportement des consommateurs face aux problèmes environnementaux, qu'aux fluctuations du prix des énergies fossiles et aux incertitudes liées au climat. Les dernières statistiques indiquent, à climat constant, une consommation en baisse de 8% par rapport à la moyenne trentenaire.

Ainsi, pour atteindre les objectifs fixés, la forêt doit produire plus de bois énergie qu'elle ne le fait actuellement et sa consommation doit croître. Dans ce sens, diverses mesures incitatives (subvention à l'équipement, crédit d'impôt, TVA réduite) ont déjà été prises. Toutefois, il est important, au préalable à la mise en place d'instruments économiques incitatifs, de connaître les facteurs explicatifs de l'usage du bois en tant que matière énergétique, en particulier pour le chauffage domestique (qui représente environ 80% de la consommation de bois énergie en France). De telles études n'existent pas à l'heure actuelle. C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent article qui a pour objectif d'analyser, d'un point de vue empirique, la consommation de bois énergie des ménages ainsi que les déterminants du choix du mode d'utilisation de cette énergie pour le chauffage.

La consommation des ménages pour le bois énergie a été principalement étudiée pour les pays en voie de développement (Hosier et Dowd, 1987 ; Leach, 1992 ; Smith et al., 1994 ; Masera et al., 2000 ; Ouedraogo, 2006 ; Gupta et Köhlin, 2006). Rares sont les études portant sur la demande de bois énergie dans les pays développés⁴ (Hardie et Hassan, 1986 ; Mackenzie et Weaver, 1986 ; Vaage, 2000) et aucune étude en France, à notre connaissance, ne s'est concentrée précisément sur cette problématique. La plupart des études relatives aux pays tant en voie de développement que développés se concentrent sur le problème de substituabilité entre énergies, quatre sources d'énergie étant possibles (bois, gaz, électricité et fioul). Ces travaux reposent sur une hypothèse de substituabilité des énergies fondée sur l'importance des facteurs économiques (principalement le revenu) dans l'explication du choix du type d'énergie et de la quantité consommée par le ménage. En effet, cette hypothèse se fonde sur le fait que la technologie énergétique utilisée par un ménage est fonction de son

⁴ À la différence des autres travaux réalisés sur les pays développés, Steininger et Voraberger (2003) proposent un modèle d'équilibre général calculable permettant la comparaison systématique des diverses options disponibles pour accroître l'approvisionnement en énergie de biomasse (bois énergie, boues d'épuration, biogaz

statut socio-économique. Les auteurs étudient alors la relation entre demande d'énergie, prix et revenu. La plupart de ces études concluent que plus le revenu du ménage augmente, plus les énergies dites « anciennes ou traditionnelles » (bois et fioul) sont remplacées par les technologies dites « modernes » (gaz et électricité). Utilisant des approches économétriques reposant soit sur des modèles à choix discrets soit sur des modèles continus, les études les plus récentes appliquées aux pays en voie de développement (Masera et al., 2000 ; Heltberg , 2005 ; Ouedraogo, 2006 ; Gupta et Köhlin, 2006 ; Farsi et Filippini, 2007) généralisent ce résultat en mettant en exergue, en plus de la relation entre la demande, le prix et le revenu, l'importance du rôle joué par les caractéristiques socio-démographiques et quelquefois culturelles dans les choix et la détermination des consommations de la principale source d'énergie et des énergies secondaires. Ainsi, la consommation d'énergie est déterminée par les caractéristiques des ménages et des combustibles (qui sont déterminées hors du ménage).

Etudiant la demande d'énergie (électricité, fioul, gaz, bois) des ménages norvégiens pour le chauffage, Vaage (2000) utilise le modèle discret-continu proposé par Dubin et McFadden (1984) pour mettre en évidence la dépendance de la demande d'énergie à l'égard de la possession d'équipements (consommateurs d'énergie) par le ménage. En effet, la consommation d'énergie est supposée dépendre des choix relatifs aux appareils consommateurs d'énergie tels que les appareils de chauffage, cuisine, lavage. Ainsi, ces deux décisions étant liées, le choix de l'équipement est modélisé conjointement avec la demande d'énergie afin d'éviter des biais de sélection. Il montre que le revenu affecte significativement la probabilité de choix mais pas la consommation d'énergie. De plus, il obtient une élasticité-prix relativement élevée (-1,29 et -1,24 selon le modèle). Il explique ce résultat par le fait que la majorité des ménages sont dotés de systèmes de chauffage mixtes.

Mackenzie et Weaver (1986) se concentrent précisément sur la consommation de bois énergie aux Etats-Unis. Ils utilisent le modèle en deux étapes proposé par McFadden (1973) pour modéliser la demande de bois énergie. À l'aide d'un modèle Logit, ils estiment la probabilité que le ménage utilise du bois énergie puis corrige les biais de sélection dans l'estimation de la demande de bois. Ils obtiennent une relation négative entre le prix et la consommation de bois (avec une élasticité-prix faible de -0,08) ainsi qu'entre le revenu et la consommation de bois. Certes, les auteurs intègrent la décision de choisir le bois comme énergie dans l'étude de la consommation de bois mais ils ne distinguent pas les différentes options liées à l'usage d'une telle énergie. Le bois énergie peut être vu comme une source de

d'enfouissement et agrocarburants) pour la production de chauffage, d'électricité et/ou de carburant.

chauffage principal ou secondaire (chauffage d'appoint ou foyer d'énergie à des fins uniquement d'agrément : certains ménages brûlent du bois dans leur cheminée dans un simple objectif de plaisir et de confort). À notre connaissance, les associations entre une source d'énergie principale (électricité, gaz, fioul) et le bois comme énergie d'appoint n'ont pas été modélisées. Pourtant, ce mode d'utilisation détermine la consommation de bois et doit être explicitement pris en compte dans l'estimation des fonctions de demande. Ainsi, des facteurs observables ou non observables déterminent le choix d'usage du bois et conditionnent aussi les niveaux de consommation du bois énergie des ménages. La non prise en compte de ce choix peut aboutir à la présence d'un biais de sélection.

Dans cet article, nous réalisons une analyse économétrique de la consommation de bois énergie des ménages afin d'estimer leurs fonctions de demande, d'identifier leurs déterminants et de mesurer les élasticités-prix et élasticités-revenu. Nous proposons, d'une part, d'étudier le profil des individus selon leur attitude à l'égard du bois énergie et leur façon d'appréhender cette ressource en tant que matière énergétique et, d'autre part, de déterminer si les variables économiques (prix, revenu) constituent des facteurs explicatifs des décisions prises par les ménages en matière de choix énergétique (ici, bois vs. autres énergies). Nous distinguons alors trois types d'usages du bois énergie : les non-utilisateurs, les utilisateurs en tant que source principale d'énergie de chauffage et les utilisateurs comme énergie d'appoint. Etablir une distinction de ces catégories d'usages au préalable de toute analyse de la consommation permet de montrer que certaines caractéristiques qui conditionnent le type d'usage du bois peuvent aussi affecter les niveaux de consommation. Par exemple, il est intuitif de penser que le ménage utilisant le bois comme chauffage principal sera beaucoup plus sensible au prix de la ressource que le ménage qui ne recherche que le plaisir « d'un bon feu de cheminée ». Le ménage se trouve de ce fait en présence de deux décisions simultanées. La consommation de bois énergie étant liée au choix du mode d'utilisation du bois de chauffage, l'estimation de l'équation de demande en bois énergie seule peut introduire un biais de sélection. Pour corriger ce biais, nous estimons d'abord l'équation de choix multiple par un Logit multinomial, puis les équations de demande en utilisant les résultats issus de la première étape (espérance des erreurs des demandes conditionnelle aux erreurs du modèle de choix latent). Nous utilisons les méthodes économétriques proposées par Lee (1983), Dubin et McFadden (1984), notée DMF ci-après, et Dahl (2002) qui adaptent les travaux de Heckman (1976, 1979) basés sur un choix binaire, au choix multinomial.

L'article est organisé de la façon suivante. La section 2 présente le modèle théorique de la demande de bois énergie par les ménages. La section 3 aborde les aspects de

méthodologies économétriques, notamment les méthodes de correction de biais de sélection basées sur un modèle de choix polytomique. La section 4 présente la base de données construite à partir d'une enquête réalisée en 2006 par l'institut de sondage BVA à la demande de l'Observatoire régional de l'énergie de Midi-Pyrénées (OREMIP). Enfin, la section 5 est consacrée à la présentation et à l'interprétation des résultats d'estimation issus de l'analyse économétrique de ces données, avant de conclure dans la dernière section.

II. Le modèle théorique : demande de bois énergie par les ménages

La spécification de la demande de bois énergie par les ménages repose sur le modèle d'utilité. Soit R^* la fonction (stochastique) d'utilité indirecte du ménage que nous supposons non observée. L'utilité indirecte V dépend du prix de la ressource P , du revenu Y , et des caractéristiques socio-économiques du ménage, notées T , et est définie conditionnellement au choix du mode d'usage du bois. Nous pouvons ainsi écrire :

$$R_{ij}^* = V_{ij} [P_j, Y_i, T_i] + v_{ij},$$

où $j = 1, \dots, J$ est l'indice des usages, $i = 1, \dots, N$ l'indice des individus et v_{ij} le terme d'erreur. L'identité de Roy nous donne la fonction de demande marshallienne de bois de chauffage du ménage :

$$X_{ij}(P_j, Y_i, Z_i) = \frac{\partial V_{ij}(P_j, Y_i, Z_i) / \partial P_j}{\partial V_{ij}(P_j, Y_i, Z_i) / \partial Y_i}.$$

De façon simplifiée, nous écrivons la fonction de demande de bois conditionnelle au mode d'usage j par le ménage i :

$$q_{ij} = \gamma_j z_{ij} + \eta_{ij}$$

où q_{ij} est la quantité consommée de bois de chauffage de l'individu i pour l'usage j , z_{ij} est un vecteur des caractéristiques des individus (y compris le prix du bois), et γ_j le vecteur des paramètres associés et η_{ij} le terme d'erreur prenant en compte l'influence des variables non observées.

III. La méthodologie économétrique

Les données à notre disposition soulèvent une problématique particulière car il existe à côté des non utilisateurs de bois pour le chauffage (soit 54,8% des personnes interrogées dans notre échantillon) quatre façons différentes d'associer le bois à une autre énergie :

1. les ménages utilisent le bois comme source principale de chauffage (16,4% de l'échantillon total) ;
2. Les ménages utilisent l'électricité comme source principale de chauffage et le bois en source d'appoint (8,4%) ;
3. Les ménages utilisent le gaz comme source principale de chauffage et le bois en source d'appoint (8,9%) ;
4. Les ménages utilisent le fioul comme source principale de chauffage et le bois en source d'appoint (11,5%).

III.1- Description générale du modèle

Le modèle à estimer est un système composé de quatre équations de demande (la cinquième équation étant exclue puisqu'elle concerne les ménages qui ne consomment pas de bois du tout) et d'un critère de sélection qui détermine si le ménage se trouve dans l'un des cinq régimes. Le modèle d'équations simultanées à régimes (*switching simultaneous-equations model*) peut s'écrire comme suit :

$$q_{ij} = \gamma_j z_{ij} + \eta_{ij} \quad \text{si } R_i = j, \quad j = 1, \dots, 4, \quad (1)$$

$$R_{ij}^* = \beta_j x_i + v_{ij}, \quad (2)$$

$$R_i = j \text{ si } R_{ij}^* > \max_{j' \neq j} (R_{ij'}^*), \quad j = 1, \dots, 4, \quad j' = 0, \dots, 4. \quad (3)$$

L'équation (1) représente la fonction de demande pour le régime j définissant le mode d'utilisation du bois pour le chauffage, avec l'indice i représentant le ménage. Le critère de sélection est modélisé par l'équation (2), la variable latente R_{ij}^* représentant le niveau de l'utilité indirecte du ménage i associée au régime j , qui va déterminer le choix du régime. L'équation (3) détermine le mode d'affectation parmi les différents régimes possibles. R_i est une variable observée indiquant le choix fait par le ménage i en fonction de son niveau d'utilité non observé.

Pour simplifier les notations, l'indice i est maintenant exclu. On définit $\varepsilon_j = \max_{j \neq j'}(q_{j'}^* - q_j^*)$, ce qui équivaut à $\varepsilon_j < 0$. On suppose que les termes d'erreur V_j sont i.i.d. selon une loi de Gumbel (spécification Logit), la probabilité pour le ménage i de choisir le régime j s'écrit alors :

$$\Pr(\varepsilon_j < 0) = \frac{\exp(\beta_j x)}{\sum_{j=0}^4 \exp(\beta_j x)}, \quad j = 0, \dots, 4.$$

Le premier problème de ce modèle est qu'il repose sur une hypothèse forte appelée propriété IIA (*Independance of Irrelevant Alternative*). Cela signifie que le rapport entre deux probabilités d'appartenir à une certaine catégorie (par exemple, les probabilités d'appartenir aux catégories 1 et 2) est indépendant des autres catégories (par exemple, des catégories 3 et 4). La véracité de cette hypothèse peut être vérifiée par un test d'Hausman. Le second problème du Logit multinomial est qu'il n'est pas possible d'identifier simultanément les vecteurs de paramètres β_0 à β_4 . Il est alors d'usage d'imposer la nullité des paramètres relatifs à une catégorie donnée. La catégorie de référence que nous choisissons ici est celle des non consommateurs de bois, c'est-à-dire la catégorie 0. Par conséquent, le vecteur β_0 est normalisé à zéro. Le modèle se réécrit alors :

$$\Pr(\varepsilon_j < 0) = \frac{\exp(\beta_j x)}{1 + \sum_{j=1}^4 \exp(\beta_j x)}, \quad j = 1, \dots, 4.$$

Ce modèle est estimé par la méthode du maximum de vraisemblance.

Comme l'écrivent Bourguignon et al (2007), la généralisation du modèle de correction de biais de sélection est basée sur la moyenne conditionnelle de η_j . On peut poser $\Gamma = \{x\beta_0 + \dots + x\beta_4\}$ et écrire :

$$E(\eta_j | \varepsilon_j < 0, \Gamma) = \iint \frac{\eta_j f(\eta_j, \varepsilon_j | \Gamma)}{P(\varepsilon_j < 0 | \Gamma)} d\varepsilon_j d\eta_j = \lambda(\Gamma),$$

où $f(\eta_j, \varepsilon_j | \Gamma)$ est la fonction de densité conditionnelle jointe de η_j et ε_j . Compte tenu du fait que la relation entre les 5 composantes de Γ et les 5 probabilités correspondantes est inversible, il existe une fonction unique μ qui peut se substituer à λ tel que :

$$E(\eta_j | \varepsilon_j < 0, \Gamma) = \mu(P_0, \dots, P_4).$$

L'équation de demande tenant compte de cette correction s'écrit alors :

$$\begin{aligned} q_j &= \gamma_j z_j + E(\eta_j | \varepsilon_j < 0, \Gamma) + u_j \\ &= \gamma_j z_j + \mu(P_0, \dots, P_4) + u_j, \end{aligned}$$

où u_j est un terme d'erreur indépendant des régresseurs.

A partir de ce modèle général, il existe différentes approches de correction du biais de sélection dépendant d'hypothèses plus ou moins restrictives : deux approches traditionnelles paramétriques (Lee, 1983 ; Dubin et McFadden, 1984 ou DMF) et une approche semi-paramétrique (Dahl, 2002).

Comme le montrent Schmertmann (1994) et Bourguignon et al. (2007), la méthode DMF donne des résultats sensiblement meilleurs que ceux obtenus par la méthode de Lee (1983). Cependant, elle reste sensible à la restriction : $\sum_{j=0}^4 r_j = 0$. Cette contrainte est levée en utilisant la version proposée par Bourguignon et al. (2007). Ces auteurs montrent également que la correction proposée par DMF est plus robuste que la correction semi-paramétrique proposée par Dahl (2002), « même lorsque le terme de sélection est fortement non-linéaire ». Enfin, le biais de sélection dans l'équation d'intérêt est convenablement corrigé avec la méthode DMF même dans le cas où l'hypothèse IIA n'est pas vérifiée dans le modèle de choix. Par conséquent, pour notre analyse empirique, nous utilisons la méthode DMF (version Bourguignon et al.). L'approche DMF est décrite dans la sous-section qui suit, les autres approches étant reléguées en annexe.

III.2- L'approche de Dubin et McFadden (1984) - DMF

Pour construire le terme de correction des biais de sélection, DMF émettent l'hypothèse suivante à partir du terme d'erreur v_j de l'équation de sélection :

$$E(\eta_j | v_0, \dots, v_4) = \sigma \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sum_{j=0, \dots, 4} r_j (v_j - E(v_j)),$$

où σ^2 est la variance de η dans l'échantillon total et r_j est le coefficient de corrélation entre η et v_j . Avec le modèle Logit multinomial, on écrit alors :

$$E\left(v_j - E(v_j) \mid R_j^* > \max_{j' \neq j} (R_{j'}^*), \Gamma\right) = -\ln(P_j) = m(P_j),$$

$$E\left(v_{j'} - E(v_{j'}) \mid R_j^* > \max_{j' \neq j} (R_{j'}^*), \Gamma\right) = \frac{P_{j'} \ln P_{j'}}{1 - P_{j'}} = m(P_{j'}), \quad \forall j' \neq j.$$

Dans la version originale du modèle, Dubin et McFadden (1984) introduisent la restriction suivante : $\sum_{j=0}^4 r_j = 0$. L'équation d'intérêt à estimer peut donc s'écrire :

$$q_j = \gamma_j z_j + \sigma \frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[\sum_{j' \neq j} r_{j'} (m(P_{j'}) - m(P_j)) \right] + u_j.$$

En levant cette contrainte, l'équation avec correction des biais de sélection s'écrit alors :

$$q_j = \gamma_j z_j + \sigma \frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[r_j m(P_j) + \sum_{j' \neq j} (r_{j'} m(P_{j'})) \right] + u_j.$$

Une fois le Logit multinomial estimé et les termes de correction construits, on peut alors estimer les paramètres γ_j , σr_j et $\sigma r_{j'}$, puis recouvrer séparément σ^2 , r_j et $r_{j'}$.

IV. L'analyse descriptive des données

Les données et certaines statistiques importantes de notre étude proviennent de l'« enquête sur la consommation de bois énergie des ménages en région Midi-Pyrénées », réalisée par l'institut de sondage BVA et traitée par l'association SOLAGRO⁵ (2006). Pour une analyse descriptive plus détaillée de ces données, le lecteur intéressé pourrait s'y reporter.

Le questionnaire comporte quatre parties. La première partie a permis de recueillir des informations sur l'âge et la profession exercée par le chef de ménage. La deuxième était destinée uniquement aux utilisateurs de bois pour le chauffage et portait sur le mode d'utilisation du bois énergie (comme chauffage principal, en appoint ou pour le plaisir) et sur les principales caractéristiques de consommation. La troisième, posée uniquement aux non utilisateurs de bois, s'intéressait aux raisons qui motivaient ce choix et aux équipements de chauffage disponibles au sein du ménage. La dernière partie quant à elle s'adressait à tout l'échantillon et portait sur l'énergie principale de chauffage du foyer, les caractéristiques du

⁵ SOLAGRO est une association à but non lucratif qui réalise des études dans les domaines de l'énergie, de

foyer et du logement, et les changements récents d'énergie de chauffage. Au total 2254 entretiens ont été effectués dans la période du 9 au 18 février 2006, avec 1019 questionnaires longs (pour les utilisateurs de bois de chauffage) et 1235 questionnaires courts (pour les non utilisateurs de bois de chauffage). Il portait sur la saison de chauffe 2004-2005. L'échantillon est représentatif au niveau de la région Midi-Pyrénées, un poids statistique étant attribué à chaque questionnaire afin de redresser l'échantillon.

Le calcul des quantités manquantes de bois dans la base de données a été réalisé par SOLAGRO. Ce calcul a été fait à partir d'une recherche des variables discriminantes permettant de décrire la quantité utilisée (type d'utilisation, modalité d'approvisionnement, équipement spécifique, date de construction du logement, profession du chef de ménage, achat ou non achat du bois, etc.). Les valeurs ont ensuite été affectées aux non répondants à partir d'un tirage bayésien parmi les personnes ayant les mêmes caractéristiques.

Un peu plus de 50% des utilisateurs de bois déclarent ne pas le payer. Pour ces derniers, le bois provient principalement de leur propriété forestière et le reste de l'entretien de vergers, d'espaces verts, de haies, etc. Une solution serait de supprimer ces utilisateurs du reste de l'analyse. On se heurterait alors à un problème de biais de sélection. Nous avons choisi de conserver ces utilisateurs et d'estimer pour eux un prix du bois en utilisant une approche hédonique⁶ (voir annexe).

La quantité moyenne de bois utilisée s'établit à 7,34 stères. Cette consommation s'élève à près de 12 stères pour les foyers dont le chauffage principal est au bois. Elle dépasse même 13 stères pour les foyers utilisant une chaudière à bois. En cas d'utilisation d'appoint du bois, la consommation varie entre 4 et 5 stères selon le type d'énergie utilisée comme source principale.

Au niveau de la région Midi-Pyrénées, l'utilisation du bois comme énergie principale représente 1 639 684 stères soit 57,5% de la consommation totale de bois. Les 42,5% restants se répartissent respectivement comme suit 12,5%, 13,2% et 16,8%, selon que la source principale d'énergie est l'électricité, le gaz ou le fioul.

Le prix moyen du stère sur l'ensemble de l'échantillon s'élève à 41,91€ soit un budget annuel moyen de 307,62€ par ménage pour l'hiver 2004-2005. Il varie d'environ 38€ par stère

l'agriculture et de l'environnement.

⁶ Une autre solution pour imputer un prix eut été d'utiliser une approche de type « coût de transport », chaque ménage déclarant sa distance d'approvisionnement. Une difficulté liée à la mise en application de cette méthode dans notre cas est que la variable de distance d'approvisionnement n'est en fait pas très discriminante pour les utilisateurs qui déclarent ne pas payer le bois.

dans le cas d'un usage principal du bois à plus de 45€ lorsque le bois est utilisé en appoint d'un chauffage électrique. Le tableau I présente les statistiques descriptives concernant les quantités de bois consommées ainsi que les différents prix d'achat. On récapitule en annexe l'ensemble des variables utilisées en donnant leur définition avec les statistiques descriptives associées.

Tableau I : Statistiques descriptives sur les variables prix et de quantités

Variable	Définition	Moyenne	Ecart-type
Q	Quantité de bois consommée par les ménages (1019 obs.)	7,34	6,46
q1	Quantité de bois consommée par les ménages qui l'utilisent comme chauffage principal (369 obs.)	11,80	7,38
q2	Quantité de bois consommée par les ménages qui l'utilisent en appoint de l'électricité (190 obs.)	4,86	3,80
q3	Quantité de bois consommée par les ménages qui l'utilisent en appoint du gaz (201 obs.)	4,42	4,13
q4	Quantité de bois consommée par les ménages qui l'utilisent en appoint du fioul (259 obs.)	5,09	4,30
Prix	Prix d'achat du bois en euros par stère (1019 obs.)	41,91	13,17
Prix1	Prix d'achat du bois en euros par stère par les ménages qui l'utilisent comme chauffage principal (369 obs.)	38,79	10,08
Prix2	Prix d'achat du bois en euros par stère par les ménages qui l'utilisent en appoint de l'électricité (190 obs.)	45,10	13,67
Prix3	Prix d'achat du bois en euros par stère par les ménages qui l'utilisent en appoint du gaz (201 obs.)	44,88	15,76
Prix4	Prix d'achat du bois en euros par les ménages qui l'utilisent en appoint du fioul (259 obs.)	41,70	13,45
Prixm	Prix moyen du bois-énergie au niveau départemental (euros par stère). Source : Observatoire économique du bois.	43,03	5,60

Note : statistiques descriptives non pondérées.

Les personnes interrogées devaient choisir un intervalle de revenu mensuel auquel ils appartenaient (moins de 750€ ; de 750 à 1000€ ; de 1000 à 1500€ ; de 1500 à 3000€ ; et plus de 3000€). Malgré ce souci de ne pas demander le revenu mensuel exact, les répondants étaient peu enclins à divulguer cette information et il y a un certain nombre de données manquantes (376 observations). Un traitement spécifique a été effectué pour la variable de revenu (voir détails en annexes).

Au sein des professions et catégories socioprofessionnelles (PCS) (du chef de ménage), les usages du bois énergie varient peu en première analyse. On peut noter toutefois que le bois est très utilisé par les agriculteurs notamment comme énergie principale (en

deuxième position mais bien plus loin arrive la catégorie des commerçants, artisans et chefs d'entreprise), et le moins utilisé par les employés et inactifs (hors retraités).

L'analyse descriptive qui suit est basée sur les données non redressées. On observe que le gaz est l'énergie la plus utilisée pour le chauffage principal (35,6%) ensuite viennent l'électricité (27,9%), le fioul (20%), et le bois (13,2%). Parmi les ménages échantillonnés, 45,2% utilisent le bois comme énergie de chauffage, dont 16,4% en chauffage principal. Souvent complété par l'électricité quand il est utilisé comme chauffage principal, le bois de chauffage apparaît fréquemment en chauffage d'appoint (ou de plaisir) comme complément au fioul (36,6%) et, dans une moindre mesure, au gaz (30,7%). Lorsque les ménages choisissent le bois comme source d'énergie du chauffage principal, le chauffage d'appoint fonctionne le plus souvent à l'électricité (48%), un quart de ces ménages n'utilise aucun chauffage d'appoint, tandis que le fioul et le gaz arrivent en dernière position (18% au total).

Environ 62% des ménages disposent d'un équipement spécifique destiné au chauffage au bois tels qu'une chaudière, un insert, une cheminée à foyer fermé etc. Parmi les utilisateurs de bois, 39% ne se servent que d'un foyer ouvert. Plus de 85% des utilisateurs de bois comme mode de chauffage principal se servent d'un appareil domestique à combustible bois de type chaudière. Plus d'un tiers de ceux utilisant le bois pour le plaisir et le confort sont également doté d'équipements domestiques de type poêle. Plus de quatre équipements sur cinq sont des premiers équipements, le renouvellement du parc étant encore lent.

V. L'analyse et l'interprétation des résultats des estimations

Dans cette section, nous analysons d'abord les résultats du modèle de choix (Logit multinomial), puis nous portons notre attention sur notre fonction d'intérêt (la demande de bois énergie). Pour l'estimation du modèle discret-continu, nous avons utilisé le programme STATA de Bourguignon et al. (2007). Les résultats d'estimation ont été obtenus avec le modèle DMF (jugé le meilleur par Schmertmann, 1994, et Bourguignon et al., 2007) dans lequel a été levée la contrainte sur les paramètres des termes de correction. Les résultats obtenus avec les modèles de Lee (1983) et Dahl (2002) sont disponibles sur demande auprès des auteurs.

V.1- L'estimation du modèle de choix Logit multinomial

Notre modèle de choix repose essentiellement sur les variables des caractéristiques des ménages et de leur logement. Comme l'interprétation des paramètres des variables du logit multinomial n'est pas directe en raison des contraintes d'identification (le vecteur β_0 est normalisé à zéro), nous nous limitons à une présentation des variables qui semblent avoir une influence sur le choix du mode d'utilisation du bois énergie. Le mode de référence choisi est la non consommation de bois. Les paramètres estimés donnent donc l'impact de la variable explicative sur la probabilité de choisir le mode en question relativement au mode de référence. Cependant, la valeur du coefficient ne peut être directement interprétée, c'est pourquoi nous avons calculé les effets marginaux (pour une valeur moyenne des variables explicatives). Nous pouvons aussi signaler que des variables indicatrices du département de résidence du ménage ont été ajoutés dans la régression pour capturer d'éventuels effets spécifiques prenant en compte des caractéristiques régionales non observées (comme la couverture de la forêt, la ruralité du département, etc.). Les différents résultats d'estimation sont présentés dans le tableau II.

Tableau II: Résultats d'estimation du modèle Logit multinomial.

Variable	R=1		R=2		R=3		R=4	
	Coef. Estimé	Effet marginal	Coef. estimé	Effet marginal	Coef. estimé	Effet marginal	Coef. Estimé	Effet marginal
Constante	10,2751 <i>3,00164</i>		-12,3034 <i>3,3929</i>		-15,0831 <i>3,4310</i>		-9,9461 <i>2,8636</i>	
Prixm	-0,1103 <i>0,0679</i>	-0,0017 <i>0,0011</i>	0,0580 <i>0,0726</i>	0,0021 <i>0,0025</i>	0,0844 <i>0,0742</i>	0,0023 <i>0,0020</i>	-0,0477 <i>0,0605</i>	-0,0023 <i>0,0026</i>
Revenu	-0,0084 <i>0,0006</i>	-0,0001*** <i>0,0000</i>	0,0016 <i>0,0007</i>	0,0000* <i>0,0000</i>	0,0018 <i>0,0007</i>	0,0000** <i>0,0000</i>	0,0009 <i>0,0006</i>	0,0000 <i>0,0000</i>
Agri	-1,3044 <i>0,5761</i>	-0,0127*** <i>0,0041</i>	1,3770 <i>0,6452</i>	0,0738 <i>0,0559</i>	1,6321 <i>0,7572</i>	0,0765 <i>0,0635</i>	1,0038 <i>0,5631</i>	0,0514 <i>0,0427</i>
Ouvrier	0,7869 <i>0,4309</i>	0,0159 <i>0,0123</i>	-0,2721 <i>0,4349</i>	-0,0101 <i>0,0117</i>	0,5919 <i>0,3994</i>	0,0190 <i>0,0161</i>	0,1871 <i>0,3836</i>	0,0074 <i>0,0183</i>
Entrepren	2,1928 <i>0,5116</i>	0,0983** <i>0,0502</i>	-0,5997 <i>0,5222</i>	-0,0190* <i>0,0104</i>	0,1076 <i>0,5177</i>	0,0004 <i>0,0130</i>	0,0453 <i>0,4257</i>	-0,0216 <i>0,0168</i>
Cadre	5,0775 <i>0,6314</i>	0,6094*** <i>0,1308</i>	0,0225 <i>0,5317</i>	-0,0223** <i>0,0095</i>	-0,2546 <i>0,5306</i>	-0,0194*** <i>0,0071</i>	-0,0320 <i>0,5251</i>	-0,0294** <i>0,0114</i>
Nbfoyer	0,7896 <i>0,1201</i>	0,0119*** <i>0,0036</i>	-0,0449 <i>0,1181</i>	-0,0022 <i>0,0041</i>	-0,0519 <i>0,1201</i>	-0,0018 <i>0,0031</i>	-0,0998 <i>0,1065</i>	0,0040 <i>0,0047</i>
Age	-0,0901 <i>0,0114</i>	-0,0014*** <i>0,0004</i>	0,0309 <i>0,0116</i>	0,0001 <i>0,0004</i>	0,0147 <i>0,0121</i>	0,0004 <i>0,0003</i>	0,0047 <i>0,0103</i>	0,0002 <i>0,0004</i>
Proprio	2,3948 <i>0,3873</i>	0,0250*** <i>0,0074</i>	0,1114 <i>0,4284</i>	0,0244 <i>0,0143</i>	-0,3547 <i>0,4206</i>	-0,0118 <i>0,0133</i>	0,5959 <i>0,3882</i>	0,0226 <i>0,0139</i>
Declin	-0,4772 <i>0,2882</i>	-0,0059 <i>0,0037</i>	-0,3392 <i>0,2588</i>	-0,0100 <i>0,0079</i>	-0,2511 <i>0,2660</i>	-0,0053 <i>0,0062</i>	-0,4250 <i>0,2455</i>	-0,0160* <i>0,0093</i>
D1948	0,1227 <i>0,2706</i>	0,018 <i>0,0042</i>	-0,3823 <i>0,29533</i>	-0,0132 <i>0,0090</i>	0,2792 <i>0,2777</i>	0,0078 <i>0,0083</i>	0,2433 <i>0,2352</i>	0,0116 <i>0,0116</i>
Dgaz	-1,5489 <i>0,3324</i>	-0,0185*** <i>0,0059</i>	-1,3376 <i>0,2808</i>	-0,0388*** <i>0,0107</i>	1,9552 <i>0,2417</i>	0,0876*** <i>0,0230</i>	-1,7974 <i>0,3068</i>	-0,0649*** <i>0,0149</i>
Appart	-4,8365 <i>0,8396</i>	-0,0341*** <i>0,0091</i>	-0,8279 <i>0,6058</i>	-0,0201 <i>0,0138</i>	-2,5267 <i>0,7740</i>	-0,0365*** <i>0,0096</i>	-1,2664 <i>0,6713</i>	-0,0374** <i>0,0152</i>
T5	1,5429 <i>0,2722</i>	0,0307*** <i>0,0100</i>	0,2519 <i>0,2733</i>	-0,0090 <i>0,0089</i>	-0,5309 <i>0,2769</i>	-0,0136* <i>0,0069</i>	-0,1340 <i>0,2498</i>	-0,0622 <i>0,0104</i>
Equip1	6,9352 <i>0,5813</i>	0,2371*** <i>0,0460</i>	5,7401 <i>0,5401</i>	0,2503*** <i>0,0443</i>	5,4821 <i>0,5462</i>	0,1530*** <i>0,0353</i>	5,1546 <i>0,4662</i>	0,2096*** <i>0,0389</i>
Equip2	4,5178 <i>0,5836</i>	0,0759*** <i>0,0246</i>	5,0798 <i>0,5351</i>	0,2863*** <i>0,0543</i>	4,7671 <i>0,5355</i>	0,1637*** <i>0,0419</i>	4,7307 <i>0,4633</i>	0,2750*** <i>0,0511</i>
Dlogrec	0,5387 <i>0,2759</i>	0,0078 <i>0,0052</i>	0,9625 <i>0,2512</i>	0,0390*** <i>0,0144</i>	0,7434 <i>0,2568</i>	0,0205* <i>0,0098</i>	-0,0773 <i>0,2476</i>	-0,0670 <i>0,0101</i>
Alti	0,4944 <i>0,2875</i>	0,0068 <i>0,0088</i>	0,0041 <i>0,2844</i>	0,0041 <i>0,0098</i>	0,1844 <i>0,3033</i>	0,0036 <i>0,0078</i>	0,6970 <i>0,2519</i>	0,0301** <i>0,0121</i>
# observations			2254					
Log-vraisemblance			-1451,75					
Test LR χ^2_{80} (P-value)			2950,44 (0,0000)					
Pseudo-R ²			0,504					

La classe de référence est celle des non utilisateurs de bois

R=1 pour bois comme énergie principale

R=2 pour électricité comme énergie principale et bois en appoint

R=3 pour gaz comme énergie principale et bois en appoint

R=4 pour fioul comme énergie principale et bois en appoint

L'ajustement du modèle aux données est satisfaisant avec un pseudo- R^2 de 0,5 et un test du khi-2 qui rejette largement l'hypothèse de nullité de tous les paramètres (p-value de 0,000). Le modèle prédit correctement la classe d'affectation des ménages dans plus de 75% des cas. Le modèle reclasse correctement plus de 86% des non utilisateurs de bois et 85% des utilisateurs en tant qu'usage principal. La performance du modèle est moins bonne pour un usage d'appoint du bois puisque le taux de prédictions correctes va de 39% pour un usage combiné au gaz à 62% avec du fioul. Toutefois, dans 71% des cas le modèle prédit de manière correcte un usage d'appoint du bois.

Le revenu des ménages apparaît comme une des variables les plus déterminantes dans le choix du mode d'utilisation du bois énergie comme énergie principale. Le coefficient estimé du revenu pour cet usage est significativement différent de zéro à un niveau de 1%. En effet, la valeur de l'effet marginal pour l'individu moyen est calculée à -0,0001. Ces résultats s'interprètent de la façon suivante. Un faible revenu accroît la probabilité de choisir le bois pour son chauffage principal plutôt que de ne pas utiliser de bois du tout. Plus précisément, un revenu moyen inférieur de 100€ a pour effet d'accroître cette probabilité de 1 point. Comme la probabilité de choisir le bois pour son chauffage principal est estimée à 4,4% (pour l'individu moyen), cela signifie que cette probabilité passerait à 5,4%. Par contre, pour les usages du bois comme énergie d'appoint, le revenu a un effet significatif mais proche de zéro, lorsque le bois est en complément de l'électricité et du gaz mais le signe est différent comparé à une utilisation du bois comme énergie principale. Par conséquent, plus le revenu des ménages augmente, plus ils seront enclins à utiliser le bois en chauffage d'appoint, plutôt que pas du tout. Cette fois-ci, une augmentation du revenu de 100€ a pour effet de ne pas modifier la probabilité de choisir le bois pour son chauffage principal. Ces premiers résultats sont cohérents avec la littérature existante, voir par exemple Hosier et Dowd (1987) ou bien Leach (1992). Le bois utilisé comme source principale d'énergie apparaît comme un *bien inférieur* alors que dans son utilisation d'appoint, il revêt les caractéristiques d'un *bien normal*. Ces résultats seront confirmés par l'analyse des demandes en bois.

Le prix du bois ne semble pas avoir d'effet sur la probabilité de choisir le bois comme énergie principale ou d'appoint. Par contre, d'autres facteurs expliquent de manière significative et simultanée les probabilités d'appartenir à une catégorie donnée d'usage du bois. Si le ménage est propriétaire de sa résidence principale, alors ce facteur a un impact positif sur la probabilité d'utiliser du bois pour le chauffage principal (0,025). De plus, si le

ménage habite un appartement plutôt qu'une maison individuelle, la probabilité d'utiliser du bois par rapport à ne rien consommer diminue. L'effet marginal est le plus fort (en valeur absolue) pour une utilisation pour le chauffage d'appoint. Par ailleurs, si le logement est relié à un réseau de gaz de ville, alors, de façon non surprenante, la probabilité d'utiliser du bois en appoint du gaz augmente très significativement (avec un effet marginal de 0,0876) alors qu'elle baisse pour toutes les autres catégories d'usage.

Si le chef de ménage appartient à la PCS « cadre » ou « commerçant, artisan, chef d'entreprise », alors la probabilité d'usage du bois comme énergie principale augmente. De manière opposée, les proportions d'agriculteurs utilisant le bois en énergie principale sont plus faibles. Si l'on habite un logement de plus de cinq pièces, alors la probabilité d'utiliser du bois comme énergie principale est plus forte (0,031). Pour un logement disposant d'équipement lié au bois, la probabilité de consommer du bois pour son chauffage principal ou d'appoint augmente, mais cette probabilité est plus forte encore pour une combinaison de chauffage électricité/bois. Le nombre de personnes composant le foyer n'a un effet positif que sur la probabilité d'usage du bois comme énergie principale pour le chauffage.

V.2- L'estimation des équations de demande

La première étape de notre modèle discret-continu permet d'obtenir les probabilités de choix et de calculer les termes de correction de biais de sélection. Ces termes de correction sont ensuite intégrés dans chaque équation de demande, pour le bois utilisé comme énergie du chauffage principal, et le bois en association avec une autre source d'énergie (électricité, gaz, fioul) utilisée pour le chauffage principal. Ces consommations pour les quatre usages différents du bois sont notées respectivement q_1 , q_2 , q_3 et q_4 . Comme dans toutes les méthodes en 2 étapes, les écarts-types de la deuxième étape (avec une méthode d'estimation des moindres carrés) sont biaisés. Il existe deux façons de remédier à ce problème : soit de corriger les écarts-types comme le suggère Heckman (1979) ou Lee et al. (1983), soit de recalculer ces écarts-types avec une méthode de *bootstrap*. C'est cette dernière méthode qui est mise en œuvre dans le programme d'estimation de Bourguignon et al. (2007). Les résultats d'estimation figurent dans le tableau III.

Tableau III: Résultats d'estimation des équations de demande

Variable	$\ln(q_1)$	$\ln(q_2)$	$\ln(q_3)$	$\ln(q_4)$
Ln(Prix)	-0,4153*** <i>0,1474</i>	-0,1393 <i>0,1538</i>	-0,0487 <i>0,1414</i>	0,0164 <i>0,1915</i>
Ln(Revenu)	0,0242 <i>0,2086</i>	-0,0967 <i>0,5160</i>	0,3348 <i>0,4876</i>	-0,9849* <i>0,4871</i>
Plaisir		-0,5620*** <i>0,1275</i>	-0,2553* <i>0,1249</i>	-0,5005*** <i>0,1209</i>
Entrepren	0,2648* <i>0,1425</i>			
Dlogrec	-0,2321* <i>0,1020</i>	-0,5323*** <i>0,2028</i>		
Dchang		0,3829* <i>0,1701</i>		
Nbfoy		0,1249* <i>0,0608</i>	-0,1176 <i>0,0715</i>	
Equip2	0,3320** <i>0,1415</i>			
Agri			0,7816** <i>0,3171</i>	
Age				-0,0118* <i>0,0059</i>
Declin		-0,2891 <i>0,1890</i>		
Alti		0,4231* <i>0,2008</i>		0,2723 <i>0,1766</i>
Dgaz			1,2669* <i>0,5614</i>	1,3376** <i>0,5513</i>
Equip1				0,2514 <i>0,1589</i>
Constante	3,6871** <i>1,5148</i>	1,1285 <i>4,4253</i>	-2,4251 <i>3,909</i>	8,0963* <i>4,3503</i>
$m(P_0)$	0,94092* <i>0,4504</i>	0,1806 <i>0,6508</i>	0,1792 <i>0,3539</i>	-0,2092 <i>0,4703</i>
$m(P_1)$	-0,0647 <i>0,1314</i>	0,0121 <i>0,5163</i>	-0,6550* <i>0,3645</i>	-0,0831 <i>0,4961</i>
$m(P_2)$	-1,0229* <i>0,4802</i>	-0,2889* <i>0,1595</i>	-0,1155 <i>0,4222</i>	-0,1729 <i>0,3866</i>
$m(P_3)$	0,0031 <i>0,4809</i>	0,2912 <i>0,5078</i>	-0,0301 <i>0,0877</i>	1,4592* <i>0,6571</i>
$m(P_4)$	0,3288 <i>0,5518</i>	0,9581 <i>0,6455</i>	-1,5352*** <i>0,3185</i>	-0,1886 <i>0,1041</i>
σ^2	1,0140** <i>0,4286</i>	0,8068 <i>0,9393</i>	6,8565*** <i>2,2703</i>	2,5724* <i>1,3973</i>

Notes : Les écarts-types (en italique) sont calculés par une méthode de *bootstrap*, avec 500 réplifications pour chaque équation de demande.

Certains coefficients associés à un terme de correction $m(P_j), j = 0, \dots, 4$ sont significativement différents de zéro (en particulier pour la demande en bois avec un usage principal du gaz). Il existait donc un biais de sélection. Ce résultat confirme l'hypothèse selon laquelle l'estimation des équations de demande séparées, sans prendre en compte la décision endogène du mode d'utilisation du bois, aurait conduit à des estimations biaisées.

Avant de commenter les résultats d'estimation, notons que les variables continues (quantité, prix et revenu) ont été préalablement transformées en log. De cette façon, il est possible d'interpréter directement les coefficients associés aux variables de prix et de revenu comme des élasticités.

Tout d'abord, on observe des niveaux d'élasticité prix de la demande en bois énergie très différents selon le mode d'utilisation du bois (usage principal ou usage d'appoint avec électricité, gaz ou fioul). L'élasticité varie de -0,42 dans le cas d'un usage principal à des valeurs non significativement différentes de zéro dans le cas d'un usage d'appoint. Ces différences signifient que l'estimation d'une seule fonction de demande regroupant les différents modes d'utilisation du bois aurait conduit à une erreur de spécification. Le modèle de demande estimé par MCO sur la totalité des ménages consommant du bois-énergie conduit par exemple à une élasticité prix significative de -0,15.

Le mode d'usage le plus sensible au prix est l'utilisation du bois comme source principale d'énergie (dans le cas d'un usage principal, la facture moyenne est plus du double que dans le cas d'un usage d'appoint). Son élasticité-prix est significativement différente de zéro et négative avec une valeur égale à -0,42. Ainsi une augmentation du prix du bois de 10% entraîne-t-elle une baisse de sa consommation d'environ 4,2%. Les élasticités prix des demandes en bois pour les trois modes d'usage (électricité et bois, gaz et bois, fioul et bois) ne sont pas significativement différentes de zéro. Ces niveaux d'élasticité sont proches du niveau moyen (-0,10) trouvé par Mackenzie and Weaver (1986) pour les Etats-Unis.

Les signes des coefficients associés à la variable revenu diffèrent des résultats du modèle de choix d'énergie. Le coefficient de la variable de revenu n'est significativement différent de zéro que dans le cas d'une utilisation du bois en appoint avec le fioul comme source principale d'énergie. L'impact du revenu sur la consommation en bois semble très faible.

D'autres facteurs expliquent les variations de quantités de bois consommées. En particulier, la consommation de bois est de façon évidente plus faible lorsque le bois est utilisé juste pour le plaisir et le confort (feu de cheminée par exemple). Enfin, la PCS d'appartenance influence la consommation de bois. Par exemple, les agriculteurs consomment davantage de bois lorsque leur chauffage principal fonctionne au gaz, montrant un peu plus les effets de substitution qui peuvent exister dans certaines catégories de la population.

VI. Simulations

Dans cette section, nous simulons une variation du prix du bois-énergie et nous analysons son impact sur les choix énergétiques des ménages ainsi que sur leur consommation en bois-énergie. Le scénario considéré est ici une baisse de 10% du prix du bois énergie, toutes choses étant égales par ailleurs (notamment le prix des autres énergies). Ce scénario de baisse de prix peut en fait s'interpréter comme un gain comparatif de 10% par rapport au coût unitaire des autres énergies. Les résultats sont reportés dans le tableau IV.

Tableau IV: *Impact d'une baisse de 10% du prix du bois sur les choix énergétiques et sur la consommation en bois énergie*

	Données observées			Prédictions (prix observé)			Prédictions ($\Delta p = -10\%$)		
	Nombre ménages (%)	q	Q (%)	Nombre ménages (%)	q	Q (%)	Nombre ménages (%)	q	Q (%)
Pas de bois	1235 (54,8%)	-	-	1193 (52,9%)	-	-	1206 (53,5%)	-	-
Bois principal	369 (16,4%)	11,8	4355 (58,2%)	416 (18,5%)	10,1	4200,0 (63,2%)	481 (21,3%)	10,5	5034,3 (70,3%)
Bois appoint et électricité	190 (8,4%)	4,9	923 (12,3%)	159 (7,0%)	3,4	546,1 (8,2%)	85 (3,8%)	2,9	248,2 (3,5%)
Bois appoint et gaz	201 (8,9%)	4,4	888 (11,9%)	214 (9,5%)	3,5	751,1 (11,3%)	168 (7,4%)	3,6	604,0 (8,4%)
Bois appoint et fuel	259 (11,5%)	5,0	1318 (17,6%)	272 (12,1%)	4,2	1148,2 (17,3%)	314 (14,0%)	4,0	1273,0 (17,8%)
Toutes catégories d'usage	2254	3,3	7485	2254	2,9	6645	2254	3,2	7159

Notes : q : Consommation individuelle moyenne en bois (en stères). Par exemple, la consommation moyenne observée d'un ménage utilisant le bois comme énergie principale s'élève à 11,8 stères,

Q : Consommation totale en bois (en stères) sur l'échantillon. Le pourcentage correspond à la part de consommation de la catégorie d'utilisation considérée calculée au niveau de Midi-Pyrénées. Par exemple, l'utilisation du bois comme énergie principale représente 58,2% du volume consommé en Midi-Pyrénées.

Tout d'abord, il convient de souligner que le logit multinomial conduit à une représentation correcte des différentes classes des utilisateurs et des non-utilisateurs de bois-énergie. Les distributions des ménages par classe sont en effet relativement proche pour les

données observées et celles simulées avec le prix du bois observé. Les modèles de demande en bois fonctionnent également correctement bien qu'ils conduisent en moyenne à une légère sous-estimation des niveaux de consommation pour toutes les classes.

Lorsque l'on regarde les consommations individuelles des ménages par type d'utilisation, on constate que la baisse de 10% du prix du bois n'a qu'un impact modéré. Par exemple pour l'usage du bois comme énergie principale, la consommation annuelle moyenne passe de 10,1 stères à 10,5 stères soit une augmentation de 4,0%. Pourtant, globalement sur la totalité de l'échantillon, la consommation augmente de 7,7% passant de 6645 à 7159 stères. Ce changement de consommation global est en fait beaucoup plus induit par des changements de catégories d'usage du bois-énergie plutôt que par un effet prix direct. Si l'on considère de nouveau les ménages pour lesquels l'usage du bois est l'énergie principale, leur effectif passe de 416 à 481 soit une augmentation de presque 16%. Sur ces 65 nouveaux ménages qui utilisent le bois lorsque son prix baisse de 10%, 13 d'entre eux n'en consommaient pas auparavant.

Ces résultats, qu'il conviendra d'approfondir ont des conséquences importantes en terme de formalisation de la demande en bois-énergie et en terme de politiques publiques. Toute d'abord, puisque les variations agrégées de consommations en bois résultent beaucoup plus de changement de type d'usage que d'effet-prix directs, cela valide notre approche consistant à modéliser de façon jointe ces 2 types de décision. Ensuite, en termes de recommandations de politiques publiques, ces résultats suggèrent que des subventions aux ménages qui adoptent le bois-énergie (primes pour équipements en foyers par exemple), subventions qui vont constituer en fait des incitations à des changements d'usage d'énergie, sont des outils efficaces pour développer le bois-énergie. Parallèlement à ces mesures qui touchent les équipements, les décideurs publics peuvent mettre en place des politiques affectant le prix de la ressource comme une subvention liée à l'achat de bois. Malgré les niveaux des élasticités-prix obtenus, nos résultats montrent qu'une telle mesure aura des effets significatifs sur l'usage du bois en tant qu'énergie tant principale que d'appoint.

VII. Conclusion

Avec l'envolée des prix du pétrole et son épuisement programmé à moyen terme, un système énergétique viable pourrait être celui qui réserve une plus grande place aux énergies

renouvelables. Cela signifie la mise en place progressive d'un système énergétique de moins en moins dépendant des énergies fossiles et associant de plus en plus les énergies solaires, éoliennes ou celles issues de la biomasse.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'un des éléments essentiels d'un tel système énergétique, à savoir le bois énergie et donc la forêt (principale source du bois énergie). En effet, la forêt joue un rôle important dans la préservation de notre écosystème par la séquestration du carbone. En outre, la combustion du bois dans des chaufferies modernes participe à limiter l'émission des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. L'objectif de ce travail était double : d'une part, pallier la quasi-absence d'études consacrées à la consommation domestique de bois énergie en France et dans les pays développés en général, et d'autre part, mettre en exergue les déterminants de la consommation et du mode d'utilisation du bois énergie.

Notre travail économétrique repose sur l'hypothèse de choix endogène du mode d'utilisation du bois (chauffage principal au bois ou chauffage au bois en appoint d'autres énergies –électricité, gaz, fioul) dont il faut tenir compte dans l'estimation de la demande des ménages pour éviter des problèmes de biais de sélection. Il ressort de notre analyse que le choix du bois comme énergie pour le chauffage principal est négativement lié au revenu, ce qui semble confirmer la théorie de l'échelle des énergies selon laquelle le bois est beaucoup plus utilisé par les catégories les plus pauvres de la société. On note en revanche que ce sont plutôt les ménages aux revenus les plus élevés qui sont enclins à utiliser du bois en chauffage d'appoint ou pour le plaisir. Cependant, comme le montrent nos estimations, le revenu ne suffit pas à lui seul à expliquer le mode d'utilisation du bois. Le prix du bois, par exemple, peut avoir un effet de dissuasion pour le choix du bois en chauffage principal. Il ressort aussi que certaines caractéristiques du ménage telles que l'âge du chef de ménage ou la PCS, mais aussi le type de leur logement influencent significativement leur choix.

Les déterminants de la consommation de bois quant à eux varient en fonction du mode d'utilisation du bois. En effet, la quantité de bois consommée pour le chauffage principal est influencée par le prix avec une élasticité-prix évaluée à -0,42, tandis que la consommation de bois pour un chauffage d'appoint ne varie pas significativement avec le prix. On l'explique par le fait que le prix des autres énergies augmente plus vite que le prix du bois, et qu'ainsi il semblerait y avoir des effets de substitution entre bois d'une part et gaz, fioul et électricité d'autre part.

Cette étude pourrait être approfondie en prenant en compte les prix, les quantités des

substituts du bois pour le chauffage et les caractéristiques de chaque type d'énergie. Cela permettrait de se pencher en détail sur le problème de la substitution entre les différentes énergies possibles pour le chauffage. Cependant, ce travail préliminaire permet de mieux cerner la consommation des énergies renouvelables telles que le bois, et donne des indications essentielles pour mettre en oeuvre des politiques publiques économiques et environnementales.

Références

- ADEME (2004) : *Programme bois énergie 2000-2006*, Rapport d'activités 2000-2004 – synthèse.
- Bourguignon, F., Fournier, M., Gurgand, M., (2007): « Selection Bias Corrections Based on the Multinomial Logit Model: Monte-Carlo Comparisons», *Journal of Economic Surveys*, 21(1): 174-205.
- Chambwera, M., Folmer, H., (2007): « Fuel switching in Harare: An almost ideal demand system approach », *Energy Policy*, 35: 2538-2548.
- Cuthbert, A.L., Dufournaud, C.M., (1998): « An econometric analysis of fuelwood consumption in Sub-Saharan Africa » *Environnement and Planning*, 30: 721-729.
- Dahl, G.B., (2002): « Mobility and the returns to education: testing a Roy Model with multiple markets », *Econometrica* 70: 2367-2420.
- Deaton, A., Muellbauer, J., (1992): « Economics and Consumer Behavior » *Cambridge University Press*.
- Dubin, J.A., McFadden, D.L., (1984): « An econometric analysis of residential electric appliance holding and consumption », *Econometrica*, 52(2): 345-362.
- FAO (1995): « Agriculture mondiale: Horizon 2010 », sous la direction d'Alexandros Nikos, <http://www.fao.org/DOCREP/003/V4200F/V4200F00.htm#TOC>.
- Farsi, M., Filippini, M., (2007): « Fuel choices in urban India households », *Environment and Development Economics*, 12: 757-774.
- Gupta, G., Köhlin, G., (2006): « Preferences for domestic fuel: Analysis with socio-economic factor and rankings in Kolkata, India », *Ecological Economics*, 57: 107-121.
- Hardie, I.W., Hassan, A.A., (1986): « An econometric analysis of residential demand for fuelwood in the United States, 1980-1981 », *Forest Science*, 32(4): 1001-1015.
- Heckman, J.J., (1976): « The common structure of statistical models of truncation, sample selection, limited dependent variables and a simple estimator for such models », *The annals of economic and social measurement*, 5: 475-492.
- Heckman, J.J., (1979): « Sample selection bias as a specification error », *Econometrica*, 47(1): 153-161.
- Heltberg, R., Arndt, T.C., Sekhar, N.U., (2000): « Fuelwood consumption and forest degradation: A household model for domestic energy substitution in rural India », *Land Economics*, 76(2): 213-232.

- Hosier, R.H., Dowd, J., (1987): « Household fuel choice in Zimbabwe: an empirical test of the energy ladder hypothesis », *Journal of Resources and Energy*, 9: 347-361.
- Leach, G., (1992): « The energy transition », *Energy Policy*, 20: 116-123.
- Lee, L. F., (1983): « Generalised econometric models with selectivity » *Econometrica*, 51(2): 507-512.
- Mackenzie, J., Weaver, T.F., (1986): « A household production analysis of fuelwood demand in Rhode Island », *Northeastern Journal of Agricultural and Resource Economics*, 15: 53-60.
- Masera, O.R., Saatkamp, B.D., Kammen, D.M., (2000): « From linear fuel switching to multiple cooking strategies: a critique and alternative to the energy ladder model », *Journal of World Development*, 28(12): 2083-2103.
- Ouedraogo, B., (2006): « Household energy preferences for cooking in urban Ouagadougou », *Energy Policy*, 34: 3787-3795.
- Sanga, D.M., (1990), « Estimation des modèles économétriques discret/continu: une approche par simulation », *Thèse de doctorat, Université de Laval*.
- Schmertmann, C.P., (1994): « Selectivity bias correction methods in polychotomous sample selection models », *Journal of Econometrics*, 60: 101-132.
- SOLAGRO (2006): « étude de la filière bois énergie du secteur domestique en Midi-Pyrénées ».
- Steininger, K.W., Voraberger, H., (2003): « Exploiting the medium-term biomass energy potentials in Austria: A comparison of costs and macroeconomic impact » *Environmental and Resource Economics* 24: 359-377.
- Smith, K.R., Apte, M.G., Yuping, M., Wongsekiarttirat, W., Kulkarni, A., (1994): « Air pollution and the energy ladder in Asian cities » *Energy* 19: 587-600.
- UNECE/FAO (2005): « Etude des perspectives du secteur forestier en Europe », Etude de Genève sur le bois et la forêt N°20, Nations Unies, Genève, Suisse.
- Vaage, K., (2000): « Heating technology and energy use: a discrete/continuous choice approach to Norwegian household energy demand » *Energy Economics*, 22: 649-666.

Annexes

A.1 Les méthodes de correction de biais de sélection dans les modèles de choix polytomiques

A.1.1- L'approche de Lee (1983)

La méthode de Lee (1983) est une extension de celle de Heckman (1979) au Logit multinomial. Elle est relativement simple d'usage et ne nécessite que l'estimation d'un seul paramètre de correction. Cependant, elle est obtenue au prix d'hypothèses restrictives (normalité, linéarité, etc.). La fonction de répartition de ε_j est notée $F_{\varepsilon_j}(\cdot|\Gamma)$. $J_{\varepsilon_j}(\cdot|\Gamma)$ est définie par la transformation suivante :

$$J_{\varepsilon_j}(\cdot|\Gamma) = \Phi^{-1}\left(F_{\varepsilon_j}(\cdot|\Gamma)\right),$$

où Φ est la fonction de répartition de la loi normale standard. L'équation corrigée du biais de sélection peut donc s'écrire :

$$q_j = \gamma_j z_j - \sigma_j \rho_j \frac{\phi\left(J_{\varepsilon_j}(\cdot|\Gamma)\right)}{F_{\varepsilon_j}(\cdot|\Gamma)} + u_j,$$

où σ_j^2 est la variance de η_j et ρ_j le coefficient de corrélation entre ε_j et η_j .

La procédure d'estimation se déroule en deux étapes : on estime d'abord les paramètres β_j du Logit multinomial pour construire le terme de correction (prédit) pour chaque équation de demande, et ensuite les paramètres γ_j et $\sigma_j \rho_j$ de l'équation de demande par une méthode des moindres carrés.

A.1.2- L'approche de Dahl (2002)

Dahl (2002) propose de restreindre l'ensemble des probabilités dans $\mu(P_0, \dots, P_4)$ et de choisir un sous-ensemble S de l'ensemble des catégories possibles (moins une), particulièrement intéressant puisqu'il contient toutes les informations pertinentes. Cette hypothèse peut s'écrire sous la forme suivante :

$$f(\eta_j, \varepsilon_j | \Gamma) = f(\eta_j, \varepsilon_j | P_{j, j \in S}).$$

Le terme de correction de Dahl (2002) peut donc s'écrire $\mu(P_{j, j \in S})$. Un cas particulier proposé par Dahl est de faire l'hypothèse que la probabilité de l'alternative j est la seule information dont on a besoin pour l'estimation de l'équation d'intérêt. Cela réduit considérablement le nombre de paramètres à estimer dans l'équation corrigée du biais de sélection. L'équation de demande corrigée s'écrit donc :

$$q_j = \gamma_j z_j + \mu(P_j) + u_j.$$

A.2 Les variables

A.2.1- La variable Revenu

À l'aide d'un modèle Logit ordonné, nous avons régressé le revenu sur plusieurs facteurs dont les professions et catégories socioprofessionnelles (PCS) qui expliquent en grande partie les variations de revenus. Cette estimation nous a permis de faire des prédictions de revenu pour les individus n'ayant pas répondu à cette question. On a pu ensuite calculer le revenu espéré pour tous les ménages.

Tableau V: Résultats du Logit ordonné

Variables		
Nbfoy	0,4715	***
	0,1124	
Age	-0,0321	***
	0,0118	
T5	1,2790	***
	0,2658	
Surflog	-0,0762	
	0,0794	
Proprio	1,5310	***
	0,3178	
Chaufbois	-1,6619	***
	0,3208	
Inactif	-1,0761	
	0,7479	
Cadre	4,0279	***
	0,7826	
Entrepren	2,9919	***
	0,9375	
Employé	2,5362	***
	0,7247	
Ouvrier	2,0605	***
	0,6643	
Intermed	4,0162	***
	0,8241	
Retraité	1,2875	*
	0,6466	
Appart	1,4389	*
	0,7107	
Maison	1,8152	***
	0,6999	
Constante	-3,9530	***
	1,1518	
# observations	1882	
Log-vraisemblance	-2342,53	
Test LR (P-value)	886,40 (0,0000)	
Pseudo-R ²	0,1591	

A.2.2- La variable Prix

Le prix payé a été régressé sur un ensemble de variables reflétant le coût d'acquisition et d'approvisionnement du bois. Ces variables sont l'altitude et le département de la commune, l'origine du bois (commune d'appartenance du ménage, commune située à plus de 10km,

etc.), les modalités d'approvisionnement (simple ramassage, coupe par le ménage ou par un tiers, etc.) et la provenance du bois (entretien des haies, récupération, rebus, etc.). La plupart de ces variables sont significatives et le R² est de 0,21. Le modèle hédonique a été alors appliqué pour prédire le prix du bois des utilisateurs qui déclarent ne pas le payer, ce prix calculé s'interprétant alors comme la valeur de marché du bois. Le prix moyen ainsi calculé s'établit à 37,8 euros par stère comparé à 41,9 euros le prix moyen acquitté par les utilisateurs qui déclarent payer le bois, le différentiel étant statistiquement différent de zéro. Ce résultat confirme l'intuition que le coût d'opportunité du bois pour les utilisateurs qui ne l'achètent pas est inférieur au prix de marché. Enfin, nous avons construit un prix départemental moyen (que nous notons Prix_m) pour l'achat de bois énergie à partir des observations individuelles. Cet indicateur reflète un prix de marché exogène qui sera utilisé dans le modèle de choix énergétique.

Tableau VI: Résultats du modèle hédonique du prix du bois

Variables	
Origine : D'une autre commune située à moins de 10 kilomètres	-3,4678
	2,2593
Origine : D'une commune située à plus de 10 kilomètres	-0,2831
	2,0068
Origine : De votre commune	2,5178
	2,4166
Approvisionnement : Autre	-0,6422
	21,6444
Approvisionnement : Vous allez le chercher	-13,4609
	15,1906
Approvisionnement : Vous le coupez vous-même	-18,1598
	15,2109
Approvisionnement : Vous le faites livrer	-7,0476
	14,9822
Approvisionnement : Vous le ramassez	-4,8726
	17,5559
Explo3 : C'est du bois de rebut (emballage, palettes, charpente...)	3,0018
	6,2790
Explo4 : C'est du bois de récupération (chute de scierie ou autres)	-6,8784
	4,4622
Explo5 : De l'entretien d'espaces verts	0,1158
	7,1672
Explo6 : De l'entretien de haies (y compris les bords de route)	4,9812
	5,4356
Explo7 : De l'entretien de vergers ou de vignes	-3,4743

	7,7376	
Explo8 : De la récolte d'un bois ou d'une forêt	-0,9865	
	1,5506	
Prove2 : Autre	1,7396	
	7,1346	
Prove3 : D'un agriculteur, d'un paysan	3,1979	
	4,7445	
Prove4 : D'une entreprise spécialisée, d'un marchand de bois ou d'une coopérative forestière	4,4009	
	4,5388	
Prove5 : D'une grande surface ou d'une station service	24,2557	*
	11,7040	
Prove6 : De la propriété d'un membre de votre famille ou de celle d'un voisin ou ami	6,6246	
	5,2329	
Prove7 : De votre propriété	2,7140	
	7,5742	
Prove8 : Directement d'un particulier ou d'un propriétaire forestier	2,5181	
	4,6303	
Altitude	-0,0166	***
	0,0060	
Part de la forêt dans la commune	-3,3337	
	5,1350	
Constante	60,5851	***
	15,8897	
# observations	494	
F(30,463)	4,05	
P-value	0,0000	
R2	0,2081	

A.2.3- Les statistiques descriptives des variables

Tableau A.1 : Définition des variables et statistiques descriptives

Variable	Définition	Moyenne	Ecart-type
Revenu	Revenu annuel espéré du ménage en euros	1806,5	464,32
Age	Age du chef de ménage	52,5	16,06
Nbfoy	Nombre de personnes composant le ménage	2,71	1,28
Alti	Altitude de la commune où réside le ménage (en mètres)	270,44	175,87
couvfor	Couverture forestière	0,14	0,15
surflog	Surface du logement	121,1	67,2
Plaisir	Variable binaire = 1 si le ménage consomme le bois juste pour le plaisir et le confort	0,12	0,33

Equip1	Variable binaire = 1 si le ménage dispose d'un équipement spécifique (chaudière à bois, insert, foyer fermé)	0,28	0,45
Equip2	Variable binaire = 1 si le ménage dispose d'une cheminée à foyer ouvert	0,25	0,43
Appro	Variable binaire = 1 si l'approvisionnement en bois est difficile	0,04	0,21
Declin	Variable binaire = 1 si le ménage pense que le bois est une énergie en déclin	0,20	0,40
Proprio	Variable binaire = 1 si le ménage est propriétaire de son logement principal	0,75	0,44
Appart	Variable binaire = 1 si le ménage habite dans un appartement	0,18	0,38
T5	Variable binaire = 1 si le logement possède plus de 5 pièces	0,39	0,49
D1948	Variable binaire = 1 si le logement a été construit avant 1948	0,26	0,44
Dgaz	Variable binaire = 1 si le logement est relié au réseau de gaz de ville	0,32	0,47
Davis	Le bois une énergie renouvelable	0,84	0,37
Dlogrec	Logement récent (construit après 1975)	0,34	0,47
Dchang	Changement d'énergie pour le chauffage principale lors des 15 dernières années	0,28	0,45
Appro-dif	Réapprovisionnement en bois difficile	0,04	0,21
Inactif	Autre inactif		
Retraité	Retraité	0,34	0,47
Agri	Variable binaire = 1 si la PCS du chef de ménage est agriculteur	0,04	0,20
Ouvrier	Variable binaire = 1 si la PCS du chef de ménage est ouvrier	0,18	0,38
employé	Employé	0,09	0,29
intermed	Professions intermédiaires	0,05	0,22
cadre	Cadre, profession intellectuelle supérieure	0,08	0,28
Entrepren	Variable binaire = 1 si la PCS du chef de ménage est commerçant, artisan ou chef d'entreprise	0,05	0,22

Note : statistiques descriptives non pondérées.