



HAL
open science

Les déterminants spatiaux de la demande et de l'efficacité énergétiques

Laure Lampin

► **To cite this version:**

Laure Lampin. Les déterminants spatiaux de la demande et de l'efficacité énergétiques. Economies et finances. Université Paris-Est, 2013. Français. NNT : 2013PEST1153 . tel-01084531

HAL Id: tel-01084531

<https://pastel.hal.science/tel-01084531>

Submitted on 19 Nov 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT

de

Ecole des Ponts ParisTech et Université Paris Est

Ecole Doctorale Ville, Transports et Territoires

réalisée au

Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement

Les Déterminants Spatiaux de la
Demande et de l'Efficacité Energétiques

par

Laure Lampin

pour obtenir le titre de

DOCTEUR EN ECONOMIE

Septembre 2013

Jury

Jean-Charles HOURCADE
Directeur de Thèse, CIRED

Lionel RAGOT
Président, UNIV. PARIS OUEST

Miren LAFOURCADE
Rapporteur, UNIV. PARIS SUD

Jean-Loup MADRE
Rapporteur, IFSTTAR

Dominique BUREAU
Examineur, CEDD

Alain AYONG LE KAMA
Examineur, UNIV. PARIS OUEST

Manuscrit provisoire

Résumé

Cette thèse propose une approche quantitative intégrée pour l'analyse du rôle de la dimension spatiale de l'économie sur la demande énergétique des secteurs résidentiel et transports, ainsi que sur les émissions de carbone associées. L'approche comprend cinq étapes méthodologiques distinctes et consécutives. Après une méta-analyse des travaux économiques soulignant l'impact significatif de la structure spatiale sur la demande énergétique pour les transports (Chapitre 1), on développe et estime un modèle économétrique en coupe transversale sur la France afin d'explorer la nature causale de cet impact et d'en révéler les déterminants pour les deux secteurs, transports (Chapitre 2) et résidentiel (Chapitre 3). Ensuite, le cadre d'analyse économétrique est étendu pour intégrer la dimension longitudinale de la relation entre espace et énergie *via* l'effet de long terme des prix de l'immobilier sur la demande nationale de transports (Chapitre 4). L'identification d'un tel effet permet de dépasser les enjeux d'acceptabilité d'un espace entièrement planifié ainsi que ceux d'arbitrage entre bien-être individuel et maîtrise des externalités négatives dues aux émissions de carbone. Enfin, l'ensemble des déterminants identifiés dans les étapes économétriques précédentes sont intégrés dans un cadre d'équilibre général calculable pour l'évaluation du potentiel de l'organisation spatiale en tant que levier additionnel de lutte contre le changement climatique (Chapitre 5). Les résultats concluent en faveur de la coordination de stratégies d'action diversifiées (axées sur les instruments de marché et/ou sur les interventions planifiées) pour l'atteinte d'objectifs énergie-climat à coûts maîtrisés.

Table des matières

RÉSUMÉ	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	x
INTRODUCTION	1
BIBLIOGRAPHIE	7
MÉTA-ANALYSE DE L'EFFET DE LA DENSITÉ DE POPULATION SUR LA DEMANDE DE TRANSPORT	11
I. INTRODUCTION	11
II. LA METHODE DE LA META-ANALYSE, INTERET ET LIMITES	12
a. <i>Objectif d'une méta-analyse</i>	12
b. <i>Développement historique</i>	12
c. <i>Méthodes et limites</i>	13
III. IMPACT DE LA DENSITE RESIDENTIELLE SUR LA MOBILITE : CARACTERISTIQUES DES ETUDES SELECTIONNEES ET STATISTIQUES DESCRIPTIVES DU META-ECHANTILLON RETENU	14
IV. HETEROGENEITE SYSTEMATIQUE DE L'ELASTICITE-DENSITE DE LA MOBILITE : RESULTATS DE LA META-ANALYSE	21
a. <i>Test d'homogénéité</i>	21
b. <i>Analyse de l'hétérogénéité systématique et significativité de l'impact de la densité sur la demande de transport</i>	23
c. <i>Hétérogénéité systématique dans la valeur de l'effect size</i>	26
V. CONCLUSION	31
BIBLIOGRAPHIE	33
LOCALISATION, ENERGIE ET TRANSPORT : LE CAS DES MÉNAGES FRANÇAIS	37
I. INTRODUCTION	37
II. SYNTHÈSE DE LA LITTÉRATURE SUR LE LIEN ENTRE ORGANISATION SPATIALE ET TRANSPORT	38
a. <i>Mobilité et espace : un système complexe à variables multiples</i>	38
1) Multiplicité des indicateurs d'organisation spatiale	38
2) Accessibilité et infrastructures de transport.....	40
3) Complexité de la mobilité	40
b. <i>Hypothèse de causalité : effet de sélection</i>	42
c. <i>Implications politiques</i>	43
1) Organisation du territoire, un levier pour la réduction des consommations d'énergie	43
2) Le cas français et l'incertitude sur les zones rurales.....	44
III. CADRE D'ANALYSE EMPIRIQUE.....	45
a. <i>Territoire, échelles et objet d'étude</i>	45
b. <i>Rôles respectifs de l'effet distance et de l'effet mode de transport</i>	45
c. <i>Données</i>	46
IV. ANALYSE ÉCONOMÉTRIQUE.....	51
a. <i>Distance parcourue et mode de transport - Modèles discrets</i>	51
1) Spécifications	51
2) Traitement de l'endogénéité	52
3) Résultats	54
b. <i>Demande énergétique – Modèle continu</i>	58
1) Effet agrégé de la densité sur la demande énergétique	58

2) Effet de la distance parcourue et du mode de transport sur la demande énergétique.....	60
c. <i>Exploitation des résultats économétriques : modélisation de la demande énergétique à l'aide d'un modèle à équation unique et d'un modèle à équations multiples</i>	62
d. <i>Interprétation et discussion : comparaison des résultats des deux modèles et application numérique dans le cas d'un ménage type</i>	64
V. CONCLUSION	80
BIBLIOGRAPHIE	83
ANNEXE	88
a. <i>Traitement de l'endogénéité de la densité dans le modèle de distance parcourue et dans le modèle de consommation énergétique</i>	88
b. <i>Traitement de l'endogénéité de la densité dans le modèle de mode de transport principal</i>	89
c. <i>Traitement de l'endogénéité de la variable de distance parcourue dans le modèle de mode de transport</i>	90
d. <i>Applications numériques et simulations</i>	92
LOCALISATION, ENERGIE ET LOGEMENT : LE CAS DES MÉNAGES FRANÇAIS.....	95
I. INTRODUCTION	95
II. FORME URBAINE ET DEMANDE ENERGETIQUE RESIDENTIELLE	96
a. <i>Synthèse de la littérature</i>	96
b. <i>Mécanismes d'impact de la forme urbaine sur la demande énergétique liée au logement</i>	98
III. ANALYSE ÉCONOMÉTRIQUE	100
a. <i>Données</i>	100
b. <i>Modèles discrets</i>	104
1) <i>Spécifications</i>	104
2) <i>Traitement de l'endogénéité</i>	105
3) <i>Résultats</i>	107
c. <i>Demande énergétique – Modèle continu</i>	111
1) <i>Effet agrégé de la densité sur la demande énergétique</i>	111
2) <i>Effet de la surface, du type et de la source d'énergie du logement sur la demande énergétique</i>	114
d. <i>Exploitation des résultats économétriques : modélisation de la demande énergétique à l'aide d'un modèle à équation unique et d'un modèle à équations multiples</i>	116
e. <i>Interprétation et discussion : comparaison des résultats des deux modèles et application numérique dans le cas d'un ménage type</i>	120
IV. CONCLUSION	135
BIBLIOGRAPHIE	138
ANNEXES.....	141
a. <i>Méthodologie de construction de la variable de demande énergétique résidentielle dans l'Enquête Nationale Logement 2006 de l'INSEE</i>	141
1) <i>Calcul de la demande énergétique finale</i>	141
2) <i>Demande d'énergie primaire et émissions de CO₂ associées</i>	145
b. <i>Traitement de l'endogénéité de la densité dans les modèles de classe de surface et de typologie de logement</i>	145
c. <i>Traitement de l'endogénéité de la variable de classe de surface dans le modèle de type de logement</i> 147	
d. <i>Résultats des estimations standard des modèles de classes de surface et de type de logement</i>	149
e. <i>Traitement de l'endogénéité de la densité dans le modèle agrégé de consommation énergétique</i>	150
f. <i>Traitement de l'endogénéité de la variable type de logement dans le modèle désagrégé de consommation énergétique</i>	152
g. <i>Applications numériques et simulations</i>	154
PRIX VERSUS ESPACE : QUEL RÔLE SUR LA DEMANDE D'ÉNERGIE DES MÉNAGES ?	157
I. INTRODUCTION	157
II. LES SECTEURS DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT EN FRANCE DE 1960 À 2009	158
a. <i>Les données utilisées</i>	158

b.	<i>Le secteur des transports en France de 1960 à 2009</i>	160
c.	<i>Le secteur de l'immobilier en France de 1960 à 2009</i>	163
III.	PRIX DES LOGEMENTS, CHOIX DE LOCALISATION ET DEPENDANCE A LA VOITURE : FONDEMENTS THEORIQUES ET MODELE CONCEPTUEL	164
a.	<i>Spécifications et méthodes</i>	165
b.	<i>Demande de carburant, fonction du revenu et du prix de l'énergie</i>	167
c.	<i>Demande de carburant, fonction du revenu, du prix de l'énergie et du prix des logements</i>	168
V.	MODELISATION DE POLITIQUES ENERGETIQUES : TAXE CARBONE VERSUS REGULATION DU PRIX DES LOGEMENTS	172
VI.	CONCLUSION	178
	BIBLIOGRAPHIE	180
	ENDOGENÉISATION DES LIENS ESPACE - ÉNERGIE ET EFFETS D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL DES POLITIQUES CLIMATIQUES	183
I.	INTRODUCTION	183
II.	DESCRIPTION DU CADRE D'ANALYSE MACRO-ECONOMIQUE ET DES HYPOTHESES DE MODELISATION	184
a.	<i>Outil de modélisation IMACLIM-S : rappel de ses principes de base</i>	184
b.	<i>Modélisation du secteur Logement</i>	188
III.	EFFETS D'ÉQUILIBRE GENERAL D'UNE REGULATION DU PRIX DES LOGEMENTS	191
IV.	MAITRISE DU PRIX DES LOGEMENTS ET TAXE CARBONE : ROLE CLE DE L'ESPACE DANS LA REDUCTION DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES ET DES EMISSIONS ASSOCIEES	196
a.	<i>Effets d'équilibre général d'une taxe carbone</i>	197
b.	<i>Maitrise du prix de l'immobilier et taxe carbone : deux leviers et deux outils complémentaires</i>	198
V.	CONCLUSION	202
	BIBLIOGRAPHIE	204
	ANNEXES	206
a.	<i>Densité résidentielle et demande énergétique globale</i>	206
1)	<i>Synthèse de la littérature empirique</i>	206
2)	<i>Evaluation empiriques intégrée du rôle des déterminants spatiaux dans la demande énergétique des ménages</i> 207	208
3)	<i>Demande énergétique par ménage</i>	208
b.	<i>Détail des hypothèses utilisées pour le calibrage d'IMACLIM-S</i>	215
	CONCLUSION	217

Liste des tableaux

META-ANALYSE DE L'EFFET DE LA DENSITE DE POPULATION SUR LA DEMANDE DE TRANSPORT

TABLEAU 1–Études empiriques estimant l'effet de la densité résidentielle sur la demande de transport et incluses dans la méta-analyse.....	17
TABLEAU 2 – Formules utilisées pour évaluer l'élasticité en fonction des spécifications	18
TABLEAU 3–Statistiques descriptives	20
TABLEAU 4–Elasticités moyennes par zone géographique	21
TABLEAU 5 – Moyennes simple et pondérée de l'effect size, écarts types correspondants et statistique de test d'homogénéité	23
TABLEAU 6–Résultat de la régression de la valeur absolue du t-ratio des estimations sur la racine carrée du nombre de degré de liberté	24
TABLEAU 7–Résultats de l'estimation du modèle logit binaire visant à prédire la significativité de la densité dans la formation de la demande de transport	25
TABLEAU 8 –Spécification des cinq modèles estimés	27
TABLEAU 9 – Estimations des modèles de l'élasticité-densité de la demande de transport.....	28

LOCALISATION, ENERGIE ET TRANSPORT : LE CAS DES MENAGES FRANÇAIS

TABLEAU 1 – Synthèse des principaux indicateurs de forme urbaine utilisés dans la littérature	39
TABLEAU 2 - Synthèse qualitative et quantitative des estimations de l'impact de l'environnement construit sur la mobilité	44
TABLEAU 3 – Nombre d'individus par ménage dans la base de données ENTD 2007-2008 utilisée	47
TABLEAU 4 – Nombre de trajets contraints par individu dans la base de données ENTD 2007-2008 utilisée	47
TABLEAU 5 – Coefficients d'efficacité énergétique et facteur d'émissions par mode de transport (Sources : ADEME (2008) et calculs de l'auteur).....	48
TABLEAU 6 – Discrétisation en quatre classes de la distance annuelle parcourue par ménage.....	49
TABLEAU 7 – Statistiques descriptive de l'échantillon de 12653 ménages de l'ENTD 2007-2008.....	50
TABLEAU 8 – Moyenne de la distance parcourue, de la demande d'énergie et des émissions par unité d'observation.....	51
TABLEAU 9 – Estimations du modèle logit multinomial de la distance parcourue sans et avec traitement de l'endogénéité	55
TABLEAU 10 – Estimations du modèle logit multinomial du mode de transport avec et sans traitement de l'endogénéité (Véhicule motorisé comme référence).....	56
TABLEAU 11 – Estimation de la demande énergétique comme fonction des caractéristiques socio-économique des ménages et de la densité de population de la commune de résidence	59
TABLEAU 12 – Estimation de la demande énergétique comme fonction des caractéristiques socio-économiques du ménage, de la distance parcourue et du mode de transport principal	61
TABLEAU 13 – Effet de la densité de population par mécanisme d'impact sur la demande énergétique	64
TABLEAU 14 – Principaux résultats de l'analyse de sensibilité aux caractéristiques des ménages de l'effet de la densité sur la demande énergétique	75
TABLEAU 15 – Régression de la densité sur ses instruments et sur les variables exogènes du modèle de la distance parcourue	88
TABLEAU 16 – Régression de la densité sur ses instruments et sur les variables exogènes du modèle de mode de transport.....	89
TABLEAU 17 – Estimation des classes de distance parcourue en fonction des caractéristiques socio-économiques des ménages pour la construction des instruments de la distance parcourue.....	90
TABLEAU 18 – Régression de la distance parcourue sur ses instruments et sur les variables exogènes du modèle de mode de transport	91

TABLEAU 19 – Valeurs au point moyen pour les variables inobservables et de termes d’erreur, utilisées pour les applications numériques	92
TABLEAU 20 – Valeurs minimum et maximum retenues pour les caractéristiques des ménages dans le cas des deux scénarios extrêmes de demande énergétiques	93

LOCALISATION, ENERGIE ET LOGEMENT : LE CAS DES MENAGES FRANÇAIS

TABLEAU 1 - Synthèse de la littérature proposant des estimations empiriques de l’impact de la densité sur la demande énergétique du secteur résidentiel	97
TABLEAU 2 – Statistiques descriptives de l’échantillon de 27 940 ménages de l’ENL 2006	102
TABLEAU 3 – Estimations de l’impact environnemental des logements français dans la littérature.....	104
TABLEAU 4 - Estimation du modèle logit multinomial de la classe de surface du logement avec traitement de l’endogénéité de la densité (méthode 2SRI)	108
TABLEAU 5 - Estimations du modèle logit multinomial du type de logement avec traitement de l’endogénéité de la densité et de la surface (méthode 2SRI)	108
TABLEAU 6 - Estimation du modèle logit multinomial de source d’énergie principale du logement (estimation standard)	109
TABLEAU 7 – Estimations des paramètres du modèle agrégé de demande énergétique des ménages	112
TABLEAU 8– Estimation de la demande énergétique comme fonction des caractéristiques socio-économiques du ménage, et de la surface, du type et de la source d’énergie principale du logement ainsi que de la densité de population.....	115
TABLEAU 9 – Effet de la densité de population sur la demande énergétique	119
TABLEAU 10 - Principaux résultats de l’analyse de sensibilité aux caractéristiques des ménages de l’effet de la densité sur la demande énergétique des logements	131
TABLEAU 11 – Détail des options tarifaires électriques moyennées sur la période février 2005 – novembre 2006 (MEDDTL, 2010).....	142
TABLEAU 12 – Options tarifaires optimales selon les recommandations d’EDF, fournisseur français d’électricité	142
TABLEAU 13– Taux d’équipement en appareils électroménagers des ménages français en 2006	143
TABLEAU 14 – Hypothèses de part d’utilisation heures pleines et heures creuses en fonction des usages électriques.....	143
TABLEAU 15 - Détail des options tarifaires de gaz moyennées sur la période février 2005 – novembre 2006 (MEDDTL, 2010).....	144
TABLEAU 16 – Facteurs de conversion des émissions de CO2 par source d’énergie pour la demande énergétique résidentielle finale (MEDDTL, 2006b)	145
TABLEAU 17 - Régression de la densité sur les variables explicatives du modèle de classe de surface	145
TABLEAU 18 – Régression de la densité sur les variables explicatives du modèle du type de logement et ses instruments	146
TABLEAU 19 – Estimation des classes de surface du logement en fonction des variables explicatives du modèle de type de logement	147
TABLEAU 20 - Régression de la surface sur les variables explicatives du modèle du type de logement et ses instruments	148
TABLEAU 21 – Estimation standard du modèle logit multinomial de classe de surface.....	149
TABLEAU 22 – Estimation standard du modèle logit multinomial de type de logement	150
TABLEAU 23 – Régression de la densité sur ses instruments et sur les variables exogènes du modèle agrégé de demande énergétique résidentielle (<i>first stage</i>)	151
TABLEAU 24 – Estimation du type de logement pour la construction de ses instruments	152
TABLEAU 25 – Régression de la variable type de logement sur ses instruments (<i>first stage</i>).....	153
TABLEAU 26 – Valeurs au point moyen pour les variables inobservables et de termes d’erreur, utilisées pour les applications numériques	154
TABLEAU 27 – Valeurs minimum et maximum retenues pour les caractéristiques des ménages dans le cas des deux scénarios extrêmes de demande énergétique	156

PRIX VERSUS ESPACE : QUEL ROLE SUR LA DEMANDE D'ENERGIE DES MENAGES ?

TABLEAU 1 – Statistiques descriptives des données	159
TABLEAU 2 - Evolution des parts de marché et des prix de carburant en France de 1960 à 2009	162
TABLEAU 3 – Estimations et test de co-intégration de la demande de carburant comme une fonction du revenu et du prix du carburant	168
TABLEAU 4 - Estimations et test de co-intégration de la demande de carburant comme une fonction du revenu, du prix du carburant et du prix des logements.....	169
TABLEAU 5 – Synthèse des estimations des élasticités court et long terme des <i>Modèle 1</i> et <i>Modèle 2</i>	170

ENDOGENEISATION DES LIENS ESPACE - ENERGIE ET EFFETS D'EQUILIBRE GENERAL DES POLITIQUES CLIMATIQUES

TABLEAU 1 – Evolution de la production et de la consommation des ménages en cas de régulation du prix des logements	192
TABLEAU 2 – Variations de variables clé en cas d'une taxe carbone de 200 €/tonne _{CO2}	197
TABLEAU 3 – Variations de variables clé en cas d'une taxe carbone de 200 €/tonne _{CO2} et d'une régulation du prix de l'immobilier de 10 %	201
TABLEAU 4–Estimations empiriques de l'effet de la densité résidentielle sur la demande énergétique multisectorielle	206
TABLEAU 5 – Données utilisées comme caractéristiques du ménage français moyen en 2008	207
TABLEAU 6 – Calibrage des élasticités utilisées pour les simulations sous IMACLIM-S	215

Liste des figures

META-ANALYSE DE L'EFFET DE LA DENSITE DE POPULATION SUR LA DEMANDE DE TRANSPORT

FIGURE 1 - Relation entre valeur absolue du t-ratio et taille de l'échantillon pour les estimations considérées..... 24

LOCALISATION, ENERGIE ET TRANSPORT : LE CAS DES MENAGES FRANÇAIS

FIGURE 1 – Vision intégrée des liens testés entre organisation spatiale et demande énergétique pour le transport des ménages.....	46
FIGURE 2 – Structure de l'ENTD 2007-2008 pour les observations valides	47
FIGURE 3 – Demande énergétique liée aux déplacements et densité de population (pour un ménage type correspondant au point moyen de l'échantillon)	65
FIGURE 4 – Taux de variation de la demande énergétique en fonction de la densité d et de α	66
FIGURE 5 – Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de α (Modèle à équation unique).....	67
FIGURE 6 – Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % (Modèle à équations multiples).....	67
FIGURE 7 – Demande énergétique normalisée et densité de population en fonction du mécanisme d'interaction considéré (calculées pour un ménage type correspondant au point moyen de l'échantillon)	69
FIGURE 8 – Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d'impact	70
FIGURE 9 – Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d'impact pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 %	70
FIGURE 10 - Variations de la demande énergétique liée aux déplacements avec la densité de population dans le cas du scénario <i>sobre</i>	72
FIGURE 11 - Variations de la demande énergétique liée aux déplacements avec la densité de population dans le cas du scénario <i>consommateur</i>	72
FIGURE 12 - Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % (Modèle à équations multiples, scénario <i>sobre</i>).....	73
FIGURE 13 - Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d'impact (Modèle à équations multiples, scénario <i>sobre</i>).....	73
FIGURE 14 - Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % (Modèle à équations multiples, scénario <i>consommateur</i>).....	74
FIGURE 15 - Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d'impact (Modèle à équations multiples, scénario <i>consommateur</i>)	74
FIGURE 16 - Variations de la demande énergétique liée aux déplacements avec la densité de population dans le cas des ménages ruraux	77
FIGURE 17 - Variations de la demande énergétique liée aux déplacements avec la densité de population dans le cas des ménages urbains	78
FIGURE 18 – Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % dans le cas des ménages ruraux (Modèle à équations multiples)	78
FIGURE 19 – Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % dans le cas des ménages urbains (Modèle à équations multiples).....	79
FIGURE 20 – Variation des probabilités d'occurrence des classes de distance avec la densité (modèle à équations multiples).....	92
FIGURE 21 – Variation des probabilités d'occurrence des modes de transport avec la densité (modèle à équations multiples).....	93

LOCALISATION, ENERGIE ET LOGEMENT : LE CAS DES MENAGES FRANÇAIS

FIGURE 1 – Vision intégrée des liens testés entre organisation spatiale et demande énergétique résidentielle....	100
FIGURE 2 – Demande énergétique normalisée du logement et densité de population (calculées pour un ménage type correspondant au point moyen de l'échantillon).....	121

FIGURE 3– Taux de variation de la demande énergétique en fonction de la densité d et de α	122
FIGURE 4– Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de α (Modèle à équation unique)	122
FIGURE 5– Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % (Modèle à équations multiples).....	123
FIGURE 6– Décomposition des variations de la demande énergétique avec la densité de population en fonction du mécanisme d’interaction considéré (calculées pour un ménage type correspondant au point moyen de l’échantillon)	124
FIGURE 7– Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d’impact.....	125
FIGURE 8 - Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d’impact pour α égal à 100 %	126
FIGURE 9 - Variations de la demande énergétique résidentielle avec la densité de population dans le cas du scénario <i>sobre</i>	127
FIGURE 10 - Variations de la demande énergétique résidentielle avec la densité de population dans le cas du scénario <i>consommateur</i>	127
FIGURE 11 – Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % (Modèle à équations multiples, scénario <i>sobre</i>).....	128
FIGURE 12 - Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d’impact (Modèle à équations multiples, scénario <i>sobre</i>).....	128
FIGURE 13 - Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % (Modèle à équations multiples, scénario <i>consommateur</i>)	129
FIGURE 14 - Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d’impact (Modèle à équations multiples, scénario <i>consommateur</i>)	129
FIGURE 15 - Variations de la demande énergétique du logement avec la densité de population dans le cas des ménages ruraux	133
FIGURE 16 - Variations de la demande énergétique du logement avec la densité de population dans le cas des ménages urbains	133
FIGURE 17 - Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % dans le cas des ménages ruraux (Modèle à équations multiples)	134
FIGURE 18 - Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % dans le cas des ménages urbains (Modèle à équations multiples).....	135
FIGURE 19 – Variation des probabilités d’occurrence des classes de surface avec la densité (modèle à équations multiples).....	154
FIGURE 20 - Variation des probabilités d’occurrence des types de logement avec la densité (modèle à équations multiples).....	155
FIGURE 21 - Variation des probabilités d’occurrence des sources principales d’énergie du logement avec la densité (modèle à équations multiples)	155

PRIX VERSUS ESPACE : QUEL ROLE SUR LA DEMANDE D’ENERGIE DES MENAGES ?

FIGURE 1 – Evolutions du revenu per capita et de la demande de carburant per capita en France de 1960 à 2009	160
FIGURE 2 – Evolution de l’indice du prix du carburant de 1960 à 2009 (indice 1 en 2000).....	162
FIGURE 3 – Evolutions des indices du prix de vente des logements et du prix du service logement de 1960 à 2009 (Indice 1 en 2000).....	163
FIGURE 4– Variation de la demande de carburant en fonction des niveaux de politiques énergétiques τ et λ	174
FIGURE 5 – Combinaison requise de politiques énergétiques pour maîtriser la demande de carburant de 10 %, 25 % et 50 %	175
FIGURE 6 – Equivalent taxe carbone d’un incrément marginal de 1 % de la régulation du prix des logements sous contrainte de réduction de 10%, 25% et 50% de la consommation de carburant	176
FIGURE 7 – Evolutions comparées des prix des logements en France et en Allemagne de 1999 à 2010	177

ENDOGENISATION DES LIENS ESPACE - ENERGIE ET EFFETS D'EQUILIBRE GENERAL DES POLITIQUES CLIMATIQUES

FIGURE 1 – Synthèse des élasticités utilisées pour l'exercice de modélisation.....	190
FIGURE 2 – Variation des productions sectorielles en quantité en fonction du niveau de régulation du prix des logements	193
FIGURE 3 – Evolution nette du revenu des ménages en fonction du niveau de régulation du prix des logements par rapport à la situation de référence	194
FIGURE 4 – Evolution en quantité des consommations des ménages en fonction du niveau de régulation du prix de l'immobilier par rapport à la situation de référence.....	195
FIGURE 5 – Evolution de la demande de carburant et des émissions de gaz à effet de serre des ménages en fonction du niveau de régulation du prix de l'immobilier et par rapport à la situation de référence	196
FIGURE 6 - Variation de la demande d'énergie des ménages face à une taxe carbone et à une régulation du prix des logements	199
FIGURE 7 - Comparaison de l'impact énergétique et climatique d'une taxe carbone sans et avec régulation du prix de l'immobilier	200
FIGURE 8 – Demande d'énergie sectorielle des ménages en fonction du niveau de taxe carbone en cas de régulation de prix des logements de 20 %	200
FIGURE 9 – Demande d'énergie totale du ménage, demande d'énergie pour le logement et demande d'énergie pour le transport en fonction de la densité de population	209
FIGURE 10 – Part respective des secteurs Transports et Logement dans la demande énergétique du ménage.....	210
FIGURE 11 – Taux de variation des demandes sectorielles en fonction de α et de la densité	211
FIGURE 12 – Taux de variation des demandes de logement et totale en fonction de α et de la densité.....	211
FIGURE 13 – Taux de variation des demandes de transport et totale en fonction de α et de la densité.....	212
FIGURE 14 – Taux de variation des demandes énergétiques logement, transport et totale pour $\alpha=0,1$	213
FIGURE 15 - Taux de variation des demandes énergétiques logement, transport et totale pour $\alpha=0,25$	213
FIGURE 16 - Taux de variation des demandes énergétiques logement, transport et totale pour $\alpha=0,50$	213
FIGURE 17 - Taux de variation des demandes énergétiques logement, transport et totale pour $\alpha=1$	213
FIGURE 18 –Taux de variation de la demande énergétique totale pour des densités résidentielles de référence de 0 à 3 000 habitants/km ² et des différences de densité de 10 %, 25 %, 50 % et 100 %	214

Introduction

Depuis la crise pétrolière de 1973 et l'émergence de la question de la sécurité énergétique, la communauté scientifique et politique internationale s'est intéressée à l'analyse des besoins en énergie. Ce thème suscita un regain d'intérêt avec l'avènement de la lutte contre le changement climatique au début des années 1990. La question de la maîtrise énergétique devint alors un enjeu économique et politique majeur puisque, outre de réduire l'intensité énergétique et la dépendance aux importations des économies nationales, les économies d'énergie permettent de réduire les émissions anthropiques de gaz à effet de serre à l'origine du changement climatique (Levine et al., 2007).

Si historiquement, croissance économique et demande énergétique sont fortement corrélées (Chontanawat et al., 2006), le débat autour du double enjeu de sécurité énergétique et de changement climatique a fait naître la question de leur découplage. La variable clé de cet enjeu devient alors l'efficacité énergétique et les leviers permettant de l'atteindre. Ces leviers se déclinent tant du côté de l'offre que du côté de la demande d'énergie. Du point de vue de l'offre, les énergies alternatives aux énergies fossiles, parmi lesquelles on peut citer en exemple le solaire, l'éolien ou encore les bio-carburants, sont autant d'options technologiques visant à satisfaire les besoins énergétiques en diminuant la dépendance aux gisements d'hydrocarbure (tout en réduisant les émissions de carbone). Les infrastructures et équipements performants énergétiquement (équipements domestiques électriques, logements, véhicules) font également partie des pistes explorées pour répondre à d'ambitieux objectifs d'efficacité énergétique et de faible impact climatique. Enfin, en aval du panel de technologies et équipements disponibles, la formation de la demande énergétique est déterminée par les choix de consommation des différents agents économiques face aux déterminants économiques tels que revenu et prix des énergies. Dans le cas des transports en particulier, activité vitale de l'économie moderne, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) souligne l'influence observée du revenu sur le taux d'équipement des ménages en véhicules particuliers et sur leur utilisation :

« Historically there has been a strong correlation between income levels and the rate of passage Light Duty Vehicle ownership. », AIE (2009), pp. 59.

« Car travel per capita is also closely related to incomes [...]. [Studied] countries have experienced a steady increase in car travel per capita as personal consumption expenditures have increased. This stems from the tendency [...] that as people grow richer, they travel further and use faster, more flexible and more expensive modes of transport. », AIE (2007), pp. 104.

De nombreux travaux empiriques ont cherché à évaluer le rôle des déterminants revenu et prix dans la formation de la demande énergétique de ce secteur afin de mieux la comprendre, la prévoir et la contrôler¹. L'intérêt suscité par ces variables ne se cantonna pas au seul secteur des transports ; les effets du revenu et des mécanismes de prix furent également étudiés dans le cas de la demande énergétique résidentielle (Alberini et al., 2011; Nesbakken, 1999 ; Reiss & White, 2005) ou encore dans le cas de la demande énergétique multisectorielle².

Derrière l'intérêt porté à ces deux déterminants, on retrouve à nouveau, dans le contexte de sécurité énergétique et de changement climatique, la recherche de leviers pour concilier sobriété énergétique et développement. Pourtant, l'existence de spécificités sectorielles peut s'avérer constituer un frein à cette approche. Ainsi, la faible élasticité de la demande de carburant aux prix de l'énergie reflète l'existence d'autres déterminants à la demande énergétique du secteur des transports : les infrastructures existantes tout comme l'organisation spatiale du territoire sont autant de facteurs spécifiques à la demande de carburant qu'il convient de prendre en compte pour la maîtriser³. C'est à ce second facteur résultant des choix de localisation, que sera consacrée la suite de cette thèse.

Parallèlement à l'étude des mécanismes prix et revenu, le rôle des choix de localisation des agents économiques et de l'organisation spatiale du territoire (forme urbaine dense versus étalement urbain) dans la formation de la demande énergétique commença à être sérieusement étudié au début des années 1990 et ce tout d'abord pour le secteur des transports. En effet, le débat sur la remise en cause du modèle américain de croissance urbaine, reposant comme le souligne Bento et al. (2005) sur un développement à faible densité accompagné d'une augmentation rapide de l'équipement automobile des ménages et des distances parcourues, a engendré de nombreux travaux sur la relation entre forme urbaine et mobilité. Un effort particulier a été déployé pour la quantification de cette relation, à savoir l'évaluation de l'impact de l'organisation spatiale sur la demande de transport (Bento et al., 2005 ; Grazi et al., 2008 ; Newman & Kenworthy, 1989). Or, si cette littérature scientifique est relativement fournie, elle présente de fortes variations quant aux estimations empiriques de l'effet de la structure urbaine sur le secteur des transports (Ewing & Cervero, 2010 ; Stead & Marshall, 2001), ce qui laisse suggérer que la question du potentiel des mécanismes d'interaction entre organisation spatiale du territoire et mobilité dans l'effort d'efficacité énergétique n'est pas encore totalement résolue. Plus largement, à la lumière du processus croissant d'urbanisation que connaît actuellement la population mondiale qui vivra à 70 % en ville d'ici 2050 selon les Nations Unies (UN, 2009) et étant donné les réorganisations du territoire que cela implique, la question de l'impact de la localisation des activités sur l'énergie nécessaire pour ces mêmes activités est cruciale. Les dynamiques d'urbanisation, responsables de profondes modifications dans les choix de localisation des individus et des activités tout secteur confondu, ont suscité l'intérêt des chercheurs quant à leur impact potentiel

¹ Voir entre autres Dahl & Sterner (1991), Schmalensee & Stoker (1999), Yatchew & No (2001).

² Voir par exemple Bentzen & Engsted (1993), Fouquet et al. (1997), Webster et al. (2008).

³ On peut citer en exemple les différents travaux prospectifs menés au Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement sur ces sujets (Grazi & Waisman, 2009 ; Gusdorf, 2008 ; Viguié, 2012).

sur la demande énergétique nationale (Parikh & Shukla, 1995). Selon certaines études, la migration des populations vers les villes engendre de significatives réductions de consommation d'énergie (Liu 2009 ; Pachauri 2004 ; Permana et al. 2008 ; Shahbaz & Lean 2012) ; d'autres travaux mettent en revanche en évidence la surconsommation que ces déplacements massifs créent (Holtedahl & Joutz 2004) ou encore leur effet mitigé sur la demande d'énergie du pays (Mishra et al., 2009 ; Poumanyong & Kaneko, 2010).

Ainsi, en parallèle des choix des acteurs économiques en termes d'infrastructures énergétiques du côté de l'offre et en termes de consommation du côté de la demande, l'organisation spatiale résultant des choix de localisation semble également intervenir dans la formation de la demande énergétique. Si l'enjeu n'est pas de substituer l'espace aux mesures économiques et réglementaires, qui, déclinées de l'échelle internationale à l'échelle locale, sont indispensables dans la maîtrise énergétique et la lutte contre le changement climatique, on peut s'interroger sur le potentiel de l'organisation spatiale comme instrument de politique publique pour réduire les consommations d'énergie et émissions associées.

Bien que présente dans les débats depuis plusieurs années, la question de l'utilisation de l'organisation spatiale comme levier de réduction de la demande énergétique est loin de faire consensus, et ce pour deux raisons principales. La première relève du doute persistant concernant l'impact effectif des choix de localisation sur les consommations d'énergie. La deuxième tient à un scepticisme concernant la mise en application d'une politique d'intervention sur les choix de localisation des individus. Derrière ce second argument repose l'opposition entre utilité et bien-être individuel régissant les choix de localisation d'une part, et le bien commun que représente la protection de l'environnement d'autre part. Intervenir sur l'organisation spatiale à des fins énergétique et climatique suppose la modification des modes de vie à une époque où l'aspiration à la maison familiale entourée de son jardin individuel est largement répandue. L'acceptabilité d'une telle action est délicate et pose la question de l'arbitrage entre le coût d'une telle mesure en termes de perte de bien-être individuel et les bénéfices environnementaux associés.

Cette thèse s'inscrit au cœur du débat sur le rôle de l'organisation spatiale dans la réduction des consommations énergétiques et émissions associées. A la lumière des deux arguments principaux des détracteurs de l'utilisation de l'espace comme instrument de politique énergétique et climatique, ce travail a pour objectif d'explorer le cas particulier de la France en s'articulant autour des deux questions de recherche suivantes :

Q1. Dans quelle mesure les choix de localisations affectent-ils la demande énergétique globale des ménages en France ?

Le transport représente 27 % dans la demande énergétique finale mondiale selon l'AIE, et les bâtiments sont eux responsables de 33 % de cette demande et connaîtront une forte croissance avec une augmentation de 67 % du nombre de ménage et de presque 195 % de la surface des bâtiments

commerciaux d'ici 2050 (AIE, 2009b, 2011). Or si l'organisation de l'espace constitue un critère structurant pour le secteur des transports et la demande de mobilité, elle résulte de la localisation des infrastructures de l'économie et est donc également intimement liée aux bâtiments : les choix de localisation et l'organisation spatiale résultante sont ainsi liés à deux secteurs responsables de plus de la moitié de la demande énergétique mondiale. Pourtant, alors que le lien entre choix de localisation et demande énergétique associée aux transports a été largement étudié, très peu de travaux se sont penchés sur le rôle de ces mêmes choix de localisation sur les consommations d'énergie des bâtiments, probablement en raison de la difficulté d'identifier les mécanismes d'interaction en jeu.

Les travaux de cette thèse ont pour premier objectif de combiner transport et logement afin d'apporter des éléments quantitatifs robustes permettant de trancher la question de l'effet des choix de localisation dans la formation de la demande énergétique globale des ménages français. Le rôle de l'espace est ainsi analysé en termes d'impact sur la consommation d'énergie de deux secteurs clé de l'économie et non plus uniquement des transports, ce qui renforce la robustesse des conclusions en termes d'implication politique. L'attention particulière apportée à la méthodologie vise à produire une analyse fine des différents mécanismes d'impact et relations de causalité entre organisation spatiale et formation de la demande d'énergie, ceci afin de permettre une compréhension en profondeur des interactions en jeu et faciliter ainsi la mise en œuvre d'actions publiques d'efficacité énergétique à travers les déterminants identifiés.

Q2. Comment intervenir sur les choix de localisation pour infléchir la demande énergétique ?

L'analyse empirique conduite pour répondre à la première question fournit des éléments sur les effets en termes énergétiques d'une intervention directe sur les choix de localisation. Toutefois, étant donné que cette option politique se heurte à la question de son acceptabilité du fait qu'il est difficile de concevoir aujourd'hui des choix de vie conditionnés par la demande énergétique, on se propose ici de dépasser l'alternative d'une modification exogène de l'espace en analysant son rôle endogène dans la formation de la demande énergétique. Plus précisément, on cherche à orienter l'organisation spatiale non pas à travers une contrainte arbitraire sur les choix des ménages mais en explorant les mécanismes intervenant dans la formation de ces choix de localisation. Endogénéisé, l'espace constitue un levier indirect pour réduire les consommations d'énergie et émissions associées et offre ainsi une dimension supplémentaire d'action. Son rôle est estimé et son potentiel au regard de politiques énergétiques et climatiques alternatives telle que la taxe carbone est analysé dans un cadre macro-économique afin de tirer des conclusions en termes d'optimisation de stratégies d'intervention publique à coût économique maîtrisé.

La réponse aux deux questions de recherche posées s'articule en cinq chapitres. Dans un premier temps, la littérature riche et variée sur le lien entre mobilité et organisation spatiale est étudiée. Au-delà de la revue bibliographique, ce chapitre explore et exploite l'hétérogénéité des travaux, hétérogénéité notamment de résultats quantitatifs obtenus et de méthode utilisées, par le biais

d'une méta-analyse : la compilation et l'exploitation statistique des résultats existants permettent de tirer des enseignements méthodologiques et politiques sur l'évaluation empirique du rôle de l'organisation spatiale sur la demande de transport. Notamment, ce premier chapitre renseigne sur la causalité entre organisation spatiale du territoire, demande de transport et consommation d'énergie associée et sur l'existence de spécificités territoriales susceptibles d'intervenir dans cette interaction.

Suite à l'analyse de l'état de l'art de la littérature académique économique en matière de choix de localisation et transport, le deuxième chapitre se concentre sur le territoire français : il propose des éléments quantitatifs contextualisés visant à évaluer le potentiel des interventions locales sur l'organisation spatiale en termes de réduction des consommations d'énergie du secteur des transports. L'analyse de l'interaction entre forme urbaine et demande de transports des ménages repose sur l'utilisation de méthodes économétriques et propose une étude approfondie des différents mécanismes de causalité par lesquels cette interaction se produit. La prise en compte de l'ensemble du territoire métropolitain français permet de souligner le potentiel des zones rurales au même titre que les zones urbaines dans l'effort de réduction de la demande énergétique nationale à travers la mise en place de politiques spatiales. L'influence des caractéristiques socio-économiques des ménages dans le lien entre espace et consommation d'énergie est également explorée.

Au-delà de leur effet sur la demande de transport des ménages, les choix de localisation et l'organisation spatiale résultante sont susceptibles d'affecter la formation de la demande énergétique liée au logement. C'est ce lien additionnel que le troisième chapitre a pour objectif d'explorer. A partir d'une méthodologie analogue à celle utilisée pour le secteur des transports, la relation de causalité entre consommation d'énergie résidentielle et organisation spatiale dans le cadre du territoire français est étudiée. Les différents mécanismes d'impact des choix de localisation sur la demande d'énergie (à travers les caractéristiques des logements, les sources d'énergie utilisées ou encore le microclimat) sont estimés. A nouveau, zones rurales et urbaines sont comparées et la sensibilité du rôle de l'espace aux caractéristiques socio-économiques du ménage considéré est également étudiée.

Les chapitres deux et trois offrent une évaluation de l'impact de l'organisation spatiale comme variable exogène de l'économie, et donc comme levier d'action direct sur la formation de la demande énergétique des ménages. Dans le quatrième chapitre, on se propose de considérer l'espace non pas comme une donnée mais comme une résultante de mécanismes économiques et de mettre ainsi en évidence son rôle dans la formation de la demande énergétique. Dans le cas particulier des transports, la dépendance de la consommation d'énergie aux mécanismes de prix et notamment celui de l'énergie et celui des logements est analysée. Les résultats sont interprétés à la lumière de l'effet des prix des logements dans la formation des préférences de localisation des ménages. L'espace est alors intégré dans un contexte macro-économique et identifié comme un levier indirect de réduction de la demande énergétique.

Enfin, le dernier chapitre fait appel à l'ensemble des résultats des chapitres précédents et permet de fournir des conclusions sur le rôle de la dimension spatiale dans la stratégie de réduction des

consommations énergétiques et de l'impact climatique associé. Dans un cadre de modélisation macro-économique à équilibre général, l'espace est endogénéisé à l'aide des résultats du chapitre 4 et les interactions entre demande énergétique des ménages et organisation spatiale sont modélisées et calibrées en fonction des conclusions des chapitres 1, 2 et 3. Différentes stratégies d'intervention énergétique et climatique reposant sur les mécanismes de prix de l'énergie et des logements sont alors simulées. L'analyse dans un cadre macro-économique intégrant la dimension spatiale endogène permet de tirer des conclusions quant au rôle des choix de localisation dans l'effort de réduction des consommations et émissions associées et fournit ainsi des éléments de réflexion pour l'orientation des politiques énergétiques et climatiques à venir. La dimension spatiale constituerait un levier d'action du même ordre de grandeur que les autres leviers envisagés traditionnellement (tel que la taxe carbone) et offrirait un degré de liberté additionnel permettant un accroissement, à coût maîtrisé, de l'efficacité de l'action publique en matière d'énergie et de climat.

BIBLIOGRAPHIE

- Alberini, A., Gans, W., Velez-Lopez, D., 2011. Residential consumption of gas and electricity in the U.S.: The role of prices and income. *Energy Economics*, *Energy Economics* 33, 870–881.
- Bento, A.M., Cropper, M.L., Mobarak, A.M., Vinha, K., 2005. The Effects of Urban Spatial Structure on Travel Demand in the United States. *Review of Economics and Statistics* 87, 466–478.
- Bentzen, J., Engsted, T., 1993. Short- and long-run elasticities in energy demand: A cointegration approach. *Energy Economics* 15, 9–16.
- Chontanawat, J., Hunt, L.C., Pierse, R., 2006. Causality between Energy Consumption and GDP: Evidence from 30 OECD and 78 Non-OECD Countries (Surrey Energy Economics Centre (SEEC), School of Economics Discussion Papers (SEEDS) No. 113). Surrey Energy Economics Centre (SEEC), School of Economics, University of Surrey.
- Dahl, C., Sterner, T., 1991. Analysing gasoline demand elasticities: a survey. *Energy Economics*, *Energy Economics* 13, 203–210.
- Ewing, R., Cervero, R., 2010. Travel and the Built Environment. *Journal of the American Planning Association* 76, 265–294.
- Fouquet, R., Pearson, P., Hawdon, D., Robinson, C., Stevens, P., 1997. The future of UK final user energy demand. *Energy Policy* 25, 231–240.
- Grazi, F., van den Bergh, J.C.J.M., van Ommeren, 2008. An Empirical Analysis of Urban Form, Transport and Global Warming. *The Energy Journal* 29, 97–122.
- Grazi, F., Waisman, H., 2009. Urban Agglomeration Economies in Climate Policy: A Dynamic CGE Analysis. CIRED Working Paper Series.
- Gusdorf, F., 2008. L'inertie des systèmes urbains et le tempo des politiques publiques face aux risques énergétiques et climatiques.
- Holtedahl, P., Joutz, F.L., 2004. Residential electricity demand in Taiwan. *Energy Economics* 26, 201–224.
- Hourcade, J.-C., 1993. Modelling long run scenarios: Methodology lessons from a prospective study on a low CO₂ intensive country. *Energy Policy* 21, 309–326.
- IEA, 2007. *Energy Use in the New Millennium*.
- IEA, 2009a. *Transport, Energy and CO₂: Moving Toward Sustainability*.
- IEA, 2009b. *World Energy Balance*.
- IEA, 2011. *Technology Roadmap - Energy-efficient Buildings: Heating and Cooling Equipments*.
- Levine, M., Ürge-Vorsatz, D., Blok, K., Geng, L., Harvey, D., Lang, S., Levermore, G., Mongameli Mehlwana, A., Mirasgedis, S., Novikova, A., Rilling, J., Yoshino, H., 2007.

- Residential and commercial buildings, in: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A. (Eds.), *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Liu, Y., 2009. Exploring the relationship between urbanization and energy consumption in China using ARDL (autoregressive distributed lag) and FDM (factor decomposition model). *Energy* 34, 1846–1854.
- Mishra, V., Smyth, R., Sharma, S., 2009. The energy-GDP nexus: Evidence from a panel of Pacific Island countries. *Resource and Energy Economics* 31, 210–220.
- Nesbakken, R., 1999. Price sensitivity of residential energy consumption in Norway. *Energy Economics* 21, 493–515.
- Newman, P.W.G., Kenworthy, J.R., 1989. *Cities and automobile dependence : a sourcebook*. Gower Technical, Brookfield, Vt., USA.
- Pachauri, S., 2004. An analysis of cross-sectional variations in total household energy requirements in India using micro survey data. *Energy Policy* 32, 1723–1735.
- Parikh, J., Shukla, V., 1995. Urbanization, energy use and greenhouse effects in economic development: Results from a cross-national study of developing countries. *Global Environmental Change* 5, 87–103.
- Permana, A.S., Perera, R., Kumar, S., 2008. Understanding energy consumption pattern of households in different urban development forms: A comparative study in Bandung City, Indonesia. *Energy Policy* 36, 4287–4297.
- Poumanyong, P., Kaneko, S., 2010. Does urbanization lead to less energy use and lower CO₂ emissions? A cross-country analysis. *Ecological Economics* 70, 434–444.
- Reiss, P.C., White, M.W., 2005. Household Electricity Demand, Revisited. *Review of Economic Studies* 72, 853–883.
- Schmalensee, R., Stoker, T.M., 1999. Household Gasoline Demand in the United States. *Econometrica*, *Econometrica* 67, 645–662.
- Shahbaz, M., Lean, H.H., 2012. Does financial development increase energy consumption? The role of industrialization and urbanization in Tunisia. *Energy Policy* 40, 473–479.
- Stead, D., Marshall, S., 2001. The Relationships between Urban Form and Travel Patterns: An International Review and Evaluation. *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 1, 113 – 141.
- UN, 2009. *World Urbanization Prospects, the 2009 Revision*.
- Viguie, V., 2012. *Modélisation des dynamiques urbaines, application à l’analyse économique du changement climatique*.
- Webster, M., Paltsev, S., Reilly, J., 2008. Autonomous efficiency improvement or income elasticity of energy demand: Does it matter? *Energy Economics* 30, 2785–2798.

Yatchew, A., No, J.A., 2001. Household Gasoline Demand in Canada. *Econometrica*,
Econometrica 69, 1697–1709.

Chapitre 1 :

Méta-analyse de l'effet de la densité de population sur la demande de transport

I. INTRODUCTION

Ce chapitre traite des déterminants spatiaux de la demande énergétique des ménages, et plus précisément du rôle de la densité résidentielle⁴ dans la formation de la demande de mobilité et de la consommation d'énergie correspondante. L'objectif est de dégager les informations principales qui peuvent être tirées de la littérature existante sur la relation entre forme urbaine et mobilité des ménages. La méthodologie utilisée repose sur une méta-analyse, à savoir un traitement statistique d'estimations empiriques présentes dans les travaux de recherche existants. L'hétérogénéité des études économétriques considérées, que ce soit en termes de données ou de méthodes d'estimation employées, est prise en compte et l'on explore et identifie, s'il y en a, les variations systématiques entre résultats, imputables aux seules caractéristiques de l'étude considérée. Cette méthode permet d'isoler l'évaluation proprement dite du lien entre forme urbaine et demande de mobilité des influences que peuvent avoir les caractéristiques géographiques ou temporelles des données considérées et des spécifications ou techniques économétriques utilisées.

Plusieurs travaux reposent sur une méta-analyse pour approfondir l'étude de déterminants tels que le prix ou le revenu dans la formation de la demande de transport des ménages⁵. Mais, à notre connaissance, très peu d'efforts ont été déployés à ce jour pour exploiter l'éventail de travaux sur le rôle de la dimension spatiale dans la demande de transport et pour en tirer des conclusions générales dépassant le cadre des données et des techniques économétriques utilisées. Ainsi Leck (2006) propose des méta-analyses de l'impact de variables spatiales sur la demande de transport mais seulement quelques études (au maximum six) sont utilisées pour chaque analyse. Ewing & Cervero (2010) quant à eux complètent leurs travaux de 2001 (Ewing & Cervero 2001) pour proposer des moyennes pondérées des valeurs présentes dans la littérature des élasticités de la demande de mobilité aux déterminants spatiaux. En proposant une méta-analyse approfondie de l'effet de la densité résidentielle sur la demande de mobilité des ménages, notre contribution spécifique se décline sur trois aspects :

- i) l'effort de revue bibliographique permet d'enrichir le nombre d'estimations comparables de l'impact de la forme urbaine sur la demande de transport de 10 pour Ewing & Cervero (2010) à 50 ;

⁴ La densité résidentielle est définie comme le ratio entre nombre de logements ou d'individus et unité de surface.

⁵ Voir par exemple Espey (1998) et Goodwin et al. (2004).

- ii) les informations recueillies pour chaque étude considérée incluent, dans la majorité des cas, les écarts types des estimations, ce qui assure entre autres le calcul de moyennes pondérées robustes ;
- iii) l'analyse statistique réalisée comprend des calculs de moyennes, une recherche de variations systématiques dans la significativité de la variable spatiale ainsi qu'une recherche de variations systématiques dans la valeur de l'effet de cette variable spatiale sur la mobilité.

Après la présentation de la méthodologie qu'est la méta-analyse, la section III de ce chapitre est consacrée à la description des données collectées et utilisées pour l'étude de l'effet de la densité sur la demande de transport des ménages. Les résultats sont présentés section IV. La dernière section clôt ce chapitre par des éléments de conclusion.

II. LA METHODE DE LA META-ANALYSE, INTERET ET LIMITES

a. Objectif d'une méta-analyse

Dans un souci de positionnement par rapport aux recherches précédentes et de légitimité, les articles académiques consacrent la plupart du temps une section à la revue bibliographique, voire la totalité de leur contenu lorsqu'il s'agit d'articles de revue de littérature. Ces revues prennent la forme d'une présentation et d'une discussion des études, dressent un panorama des thèses développées et des méthodes utilisées, mettent en évidence des lacunes dans la connaissance scientifique ou au contraire en soulignent la complétude. Puis, en général, elles tirent des conclusions qualitatives quant aux consensus et controverses sur la question étudiée. Utiles et précieuses, ces revues reposent sur une énumération commentée avec laquelle la tâche de synthèse est délicate, et ce tout particulièrement dans le cas de travaux empiriques.

Afin de pallier les limites des revues bibliographiques traditionnelles et de compléter l'information qu'elles révèlent, notamment lorsqu'il s'agit de recherches quantitatives, Glass (1976) a développé dans les années 70 une méthodologie permettant d'effectuer des analyses statistiques rigoureuses dans le cadre d'une recherche comparative. La suite de cette section présente les grandes lignes de l'histoire de la diffusion de la méta-analyse comme méthode de recherche puis en souligne les limites.

b. Développement historique

Comme le rappelle Brons (2006) dans sa thèse, la méta-analyse moderne comme méthode de recherche a été initiée par les travaux de Glass (1976) dans le domaine de la psychothérapie, et s'est rapidement diffusée dans les sciences sociales et expérimentales, notamment dans des disciplines telles que l'éducation, la psychologie et la médecine. Cette méthode est en fait une « étude d'études »,

d'où le terme de « *méta* », ayant pour objectif d'accumuler et d'intégrer les résultats expérimentaux d'études indépendantes pour en tirer des informations supplémentaires. Les prémices de cette approche remontent au début du XX^{ème} siècle avec de premiers travaux proposant des moyennes d'estimations provenant d'études différentes (Birge 1932 ; Simpson & Pearson 1904) mais c'est le travail de l'équipe de Glass qui contribua à développer et faire connaître la méta-analyse comme outil de compilation bibliographique (Smith & Glass 1977 ; Smith et al. 1980). Dans le domaine médical en particulier, où les estimations empiriques sont fortement contraintes en termes de nombre d'observations et donc de qualité des échantillons, cette méthode fut plébiscitée pour agréger et synthétiser les résultats de différentes études cliniques⁶. On pourra se reporter à l'ouvrage de Cooper et al. (2009) pour plus de précisions sur l'histoire de la méta-analyse.

Parallèlement à la diffusion de la méta-analyse, les fondations théoriques ainsi que les outils statistiques et économétriques renforçant la rigueur et la robustesse de cette méthode se sont enrichis⁷. Alors que cette méthode se diffusait au sein des sciences sociales (Glass et al. 1981), les applications aux différents secteurs de l'économie comme l'économie du travail, des transports et plus dernièrement l'économie de l'environnement et de l'énergie se sont multipliées (Elvik 1995 ; Groot & Maassen van den Brink 2000 ; Woodward & Wui 2001).

c. Méthodes et limites

La méta-analyse est une méthode permettant de construire un cadre d'analyse rigoureux pour la comparaison et la synthèse de la littérature existante afin de dégager des conclusions sur la direction et l'ampleur d'une relation entre variables dépendantes et indépendantes.

Elle repose sur la collection de travaux scientifiques antérieurs menés sur le paramètre ou la relation d'intérêt, et le recueil des informations décrivant les caractéristiques des études primaires considérées. Des techniques de traitements statistiques incluant des descriptions statistiques, des analyses de variance ou bien encore des régressions multi-variées sont ensuite conduites sur les données recueillies afin d'en extraire des conclusions générales qualitatives et quantitatives sur le paramètre étudié. En effet, l'association de plusieurs études primaires permet de s'affranchir des caractéristiques techniques propres à chaque étude, notamment en ce qui concerne les taille et qualité d'échantillon mais également en termes de méthodes d'évaluation utilisées, et permet ainsi de donner une image plus précise de la relation considérée. La compilation d'informations primaires crée de l'information supplémentaire. Un deuxième enjeu de la méta-analyse est de fournir des éléments explicatifs quant à l'hétérogénéité éventuelle des résultats de la littérature : les méthodologies utilisées, les spécifications testées ou bien les caractéristiques des populations étudiées peuvent ainsi être

⁶ Voir par exemple Olkin (1992), Sacks et al. (1987), Stanley (2001), Stanley et al. (2008) et Thompson & Pocock (1991) pour une analyse critique de la méthodologie par rapport aux revues de littératures traditionnelles

⁷ Voir par exemple Berkey et al. (1995), Böckenhoff & Hartung (1998), Hardy & Thompson (1996), Hedges & Olkin (1985), Li et al. (1994), Morris & Normand (1992), Platt et al. (1999), Sidik & Jonkman (2003).

identifiées comme sources de variation parmi les résultats des études primaires de la littérature (Egger & Smith 1997).

Possédant des avantages certains en termes de rigueur et objectivité du traitement de l'information, la méta-analyse présente néanmoins des limites. Son premier point faible est la représentativité des études académiques primaires sélectionnées. En effet, le traitement statistique des études de la littérature existante repose sur l'hypothèse que l'échantillon de ces études collectées est représentatif de l'ensemble des estimations qui pourraient être effectuées. Or il existe plusieurs sources de facteurs conditionnants, parmi lesquels en voici trois principaux : i) le processus de sélection des publications, qui, s'il assure la qualité des recherches, pourrait dans le cas d'études empiriques favoriser les travaux concluant à des résultats significatifs plutôt que non significatifs (Long & Lang 1992) ; ii) le poids de l'opinion académique dominante sur l'arbitrage du chercheur qui est susceptible d'orienter ses travaux en fonction des résultats attendus (Card & Krueger 1995) ; iii) le processus de sélection des études parmi la littérature pour la réalisation de la méta-analyse. La deuxième limite avancée lorsque l'on parle de méta-analyse est la comparabilité entre études primaires (Hunt 1997). En effet, chaque étude est unique par ses caractéristiques d'estimation et par la population qu'elle considère. Dans ce sens, les comparer revient à *mettre dans le même panier des pommes et des oranges* selon Leck (2006), bien que, comme il le précise, cette comparaison soit nécessaire pour pouvoir conclure sur les fruits en général (Rosenthal & DiMatteo 2001).

Toutefois, au-delà de ces limites, la méta-analyse est une méthodologie statistique offrant un cadre d'analyse rigoureux pour :

- i) donner une vision de synthèse des travaux existants ;
- ii) capitaliser les résultats de la littérature sous forme de conclusions qualitatives et quantitatives sur la relation étudiée ;
- iii) orienter les recherches (empiriques) à venir.

III. IMPACT DE LA DENSITE RESIDENTIELLE SUR LA MOBILITE : CARACTERISTIQUES DES ETUDES SELECTIONNEES ET STATISTIQUES DESCRIPTIVES DU META-ECHANTILLON RETENU

La littérature s'intéressant aux déterminants de la demande de transports et incluant les aspects spatiaux comptent plus de 200 études empiriques. Dans le cadre du travail présenté dans ce chapitre, ces études ont été recherchées et identifiées par l'intermédiaire de moteurs de recherche spécialisés ainsi que par références successives. Cette littérature est caractérisée entre autres par une triple hétérogénéité : d'abord les variables spatiales utilisées pour décrire la forme urbaine varient selon les études ; ensuite les spécifications (formes fonctionnelles retenues pour la relation entre espace et mobilité) testées pour évaluer l'effet de ces variables de forme urbaine sur la mobilité des ménages

diffèrent également selon les travaux ; et enfin les unités de mesure de la mobilité ne sont pas harmonisées parmi les études.

La multiplicité des facteurs spatiaux présents dans les études reflète la complexité des organisations spatiales, et la diversité des modèles de développement de ville explique qu'il n'existe pas de proxy standardisé pour représenter la forme urbaine. Pourtant, malgré cette hétérogénéité dans la mesure de l'utilisation de l'espace, la densité résidentielle apparaît comme l'une des variables spatiales les plus largement utilisée dans la modélisation de la demande de transport. La première raison de choisir la densité comme proxy spatial repose sur le lien théorique entre densité et mobilité mis en évidence par Alonso (1964) dans son modèle séminal d'économie urbaine : les décisions de localisation des travailleurs reposent sur un arbitrage entre coûts généralisés de transports domicile-travail et prix des logements, ce qui a pour conséquence une répartition des individus dans la ville inversement proportionnelle à la distance domicile-travail, et donc une relation négative entre densité résidentielle et demande de transport des ménages. Plus largement, la densité, lorsqu'elle est considérée à un niveau suffisamment désagrégé, est reconnue résumer les aspects de formes urbaines qui induisent les mécanismes de mobilité (Niemeier & Rutherford 1994 ; Schimek 1996b).

L'hétérogénéité des fonctions utilisées pour modéliser la demande de transport, quant à elle, est le reflet de la complexité des théories d'économie spatiale où se rencontrent différentes échelles, différents secteurs et différents acteurs. Il en résulte l'absence d'une approche analytique harmonisée liant organisation urbaine et mobilité des ménages, et en particulier organisation urbaine et demande énergétique associée à la mobilité.

Le système d'unité utilisé pour mesurer la demande de transport est également source d'hétérogénéité. La mobilité se comptabilise principalement en mile ou en kilomètre quand elle est mesurée en termes de distance parcourue ; et lorsque la demande de transport est évaluée en énergie consommée, on retrouve des tonnes équivalent pétrole, des volumes pour mesurer la consommation de carburant ou encore des joules ou kilowatt.

Afin d'assurer la comparabilité des études, nous avons retenu la densité résidentielle comme variable spatiale pour représenter la forme urbaine et notre méta-analyse s'intéresse aux estimations de l'élasticité de la mobilité des ménages par rapport à cette densité. Le choix de cette variable se justifie, en sus de sa pertinence pour résumer la forme urbaine, par le fait qu'elle est la variable spatiale la plus diffusée, ce qui permet de disposer d'un grand nombre d'études empiriques primaires. Le choix de l'élasticité-densité de la mobilité comme paramètre d'intérêt de la méta-analyse est doublement motivé : i) d'une part par le fait que ce paramètre est déterminable avec différentes spécifications économétriques ; ii) et d'autre part par la volonté de travailler avec une variable adimensionnelle émancipant des difficultés de comparabilité dues aux unités.

Le paramètre d'intérêt de notre étude, appelé techniquement « *effect size* » dans le jargon anglais de la méta-analyse, est donc l'élasticité de la mobilité par rapport à la densité résidentielle. La mobilité est mesurée soit en distance parcourue, soit en énergie consommée. La nature des études

présentes dans la littérature et des informations statistiques disponibles, qu'elles soient directement fournies dans les articles ou bien qu'elles aient été recueillies après requête auprès des auteurs, nous a permis de constituer une base de données de 50 observations provenant de 24 études empiriques de la littérature. Cette méta-base contient donc 50 estimations de l'élasticité-densité de la mobilité, les écarts types correspondants lorsque ce fut possible, les caractéristiques de la méthode d'estimation utilisée dans les études primaires collectées et les caractéristiques des données sur lesquelles l'estimation fut réalisée. Les études retenues sont décrites dans le TABLEAU 1.

TABLEAU 1—Études empiriques estimant l'effet de la densité résidentielle sur la demande de transport et incluses dans la méta-analyse

Etude	Nombre d'estimations fournies	Type de données ^a	Période	Unité d'observation ^b	Zone géographique	Type de modèle utilisé ^c	Unité de mesure de la mobilité ^d	Densité résidentielle infra-urbaine ^e	Ecart type disponible	Taille de l'échantillon	Effect size
(Albalate & Bel 2009)	2	CS	2001	A.	Europe	EI/SURE	D	Non	Non	45	0
(Bento et al. 2005)	1	CS	1990	DésA.	US	2-step DC	D	Non	Non	8297	0
(Brownstone & Golob 2009)	2	CS	2001	DésA.	US California	SEM	D&E	Oui	Oui	2079	-0.14 / -0.12
(Cervero & Murakami 2010)	2	CS	2003	A.	US	SEM	D	Non	Non	370	-0.60 / -0.38
(Dahl 1978)	2	P	1954-1973	A.	Europe	EI	E	Non	Non	55	0
(Emrath & Liu 2008)	2	CS	2001	DésA.	US	EI	D&E	Oui	Oui	20356	-0.53 / -0.52
(Fang 2008)	2	CS	2001	DésA.	US California	SURE	D	Oui	Oui	2299	-0.05 / -0.04
(Frank et al. 2010)	1	CS	2001	DésA.	US Atlanta	EI	E	Oui	Non	10184	-0.15
(Glaeser & Kahn 2010)	5	CS	2001	DésA.	US	EI	E	Oui	Oui, Non	11728	[-0.11; -0.04]
(Grazi et al. 2008)	4	CS	1998	DésA.	The Netherlands	EI	D	Oui	Oui	25991	[-0.39; -0.13]
(Giuliano & Narayan 2003)	2	CS	1995	DésA.	US	EI	D	Oui	Oui	95360	-0.37 / -0.26
(Guo & Gandavarapu 2010)	1	CS	2001	DésA.	US Wisconsin	SURE	D	Oui	Oui	4974	0.04
(Heres-Del-Valle & Niemeier 2011)	4	CS	2001	DésA.	US California	2-step DC	D	Oui	Oui	7666	[-0.19; -0.16]
(Holden & Norland 2005)	1	CS	2003	DésA.	Nonrway	EI	E	Oui	Non	650	0
(Karathodorou et al. 2010)	4	CS	1999	A.	World	EI/SURE	D&E	Non	Oui	84	[-0.35; -0.23]
(Levinson & Kumar 1997)	1	CS	1990	DésA.	US	EI	D	Oui	Oui	8651	-0.42
(Liddle 2004)	3	P	1960-2003	A.	OECD	EI	E	Non	Oui	113	[-0.05; -0.04]
(Schimek 1996a)	1	P	1988-1992	A.	US	EI	E	Non	Oui	255	-0.02
(Shim et al. 2006)	1	CS	1999	A.	Korea	EI	E	Non	Oui	61	-0.12
(Su 2010)	2	P	2001	A.	World	Other	D	Non	Oui, Non	1700	-0.33 / -0.13
(Su 2011)	2	CS	1982-2003	DésA.	US	EI	E	Non	Oui, Non	5756	-0.06 / 0
(van de Coevering & Schwanen 2006)	1	CS	1990	A.	Europe, Canada and US	EI	D	Non	Oui	31	-0.52
(Zegras 2010)	2	CS	2001	DésA.	Santiago	EI/2-step DC	D	Oui	Non	4103	-0.04 / 0
(Zhou & Kockelman 2008)	2	CS	1998	DésA.	US Texas	EI	D	Oui	Oui, Non	776	-0.22 / 0

Nombre d'études sélectionnées : 24

^a Type de données : CS = données cross-section, P = données de panel.

^b Unité d'observation : unité d'observation de l'étude; DésA = désagrégée (échelle du véhicule, de l'individu ou du ménage), A = agrégée (échelle de la ville, de l'état/province ou du pays).

^c Type de modèle estimé : EI = équations indépendantes, SUR= "seemingly unrelated regressions", SEM = "structural equations model", 2-step DC = modèle discret-continu à deux étapes.

^d Unité de mesure de la mobilité : E = énergie consommée, D = distance parcourue.

^e Densité résidentielle infra-ville : indique si la densité est mesurée à une échelle infra-ville contrairement aux études où la densité est mesurée à l'échelle de la ville, de l'état ou du pays.

À partir de maintenant, le terme de *primaire* sera utilisé pour se référer aux éléments des études retenues pour la méta-analyse listées dans le TABLEAU 1 alors que celui de *méta-* indiquera les éléments spécifiques de l'analyse conduite dans ce chapitre. e défini dans l'équation (1.1) désigne l'*effect size*, soit l'élasticité de la demande de mobilité M par rapport à la densité résidentielle d .

$$e = \frac{\partial M / M}{\partial d / d} \quad (1.1)$$

Lorsque les études du TABLEAU 1 ne fournissent pas directement l'estimation de e mais un autre paramètre mesurant l'impact de la densité sur la demande de mobilité, e est alors dérivé selon les formules indiquées dans le TABLEAU 2, où \bar{M} et \bar{d} font respectivement référence aux valeurs moyennes de M et d sur l'échantillon : l'élasticité est évaluée au point moyen $(\bar{M} ; \bar{d})$ de l'échantillon. Les valeurs moyennes \bar{M} et \bar{d} de la variable dépendante M et/ou de la variable indépendante d sont le plus souvent disponibles dans les statistiques descriptives des études primaires. Lorsque ce n'est pas le cas, elles ont été demandées directement auprès des auteurs des études ou bien proviennent de sources alternatives.⁸ Les écarts types furent également recueillis ou bien calculés lorsque ce fut possible.

TABLEAU 2 – Formules utilisées pour évaluer l'élasticité en fonction des spécifications

	Modèle primaire estimé	Coefficient primaire estimé	Détermination de e
1	$\log(M_n) = \alpha_n \cdot \log(d_n) + \beta_n \cdot \mathbf{X}_n$	$\alpha = \frac{\partial M / M}{\partial d / d}$	$e = \hat{\alpha}$
2	$M_n = \alpha_n \cdot \log(d_n) + \beta_n \cdot \mathbf{X}_n$	$\alpha = \frac{\partial M}{\partial d / d}$	$e = \hat{\alpha} / \bar{M}$
3	$\log(M_n) = \alpha_n \cdot d_n + \beta_n \cdot \mathbf{X}_n$	$\hat{\alpha} = \frac{\partial M / M}{\partial d}$	$e = \hat{\alpha} \cdot \bar{d}$
4	$M_n = \alpha_n \cdot d_n + \beta_n \cdot \mathbf{X}_n$	$\hat{\alpha} = \frac{\partial M}{\partial d}$	$e = \hat{\alpha} \cdot \bar{d} / \bar{M}$

La valeur de l'élasticité au point moyen de l'échantillon n'est qu'une approximation de la valeur moyenne des élasticité individuelles étant donné les non-linéarités parfois existantes dans les modèles

⁸ Lorsque les moyennes de l'échantillon n'ont pu être collectées, ce qui concerne deux études uniquement (celle de Glaeser & Kahn (2010) et celle de Liddle (2004)), des moyennes nationales ont été utilisées. Une variable binaire prenant la valeur 1 en cas d'utilisation de données externes et 0 sinon a été créée afin de contrôler le biais potentiel induit par cette approximation.

testés (Train 1986). Cependant, comme le mentionnent Ewing & Cervero (2010), l'erreur introduite par cette approximation concerne principalement les modèles à choix discrets, utilisés dans 3 des études que nous avons retenues. De plus, afin de contrôler l'erreur éventuelle introduite par cette approximation, nous construisons une variable indiquant si l'*effect size* e a été directement fourni par les études primaires ou bien résulte de calculs de l'auteur. L'introduction de cette variable indicatrice dans notre analyse nous permet de détecter un potentiel biais systématique induit par l'approximation de l'élasticité au point moyen.

Notre méthodologie nécessite que la densité résidentielle soit traitée comme une variable continue. Or pour 6 des observations de notre méta-base, les modèles testés considèrent la densité comme une variable discrète. Dans ces cas particuliers, $\partial d = 1$ et correspond au passage d'une classe de densité à la classe de densité supérieure. La variation infinitésimale de la demande de mobilité ∂M correspond alors à la variation de M entre deux classes adjacentes de densité et est notée $\Delta M \cdot \bar{M}$ correspond toujours à la valeur moyenne de la demande de transport sur l'échantillon alors que \bar{d} représente dans le cas particulier d'une densité discrète la classe moyenne de densité observée sur l'échantillon. Les formules 3 et 4 du TABLEAU 2 permettent ainsi de calculer l'élasticité $e_{\text{inter-couple}}$ pour chaque couple de classes adjacentes de densité (la nature discrète de la variable densité exclut les modèles 1 et 2 reposant sur une forme logarithmique, et donc continue, de la densité). On détermine également le poids du couple de classe comme étant l'ensemble des observations appartenant à l'une ou l'autre des classes de densité considérées. L'*effect size* e est alors estimé par la moyenne pondérée des élasticités inter-couples.

Un certain nombre d'études reportent un effet non significatif de la forme urbaine sur la demande de transport des ménages. Dans ce cas-là, l'*effect size* e est pris égal à 0 : on considère que l'élasticité de la demande de transport par rapport à la densité résidentielle est nulle. Une autre solution aurait été de reporter comme valeur de e l'estimation indiquée dans les études, sans tenir compte de la non-significativité de cette estimation. Retenir cette deuxième solution, comme l'ont fait Ewing & Cervero (2010) au lieu de la première, a pour but d'éviter l'introduction d'un biais vers 0 dans la méta-analyse. En revanche, elle entraîne une perte d'information sur la significativité ou non de e et fait intervenir une valeur ayant peu de sens quantitatif étant donné son manque de précision. C'est pourquoi nous avons opté pour une valeur nulle lorsque l'effet de la densité est estimé non significatif. Les statistiques descriptives de la méta-base sont présentées dans le TABLEAU 3.

TABLEAU 3–Statistiques descriptives

Variables	% dans l'échantillon	Moyenne	Err. Type	Min.	Max.
Elasticité de la mobilité par rapport à la densité		-0,16	0,17	-0,60	0,04
Estimation significative	82 %				
Ecart type disponible	64 %				
Taille des échantillons primaires		7767	14527	31	95360
<i>Caractéristiques des modèles et des spécifications</i>					
<i>Méthode</i>					
Equations indépendantes	64 %				
Seemingly Unrelated Regressions	12 %				
Structural Equations Model	8 %				
Modèle discret-continu à deux étapes	12 %				
Modèle alternatif	4 %				
<i>Autres</i>					
Effet de sélection pris en compte ⁹	26 %				
Spécification log-log	24 %				
<i>Caractéristiques des données</i>					
Données cross-section	84 %				
Données de panel	16 %				
Unité d'observation désagrégée	64 %				
Unité d'observation agrégée	36 %				
Classes de densité	18 %				
Mobilité mesurée en distance parcourue	60 %				
Mobilité mesurée en énergie consommée	40 %				
Déplacements véhicule particulier uniquement	80 %				
Déplacements tout mode de transports	20 %				
Densité résidentielle infra-ville	56 %				
Densité résidentielle échelleville	32 %				
Densité résidentielle supra-ville	12 %				
<i>Caractéristiques géographiques</i>					
Etats-unis	54 %				
Europe	18 %				
Monde*	20 %				
Autres localisations	8 %				
Zone infra-nationale	72 %				
Zone urbaine uniquement	54 %				
<i>Variables de contrôle</i>					
Caractéristiques des infrastructures de transport	40 %				
Prix de l'énergie	28 %				
Caractéristiques des véhicules particuliers	32 %				
<i>Autres</i>					
Calcul de l'auteur**	54 %				

Nombre d'observation dans la méta-base : n=50

*Fait référence aux études dont les observations sont disséminées dans le monde entier.

**Calcul de l'auteur : l'estimation de l'*effect size* résulte d'un calcul à partir des données fournies dans l'étude primaire.

L'estimation moyenne de l'élasticité-densité sur les déplacements des ménages est de -0,16 dans notre méta-base de données. 82 % des observations sont significatives à un niveau égal ou inférieur à 10 %. Les estimations de l'*effect size* vont de -0,60 à 0,04, et de -0,60 à -0,02 si on exclut l'unique valeur

⁹ L'effet de sélection fait référence au choix des individus de se localiser en fonction de leurs préférences pour des zones à faible ou haute densité résidentielle, préférences qui influencent aussi leurs déplacements. L'hypothèse initiale d'effet unidirectionnel de la densité sur la demande de transport n'est pas vérifiée, et l'effet de sélection introduit une interaction bilatérale entre densité et mobilité des ménages. Il y a alors un biais dans les estimations de l'effet de la densité sur les déplacements si cet effet de sélection n'est pas pris en compte.

positive et celles non significatives. Les écarts types sont connus pour 64 % des observations et la taille des échantillons des études primaires varie de 31 à 95 360. En ce qui concerne les caractéristiques des modèles estimés, à 64% ce sont des équations indépendantes et 26 % des méta-observations ont été estimées en contrôlant les potentiels effets de sélection. La majorité des études primaires ont été menées à une échelle désagrégée (véhicule particulier, individu ou ménage) et très peu ont utilisées des données de panel. Enfin, il y a un déséquilibre entre les zones géographiques étudiées puisque 54 % des estimations ont été réalisées sur des données des États-Unis. Le TABLEAU 4 présente ainsi les élasticités moyennes calculées par zone géographique.

TABLEAU 4—Elasticités moyennes par zone géographique

Estimation moyenne de l'élasticité-densité de la mobilité (<i>nombre d'observations</i>)	
Etats-Unis	-0,17 (27)
Europe	-0,12 (9)
Monde	-0,23 (10)
Autre	-0,04 (4)

Le TABLEAU 4 révèle des variations dans les moyennes des estimations de *l'effect size* en fonction des régions considérées. Ainsi, l'impact de la forme urbaine sur les déplacements des ménages apparaît être plus fort aux États-Unis qu'en Europe, rappelant des temporalités historiques différentes entre les deux régions : alors qu'aux États-Unis, les villes se sont développées avec l'apparition de la voiture et donc à un moment où les modèles de consommation de transport étaient similaires aux modèles actuels, les villes européennes sont plus anciennes et donc leur forme est historiquement moins corrélées à la mobilité actuelle.

L'analyse statistique que nous venons de décrire tend à mettre en évidence des différences dans l'évaluation du paramètre estimé allant au-delà de simples variations imputables à l'erreur d'échantillonnage. Afin de confirmer ces résultats préliminaires, la section suivante examine plus en détail les variations systématiques des valeurs d'élasticité-densité de la mobilité présentes dans notre méta-base de données.

IV. HETEROGENEITE SYSTEMATIQUE DE L'ELASTICITE-DENSITE DE LA MOBILITE : RESULTATS DE LA META-ANALYSE

a. Test d'homogénéité

Cette sous-section a pour objectif d'explorer les variations des estimations de l'élasticité -densité de la mobilité et d'en rechercher la nature. Pour cela, on considère en premier lieu la moyenne pondérée des estimations. On appelle e_i l'*effect size* de la méta-observation i , et v_i l'écart type correspondant. La

moyenne pondérée de l'*effect size* \bar{e}_w et son écart type correspondant \bar{v}_w sont calculés comme définis dans les équations (1.2) et (1.3) :

$$\bar{e}_w = \frac{\sum_{i=1}^{36} \frac{e_i}{v_i^2}}{\sum_{i=1}^{36} \frac{1}{v_i^2}} \quad (1.2)$$

$$\bar{v}_w = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{36} \frac{1}{v_i^2}}} \quad (1.3)$$

La moyenne pondérée sur l'ensemble des 36 estimations significatives de la méta-base de données est de -0,12, pour un écart type de 0,00094. Faute de disposer des écarts types v_i , la plupart des études s'intéressant à la synthèse de travaux empiriques dans le domaine des transports et de planification urbaine se concentrent sur la moyenne simple des paramètres d'intérêt ou bien pondèrent cette moyenne par la taille des échantillons des études primaires (Ewing & Cervero 2010). Or il a été démontré que dans le cas d'un travail méta-analytique, la moyenne pondérée par l'inverse des écarts types est plus robuste d'un point de vue statistique que son homologue non pondérée ou bien utilisant des pondérations différentes (Hedges & Olkin 1985). C'est pourquoi une attention particulière a été portée lors de la revue bibliographique afin de disposer d'un maximum d'information sur les estimations, y compris les écarts types. D'autre part, il est trop peu rappelé que dans le cas d'une synthèse bibliographique de travaux empiriques, une moyenne, même pondérée, prend son sens sous l'hypothèse d'homogénéité des estimations. En d'autres termes, la valeur moyenne peut être utilisée comme une approximation de l'effet étudié si les variations des estimations de l'élasticité-densité de la mobilité relèvent uniquement d'une erreur d'échantillonnage. Les estimations qui constituent cette moyenne ne doivent pas dépendre pas entre autres des méthodes économétriques ou des données utilisées pour les obtenir. Pour assurer la robustesse d'une moyenne, il est donc nécessaire de vérifier que les estimations ne présentent pas de variations ou d'hétérogénéités systématiques. Or à notre connaissance ce travail n'est pas présent dans la littérature méta-analytique s'intéressant aux déterminants spatiaux de la demande de transport. Nous avons ainsi réalisé un test d'homogénéité mené sur les estimations des études du TABLEAU 1. Pour cela, on effectue le test d'homogénéité rappelé dans Brons (2006). La statistique du test d'homogénéité Q_{hom} se détermine comme indiqué dans l'équation (1.4).

$$Q_{hom} = \sum_i \frac{(e_i - \bar{e}_w)^2}{v_i} \quad (1.4)$$

Sous l'hypothèse d'homogénéité, Q_{hom} suit une distribution du chi-2 avec pour paramètre le nombre d'estimations diminué de 1 (soit $\chi^2(n-1)$). Les valeurs des moyenne et écart type pondérés et de la statistique de test sont reportées dans le TABLEAU 5.

TABLEAU 5 – Moyennes simple et pondérée de l'effect size, écarts types correspondants et statistique de test d'homogénéité

Moyenne simple de l'effect size (nombre d'observations)	-0,16 (50)
Moyenne pondérée de l'effect size $\overline{e_w}$ (nombre d'observations)	-0,12 (36)
Ecart type $\overline{V_w}$	9,1E-04
Statistique de test d'homogénéité*	2 897***

*Cette statistique suit sous l'hypothèse d'homogénéité une distribution $\chi^2(n-1)$, n étant le nombre d'estimations de l'effect size. Dans notre cas, n=36 estimations significatives de l'élasticité-densité, ce qui conduit à une valeur critique à 1 % du test égale à 67. L'hypothèse d'homogénéité est donc rejetée à 1 %.

Comme indiqué dans le TABLEAU 5, la statistique de test vaut 2897. Dans notre cas où n=36, la valeur critique de Q_{hom} à 1 % est 67 : il y a donc une probabilité inférieure à 1 % que l'hypothèse d'homogénéité soit confirmée. La moyenne pondérée est alors insuffisante pour fournir une approximation robuste de l'effet de la densité résidentielle sur la demande de transports et il est nécessaire de la combiner avec une étude plus approfondie des sources d'hétérogénéité des estimations de cet effet. L'exploration et l'identification de ces sources d'hétérogénéité est l'objet de la suite de ce chapitre.

b. Analyse de l'hétérogénéité systématique et significativité de l'impact de la densité sur la demande de transport

Cette sous-section analyse l'hétérogénéité de la significativité de l'impact de la densité sur la demande de transport parmi les études retenues. Pour ce faire, la question d'un éventuel biais de publication en fonction du caractère significatif ou non des résultats empiriques obtenus est tout d'abord explorée. Puis, dans un deuxième temps, l'analyse examine quelles sont les sources potentielles de significativité parmi les études.

Malgré le pourcentage élevé de 86 % d'études dites significatives parmi l'ensemble des études collectées, l'existence d'un biais de sélection nous empêcherait de conclure à un effet significatif de l'effet de la densité résidentielle sur la demande de transport. Or que peut-on dire de ce biais de sélection dans notre méta-échantillon ? Tout d'abord notons que faire l'hypothèse que la densité a un effet sur la demande de transport revient à supposer que l'élasticité-densité des déplacements des ménages est non nulle, et que, sous cette hypothèse, la précision des estimations de cette élasticité augmente alors avec la taille de l'échantillon considéré. Plus précisément, la valeur absolue du t-ratio¹⁰

¹⁰ Le t-ratio est la statistique de test utilisée pour contrôler la significativité d'une variable dépendante.

de l'estimation varie proportionnellement avec la racine carrée du nombre de degré de liberté¹¹ de cette estimation comme rappelé par Card & Krueger (1995) :

“[...] the absolute value of the t-ratio of the estimate should vary proportionally with the square root of the number of degrees of freedom[...]”, p. 239.

La FIGURE 1 montre l'évolution du t-ratio en fonction de la racine carrée du nombre de degré liberté des estimations de notre méta-base ne présentant pas de valeur manquante. Afin de tester la relation entre t-ratio et degré de liberté, nous avons réalisé une régression de la valeur absolue du t-ratio sur la racine carrée du nombre de degré de liberté : les résultats sont présentés TABLEAU 6 et le modèle estimé est également représenté sur la FIGURE 1.

FIGURE 1 - Relation entre valeur absolue du t-ratio et taille de l'échantillon pour les estimations considérées

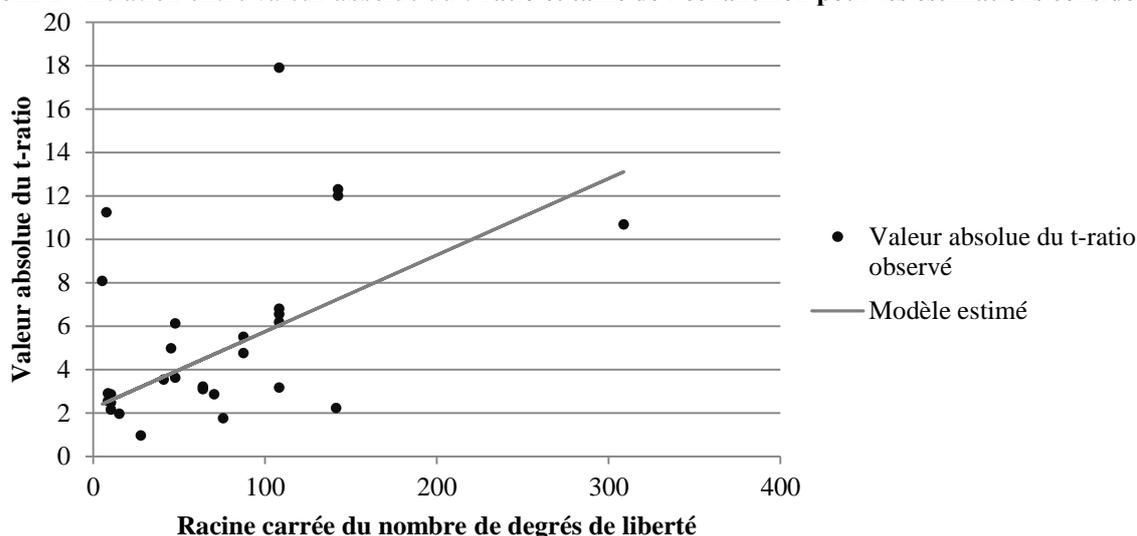


TABLEAU 6 – Résultat de la régression de la valeur absolue du t-ratio des estimations sur la racine carrée du nombre de degré de liberté

	Moyenne	Erreur type	Coefficient de régression	Ecart type
Racine carrée du nombre de degré de liberté	64	62	0,035***	0,0102155
Constante			2,22**	0,9046844
R-carré			0,27	
R-carré ajusté			0,25	
Nombre de méta-observations			34	

*: significatif à 10 % ; **: significatif à 5 % ; ***: significatif à 1 %.
Estimateur des Moindres Carrés Ordinaires utilisé.

La FIGURE 1 révèle une relation croissante entre t-ratio absolu et taille de l'échantillon, ce qui correspond à l'hypothèse d'un effet non nul de la densité sur les déplacements des ménages. Cette

¹¹ Le nombre de degré de liberté correspond aux nombres de coefficients à estimer dans la forme fonctionnelle à estimer moins le nombre de contraintes.

relation est confirmée par les résultats de la régression puisque la racine carrée du nombre de degré de liberté s'avère avoir un effet significatif et positif, avec un coefficient de 0,035, sur la valeur absolue du t-ratio des estimations de l'élasticité-densité de la demande de transport. Ces éléments ne permettent pas de rejeter l'hypothèse d'un effet significatif de la densité sur la demande de transport et ne permettent pas de conclure à l'existence d'un biais de sélection dans notre méta-échantillon.

Explorons maintenant plus en détails les facteurs pouvant influencer la significativité du rôle de la densité dans la formation de la demande de transport. Nous souhaitons notamment vérifier si les caractéristiques des méthodes économétriques ou des données de base ont un impact sur la significativité de la variable densité. Pour cela, nous avons construit un modèle discret visant à prédire la significativité de la densité en fonction des caractéristiques des études empiriques proposant son estimation. La variable dépendante, y , prend la valeur 1 lorsque l'estimation de l'effet de la densité sur les transports est significatif, et 0 sinon. y est modélisée en utilisant un modèle logit binaire.¹² La majorité des variables explicatives sont également binaires. Les résultats de l'estimation du modèle sont présentés dans le TABLEAU 7. On s'intéresse au rapport de la probabilité que y prenne la valeur 1 sur la probabilité que y prenne la valeur 0, c'est-à-dire à l'odd-ratio de y . Les coefficients reportés dans le tableau correspondent à l'impact des variables explicatives y sur son odd-ratio (rapport de chance).

TABLEAU 7—Résultats de l'estimation du modèle logit binaire visant à prédire la significativité de la densité dans la formation de la demande de transport

Variabiles explicatives	Odd-ratio	Ecart type	P>z
<i>Caractéristiques des modèles et des spécifications</i>			
Modèle à Equations Indépendantes	1,241	2,424	0,912
Prise en compte de l'effet de sélection	16,517	35,761	0,195
<i>Caractéristiques des données</i>			
Données de panel	2,375	7,130	0,773
Unité d'observation désagrégée	0,005*	0,016	0,072
Mobilité mesurée par l'énergie consommée	0,248	0,520	0,507
Déplacements en véhicules particuliers	0,577	1,109	0,775
Densité résidentielle infra-ville	184,916**	388,586	0,013
<i>Caractéristiques géographiques</i>			
Etats-Unis	28,886	70,102	0,166
<i>Variabiles de contrôle</i>			
Infrastructure de transport	1,176	2,010	0,925
Caractéristiques des véhicules particuliers	0,005**	0,010	0,015
Nombre d'observations du méta-échantillon		50	
Log de vraisemblance		-1,3862948	

*: significatif à 10 %; **: significatif à 5 %; ***: significatif à 1 %.

Le TABLEAU 7 révèle que trois variables semblent jouer un rôle dans la probabilité de la densité à être significative dans la formation de la demande de transport. Premièrement, l'échelle de mesure de la

¹² La probabilité que la variable y prenne la valeur 1 est modélisée par la fonction $\exp(\alpha X)/(1+\exp(\alpha X))$ où α est le vecteur de coefficients à estimer et X le vecteur des variables dépendantes

densité résidentielle : lorsque la densité est mesurée à un niveau infra-urbain, le ratio de la probabilité d'observer un effet significatif de la densité sur la probabilité d'observer un effet non significatif de la densité augmente de presque 185 : ce résultat indique que la majorité des mécanismes spatiaux en jeu dans la formation de la demande de transport surviennent au niveau inférieur à celui de l'agglomération. Deuxièmement, les estimations de l'effet de la densité sur les déplacements des ménages qui reposent sur des études menées à un niveau désagrégé, à savoir avec pour unité d'observation le ménage, l'individu ou bien le véhicule particulier, sont légèrement plus susceptibles de conclure à un effet significatif de la densité que les estimations menées à un niveau agrégé (ville, état ou pays). En effet l'odd-ratio observé augmente de 0,005 lorsque l'effet de la densité est estimé sur des données désagrégées. Face à la question de l'échelle pertinente d'analyse de l'impact des déterminants spatiaux sur les déplacements des ménages, les résultats précédents indiquent clairement que les données désagrégées de densité résidentielle et dans une moindre mesure de quantification de la mobilité sont plus à même de capter les mécanismes en jeu. Notamment, la variable spatiale à ce niveau de désagrégation permet de refléter l'offre de transport et la mesure de la mobilité ainsi désagrégée prend en compte les choix modaux correspondants, ce qui augmente la corrélation entre organisation de l'espace et déplacements. Ainsi, s'il a été démontré que les élasticités prix ou bien revenu peuvent indifféremment être estimées au niveau macro-économique ou bien au niveau micro-économique (Espey 1998), nos résultats suggèrent en revanche que les travaux à venir sur l'impact des déterminants spatiaux dans la demande de transport devraient privilégier les analyses à un niveau local.

On note également pour finir que l'odd-ratio de y augmente de 0,005 lorsque les caractéristiques des véhicules particuliers sont inclus dans l'estimation de l'effet de la densité sur les déplacements. Les caractéristiques des modèles et spécifications utilisées ainsi que la zone géographique étudiée ne semblent pas en revanche influencer la significativité de la densité dans la formation de la demande de transport.

c. Hétérogénéité systématique dans la valeur de l'*effect size*

Cette sous-section s'intéresse aux sources potentielles de variation systématique de la valeur de l'élasticité-densité de la demande de transport. Pour ce faire, on construit un modèle permettant d'estimer l'espérance de cette élasticité comme une fonction des caractéristiques des études primaires considérées. Deux types de modèles sont testés :

- i) Des modèles reposant sur l'hypothèse que l'ensemble des variations en dehors de l'erreur d'échantillonnage est systématique : les modèles *Ordinary Least Square* (OLS) autrement dit des moindres carrés ordinaires, *Weighted Least Square* (WLS) c'est-à-dire des moindres carrés pondérés et tobit. On se référera dans la suite de cette sous-section à ces modèles comme les modèles de Type 1 ;

- ii) Des modèles permettant de prendre en compte explicitement la corrélation potentielle entre les estimations provenant d'une même étude (dite corrélation intra-étude) en plus des variations systématiques et de l'erreur d'échantillonnage. Cette corrélation pourra être supposée constante entre estimations d'une même étude ou aléatoire. Il s'agira pour la suite des modèles de Type 2.

Les cinq modèles testés sont définis dans le TABLEAU 8, avec les notations suivantes : e_i représente l'estimation de l'*effect size* de la méta-observation i , \mathbf{x}_i est le vecteur des variables explicatives, $\boldsymbol{\beta}_i$ est le vecteur des coefficients à estimer, ε_i est le terme d'erreur. De plus, s fait référence au numéro de l'étude (sachant que certaines études fournissent plusieurs estimations de l'*effect size*), μ_s correspond à l'effet fixe intra-étude et δ_{is} est l'effet aléatoire intra-étude de la méta-observation i . Les résultats des estimations des modèles définis dans le TABLEAU 8 sont présentés TABLEAU 9.

TABLEAU 8 – Spécification des cinq modèles estimés

	Modèles	Spécification
	OLS avec écarts types robustes WLS	$e_i = \boldsymbol{\beta}_i' \mathbf{x}_i + \varepsilon_i$
Type 1	Tobit avec écarts types robustes	$\begin{cases} e_i = e_i^* & \text{if } e_i^* < 0 \\ e_i = 0 & \text{if } e_i^* > 0 \\ e_i^* = \boldsymbol{\beta}_i' \mathbf{x}_i + \varepsilon_i \end{cases}$
Type 2	Modèle à effet fixe Modèle à effet aléatoire	$e_{is} = \boldsymbol{\beta}_i' \mathbf{x}_i + \mu_s + \varepsilon_i$ $e_{is} = \boldsymbol{\beta}_i' \mathbf{x}_i + \delta_{is} + \varepsilon_i$

TABLEAU 9 – Estimations des modèles de l'élasticité-densité de la demande de transport

Variables	Type 1						Type 2			
	OLS Ec. Type robustes		WLS Coef.	Tobit Ec. Type robustes		Effet fixe		Effet aléatoire		
	Coef.	Ec. Type		Coef.	Ec. Type	Coef.	Ec. Type	Coef.	Ec. Type	Coef.
<i>Caractéristiques des modèles et spécifications</i>										
Equations Indépendantes	-0,070	0,241	0,161	0,125	-0,036	0,103	(dropped)		-0,070	0,145
Seemingly Unrelated Regressions	0,053	0,241	0,238*	0,111	0,073	0,088	-0,017	0,052	0,053	0,143
Structural Equations Model	0,074	0,201	0,203*	0,112	0,089	0,089	(dropped)		0,074	0,122
Effet de selection pris en compte	-0,056	0,091	-0,044	0,027	-0,088	0,056	-0,123**	0,052	-0,056	0,048
Spécification non log-log	-0,084	0,109	-0,149*	0,081	-0,080	0,052	-0,089	0,074	-0,084	0,061
<i>Caractéristiques des données</i>										
Données de panel	0,080	0,264	0,334**	0,105	0,129	0,121	(dropped)		0,080	0,143
Unité d'observation désagrégée	0,474**	0,148	0,403	0,332	0,389***	0,059	(dropped)		0,474***	0,097
Classe de densité	-0,007	0,193	-0,632	0,494	-0,272**	0,082	(dropped)		-0,007	0,123
Déplacements en énergie consommée	0,002	0,058	-0,015	0,011	0,006	0,032	-0,016	0,052	0,002	0,037
Déplacements en véhicules particuliers	0,007	0,131	0,409	0,751	0,132*	0,065	(dropped)		0,007	0,090
Densité résidentielle infra-ville	-0,520*	0,275	-0,144	0,238	-0,382**	0,134	-0,075	0,074	-0,520**	0,157
Densité résidentielle ville	-0,399	0,246	-0,069	0,238	-0,304**	0,131	(dropped)		-0,399**	0,137
Taille de l'échantillon primaire	-5,06E-07	2,79E-06	8,86E-06	1,27E-05	2,66E-06*	1,45E-06	-1,12E-06	1,27E-06	-5,06E-07	1,84E-06
<i>Caractéristiques géographiques</i>										
Etats-Unis	-0,243*	0,129	-0,404*	0,223	-0,238***	0,067	(dropped)		-0,243**	0,077
Europe	-0,236	0,222	0,371	1,026	0,088	0,094	(dropped)		-0,236	0,170
Monde	-0,223*	0,107	-0,367***	0,079	-0,243***	0,065	(dropped)		-0,223***	0,060
Zone infra-nationale	0,098	0,090	0,023	0,022	0,045	0,028	0,024	0,060	0,098*	0,059
Zone urbaine	0,154*	0,084	-0,032	0,175	0,085*	0,043	0,260**	0,091	0,154**	0,057
<i>Variables de contrôle</i>										
Infrastructure de transport	-0,152*	0,079	0,105	0,217	-0,043	0,039	-0,223**	0,074	-0,152**	0,058
Prix de l'énergie	0,213	0,134	(dropped)		0,179**	0,056	(dropped)		0,213**	0,093
Caractéristiques des véhicules privés	0,094	0,084	0,153	0,139	0,132**	0,047	0,132**	0,054	0,094**	0,045
<i>Autre</i>										
Calcul de l'auteur	0,071	0,173	0,062	0,150	0,102*	0,057	(dropped)		0,071	0,120
Constante	0,047	0,409	-0,507	1,083	-0,129	0,195	-0,124	0,076	0,047	0,223
AIC/BIC	-73,9/-35,1		-263,1/-236,6		-59,0/-13,2		-152,3/-133,7		-152,3/-133,7	
Nombre d'observations / Degré de liberté	40/23		35/17		50/24		40/11		40/11	
R-carré	0,882		0,995							
<i>Information complémentaire</i>					10 tronqués à droite		F-test que tout $u_s=0$ F(18,11)=1,77 (p-value=0,1682)		Corrélation intra-étude nulle $\delta_{is} DS^a$ 0,000 $\varepsilon_i DS^a$ 0,054	

^a DS: Deviation Standard

*: significatif à 10 %; **: significatif à 5 %; ***: significatif à 1 %.

Les modèles de Type 2 ont été construits sur l'hypothèse d'une dépendance intra-étude (corrélation entre les estimations provenant d'une même étude), qu'elle soit fixe pour le modèle à effet fixe ou bien aléatoire pour le modèle à effet aléatoire, alors que les modèles de Type 1 ne permettent pas cette dépendance. Cette dépendance n'est pas confirmée : dans la colonne du modèle à effet fixe du TABLEAU 9, la F-statistique testant si l'ensemble des u_s est nul a une p-value de 0,1682. L'hypothèse selon laquelle les effets fixes sont nuls n'est donc pas rejetée. De plus, la variance intra-étude est égale à 0 dans le modèle à effet aléatoire. Ces deux résultats indiquent que l'hypothèse d'une dépendance intra-étude n'est pas vérifiée. Les deux types de modèles 1 et 2 sont donc pertinents pour capturer les variations systématiques de la valeur de l'élasticité des déplacements à la densité résidentielle.

Les résultats présentés dans le TABLEAU 9 révèlent un rôle significatif des caractéristiques géographiques des bases de données primaires utilisées. Ainsi la région considérée pour l'estimation empirique de l'effet de la densité sur les transports a un impact sur la quantification de la relation entre mobilité et densité :

- i) l'*effect size* estimé aux États-Unis se confirme être significativement plus fort que celui des autres régions avec une l'élasticité-densité des déplacements plus élevée en absolu de 0,243 à 0,404 en fonction des modèles considérés, ce qui corrobore les résultats de l'analyse statistique présentée dans le TABLEAU 4. Les États-Unis ont connu une forte période d'expansion urbaine associée à la diffusion de la voiture, et présentent ainsi une interaction entre organisation spatiale et mobilité actuelle plus forte qu'en Europe où la construction et le développement des villes sont bien antérieurs ;
- ii) l'élasticité estimée sur des bases de données incluant différentes régions de la planète est également plus élevée en absolu de 0,223 à 0,367.

Le type de zone considérée importe également lorsque l'on s'intéresse aux sources de variation systématique de l'*effect size*. Les estimations conduites sur des zones urbaines uniquement mènent à des valeurs d'élasticité plus faibles en absolu de 0,085 à 0,260 par rapport à des estimations incluant également les zones rurales dans l'analyse empirique. Ce résultat met en évidence un élément important, à savoir en moyenne un impact relatif plus grand de l'organisation spatiale du territoire sur les déplacements dans les zones rurales par rapport aux zones urbaines.

Au-delà des considérations géographiques, les caractéristiques des données utilisées pour les estimations de l'*effect size* semblent également jouer un rôle par leur niveau d'agrégation et de désagrégation. Ainsi, l'analyse à l'échelle micro-économique, correspondant à une mesure de l'organisation spatiale infra-urbaine et une comptabilité de la mobilité au niveau du ménage, de l'individu ou du véhicule particulier, conduit dans le modèle OLS à une élasticité-densité plus élevée en valeur absolue de 0,046 (résultat de l'opération 0,420-0,572) : les estimations de l'effet de la densité sur la mobilité sont plus élevées lorsque les analyses sont conduites à un niveau désagrégé. Cette

différence s'explique à nouveau par le fait que ce niveau désagrégé permet de capter les caractéristiques de l'offre de transport et son influence sur le mode de transport des déplacements. La prise en compte de cette dépendance entre variété de l'offre et choix modal dans la relation entre densité et mobilité tend à faire augmenter l'amplitude de l'interaction espace-transport.

Le choix des variables de contrôle incluses dans les spécifications semble également jouer un rôle dans la valeur de l'estimation de l'*effect size*. D'une part, le modèle Type 1 OLS et les deux modèles Type 2 indiquent que le fait d'inclure les caractéristiques des infrastructures de transport lors de l'estimation de l'effet de la densité sur la mobilité des ménages conduit à une élasticité-densité plus forte en valeur absolue que lorsque ces informations ne sont pas incluses. Réciproquement, les estimations dans lesquelles aucune information concernant ces équipements n'est incluse conduisent à une élasticité-densité plus faible en valeur absolue de 0,152 à 0,223. Ce résultat suggère que l'effet indirect de la densité sur la mobilité à travers les infrastructures de transport est négatif : un accroissement de la densité résidentielle modifie les équipements de telle sorte à induire une augmentation des déplacements des ménages, en les facilitant par exemple avec de meilleures infrastructures. D'autre part, la valeur absolue de l'élasticité-densité diminue de 0,094 à 0,132 lorsque les caractéristiques de véhicules (principalement le nombre de véhicules) sont prises en compte dans les spécifications visant à estimer l'impact de l'organisation spatiale sur la mobilité. Ce résultat confirme l'hypothèse selon laquelle une densité résidentielle plus élevée influence les caractéristiques des véhicules particuliers de telle sorte à induire une réduction de la demande de transport et de la consommation énergétique associée.

En ce qui concerne les caractéristiques des modèles et des spécifications, elles ne semblent pas jouer un rôle significatif dans la valeur de l'estimation de l'effet de la densité sur la mobilité, excepté dans le modèle où les méta-observations sont pondérées par l'inverse de leur variance. L'*effect size* ne présente pas non plus de différence significative en fonction de la prise en compte ou non de l'effet de sélection¹³ dans la procédure d'estimation, excepté pour le modèle tobit. Dans ce dernier, le coefficient négatif de -0,123 de la variable booléenne « prise en compte de l'effet de sélection » n'a pas le signe attendu si l'on fait l'hypothèse d'une relation bilatérale entre densité et mobilité. En effet, le fait de contrôler le mécanisme de sélection permet d'isoler l'impact de la densité sur les déplacements de l'impact des déplacements sur la densité et de le quantifier sans risque de surestimation. Ce résultat négatif confirme en revanche la thèse de Chatman (2009) selon qui la direction de l'effet du processus de *self selection* n'est pas déterminé.

Pour finir, les résultats du TABLEAU 9 ne révèlent pas un effet significatif de l'unité de mesure des déplacements sur l'*effect size* : aucune différence significative n'apparaît entre les élasticité-

¹³ L'effet de sélection fait référence au choix des individus de se localiser en fonction de leurs préférences pour des zones à faible ou haute densité résidentielle, préférences qui influencent aussi leurs déplacements. L'hypothèse initiale d'effet unidirectionnel de la densité sur la demande de transport n'est alors pas vérifiée, et l'effet de sélection introduit une interaction bilatérale entre densité et mobilité des ménages. Il y a alors un biais dans les estimations de l'effet de la densité sur les déplacements si cet effet de sélection n'est pas pris en compte.

densité provenant d'études quantifiant la mobilité en distance parcourue (D) et les élasticités-densité provenant d'études quantifiant la mobilité en énergie consommée (E). Or ces deux variables D et E sont liées par une troisième variable γ , l'efficacité énergétique représentant la quantité d'énergie nécessaire pour parcourir une distance donnée (équation (1.5)). L'élasticité-densité de la distance parcourue (e_D), de l'énergie consommée (e_E) et de l'efficacité énergétique (e_γ) vérifient donc la relation définie dans l'équation (1.6).

$$E = D \cdot \gamma \quad (1.5)$$

$$e_E = e_D + e_\gamma \quad (1.6)$$

Certaines études concluent à une valeur négative de e_γ , reflétant ainsi une augmentation de l'efficacité énergétique des véhicules avec la densité résidentielle (Fang 2008), alors que d'autres ne trouvent pas d'éléments significatif justifiant ce mécanisme (Karathodorou et al. 2010). C'est cette deuxième thèse que notre analyse vient nourrir puisque nos résultats indiquent une absence d'impact significatif de l'unité de mesure des déplacements sur l'élasticité-densité de la mobilité. L'effet de l'organisation spatiale sur l'efficacité énergétique unitaire des véhicules peut donc être considérée comme négligeable lorsque l'on analyse la demande de transport.

V. CONCLUSION

Ce chapitre s'intéresse aux déterminants spatiaux de la consommation énergétique des ménages, et plus particulièrement au rôle de la densité résidentielle dans la formation de la demande de transport. La littérature existante est explorée à l'aide de méta-analyses : le paramètre retenu pour mesurer l'effet de la forme urbaine sur la mobilité est l'élasticité-densité des déplacements et une méta-base de données de 50 estimations comparables de cette élasticité, issues de 24 études distinctes est constituée. La moyenne de l'élasticité-densité des déplacements sur notre méta-échantillon est de -0,16, pour une moyenne pondérée (par l'inverse de la variance) de -0,12. Aucune preuve de biais de publication n'est repérée dans les études sélectionnées, ce qui assure la robustesse de notre travail méta-analytique.

L'analyse de significativité révèle que les données désagrégées, pour la mesure des déplacements et de la densité résidentielle, sont plus à même de capter les mécanismes en jeu entre déterminants spatiaux et mobilité. C'est donc cette typologie de données que devraient privilégier les travaux empiriques à venir s'intéressant au lien forme urbaine et transport. Au-delà du débat de l'échelle pertinente d'analyse, le mécanisme causal d'impact entre densité et déplacements est spécifié : les caractéristiques des véhicules, dont notamment le nombre de véhicules, y jouent un rôle significatif contrairement à l'efficacité énergétique unitaire des véhicules qui n'apparaît pas affectée par la densité.

Pour finir, les caractéristiques géographiques ne sont pas anodines lorsque l'on parle des déterminants spatiaux de la demande de transport et revêtent deux implications politiques principales. La première concerne la prudence dont faire preuve lorsque l'on souhaite généraliser sur différentes régions des résultats d'estimation de l'impact de la densité sur la mobilité. En effet, les zones géographiques étudiées ont un impact sur l'ampleur du lien entre organisation spatiale et déplacements, que notre analyse révèle notamment plus forte aux Etats-Unis qu'en Europe. Promouvoir la diversité géographique dans les futurs travaux permettrait d'affiner ces résultats. La deuxième implication politique concerne l'effet comparativement plus important de l'organisation spatiale sur la mobilité dans les zones rurales que dans les zones urbaines : ce résultat met en évidence l'intérêt d'intégrer et de cibler le fort potentiel de réduction des transports dans les zones rurales dans les analyses.

Ainsi, nourri par la littérature existante, ce chapitre en effectue une synthèse pour produire des conclusions qualitatives et quantitatives sur l'impact de l'organisation spatiale sur la mobilité et rappelle l'importance des déterminants spatiaux dans la maîtrise de la demande énergétique. Il souligne l'impact significatif et négatif de la densité résidentielle sur les déplacements et met en évidence l'intérêt de renforcer la diversité géographique des régions considérées et d'inclure les zones rurales dans les analyses.

Ce chapitre permet de confirmer le rôle de l'espace sur la mobilité des ménages, ce qui donne un premier élément de réponse à la question plus générale de son effet sur la demande énergétique des ménages. Il ouvre la question de sa quantification dans le cas particulier de la France et interroge sur la place des zones rurales dans un pays où elles sont importantes. Constituant un enjeu en termes d'implication politique, ces deux points sont développés dans le prochain chapitre, qui propose une analyse économétrique à l'échelle désagrégée de l'impact de la densité sur la formation de la consommation d'énergie liée aux déplacements des ménages français.

BIBLIOGRAPHIE

- Albalade, D. & Bel, G., 2009. *Factors explaining urban transport systems in large European cities: A cross-sectional approach*, University of Barcelona, Research Institute of Applied Economics. Available at: <http://ideas.repec.org/p/ira/wpaper/200905.html> [Consulté le novembre 28, 2011].
- Alonso, W., 1964. *Location and land use: Toward a general theory of land rent*, Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Bento, A.M. et al., 2005. The Effects of Urban Spatial Structure on Travel Demand in the United States. *Review of Economics and Statistics*, 87(3), p.466-478.
- Berkey, C.S. et al., 1995. A random-effects regression model for meta-analysis. *Statistics in Medicine*, 14(4), p.395-411.
- Birge, R.T., 1932. Probable Values of e , h , e/m , and α . *Physical Review*, 40(2), p.228-261.
- Böckenhoff, A. & Hartung, J., 1998. Some Corrections of the Significance Level in Meta-Analysis. *Biometrical Journal*, 40(8), p.937-947.
- Brons, M., 2006. *Meta-Analytical Studies in Transport Economics: Methodology and Applications*.
- Brownstone, D. & Golob, T.F., 2009. The impact of residential density on vehicle usage and energy consumption. *Journal of Urban Economics*, 65(1), p.91-98.
- Card, D. & Krueger, A.B., 1995. Time-Series Minimum-Wage Studies: A Meta-analysis. *The American Economic Review*, 85(2), p.238-243.
- Cervero, R. & Murakami, J., 2010. Effects of built environments on vehicle miles traveled: evidence from 370 US urbanized areas. *Environment and Planning A*, 42(2), p.400 – 418.
- Van de Coevering, P. & Schwanen, T., 2006. Re-evaluating the impact of urban form on travel patterns in Europe and North-America. *Transport Policy*, 13(3), p.229-239.
- Cooper, H.M., Hedges, L.V. & Valentine, J.C., 2009. *The handbook of research synthesis and meta-analysis*, Russell Sage Foundation.
- Dahl, C.A., 1978. American energy consumption -- Extravagant or economical?: A study of gasoline demand. *Resources and Energy*, 1(4), p.359-373.
- Daniel Chatman, 2009. Residential choice, the built environment, and nonwork travel: evidence using new data and methods. *Environment and Planning A*, 41(5), p.1072 – 1089.
- Egger, M. & Smith, G.D., 1997. Meta-Analysis. Potentials and promise. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, 315(7119), p.1371-1374.
- Elvik, R., 1995. Meta-analysis of evaluations of public lighting as accident countermeasure. *Transportation research record*, (1485), p.112-123.
- Emrath, P. & Liu, F., 2008. Vehicle Carbon Dioxide Emissions and the Compactness of Residential Development. *Cityscape: A Journal of Policy Development and Research*, 10(3), p.185-202.
- Espey, M., 1998. Gasoline demand revisited: an international meta-analysis of elasticities. *Energy Economics*, 20(3), p.273-295.

- Ewing, R. & Cervero, R., 2010. Travel and the Built Environment. *Journal of the American Planning Association*, 76, p.265-294.
- Ewing, R. & Cervero, R., 2001. Travel and the Built Environment: A Synthesis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, p.87-114.
- Fang, H.A., 2008. A discrete-continuous model of households' vehicle choice and usage, with an application to the effects of residential density. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9), p.736-758.
- Frank, L. et al., 2010. Carbonless footprints: Promoting health and climate stabilization through active transportation. *Preventive Medicine*, 50(Supplement 1), p.S99-S105.
- Giuliano, G. & Narayan, D., 2003. Another Look at Travel Patterns and Urban Form: The US and Great Britain. *Urban Studies*, 40(11), p.2295 -2312.
- Glaeser, E.L. & Kahn, M.E., 2010. The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of Urban Economics*, 67(3), p.404-418.
- Glass, G.V., 1976. Primary, Secondary, and Meta-Analysis of Research. *Educational Researcher*, 5(10), p.3-8.
- Glass, G.V., McGaw, B. & Smith, M.L., 1981. *Meta-analysis in social research*, Sage Publications.
- Goodwin, P., Dargay, J. & Hanly, M., 2004. Elasticities of Road Traffic and Fuel Consumption with Respect to Price and Income: A Review. *Transport Reviews*, 24(3), p.275-292.
- Grazi, F., van den Bergh, J.C.J.M. & van Ommeren, 2008. An Empirical Analysis of Urban Form, Transport and Global Warming. *The Energy Journal*, 29(4), p.97-122.
- Groot, W. & Maassen van den Brink, H., 2000. Overeducation in the labor market: a meta-analysis. *Economics of Education Review*, 19(2), p.149-158.
- Guo, J.Y. & Gandavarapu, S., 2010. An economic evaluation of health-promotive built environment changes. *Preventive Medicine*, 50(Supplement 1), p.S44-S49.
- Hardy, R.J. & Thompson, S.G., 1996. A likelihood approach to meta-analysis with random effects. *Statistics in Medicine*, 15(6), p.619-629.
- Hedges, L.V. & Olkin, I., 1985. *Statistical methods for meta-analysis*, Academic Press.
- Heres-Del-Valle, D. & Niemeier, D., 2011. CO2 emissions: Are land-use changes enough for California to reduce VMT? Specification of a two-part model with instrumental variables. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(1), p.150-161.
- Holden, E. & Norland, I.T., 2005. Three Challenges for the Compact City as a Sustainable Urban Form: Household Consumption of Energy and Transport in Eight Residential Areas in the Greater Oslo Region. *Urban Stud*, 42(12), p.2145-2166.
- Hunt, M.M., 1997. *How science takes stock: the story of meta-analysis*, Russell Sage Foundation.
- Karathodorou, N., Graham, D.J. & Noland, R.B., 2010. Estimating the effect of urban density on fuel demand. *Energy Economics*, 32(1), p.86-92.

- Leck, E., 2006. The Impact of Urban Form on Travel Behavior: A Meta-Analysis. *Berkeley Planning Journal*, 19.
- Levinson, D.M. & Kumar, A., 1997. Density and the journey to work. *Growth and Change*, 28(2), p.147-172.
- Li, Y., Shi, L. & Daniel Roth, H., 1994. The bias of the commonly-used estimate of variance in meta-analysis. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 23(4), p.1063-1085.
- Liddle, B., 2004. Demographic Dynamics and Per Capita Environmental Impact: Using Panel Regressions and Household Decompositions to Examine Population and Transport. *Population and Environment*, 26(1), p.23-39.
- Long, J.B.D. & Lang, K., 1992. Are all Economic Hypotheses False? *Journal of Political Economy*, 100(6), p.1257-1272.
- Morris, C.N. & Normand, S.L., 1992. Hierarchical models for combining information and for meta-analyses. In J. M. Bernardo et al., éd. *Bayesian Statistics 4*. Oxford University Press. Oxford, p. 321-344.
- Niemeier, D. & Rutherford, G., 1994. Nonmotorized Transportation, NPTS: Travel Mode Special Reports. *Washington, DC : Report*.
- Olkin, I., 1992. Meta-Analysis: Methods for Combining Independent Studies - Editor's Introduction. *Statistical Science*, 7(2), p.226-226.
- Platt, R.W., Leroux, B.G. & Breslow, N., 1999. Generalized linear mixed models for meta-analysis. *Statistics in Medicine*, 18(6), p.643-654.
- Rosenthal, R. & DiMatteo, M.R., 2001. Meta-analysis: recent developments in quantitative methods for literature reviews. *Annual Review of Psychology*, 52, p.59-82.
- Sacks, H.S. et al., 1987. Meta-analyses of randomized controlled trials. *The New England Journal of Medicine*, 316(8), p.450-455.
- Schimek, P., 1996a. Gasoline and Travel Demand Models Using Time Series and Cross-Section Data from United States. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1558(-1), p.83-89.
- Schimek, P., 1996b. Household Motor Vehicle Ownership and Use: How Much Does Residential Density Matter? *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1552(-1), p.120-125.
- Shim, G.-E. et al., 2006. The relationship between the characteristics of transportation energy consumption and urban form. *The Annals of Regional Science*, 40(2), p.351-367.
- Sidik, K. & Jonkman, J.N., 2003. On Constructing Confidence Intervals for a Standardized Mean Difference in Meta-analysis. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 32(4), p.1191-1203.
- Simpson, R.J.S. & Pearson, K., 1904. Report On Certain Enteric Fever Inoculation Statistics. *The British Medical Journal*, 2(2288), p.1243-1246.

- Smith, M.L. & Glass, G.V., 1977. Meta-analysis of psychotherapy outcome studies. *The American Psychologist*, 32(9), p.752-760.
- Smith, M.L., Glass, G.V. & Miller, T.I., 1980. *The benefits of psychotherapy*, Johns Hopkins University Press.
- Stanley, T.D., 2001. Wheat from Chaff: Meta-Analysis as Quantitative Literature Review. *The Journal of Economic Perspectives*, 15(3), p.131-150.
- Stanley, T.D., Doucouliagos, C. & Jarrell, S.B., 2008. Meta-regression analysis as the socio-economics of economics research. *Journal of Socio-Economics*, 37(1), p.276-292.
- Su, Q., 2011. The effect of population density, road network density, and congestion on household gasoline consumption in U.S. urban areas. *Energy Economics*, 33(3), p.445-452.
- Su, Q., 2010. Travel demand in the US urban areas: A system dynamic panel data approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(2), p.110-117.
- Thompson, S. & Pocock, S., 1991. Can meta-analyses be trusted? *The Lancet*, 338(8775), p.1127-1130.
- Train, K., 1986. *Qualitative choice analysis: theory, econometrics, and an application to automobile demand*, MIT Press.
- Woodward, R.T. & Wui, Y.-S., 2001. The economic value of wetland services: a meta-analysis. *Ecological Economics*, 37(2), p.257-270.
- Zegras, C., 2010. The Built Environment and Motor Vehicle Ownership and Use: Evidence from Santiago de Chile. *Urban Studies*, 47(8), p.1793 -1817.
- Zhou, B. (Brenda) & Kockelman, K., 2008. Self-Selection in Home Choice: Use of Treatment Effects in Evaluating Relationship Between Built Environment and Travel Behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2077, p.54-61.

Chapitre 2 :

Localisation, Energie et Transport : Le Cas des Ménages Français

I. INTRODUCTION

En démontrant statistiquement la pertinence de la relation entre organisation spatiale du territoire, demande de transport et consommation d'énergie associée, le chapitre précédent a également souligné l'importance des spécificités territoriales dans l'évaluation de ce mécanisme. Ces résultats ont deux implications principales dans le cadre de l'intervention publique en faveur de la sécurité énergétique et de la lutte contre le changement climatique. Tout d'abord, ils assoient la légitimité des pouvoirs locaux à mettre en place des actions visant à limiter la dépendance aux véhicules particuliers et aux énergies fossiles et à s'interroger sur leurs modalités de mise en œuvre. Parallèlement, les conclusions du premier chapitre mettent en évidence un lien entre efficacité des efforts décentralisés et caractéristiques locales : tous les territoires n'apparaissent pas égaux face au levier de planification et la généralisation de travaux empiriques régionalisés est délicate.

Ce chapitre a pour objectif d'approfondir la question du rôle des politiques locales dans le contexte de sobriété énergétique sur le territoire français. Il s'agit de proposer des éléments quantitatifs visant à évaluer le potentiel des interventions locales en termes de réduction des consommations d'énergie du secteur des transports. Pour cela, l'analyse et l'estimation empirique de l'interaction entre forme urbaine et demande de transports des ménages sont appuyées par une étude des différents mécanismes par lesquels cette interaction se produit.

Reposant sur l'utilisation de méthodes économétriques, ce travail exploite des bases de données désagrégées afin d'assurer un niveau d'échelle optimal pour capter les mécanismes en jeu entre organisation spatiale et déplacements des ménages. La prise en compte de l'ensemble du territoire métropolitain français permet d'intégrer à l'analyse un éclairage sur le rôle des zones rurales, ce qui est peu souvent le cas dans les études similaires.

Après une synthèse de la littérature s'intéressant au lien entre organisation spatiale et demande de transport qui complète le travail méta-analytique présenté dans le premier chapitre de cette thèse, ce deuxième chapitre détaille les différents mécanismes d'impact des choix de localisation sur la mobilité et dessine ainsi le cadre conceptuel de l'analyse économétrique. Données et méthodes sont présentées à la section IV alors que la section V développe les résultats empiriques obtenus. Pour finir, interprétations et éléments de conclusion clôturent ce chapitre.

II. SYNTHÈSE DE LA LITTÉRATURE SUR LE LIEN ENTRE ORGANISATION SPATIALE ET TRANSPORT

La question de la relation entre organisation spatiale et transport a fait l'objet de nombreuses recherches académiques comme nous avons déjà eu l'occasion de le souligner. D'un point de vue théorique, ce sont les travaux de Von Thünen (1826), puis le développement plus d'un siècle après du modèle séminal d'économie urbaine d'Alonso (1964) qui posent les fondements du lien entre déplacements des ménages et localisation des activités économiques : dans un cadre stylisé unidirectionnel où tous les emplois sont regroupés au même endroit, dit *Central Business District (CBD)*, les choix de localisation des ménages autour du *CBD* résultent d'un arbitrage entre deux coûts, celui du transport et celui du logement. Le coût du transport étant proportionnel à la distance au centre (distance domicile-travail des ménages), forme urbaine et demande de mobilité sont toutes deux endogènes au modèle et liées par les dépenses relatives en logement et en transports. Le contexte de crise énergétique des années 1970 a fait émerger la nécessité d'évaluer ce mécanisme d'interaction entre localisation et déplacements malgré la complexité de la dimension spatiale réelle de l'économie sur le territoire. Et l'effort de prise en compte et de représentation de cette complexité spatiale visant à décrire au mieux les déterminants géographiques de la mobilité des ménages a nourri un débat autour des différents indicateurs de formes urbaines.

a. Mobilité et espace : un système complexe à variables multiples

1) Multiplicité des indicateurs d'organisation spatiale

Le premier indicateur majoritairement diffusé est la densité : densité résidentielle d'une part pour mesurer le regroupement des ménages sur une surface donnée et densité d'emplois d'autre part. Validé par les modèles traditionnels d'économie urbaine reposant sur une représentation mono-centrique de la ville, cet indicateur est d'autant plus utilisé qu'il repose sur des données relativement accessibles – population et emplois. Il est employé à différentes échelles, tant au niveau agrégé, c'est-à-dire régional ou national¹⁴, que désagrégé, c'est-à-dire urbain ou infra-urbain (Grazi et al. 2008 ; Handy et al. 2005). Du débat autour de la pertinence de cet indicateur pour représenter l'organisation spatiale, il émerge que la densité, calculée à une échelle désagrégée, constitue un proxy robuste pour capturer les mécanismes en jeu dans la formation de la demande de transport¹⁵.

Afin d'affiner la représentation de la complexité des formes urbaines, d'autres indicateurs sont également utilisés pour capturer différentes caractéristiques relatives à la compacité, la géométrie ou bien encore la mixité de l'organisation spatiale des activités économiques. Une synthèse des

¹⁴ Voir par exemple Cervero & Gorham (1995) ; Newman & Kenworthy (1989).

¹⁵ Voir par exemple Niemeier & Rutherford (1994), Schimek (1996) et les conclusions de la méta-analyse présentée dans le premier chapitre de cette thèse.

principales variables spatiales utilisées ainsi que les références d'études dans lesquelles elles ont été employées est présentée dans le TABLEAU 1.

TABLEAU 1 – Synthèse des principaux indicateurs de forme urbaine utilisés dans la littérature

	Description	Indicateurs	Références
Compacité	Mesure du caractère regroupé d'une organisation spatiale par rapport à un caractère étalé	- Densité résidentielle (d'individus, de ménages, de logements)	Se reporter au TABLEAU 1 du chapitre 1.
		- Densité d'emplois	(Boarnet et al. 2008 ; Boarnet & Sarmiento 1998 ; Cervero & Murakami 2010 ; Ewing 1995 ; Frank & Pivo 1995 ; Greenwald & Boarnet 2001 ; Kockelman 1997 ; Sun et al. 1998 ; Zhou & Kockelman 2008)
		- Ratio de surface commerciale sur surface au sol	(Bradley et al. 2007)
		- Centralité de la population ; distance au centre ville	(Bento et al. 2005 ; Boarnet et al. 2003 ; Boarnet et al. 2008 ; Cervero 2006 ; Cervero & Duncan 2003 ; Daniel Chatman 2009 ; Nass 2005 ; Zegras 2010)
Géométrie	Mesure des caractéristiques géométriques d'une organisation spatiale	- Circularité	(Bento et al. 2005)
		- Taille de l'agglomération	(Emrath & Liu 2008 ; Giuliano & Narayan 2003 ; Su 2010 ; Su 2011)
Mixité	Mesure de l'intensité du mélange d'utilisation des sols d'une organisation spatiale par rapport à une configuration cloisonnant les activités par typologie	- Ratio densité résidentielle sur densité d'emplois ; ratio surface résidentielle sur surface commerciale	(Bento et al. 2005 ; Ewing et al. 1996 ; Sun et al. 1998)
		- Distance du lieu de résidence à un magasin	(Cao et al. 2006 ; Handy & Clifton 2001 ; Handy et al. 2006 ; Shay et al. 2006)

Comme mesure de la compacité d'une organisation spatiale, on trouve, au-delà des densités résidentielles et d'emplois, le ratio de la surface commerciale sur la surface au sol ou la centralité de la population ou la distance au centre-ville. Ces deux dernières variables ont vocation à mesurer le regroupement des habitants d'une agglomération autour de son point central. La géométrie des formes urbaines est également considérée dans l'étude de la formation de la demande de transport : le paramètre de circularité mesure l'adéquation entre la surface de l'agglomération réelle et le disque

caractéristique du modèle mono-centrique ; la taille de l'agglomération est susceptible d'expliquer les déplacements des ménages. Enfin, les aspects de mixité ou de diversité sont aussi utilisés pour décrire une typologie d'organisation spatiale. L'objectif d'indicateurs tels que le ratio population sur nombre d'emplois ou distance à un magasin est de mesurer l'intensité du mélange des activités par rapport à une situation extrême de cloisonnement où chaque secteur se développe sur une zone géographique qui lui est exclusivement réservée.

Si le TABLEAU 1 propose une synthèse des indicateurs les plus utilisés dans l'évaluation de l'impact de la forme urbaine sur la demande de transport, il ne constitue pas une liste exhaustive : notamment certaines études construisent et proposent leur propre variable de forme urbaine, intégrant généralement plusieurs dimensions individuelles captées par des indicateurs spécifiques. C'est le cas par exemple d'indicateurs d'étalement urbains parmi lesquels certains sont construits sur des mesures de densités (Fulton et al. 2001 ; Lopez & Hynes 2003 ; Burchfield et al. 2005) alors que d'autres intègrent plusieurs dimensions de compacité, géométrie et mixité (Galster et al. 2001 ; Ewing et al. 2003 ; Wolman et al. 2005).

2) Accessibilité et infrastructures de transport

En complément des variables dites de forme urbaine et toujours dans l'objectif de représenter le territoire et ses caractéristiques, des indicateurs d'accessibilité ou d'équipements sont souvent employés pour tenter d'expliquer la mobilité des ménages. Il s'agit de quantifier les facilités de déplacements qu'offre une ville ou une zone et d'évaluer l'impact de ces facilités (ou absence de facilités) sur la demande de transport. Parfois inclus parmi les variables spatiales de forme urbaine, ce paramètre d'accessibilité mesure plutôt en général le taux d'équipement en termes d'infrastructures de transports du territoire considéré. En ce sens, il est doublement lié à l'organisation spatiale : d'une part il dépend des choix de localisation des agents économiques qui guident les décisions d'investissement des autorités locales en matière de transport ; et d'autre part il influence la localisation des différentes activités économiques par les possibilités de déplacements qu'il reflète. Parmi les indicateurs d'accessibilité, on compte entre autres la distance minimale du domicile à un arrêt de bus ou de métro, la densité de route ou la densité de voies à grande vitesse¹⁶.

3) Complexité de la mobilité

Tout comme la représentation d'une réalité spatiale est complexe, la mesure de la mobilité nécessite un double effort de qualification et de quantification afin d'être précis dans la définition de ce qui est étudié. Les déplacements se caractérisent par motivation (travail versus loisir), par mode de transport et par une unité de mesure.

¹⁶ Karathodorou et al. (2010) utilisent ainsi la longueur totale de route pour 1000 habitants et le nombre de siège-km de transports en commun par habitant.

Les déplacements majoritairement étudiés lorsque l'on s'intéresse à la question de l'impact de l'organisation spatiale sur la demande de transport sont les déplacements dont la motivation est professionnelle¹⁷. Représentant environ la moitié de l'ensemble des déplacements des ménages selon Dender (2003), on les qualifie également parfois de déplacements obligatoires. Il s'agit de déplacements contraints et réguliers, intervenant pour cette raison souvent dans les choix de localisation des ménages, et c'est donc ce type de déplacements que l'on espère pouvoir contribuer à maîtriser par la planification urbaine. Les déplacements non obligatoires, dits de loisirs par opposition aux trajets domicile-travail, sont également présents dans la littérature (Boarnet et al. 2003 ; Boarnet & Greenwald 2000 ; Cao et al. 2009 ; Chatman 2003). En fait, s'ils relèvent bien de choix non « contraints » par rapport au travail, ils s'exercent dans un jeu de contraintes spatiales et d'accès à divers modes de déplacement qui relèvent bien elles aussi de l'organisation spatiale et des choix et comportements qui y ont présidé.

Pour l'ensemble de ces déplacements, on distingue trois modes de transports principaux : i) les véhicules particuliers regroupant les voitures et les deux-roues à moteur ; ii) les transports publics incluant le bus et les réseaux ferrés ; et iii) les modes doux comptant la marche à pied et le vélo. Les trajets en véhicules particuliers sont ceux ayant suscité le plus d'intérêt étant donné leur lien avec la consommation de carburant des ménages. La méta-analyse de Ewing & Cervero (2010) recense ainsi 55 études s'intéressant à ce type de déplacements et celle de Leck (2006) 19. Transports en commun et modes doux sont toutefois également présents dans la littérature puisque dans les mêmes travaux de Leck (2006) et Ewing & Cervero (2010) sont mentionnées respectivement 34 et 7 références empiriques pour le premier mode, et 54 et 5 pour le deuxième. La représentation quantitative des modes de transport se fait à travers plusieurs unités de mesure :

- *la distance parcourue* : il s'agit de la distance effective du trajet, rapportée à l'individu ou bien au véhicule utilisé ;
- *l'énergie consommée* (et/ou émissions de Gaz à Effet de Serre) : cette mesure suppose une évaluation du besoin énergétique par kilomètre parcouru et par individu du mode de transport utilisé. Dans le cas particulier des modes doux, l'énergie nécessaire pour le trajet est celle dépensée par le corps humain (Frank et al. 2010) ;
- plus rarement *le temps de transport* (van de Coevering & Schwanen 2006 ; Yoon et al. 2008) : évaluant les déplacements par le temps passé à se déplacer, cette mesure dépend elle aussi du mode de transport utilisé par l'intermédiaire de la vitesse moyenne de celui-ci (avec prise en compte de la congestion éventuelle).

Le *nombre de voyages effectués*, parfois étudié également, apporte une information complémentaires aux unités de mesure plus traditionnellement utilisées pour mesurer les déplacements (Guo et al. 2007 ; Kitamura et al. 1997 ; Souche 2010).

¹⁷ Voir par exemple Cervero & Gorham (1995), Grazi et al. (2008), Levinson & Kumar (1997), Muñoz & Galindo (2005).

b. Hypothèse de causalité : effet de sélection

Toutes les études ne distinguent pas clairement entre corrélation statistique et causalité dans l'analyse de l'effet de la forme urbaine sur les transports (Handy et al. 2005). Autrement dit, elles ne précisent pas toujours le sens de la relation entre déplacements et organisation spatiale alors que d'autres vérifient que la relation entre les deux variables considérées est telle que les choix de transport des individus sont le résultat de la forme urbaine et non l'inverse. Dans le cas des mécanismes que nous étudions dans ce chapitre, la question de la causalité est pertinente si l'on pense au rôle des préférences des ménages dans leur choix de localisation. Ainsi, par exemple, les individus pour qui il n'est pas désagréable de conduire, ou bien même qui apprécient le temps passé au volant de leur véhicule, sont susceptibles de choisir d'habiter plus loin de leur lieu de travail, dans des zones où les coûts de logement sont bas, que les autres individus pour qui le coût du transport n'est pas atténué par leurs préférences personnelles. Ce phénomène est connu dans la littérature sous le nom de « *self-selection effect* » ou encore « *self-sorting effect* » et regroupe l'ensemble des mécanismes selon lesquelles les préférences individuelles, qu'elles concernent le style de vie, l'accès aux aménités ou encore la sécurité, jouent un rôle significatif dans le choix final de localisation des ménages.

Le risque de ne pas prendre en compte l'effet de sélection est d'aboutir à des conclusions inexactes concernant l'amplitude de l'impact de l'organisation spatiale sur la demande de transport. En effet, alors que la plupart des estimations économétriques reposent sur l'hypothèse d'exogénéité ou encore d'indépendance de la variable de forme urbaine, cette hypothèse ne tient plus si le mécanisme de *self-selection* se vérifie. Les préférences des ménages constituent alors une troisième variable influençant à la fois mobilité et choix de localisation ; la relation de stricte causalité entre ces deux dernières n'est pas assurée du fait de l'endogénéité potentielle de la variable de forme urbaine. Dans ce cas, les méthodes d'estimation économétrique standard, en imputant l'effet de *self-selection* à la variable de forme urbaine, devraient conduire à une surestimation de l'impact de l'organisation spatiale sur la demande de transport : les ménages appréciant conduire se localisent loin des lieux de travail, en zones peu denses, ce qui tend à amplifier la relation négative entre densité de population et demande de transport. Certains auteurs défendent pourtant la thèse opposée, selon laquelle la prise en compte du phénomène de *self-selection* pourrait conduire à une sous-estimation de l'influence de l'environnement construit sur les déplacements des ménages (D. G. Chatman 2009). La direction du biais potentiel induit par l'expression des préférences individuelles dans la formation de la demande de transport suscite des interrogations mais la nécessité de prendre en compte ce biais est reconnue (Bhat & Guo 2007 ; Cao et al. 2009 ; Frank et al. 2007 ; Handy et al. 2006).

On retrouve principalement deux méthodes pour contrôler ce mécanisme de *self-selection*. D'une part, l'utilisation de variables instrumentales permet une évaluation non biaisée du mécanisme étudié en cas d'endogénéité potentielle (Wooldridge 2002). Le principe repose sur l'estimation de l'impact de la forme urbaine sur la mobilité à travers une variable exogène/indépendante corrélée à la

forme urbaine et non directement corrélée à la mobilité. D'autre part, la littérature compte des études présentant une formulation explicite de l'endogénéité de l'organisation spatiale pour prendre en compte le phénomène de *self-selection* (le choix des ménages pour telle ou telle localisation en fonction de leurs préférences de transport est modélisé) : c'est le cas des estimations de *structural equation models* par exemple (Brownstone & Golob 2009 ; Cervero & Murakami 2010; P. L. Mokhtarian & Bagley 2002).

c. Implications politiques

1) Organisation du territoire, un levier pour la réduction des consommations d'énergie

Face à la complexité de la représentation conjointe de l'organisation spatiale, du concept de mobilité, et de l'évaluation de la causalité entre ces deux variables, la littérature offre une grande diversité de travaux. Cette hétérogénéité, structurelle à la question posée, rend difficile la formulation de conclusions générales en termes notamment d'implication politique pour la réduction des consommations d'énergie (et les émissions de gaz à effet de serre qu'elles engendrent). Pourtant, on peut tirer des travaux existants des leçons intéressantes pour les délibérations publiques.

Tout d'abord, au-delà du débat sur les paramètres de mesure et de représentation de cet environnement, un consensus semble émerger quant à l'influence significative de l'environnement construit en général sur la demande de transport. Ainsi Leck (2006) conclut sa méta-analyse en soulignant :

« [...] it is clear that two elements of the built environment, population density and employment density exert a strong influence on travel behavior, even when controlling for socio-demographic variables such as income or age. », Leck (2006), pp. 53.

Quant aux résultats du travail de synthèse de Ewing & Cervero (2010), visant à estimer les élasticités de la mobilité sur l'environnement construit, ils fournissent un ensemble de valeurs non nulles qui appuient l'existence d'un effet significatif de l'organisation spatiale sur les déplacements des ménages. Le TABLEAU 2 synthétise, pour les variables de compacité (densité de population) et de mixité d'utilisation des sols, les conclusions qualitatives et quantitatives de ces deux méta-analyses ainsi que celles du premier chapitre de cette thèse, s'appuyant donc au total sur 210 estimations.

TABLEAU 2 - Synthèse qualitative et quantitative des estimations de l'impact de l'environnement construit sur la mobilité

	Utilisation des véhicules particuliers		Utilisation des transports en commun		Marche	
	Signe de l'interaction	Valeur de l'élasticité	Signe de l'interaction	Valeur de l'élasticité	Signe de l'interaction	Valeur de l'élasticité
Densité de population	-(a), (b), (c)	-0,12 ^(b) / -0,04 ^(a)	+(a), (c)	0,07 ^(a)	+(a), (c)	0,07 ^(a)
Mixité d'utilisation des sols	-(a), (c)	-0,09 ^(a)	+(a), (c)	0,12 ^(a)	+(a), (c)	0,15 ^(a)

^(a) : Ewing & Cervero 2010 ; ^(b) : Chapitre 1 de cette thèse ; ^(c) : Leck 2006.

Comme l'indique le TABLEAU 2, densité de population et mixité d'utilisation des sols favorisent significativement les déplacements en transports en commun et la marche alors qu'elles défavorisent toutes deux l'utilisation de véhicules particuliers. A noter que ces élasticités sont relativement faibles. Selon Ewing & Cervero (2010), les élasticités d'utilisation des transports en commun ou de la marche par rapport aux variables de compacité et mixité varient de +0,07 à +0,15. En ce qui concerne l'élasticité de l'utilisation des véhicules particuliers, ces auteurs l'estiment à -0,04 alors que le chapitre précédent propose une valeur moyenne de -0,12 ; l'élasticité par rapport à la mixité d'utilisation des sols est évaluée à -0,09.

Les conclusions émergeant de la littérature mettent en évidence un effet significatif de l'impact de l'organisation spatiale sur les déplacements des ménages, avec un effet opposé entre d'une part les déplacements en véhicules particuliers et d'autre part les déplacements en transports en commun ou par modes doux. Les valeurs des estimations sont individuellement relativement faibles. Toutefois, il convient de garder à l'esprit que ces effets constituent un levier parmi d'autres pour atteindre des objectifs ambitieux de réduction des consommations d'énergie et des émissions associées.

2) Le cas français et l'incertitude sur les zones rurales

Comme en attestent les détails des trois méta-analyses exploitées ci-dessus, c'est sur le territoire des Etats-Unis que ce sont clairement concentrés la majorité des travaux d'estimation de l'impact de la forme urbaine sur la demande de transport. Or, nous avons mis en évidence dans le premier chapitre la nécessité d'estimations spécifiques à chaque pays ou régions considérées. L'analyse des politiques spatiales comme politiques complémentaires aux politiques énergétiques et climatiques requiert une estimation spécifique sur le territoire concerné, français dans notre cas. Si la littérature offre quelques études empiriques dans ce contexte (SOES 2010 ; Service de l'observation et des statistiques 2011 ; Lafourcade & Baudin-de-Thé 2012), le but de ce chapitre est de proposer un travail spécifique à la France permettant de mieux appréhender le levier que représente l'organisation spatiale face aux objectifs de sécurité énergétique et de réchauffement climatique. Et cette prise en compte des

spécificités géographiques est d'autant plus importante que le caractère fortement rural de ce pays (plus d'un cinquième de la population française vivait en zone rurale en 2010) constitue également un enjeu pour tester le rôle de ces zones traditionnellement peu incluses dans les estimations empiriques de la mobilité des ménages. Disposer d'une évaluation nationale intégrée des déterminants spatiaux du secteur des transports est ce que l'on se propose d'effectuer dans la suite de ce chapitre.

III. CADRE D'ANALYSE EMPIRIQUE

a. Territoire, échelles et objet d'étude

Notre analyse est centrée sur le territoire français métropolitain. Les conclusions du chapitre précédent ont mis en évidence la pertinence de l'échelle d'étude désagrégée par rapport aux points de vue plus globaux dans l'évaluation empirique des déterminants spatiaux de la mobilité. Conformément à ces conclusions, c'est donc ce niveau d'analyse, avec comme unité d'observation l'individu, que nous retenons pour notre travail d'estimation. Enfin, nous utilisons l'indicateur de densité résidentielle comme proxy de forme urbaine. Disposant d'un fondement théorique et offrant des facilités d'utilisation et de communication, cet outil s'avère pertinent dans l'analyse que nous souhaitons mener. L'échelle retenue pour le calcul de la densité de population est la commune ; ce choix s'inscrit dans la volonté de faire apparaître les mécanismes de formation de la demande de transport au niveau désagrégé.

Les déplacements analysés dans ce travail correspondent à l'ensemble des déplacements contraints, c'est-à-dire les trajets qui ne résultent pas du libre choix des ménages considérés, une fois qu'ils ont choisi leur lieu de résidence. Essentiellement composés du transport entre domicile et lieu de travail, ils incluent également les lieux d'études pour les enfants scolarisés et les lieux de garde pour les enfants en bas âge.

b. Rôles respectifs de l'effet distance et de l'effet mode de transport

Notre analyse empirique de l'interaction entre forme urbaine et demande de transports des ménages passera par l'étude approfondie de deux des principaux canaux de cette interaction :

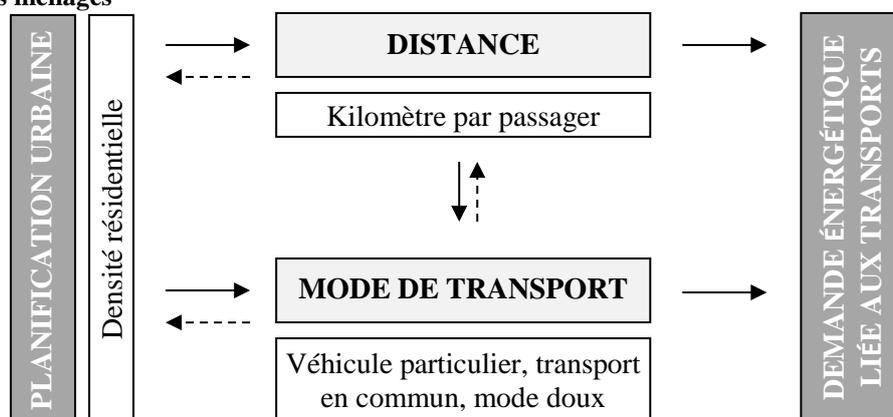
- Organisation spatiale et *effet distance* : la localisation des activités influence l'éloignement entre points de départ et d'arrivée du trajet, éloignement qui influence à son tour la quantité d'énergie nécessaire pour le transport. Le lien entre densité de population et distance des déplacements est révélé par la théorie de l'économie urbaine et le lien entre distance et énergie est proportionnel à l'efficacité énergétique du véhicule utilisé.

- Organisation spatiale et *effet mode de transport* : la densité de population influence les modalités et la qualité des transports disponibles en intervenant par exemple dans les décisions d'investissements des infrastructures de transports et dans le taux d'utilisation de ces équipements. Du

choix du mode de transport utilisé dépend la consommation d'énergie par unité de distance et par individu (nulle pour les modes doux, elle est en moyenne plus basse pour les transports en commun que pour les véhicules particuliers), ce qui influence le besoin énergétique total pour le trajet.

Une vision intégrée des canaux de transmission de l'impact de la densité de population sur la formation de la demande d'énergie associée au transport, testés dans la suite de ce chapitre, est donnée par la FIGURE 1. Les flèches en pointillé représentent les interactions potentielles, sources d'endogénéité : elles sont explicitées par la suite.

FIGURE 1 – Vision intégrée des liens testés entre organisation spatiale et demande énergétique pour le transport des ménages



c. Données

En France, les enquêtes nationales sur les transports ont lieu environ tous les 10 à 15 ans. Les enquêtes réalisées à ce jour ont eu lieu en 1966-67, 1973-74, 1981-82, 1993-94 et 2007-2008. L'Enquête Nationale Transports et Déplacements (ENTD) 2007-2008 est la cinquième, et c'est sur cette dernière, réalisée par l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) en partenariat avec le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL), que s'appuie ce chapitre. Elle fournit des informations sur les déplacements individuels des français en termes de typologie (quel est l'objectif du trajet), distance (sont inclus à la fois les voyages courtes et moyennes distances et les trajets longues distance éventuellement à l'étranger) et modes de transports utilisés, ainsi que sur les caractéristiques socio-économiques des ménages auxquels les individus appartiennent. Les données concernant la localisation des ménages en dessous de l'échelle du département sont présentes dans l'enquête mais confidentielles. Notre étude nécessitant l'utilisation de la densité de population de la commune de résidence, une procédure d'accès aux données confidentielles a été engagée pour pouvoir accéder à l'information sur la commune de résidence des ménages. L'autorisation a été obtenue après passage en commission devant le Comité du Secret Statistique et les données ont été mises à disposition par l'intermédiaire du Centre d'Accès Sécurisé aux Données de la statistique publique française, un outil mis en place par l'INSEE pour les

chercheurs. L'ENTD 2007-2008 nous permet d'analyser 26 035 déplacements contraints, ce qui représente un total de 24 819 individus étudiés appartenant à un ensemble de 12 653 ménages. La FIGURE 2 décrit la structure de l'ENTD alors que les TABLEAUX 3 et 4 donnent le détail de sa composition.

FIGURE 2 – Structure de l'ENTD 2007-2008 pour les observations valides

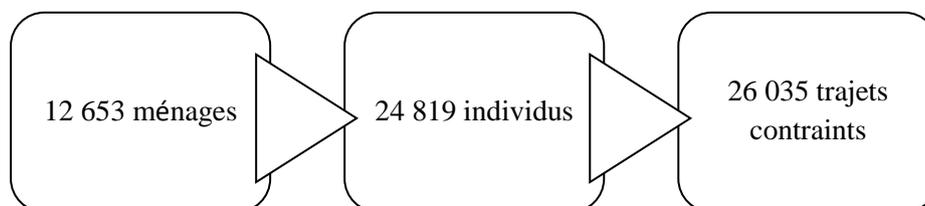


TABLEAU 3 – Nombre d'individus par ménage dans la base de données ENTD 2007-2008 utilisée

	Ménages		Total des individus
	#	%	
Nombre d'individus par ménage	1	5 031	39,8 %
	2	4 070	32,2 %
	3	2 692	21,3 %
	4	782	6,2 %
	5	76	0,6 %
	6	2	0,0 %
Total	1 2653	100 %	24 767

TABLEAU 4 – Nombre de trajets contraints par individu dans la base de données ENTD 2007-2008 utilisée

	Individus		Total de trajets contraints
	#	%	
Nombre de trajets contraints par individu	1	23 515	95,1 %
	2	1 236	4,8 %
	3	16	0,1 %
Total	24 767	100 %	26 035

Afin d'analyser l'impact de l'organisation spatiale sur les choix de mobilité des ménages, nous nous intéressons à trois variables dépendantes :

- i) la *distance domicile-lieu contraint* : la variable distance est exprimée en kilomètre. Elle se détermine par la moyenne des distance aller et distance retour fournies par l'enquête qui peuvent ne pas correspondre, dans le cas, par exemple, d'un changement de trajet ou de mode de transport entre l'aller et le retour ;
- ii) le *mode de transport utilisé* : dans le cas de modes de transport multiples, on retient le mode de transport défini comme le mode de transport principal utilisé pour le trajet considéré. Qualitative, cette variable possède trois valeurs qui sont « modes doux »,

« deux-roues motorisés et voitures », et « transports en commun urbains et régionaux ou trains » ;

- iii) *l'énergie annuelle consommée pour les trajets contraints* : exprimée en kWh par an, il s'agit de la distance totale domicile-lieu contraint parcourue par an multipliée par la consommation énergétique par kilomètre du mode de transport principal utilisé. La distance totale parcourue se détermine en fonction de la distance domicile-lieu contraint, du nombre d'aller-retour effectués dans la journée, du nombre de jour par semaine où l'individu se rend sur son lieu contraint et de la durée des vacances.¹⁸ Les coefficients d'efficacité énergétique utilisés, ainsi que les facteurs d'émissions CO₂ associés proviennent de l'ADEME (ADEME 2008) et sont présentés dans le TABLEAU 5.

TABLEAU 5 – Coefficients d'efficacité énergétique et facteur d'émissions par mode de transport (Sources : ADEME (2008) et calculs de l'auteur)

	Efficacité énergétique (kWh/km.voyageur)	Facteurs d'émissions (kg équivalent CO ₂ /km.voyageur)
Modes doux	0	0
Deux-roues motorisé	0,41	0,09
Voiture	1,21	0,30
Covoiturage	0,60	0,15
Tramway	0,06	0,02
Bus	0,30	0,08
Métro	0,09	0,02
Train	0,22	0,03

Les consommations d'énergie se calculent à partir de l'unité d'observation de référence, à savoir le trajet contraint et non l'individu ou le ménage. Pour déterminer les consommations par individu, on additionne les consommations énergétiques relatives à l'ensemble de ses trajets contraints. Afin d'en déduire la consommation d'énergie par ménage, deux cas sont à distinguer :

- *l'individu considéré est un adulte* : tous les adultes des ménages sondés ayant été interrogés, il convient de sommer les consommations des adultes pour obtenir la demande d'énergie relative à la mobilité des adultes du ménage ;
- *l'individu considéré est un enfant* : seul un enfant par ménage (sélectionné selon une loi de probabilité uniforme) a été sondé. Et parmi cet échantillon d'enfants, 94,1 % effectuent des déplacements contraints. La demande d'énergie liée à la mobilité des enfants a donc été estimée comme le produit du nombre d'enfants du ménage par la consommation de l'enfant sélectionné, diminué de 5,9 % afin de tenir compte de la proportion d'enfants non concernés par la mobilité contrainte.

¹⁸ La durée de vacances associée au lieu de travail est de cinq semaines et celle associée au lieu d'étude et de garde est de 16 semaines.

La demande énergétique du ménage pour le transport se dérive ensuite comme la somme des consommations liées à la mobilité des adultes et à la mobilité des enfants. La même méthodologie a été utilisée pour l'agrégation par individu puis par ménage des distances parcourues et des émissions relatives aux déplacements contraints. Dans le cas de la distance annuelle parcourue par ménage, la variable est discrétisée en quatre classes définies dans le TABLEAU 6.

TABLEAU 6 – Discrétisation en quatre classes de la distance annuelle parcourue par ménage

Discrétisation de la distance parcourue par ménage (km par an)			
	Valeur du quantile	Intervalle	Valeur discrète
0-quantile	0	< à 3 360	1
25-quantile	3 360	3 360 à 8 710	2
50-quantile	8 710	8 710 à 17 600	3
75-quantile	17 600	> à 17 600	4

Le mode de transport tel qu'il est dans l'ENTD est défini par trajet contraint. Afin de constituer une variable de mode de transport par ménage, il convient de déterminer quel est le mode de transport principal utilisé par le ménage. Pour ce faire, on considère la fonction du déplacement, à savoir « amener un individu dans un lieu où il doit se rendre ». On comptabilise alors par ménage le nombre de fois où est utilisé chaque mode de transport pour remplir cette fonction première : le mode de transport principal du ménage est déterminé comme celui remplissant le plus de fois cette fonction. Dans le cas où il n'est pas possible de trancher, on considère que le ménage n'a pas un seul mode de transport principal, mais utilise un mode de transport mixte. La variable *mode de transport* compte donc quatre alternatives : *véhicule particulier motorisé*, *transports en commun*, *mode doux* et *mode mixte*.

La *densité de population* constitue la principale variable indépendante. Elle est déterminée au niveau de la commune par le ratio de la population sur la surface mesurée en kilomètre carré. Au-delà de la densité, *revenu* et *taille des ménages* constituent les autres variables explicatives continues.¹⁹ Toutes ces variables sont exprimées sous leurs formes logarithmiques. Les variables explicatives qualitatives comprennent l'âge de la personne de référence du ménage, son niveau d'éducation et sa nationalité. Les statistiques descriptives des variables dépendantes et indépendantes sont présentées à l'échelle d'observation du ménage dans le TABLEAU 7 alors que le TABLEAU 8 détaille les moyennes, en fonction de l'unité d'observation retenue, de la distance parcourue, de l'énergie consommée et des émissions émises.

¹⁹ La variable *taille des ménages* correspond aux standards définis par l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE).

TABLEAU 7 – Statistiques descriptive de l'échantillon de 12653 ménages de l'ENTD 2007-2008

	%	Moy.	Err. St.
Energie (kWh/an)			
Absolu		11 751	21 087
Forme logarithmique		7,911	2,8
Emissions de CO ₂ eq (tonne de CO ₂ eq/an)		2,87	5,21
Distance parcourue (km/an)		14 876	25 864
Mode de transport			
<i>Mode doux</i>	13,01 %		
<i>Véhicule individuel motorisé</i>	60,26 %		
<i>Transports en commun</i>	17,23 %		
<i>Mixte</i>	9,50 %		
Age de la personne de référence			
< 30 ans	12,61 %		
de 30 à 39 ans	23,80 %		
de 40 à 49	30,53 %		
de 50 à 64	31,03 %		
>65 ans	2,03 %		
Revenu mensuel (€)			
Absolu		3 074	2 334
Forme logarithmique		7,86	0,59
Nombre d'unité de consommation			
Absolu		1,83	0,56
Forme logarithmique		0,56	0,32
Niveau d'étude de la personne de référence			
<i>Aucun diplôme</i>	10,05 %		
<i>Certificat d'études primaires (CEP)</i>	3,96 %		
<i>Brevet d'études du 1er cycle (BEPC), BE, ou brevet des collèges</i>	5,99 %		
<i>CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau</i>	33,46 %		
<i>Niveau baccalauréat</i>	11,08 %		
<i>Niveau Bac+2</i>	12,90 %		
<i>Niveau supérieur à Bac+2</i>	22,56 %		
Nationalité de la personne de référence			
<i>Français de naissance, y compris par réintégration</i>	89,84 %		
<i>Français par naturalisation, mariage, déclaration ou option à sa majorité</i>	4,34 %		
<i>De nationalité de l'Union européenne des 15 (hors France)</i>	2,07 %		
<i>De nationalité des pays entrés en 2004 dans l'Union européenne</i>	0,13 %		
<i>De nationalité algérienne, marocaine ou tunisienne</i>	1,65 %		
<i>De nationalité d'Afrique (hors Maghreb)</i>	0,96 %		
<i>De nationalités autres ou apatride</i>	1,01 %		
Présence d'enfant			
<i>Oui</i>	62,44 %		
<i>Non</i>	37,56 %		
Densité de population de la commune de résidence en 2006 (habitants/km ²)			
Absolu		3 241	5 622
Forme logarithmique		6,38	2,12

TABLEAU 8 – Moyenne de la distance parcourue, de la demande d'énergie et des émissions par unité d'observation

			Distance (km)	Energie (kWh)	Emission (tonne de CO ₂)
Ménage	Moyenne	Par jour	87,6	67,5	0,016
		Par an	14 876	11 751	2,87
	Err. Type	Par jour	178,47	135,61	0,033
		Par an	25 864	21 087	5,21
Individu	Moyenne	Par jour	32,24	26,45	0,006
		Par an	5 698	4 778	1,17
	Err. Type	Par jour	60,21	47,86	0,012
		Par an	9 097	8 201	2,03
Déplacement contraint	Moyenne	Par jour	30,66	25,16	0,006
		Par an	5 420	4 546	1,11
	Err. Type	Par jour	49,72	42,02	0,01
		Par an	8 276	7 618	1,89

La consommation d'énergie annuelle moyenne observée sur l'échantillon étudié est de 4 778 kWh par an par individu. Les émissions de CO₂ équivalent associées s'élèvent à 1,17 tonnes par an et par individu. En termes de distance, les déplacements contraints représentent en moyenne 5 698 km par an par individu, et 32,2 km par jour, pour un trajet moyen domicile-lieu contraint de 13,3 km. Les parts modales sont en faveur véhicules individuels motorisés, utilisés comme mode de transport principal pour 60 % des ménages. 17 % privilégient les transports en commun alors que 13 % se déplacent majoritairement par des modes doux. Enfin, près de 10 % des ménages n'ont pas de mode de transport principal mais repose sur un « mix » de modes de transport.

IV. ANALYSE ÉCONOMÉTRIQUE

La procédure d'estimation utilisée se compose de deux étapes, la première consiste en une estimation de deux modèles discrets et la deuxième en une estimation d'un modèle continu. Dans un premier temps sont estimés la distance parcourue par ménage et son mode de transport principal comme des fonctions discrètes des caractéristiques socio-économiques du ménage et de la densité de population du lieu de résidence. Puis dans un deuxième temps, on s'intéresse à l'estimation de la demande énergétique liée aux déplacements des ménages comme une fonction linéaire des caractéristiques du ménage et de la densité d'une part, et des caractéristiques du ménage, de la distance parcourue et du mode de transport d'autre part.

a. Distance parcourue et mode de transport - Modèles discrets

1) Spécifications

Les deux modèles discrets sont construits pour capter l'effet de la densité de population respectivement sur la distance parcourue par le ménage et sur son mode de transport principal (qui à leur tour ont un impact sur la demande énergétique liée à la mobilité du ménage). Les variables explicatives comprennent les caractéristiques socio-économiques des ménages et les variables de

forme urbaine. On inclut également la distance parcourue comme variable indépendante au modèle de choix de mode de transport principal. On utilise un modèle à utilité aléatoire (*random utility model*) avec une spécification logit pour représenter les deux décisions à choix multiple des ménages. Ce choix de modélisation repose sur deux hypothèses principales : i) les ménages maximisent leur utilité, que l'on suppose être une fonction linéaire des variables explicatives du modèle ; et ii) les préférences des ménages pour un choix donné (de classe de distance ou de mode de transport) suivent une distribution de Gumbel (Train 2003). L'utilité U_{nj} du ménage n pour le choix de l'alternative j est décrite par l'équation (2.1), où \mathbf{X}_n est le vecteur de variables explicatives, $\boldsymbol{\beta}_j$ est le vecteur de coefficients relatif au choix de l'alternative j et ε_{nj} représente les préférences du ménage n pour le choix j . La probabilité que le ménage n choisisse l'alternative i parmi toutes les alternatives disponibles est définie dans l'équation (2.2) comme la probabilité que le choix i induise une utilité plus grande pour le ménage que les autres choix.

$$U_{n,i} = \mathbf{X}_n \cdot \boldsymbol{\beta}_i + \varepsilon_{n,i} \quad (2.1)$$

$$P_n(i) = P(U_{n,i} > U_{n,j}, \forall j \neq i) \quad (2.2)$$

Les spécifications testées pour modéliser la distance parcourue par les ménages et leur mode de transport principal sont détaillées respectivement dans les équations (2.3) et (2.4), où la densité de population est notée d , et CSE est une liste de variables comprenant m Caractéristiques Socio-Economiques du ménage n (dans laquelle on inclut la constante 1). f et g sont deux fonctions logit d'une combinaison linéaire de leurs arguments. i et j sont les alternatives respectivement de la classe de distance parcourue (D^i) et du mode de transport principal (MT^j).

$$P_n(D^i) = f_i(CES_n, d_n) \quad i \in \{1; 2; 3; 4\} \quad (2.3)$$

$$P_n(MT^j) = g_j(CES_n, d_n, D^1..D^4) \quad j \in \{1; 2; 3; 4\} \quad (2.4)$$

2) Traitement de l'endogénéité

L'objectif de l'estimation des modèles discrets est de quantifier l'effet de la densité de population de la commune de résidence à travers différents mécanismes d'impact et donc à travers différentes variables que l'on peut qualifier d'*indirectes* ou encore d'*intermédiaires* : ces variables sont la distance parcourue par le ménage et le mode de transport principal du ménage. Afin d'assurer la relation de causalité entre densité et variables dépendantes, il est nécessaire de garantir qu'il n'y a pas de facteur externe au modèle établissant un lien entre ces variables (Wooldridge 2002). Reprenons l'exemple des ménages présentant des préférences pour la conduite d'une voiture, susceptibles de se localiser loin de leurs lieux contraints, où la densité de population est probablement basse, et de privilégier le choix de véhicules particuliers pour leurs déplacements. Cet exemple met en évidence deux risques potentiels d'endogénéité : le premier correspond au *self-selection effect* pour la variable de densité, le deuxième

concerne la variable explicative de distance parcourue dans le modèle de choix multiple du mode de transport. Si le modèle estimé ne prend pas en compte les préférences des ménages comme variable explicative de la distance parcourue et mode de transport principal, on est dans la situation où un facteur externe induit une relation entre variables explicatives (densité/densité et distance parcourue) et dépendantes (distance parcourue/mode de transport). Il y a alors endogénéité et biais potentiel dans les estimations du rôle de la forme urbaine.

L'endogénéité est généralement traitée en utilisant des variables instrumentales (VI) (Angrist & Krueger 2001 ; Boarnet & Sarmiento 1998 ; Frankel & Rose 2005 ; Grazi et al. 2008). Si la méthode des Doubles Moindres Carrés aussi appelée la méthode des Moindres Carrés en Deux Etapes (*Two-Stage Least Square* soit 2SLS en anglais) est valide dans le cas des modèles linéaires, la méthode de l'Inclusion du Résidu en Deux Etapes ou bien *Two-Stage Residual Inclusion* (2SRI) en anglais doit être utilisée dans le cas d'estimation de modèles non linéaires (Terza et al. 2008)). Cette dernière approche 2SRI est donc utilisée pour estimer les deux modèles logit multinomiaux de la distance parcourue et du mode de transport. Comme le rappelle Wooldridge (2002) dans son ouvrage, les instruments retenus pour contrôler l'endogénéité doivent respecter deux critères : ils ne doivent pas influencer les variables du modèle autrement qu'à travers la variable endogène (critère 1) avec laquelle ils doivent être fortement corrélés (critère 2).

Endogénéité de la densité de population

On utilise deux instruments pour la densité de population :

- i) le taux d'accroissement entre 1968 et 1975 de la population de l'aire urbaine²⁰ de résidence pour décrire l'organisation spatiale passée des territoires, ce que font Ciccone & Hall (1996). Cette variable n'est liée à la mobilité actuelle des ménages qu'indirectement à travers leur choix de localisation et donc de densité résidentielle (critère 1). De plus la densité de population de 2006 utilisée dans notre analyse est corrélée avec cet accroissement de population passé (critère 2) ;
- ii) le nombre de pièces du logement, fourni dans l'ENTD. Fortement corrélée à la densité de population (critère 2), cette variable est également indépendante de la mobilité des ménages, si ce n'est par l'intermédiaire de l'organisation spatiale du territoire (critère 1).

Afin de tester la robustesse des instruments retenus, on effectue une régression de la densité de population sur ses instruments et sur les variables exogènes des deux modèles. On réalise ensuite un test, le *Weak Instrument Test*, construit sur la F-statistique de ces régressions, qui confirme la validité

²⁰Aire urbaine définie au sens de l'INSEE : « Une aire urbaine est un ensemble de communes, d'un seul tenant et sans enclave, constitué par un pôle urbain (unité urbaine) de plus de 1 500 emplois, et par des communes rurales ou unités urbaines (couronne périurbaine) dont au moins 40 % de la population résidente ayant un emploi travaille dans le pôle ou dans des communes attirées par celui-ci. »

des instruments retenus par rapport au critère 2 (Stock et al. 2002 ; Stock & Yogo 2001). Les résultats sont reportés TABLEAU 15 et TABLEAU 18 en annexe.

Endogénéité de la distance parcourue

Les variables instrumentales des variables de distance sont des variables construites par l'auteur : il s'agit des prédictions d'un modèle logit multinomial dépendant uniquement des caractéristiques socio-économiques du ménage. En effet ces prédictions constituent de robustes instruments car elles sont fortement corrélées avec les variables observées tout en étant purgées de l'effet de facteurs non observables tels que les préférences des ménages²¹. Le TABLEAU 17 en annexe présente le résultat de l'estimation réalisée pour la construction des variables instrumentales de la distance parcourue par le ménage.

3) Résultats

Les deux modèles sont estimés sans et avec contrôle de l'endogénéité. Les estimations intermédiaires nécessaires au traitement de l'endogénéité par la méthode 2SRI sont présentées en annexe dans les TABLEAU 15 et TABLEAU 16 alors que l'ensemble des estimations de la distance parcourue et du mode de transport sont présentées dans les TABLEAU 9 et TABLEAU 10.

²¹ Voir Dubin and McFadden (1984) et Wooldridge (2002) comme référence pour l'utilisation de prédiction de probabilité pour instrumenter une variable discrète.

TABLEAU 9 – Estimations du modèle logit multinomial de la distance parcourue sans et avec traitement de l'endogénéité

Distance parcourue (Réf. : Classe 4)	Estimation standard						Estimation 2SRI									
	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 1			Classe 2			Classe 3			
	Coef.	Err.	Coef.	Err.	Coef.	Err.	Coef.	Err.	Marg.	Coef.	Err.	Marg.	Coef.	Err.	Marg.	
Revenu (log. ^a)	-1,415***	0,071	-0,818***	0,066	-0,325***	0,064	-1,380***	0,073	-0,141***	-0,799***	0,067	-0,032***	-0,315***	0,065	0,059***	
Age PR																
< 30 ans	Réf.		Réf.	Réf.			Réf.			Réf.			Réf.			
de 30 a 39 ans	0,599***	0,112	0,587***	0,107	0,414***	0,104	0,517***	0,115	0,023*	0,526***	0,110	0,038***	0,382***	0,107	0,017	
de 40 a 49	0,675***	0,111	0,569***	0,106	0,331***	0,103	0,608***	0,113	0,040***	0,517***	0,108	0,035***	0,307***	0,105	-0,001	
de 50 a 64	0,990***	0,110	0,694***	0,105	0,264**	0,103	0,896***	0,114	0,081***	0,630***	0,109	0,040***	0,234**	0,106	-0,034**	
>65 ans	2,111***	0,259	1,524***	0,258	0,823***	0,265	2,039***	0,261	0,181***	1,475***	0,260	0,066**	0,802***	0,266	-0,054*	
Nb UC (log. ^a)	-3,414***	0,176	-2,428***	0,166	-1,648***	0,160	-3,623***	0,189	-0,293***	-2,573***	0,178	-0,117***	-1,725***	0,171	0,021	
Présence d'enfant	0,289***	0,100	0,183*	0,095	0,197**	0,093	0,328***	0,101	0,025**	0,210**	0,095	0,003	0,214**	0,094	0,010	
Education PR																
Aucun diplôme	Réf.		Réf.	Réf.			Réf.			Réf.			Réf.			
CEP	0,166	0,180	0,200	0,178	0,030	0,177	0,148	0,180	0,01	0,185	0,178	0,021	0,022	0,177	-0,015	
BEPC, BE, BC	0,056	0,154	0,159	0,149	0,051	0,142	0,055	0,154	-0,005	0,162	0,149	0,022	0,051	0,142	-0,003	
CAP, BEP, autre	-0,171	0,110	0,036	0,106	-0,097	0,101	-0,221**	0,111	-0,028**	0,001	0,107	0,022	-0,113	0,102	-0,009	
Niveau bac.	-0,207	0,135	0,049	0,129	-0,054	0,123	-0,185	0,135	-0,03	0,062	0,129	0,027	-0,049	0,123	-0,003	
Niveau Bac+2	-0,393***	0,133	-0,142	0,126	-0,127	0,118	-0,375***	0,133	-0,042*	-0,136	0,126	0,008	-0,124	0,118	0,004	
Niv. > à Bac+2	-0,059	0,127	0,197	0,121	-0,067	0,116	0,050	0,132	-0,01	0,273**	0,126	0,048***	-0,033	0,120	-0,025	
Nationalité PR																
Français de nais.	Réf.		Réf.	Réf.			Réf.			Réf.			Réf.			
Français autre	0,060	0,147	0,063	0,139	-0,137	0,144	0,233	0,159	0,026	0,192	0,149	0,023	-0,074	0,153	-0,035*	
UE des 15	0,304	0,212	0,087	0,209	0,111	0,205	0,473**	0,220	0,054*	0,206	0,215	-0,006	0,150	0,211	-0,010	
UE entrés 2004	1,030	1,157	-0,776	1,458	1,043	1,134	1,227	1,155	0,145	-0,637	1,456	-0,184***	1,104	1,134	0,151	
Alg., maroc.	-0,039	0,246	-0,234	0,251	0,017	0,246	0,200	0,261	0,029	-0,053	0,263	-0,029	0,105	0,256	0,012	
Afrique	0,082	0,382	0,138	0,380	0,566	0,369	0,383	0,395	-0,003	0,354	0,390	-0,008	0,673*	0,378	0,087	
Autre	0,440	0,352	0,163	0,359	0,510	0,348	0,670*	0,359	0,051	0,324	0,365	-0,027	0,587*	0,354	0,052	
Densité de pop. (log. ^a)	0,419***	0,016	0,305***	0,015	0,139***	0,014	0,303***	0,041	0,026***	0,221***	0,037	0,014**	0,098***	0,035	-0,010**	
Inob _{dens} ^{Db}							0,138***	0,044	0,012**	0,098**	0,040	0,006	0,047	0,038	-0,004	
Constante	9,643***	0,512	5,414***	0,483	2,496***	0,470	10,24**	0,54		5,894***	0,517		2,735***	0,502		
Nombre			N=11 922								N=11 910					
Log-likelihood			-14 749,536								-14 728,514					
Pseudo R-carré			0,11								0,11					

^a log. : forme logarithmique.

^bInob_{dens}^D : Variable capturant la variabilité non observable de la densité de population (définie en annexe).

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 % et 1 %.

TABLEAU 10 – Estimations du modèle logit multinomial du mode de transport avec et sans traitement de l'endogénéité (Véhicule motorisé comme référence)

Mode de transport	Estimation standard						Estimation 2SRI										
	Mode mixte		Mode doux		Transp. Com.		Mode mixte			Mode doux			Transport en Commun				
	Coef.	Err.	Coef.	Err.	Coef.	Err.	Coef.	Err.	Marg.	Coef.	Err.	Marg.	Coef.	Err.	Marg.		
DisSt. (Réf. : Classe																	
<i>Classe 2</i>	0,326***	0,111	-2,025***	0,089	0,084	0,081	-0,204	0,368	0,038	-2,088***	0,293	-0,290***	0,240	0,263	0,083***		
<i>Classe 3</i>	0,226**	0,115	-2,531***	0,105	0,086	0,088	-0,827	0,707	-0,024	-2,664***	0,565	-0,318***	0,388	0,502	0,122***		
<i>Classe 4</i>	-0,042	0,122	-3,370***	0,142	0,305***	0,093	-1,630	1,056	-0,078	-3,562***	0,843	-0,346***	0,748	0,745	0,194**		
Revenu (log. ^a)	-0,401***	0,079	-0,827***	0,073	-0,84***	0,064	-0,193	0,170	0,010	-0,822***	0,137	-0,046***	-0,945***	0,120	-0,092***		
Age PR																	
<i>< 30 ans</i>	Réf.		Réf.		Réf.		Réf.			Réf.			Réf.				
<i>de 30 à 39 ans</i>	-0,278**	0,135	0,223*	0,115	-0,152	0,099	-0,345**	0,153	-0,028**	0,255**	0,122	0,028***	-0,045	0,106	-0,006		
<i>de 40 à 49</i>	0,318**	0,128	0,205*	0,115	0,320***	0,097	0,231	0,151	0,011	0,229*	0,125	0,007	0,417***	0,107	0,039***		
<i>de 50 à 64</i>	0,080	0,132	-0,152	0,119	0,249**	0,098	-0,042	0,173	-0,010	-0,117	0,145	-0,018	0,394***	0,121	0,051***		
<i>>65 ans</i>	-0,721*	0,390	-0,205	0,250	0,766***	0,204	-1,065**	0,462	-0,071***	-0,205	0,307	-0,034*	0,947***	0,256	0,151***		
Nb UC (log. ^a)	1,131***	0,188	1,997***	0,182	0,523***	0,157	1,85***	0,462	0,118***	2,172**	0,366	0,154***	0,615*	0,324	-0,011		
Présence d'enfant	0,836***	0,122	0,222**	0,108	0,140	0,094	0,76***	0,128	0,058***	0,197*	0,113	0,006	0,118	0,099	-0,004		
Education PR																	
<i>Aucun diplôme</i>	Réf.		Réf.		Réf.												
<i>CEP</i>	-0,344	0,229	0,205	0,185	-0,115	0,176	-0,379*	0,230	-0,029*	0,216	0,185	0,026	-0,090	0,177	-0,010		
<i>BEPC, BE, BC</i>	0,050	0,168	0,058	0,164	0,193	0,145	0,027	0,168	-0,002	0,064	0,164	0,001	0,187	0,145	0,021		
<i>CAP, BEP, autre</i>	-0,075	0,120	-0,156	0,117	-0,157	0,107	-0,031	0,122	0,001	-0,115	0,119	-0,007	-0,111	0,109	-0,010		
<i>Niveau bac.</i>	-0,256*	0,154	0,080	0,139	0,062	0,125	-0,246	0,154	-0,021*	0,077	0,141	0,009	0,022	0,126	0,005		
<i>Niveau Bac+2</i>	0,083	0,142	-0,099	0,144	0,082	0,124	0,126	0,147	0,012	-0,096	0,148	-0,010	0,036	0,128	0,004		
<i>Niv. > à Bac+2</i>	-0,098	0,140	0,244*	0,132	0,347***	0,116	-0,177	0,147	-0,020*	0,193	0,139	0,014	0,215*	0,121	0,025*		
Nationalité PR																	
<i>Français de nais.</i>	Réf.		Réf.		Réf.								Réf.				
<i>Français autre</i>	0,126	0,151	0,138	0,148	0,018	0,129	-0,002	0,169	0,003	0,043	0,164	0,008	-0,184	0,143	-0,022		
<i>UE des 15</i>	-0,188	0,247	0,496**	0,201	0,274	0,181	-0,343	0,261	-0,030*	0,377*	0,215	0,036*	0,089	0,192	0,007		
<i>UE entrés 2004</i>	-11,827	597,0	0,850	0,980	1,504*	0,854	-12,066	600,8	-0,097***	0,747	1,002	0,031	1,314	0,879	0,205		
<i>Alg., maroc. tunis.</i>	-0,110	0,288	0,624***	0,223	0,106	0,210	-0,246	0,305	-0,022	0,521**	0,243	0,058**	-0,177	0,225	-0,030		
<i>Afrique</i>	0,838*	0,452	1,251***	0,387	1,598***	0,348	0,594	0,471	0,006	1,104***	0,400	0,058*	1,253***	0,359	0,135***		
<i>Autre</i>	-0,446	0,501	0,751**	0,302	0,935***	0,266	-0,692	0,517	-0,056***	0,633**	0,317	0,044	0,686**	0,279	0,087**		
Densité de pop. (log. ^a)	0,306***	0,019	0,327***	0,019	0,554***	0,017	0,30***	0,057	0,008*	0,381***	0,051	0,013***	0,702***	0,043	0,071***		
Inob _{dens} ^{MT b}							-0,001	0,061	0,004	-0,067	0,054	-0,002	-0,176***	0,045	-0,020***		
Inob _{dist} ^{MT b}							0,531	0,352	0,046	0,062	0,282	0,004	-0,153	0,249	-0,030		
Constante	-2,006***	0,564	2,881***	0,497	0,828*	0,443	-3,05***	0,818		2,493***	0,693		0,402	0,608			
<i>Nombre</i>			N=11 922									N=11 910					
<i>Log-likelihood</i>			-10 649,871									-10630,216					
<i>Pseudo R-carré</i>			0,18									0,18					

^a log. : forme logarithmique.

^b Inob_{dens}^{MT}, Inob_{dist}^{MT} : Variable capturant la variabilité non observable de la densité de population (définie en annexe).

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 % et 1 %.

Dans le TABLEAU 9, on note tout d'abord que les coefficients relatifs à la densité varient entre l'estimation standard et l'estimation 2SRI. Or la variable $Inob_{dens}^D$, représentant la variation inobservable de la densité de population dans la base de donnée et construite pour contrôler l'endogénéité potentielle de la variable densité dans la modélisation de la distance parcourue par le ménage, est significative à respectivement 1%²² et 5% pour les classes de distance 1 et 2 : le *self-selection effect* n'est ainsi pas négligeable et la deuxième méthode d'estimation avec traitement de l'endogénéité est donc à privilégier pour la modélisation de la distance parcourue.

La variable densité est significative à 1% pour les trois classes de distance 1, 2 et 3. L'effet marginal correspondant est positif pour les classes 1 et 2 et négatif pour la classe 3 : ainsi plus la densité est élevée, plus la probabilité que le ménage parcoure une grande distance est faible et plus la probabilité que ses déplacements contraints correspondent aux classes 1 et 2 est élevée. Le revenu est significatif à 1 % dans les choix des ménages quant à la distance à parcourir : avec un effet marginal négatif pour les deux premières classes et positif pour la troisième, on en déduit qu'une augmentation du revenu augmente la probabilité du ménage de parcourir une grande distance contrainte alors qu'elle diminue sa probabilité de parcourir des distances modérées. L'âge de la personne de référence est également significatif à 1 % dans la majorité des cas et l'augmentation de l'effet marginal de la classe 1 avec l'âge nous indique que plus la personne de référence du ménage est âgée, plus la probabilité que le ménage parcourt une distance contrainte modérée est élevée. Moins marqué dans le cas de la classe 2, cet effet s'inverse pour la classe 3 qui voit sa probabilité diminuer avec l'âge de la personne de référence. En ce qui concerne le nombre d'unité de consommation, également significatif à 1 %, plus celui-ci est élevé plus la probabilité que le ménage parcoure une grande distance est importante. Et à taille de ménage constante, les ménages avec enfant privilégient les plus faibles distances.

Si la variable $Inob_{dist}^{MT}$ représentant les variations inobservables de la distance parcourue n'est pas significative dans l'estimation 2SRI du TABLEAU 10, la variable $Inob_{dens}^{MT}$ l'est en revanche à 1 % pour le cas de l'utilisation des transports en commun comme mode de transport principal du ménage. Ainsi, l'endogénéité de la densité dans le modèle de choix de mode de transport ne peut être exclue et on privilégie à nouveau la deuxième estimation par rapport à l'estimation standard.

Dans le TABLEAU 10, la variable densité est significative à 1 % pour l'ensemble des modes de transport : l'organisation du territoire intervient bien dans le choix de mode de transport des ménages. Les effets marginaux de la densité sont positifs pour le cas des trois modes mixte, doux et transports en commun : la probabilité que le ménage repose sur l'utilisation d'une combinaison de mode de transport augmente légèrement (de 0,008) avec la densité ; la probabilité qu'il utilise des modes doux est également plus élevée dans les zones plus denses (effet marginal de 0,013 de la densité) ; enfin ce sont les transports en commun qui voient leur probabilité augmenter le plus avec la densité avec un

²² La probabilité que la densité ne soit pas significative est inférieure à 1 %.

effet marginal de 0,071. Les ménages sont donc plus susceptibles d'utiliser leur voiture ou autre véhicule particulier motorisé dans les zones peu denses.

La distance à parcourir est significative pour le recours aux modes doux et également pour l'utilisation des transports en commun si on se concentre sur les effets marginaux. Le TABLEAU 10 confirme l'intuition que la probabilité pour le ménage de se déplacer principalement en modes doux diminue avec la longueur des déplacements alors que les transports en commun sont plus utilisés quand la distance à parcourir augmente. Le revenu est également significatif à 1 % : les ménages les plus riches sont moins susceptibles de se tourner vers les modes doux et encore moins vers les transports en commun pour leurs déplacements que les ménages moins aisés. D'autre part, l'âge influence le choix des modes de transport puisque la probabilité de voyager en transports en commun augmente avec l'âge de la personne de référence du ménage, et que les modes doux et dans une moindre mesure les modes mixtes sont comparativement privilégiés par les jeunes par rapport aux plus âgés. En ce qui concerne la taille du ménage, elle favorise les modes de déplacements mixtes et de façon plus importante encore les modes doux alors qu'à taille de ménage constante, la présence d'enfant augmente la probabilité de recourir à plusieurs modes de transports.

Enfin, l'éducation n'apparaît pas influencer significativement le choix modal des ménages et les résultats concernant la nationalité semblent indiquer que les ménages dont la personne de référence est d'origine africaine ou autre privilégient les transports en commun et les modes doux.

Les TABLEAU 9 et TABLEAU 10 ont permis d'éclairer les choix de mobilité des ménages et ont mis en évidence le rôle significatif de la densité, que ce soit sur la distance parcourue ou le mode de transport. Il s'agit maintenant d'estimer l'impact de ces choix dans la demande énergétique associée aux déplacements des ménages.

b. Demande énergétique – Modèle continu

1) Effet agrégé de la densité sur la demande énergétique

La demande énergétique des ménages est tout d'abord estimée sous forme logarithmique comme une fonction linéaire des caractéristiques des ménages et de la densité de population (également sous forme logarithmique) afin de quantifier l'effet agrégé de l'organisation spatiale sur la consommation d'énergie. La spécification testée est décrite dans l'équation (2.5) où \mathbf{a} est le vecteur de coefficients à estimer relatif aux variables de caractéristiques socio-économiques du ménage et b est le coefficient relatif à la densité ; ε_n est le terme d'erreur et N est le nombre total de ménages.

$$\log(E_n) = \mathbf{a} \cdot {}^t \mathbf{CSE}_n + b \cdot \log(d_n) + \varepsilon_n \quad n \in [1; N] \quad (2.5)$$

La spécification retenue pour la modélisation de la demande énergétique étant linéaire, une estimation 2SLS permet de traiter l'endogénéité potentielle de la densité de population. Le TABLEAU

11 présente les résultats des estimations standard et avec variables instrumentales (constituées de l'accroissement de population et du nombre de pièces du logement du ménage).

TABEAU 11 – Estimation de la demande énergétique comme fonction des caractéristiques socio-économique des ménages et de la densité de population de la commune de résidence

Demande énergétique (log. ^a)	Moindres Carrés			IV (2SLS)		
	Coef.	Err. St.	p-value	Coef.	Err. St.	p-value
Revenu mensuel du ménage (log.)	1,319***	0,051	>0,001	1,304***	0,052	>0,001
Age de la personne de référence						
< 30 ans	-0,271***	0,083	0,001	Réf.		
de 30 a 39 ans	-0,318***	0,083	>0,001	-0,239***	0,085	0,005
de 40 a 49	-0,427***	0,082	>0,001	-0,292***	0,084	>0,001
de 50 a 64	-1,038***	0,183	>0,001	-0,391***	0,085	>0,001
>65 ans	Référence			-1,007***	0,184	>0,001
Nombre d'unité de consommation (log.)	1,216***	0,127	>0,001	1,298***	0,137	>0,001
Présence d'enfant	-0,269***	0,076	>0,001	-0,284***	0,077	>0,001
Education de la personne de référence						
Aucun diplôme	Réf.			Réf.		
Certificat d'études primaires (CEP)	-0,167	0,139	0,229	-0,161	0,139	0,246
Brevet d'études du 1er cycle (BEPC) ou BE, ou brevet des collèges	-0,056	0,118	0,638	-0,059	0,118	0,616
CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau	0,194**	0,085	0,022	0,211**	0,086	0,014
Niveau baccalauréat	0,065	0,102	0,522	0,055	0,102	0,590
Niveau Bac+2	0,192*	0,101	0,057	0,182*	0,101	0,072
Niveau supérieur à Bac+2	-0,116	0,096	0,230	-0,161	0,100	0,109
Nationalité de la personne de référence						
Français de naissance, y compris par réintégration	Réf.			Réf.		
Français par naturalisation, mariage, déclaration ou option à sa majorité	-0,091	0,113	0,423	-0,162	0,122	0,182
De nationalité de l'Union européenne des 15 (hors France)	-0,582***	0,162	>0,001	-0,649***	0,167	>0,001
De nationalité des pays entrés en 2004 dans l'Union européenne	-1,415**	0,658	0,031	-1,493**	0,659	0,024
De nationalité algérienne, marocaine ou tunisienne	-0,664***	0,184	>0,001	-0,768***	0,195	>0,001
De nationalité d'Afrique (hors Maghreb)	-0,323	0,244	0,186	-0,440*	0,255	0,084
De nationalités autres ou apatride	-1,024***	0,233	>0,001	-1,117***	0,240	>0,001
Densités de population (log.)	-0,402***	0,012	>0,001	-0,356***	0,031	>0,001
Constante	-0,100	0,361	0,781	-0,319	0,386	0,408
Nombre d'observations				N=11 910		
				F(20, 11889)=174,75		
				Wald chi2(20)=2469,85		
				Prob.> F=0		
				Prob.>chi2=0		
R-carré	0,2259			0,2262		

^a log. : forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 % et 1 %.

Pour la majorité des variables explicatives, les coefficients estimés par les deux approches sont relativement proches. Dans le cas de la densité de population, l'élasticité-densité est estimée à -0,40

par la méthode des Moindres Carrés et à -0,36 par la méthode 2SLS. Dans le cas où aucune différence statistique n'est mise en évidence entre les estimations des deux méthodes, les Moindres Carrés sont à privilégier car ils fournissent des écarts type plus faibles que la méthode 2SLS. Afin de savoir quelles estimations privilégier, on réalise un test de Hausman (Wooldridge 2002) : sous l'hypothèse de référence H_0 , à savoir l'absence de différence significative entre les estimations des deux méthodes, la statistique de test, égale à 2,61 dans notre cas, suit une loi du $\chi^2(20)$. La probabilité qu'une variable suivant cette loi soit supérieure à la statistique de test étant 1,000, l'hypothèse de référence n'est pas rejetée : il n'y a donc pas de différence significative entre les estimations des deux méthodes. Le biais induit par l'endogénéité potentielle de la variable de densité de population n'est pas confirmé et l'utilisation de la méthode des Moindres Carrés est donc robuste pour estimer l'effet de la forme urbaine sur la demande énergétique liée aux déplacements des ménages.

Selon l'estimation des Moindres Carrés, le revenu du ménage est significatif à 1 % et positivement corrélé à la consommation d'énergie avec une élasticité élevée estimée à 1,32. L'âge de la personne de référence affecte également significativement la variable dépendante : plus il augmente, plus la demande d'énergie pour la mobilité du ménage diminue. A taille du ménage constante, la présence d'enfant induit en moyenne des consommations d'énergie plus faibles, et ces dernières sont plus élevées pour les ménages plus nombreux. Enfin, si l'effet du niveau d'étude n'est pas très clair, la nationalité de la personne de référence semble influencer la mobilité du ménage de telle sorte que les ménages non français présentent en moyenne une demande énergétique liée à leurs déplacements plus faible. Ces résultats vont dans le même sens que ce que l'on a trouvé pour la distance parcourue : le revenu est positivement corrélé à la distance comme à la consommation d'énergie alors que la densité, l'âge et la présence d'enfant sont négativement corrélés à ces deux variables.

2) Effet de la distance parcourue et du mode de transport sur la demande énergétique

Le logarithme de la demande énergétique est ici modélisé comme une fonction linéaire de la distance parcourue par le ménage, de son mode de transport principal et des caractéristiques socio-économiques du ménage. Les variables discrètes à m alternatives sont converties en m variables binaires prenant la valeur 1 lorsque l'alternative considérée est vérifiée et 0 sinon. Ainsi les régresseurs de la demande énergétique sont constitués de variables continues et de variables binaires. La spécification utilisée pour estimer la consommation d'énergie E_n , liée aux déplacements du ménage n , est décrite dans l'équation (2.6) où c^i et e^j sont les coefficients à estimer relatifs respectivement aux classes de distance parcourue et modes de transport principaux.

$$\log(E_n) = \mathbf{a} \cdot {}^t \mathbf{CSE}_n + \sum_i c^i \cdot D^i + \sum_j e^j \cdot MT^j + \varepsilon_n \quad n \in [1; N] \quad (2.6)$$

Le TABLEAU 12 présente les résultats de l'estimation de la demande énergétique.

TABLEAU 12 – Estimation de la demande énergétique comme fonction des caractéristiques socio-économiques du ménage, de la distance parcourue et du mode de transport principal

Demande énergétique (log. ^a)	Coefficient	Standard Erreur	p-value
Distance parcourue			
<i>Classe 1</i>	-3,599***	0,038	>0,001
<i>Classe 2</i>	-1,556***	0,033	>0,001
<i>Classe 3</i>	-0,777***	0,032	>0,001
<i>Classe 4</i>	Référence		
Mode de transport principal			
<i>Mode mixte (classe 1)</i>	0,719***	0,046	>0,001
<i>Mode doux (classe 2)</i>	-3,387***	0,044	>0,001
<i>Véhicule motorisé (classe 3)</i>	1,333***	0,032	>0,001
<i>Transport en commun (classe 4)</i>	Référence		
Revenu mensuel du ménage (log.)	0,201***	0,026	>0,001
Age de la personne de référence			
< 30 ans	Référence		
de 30 a 39 ans	0,063	0,041	0,128
de 40 a 49	0,067	0,041	0,103
de 50 a 64	0,046	0,041	0,260
>65 ans	-0,022	0,092	0,812
Nombre d'unité de consommation (log.)	0,335***	0,065	>0,001
Présence d'enfant	-0,045	0,038	0,238
Education de la personne de référence			
<i>Aucun diplôme</i>	Référence		
<i>Certificat d'études primaires (CEP)</i>	-0,009	0,069	0,902
<i>Brevet d'études du 1er cycle (BEPC) ou BE, ou brevet des collèges</i>	-0,012	0,059	0,846
<i>CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau</i>	0,019	0,042	0,656
<i>Niveau baccalauréat</i>	-0,035	0,051	0,495
<i>Niveau Bac+2</i>	-0,071	0,050	0,157
<i>Niveau supérieur à Bac+2</i>	-0,098**	0,048	0,042
Nationalité de la personne de référence			
<i>Français de naissance, y compris par réintégration</i>	Référence		
<i>Français par naturalisation, mariage, déclaration ou option à sa majorité</i>	0,017	0,056	0,765
<i>De nationalité de l'Union européenne des 15 (hors France)</i>	-0,205**	0,081	0,011
<i>De nationalité des pays entrés en 2004 dans l'Union européenne</i>	-0,544*	0,329	0,098
<i>De nationalité algérienne, marocaine ou tunisienne</i>	-0,291***	0,091	0,001
<i>De nationalité d'Afrique (hors Maghreb)</i>	-0,127	0,122	0,297
<i>De nationalités autres ou apatride</i>	-0,511***	0,116	>0,001
Constante	7,225***	0,188	>0,001
	<i>Nombre d'observations</i>	N=11 922	
	<i>Degrés de liberté</i>	25	
	<i>F(25, 11896)</i>	1987,48	
	<i>Prob> F</i>	>0,0010	
	<i>R-carré</i>	0,8068	
	<i>R-carré ajusté</i>	0,8064	

^a log. : forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 % et 1 %.

Les deux variables *distance parcourue* et *mode de transport principal* sont significatives à 1 % pour l'ensemble de leurs alternatives : elles jouent donc un rôle déterminant dans la formation de la demande énergétique liée aux déplacements des ménages. En ce qui concerne la distance parcourue, plus elle est importante, plus la demande d'énergie pour les transports est élevée. Pour les modes de

transports, le recours aux modes de déplacements doux induit une consommation d'énergie plus faible que celle requise lors de trajets en transports en commun, et l'utilisation de véhicules motorisés induit une demande énergétique plus forte. L'usage d'un mixte de mode de transport par le ménage conduit à une consommation intermédiaire entre transport en commun et véhicule motorisé. Parmi les variables socio-économiques du ménage, le revenu se révèle significativement (à 1 %) et positivement lié à la consommation d'énergie avec une élasticité associée de 0,2. On notera la diminution de l'élasticité-revenu égale à 1,32 dans l'estimation précédente : cette variation est à mettre en regard avec l'ajout des variables explicatives de distance et de mode de transport dans la régression. La corrélation probable entre le revenu du ménage et les choix de transport, à savoir distance parcourue et mode de transport principal, explique cette diminution de l'élasticité observée. La taille du ménage est également significative à 1 % : plus le ménage est grand, plus sa demande énergétique pour le secteur des transports est importante. A distance et mode de transport constant, l'âge et le niveau d'étude de la personne de référence du ménage ne semblent pas influencer la consommation d'énergie, excepté dans le cas d'un niveau supérieur à « baccalauréat + 2 ans » pour lequel les ménages concernés révèlent une demande énergétique significativement plus faible que les autres ménages. Enfin, la variable dépendante apparaît également être affectée significativement par la nationalité de la personne de référence, qui, lorsqu'elle n'est pas française, correspond à une demande énergétique statistiquement plus faible.

c. Exploitation des résultats économétriques : modélisation de la demande énergétique à l'aide d'un modèle à équation unique et d'un modèle à équations multiples

L'estimation agrégée de l'impact de la densité de population sur la demande énergétique des ménages pour leurs déplacements a permis de mettre en évidence la significativité, le sens et l'ampleur de l'effet de la variable de forme urbaine dans la formation de la consommation énergétique pour les transports. Cette estimation agrégée constitue le premier modèle à équation unique de la demande énergétique. L'élasticité-densité y est estimée à -0,40 sur l'échantillon français considéré. Cette valeur élevée constitue une première estimation qui sera précisée par la suite avec les résultats d'un modèle plus complet : afin de préciser cette première estimation et de désagréger l'effet de la densité pour identifier et quantifier les différents mécanismes d'impact selon lesquels il influence la demande énergétique, on combine les trois modèles de distance parcourue, de mode de transport et de demande énergétique des équations (2.3), (2.4) et (2.6). La combinaison de ces modèles constitue le deuxième modèle, le modèle à équations multiples, plus complet que le premier à équation unique. Tout d'abord, la demande énergétique en fonction des caractéristiques socio-économiques des ménages, de la distance parcourue et du mode de transport principal du logement se détermine en transformant l'équation (2.6) avec passage à l'exponentielle.

$$E_n = e^{\varepsilon_n} \cdot e^{a \cdot \text{CSE}_n} \cdot \prod_i e^{c^i \cdot D_n^i} \cdot \prod_j e^{e^j \cdot MT_n^j} \quad n \in [1; N] \quad (2.7)$$

D_n^i et MT_n^j étant des variables binaires, on en déduit l'espérance de la demande énergétique liée aux déplacements du ménage n , sachant ses caractéristiques socio-économiques, sa distance parcourue annuellement pour se rendre sur les lieux contraints D_n^i et son mode de transport principal MT_n^j (distance et mode de transport sont supposés connus dans ce cas et correspondre aux alternatives I et J parmi les 4 alternatives i et 4 alternatives j possibles).

$$E[E_n | \text{CES}_n, D_n^i \cap MT_n^j] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{a \cdot \text{CSE}_n} \cdot e^{c^i} \cdot e^{e^j} \quad n \in [1; N] \quad (2.8)$$

Or on a également par définition de l'espérance que :

$$E[E_n | \text{CES}_n] = \sum_{i,j} E[E_n | \text{CES}_n, D_n^i \cap MT_n^j] \cdot P(D_n^i \cap MT_n^j) \quad n \in [1; N] \quad (2.9)$$

Et par substitution de l'équation (2.8) dans l'équation (2.9) on obtient :

$$E[E_n | \text{CES}_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{a \cdot \text{CSE}_n} \cdot \sum_{i,j} e^{c^i + e^j} \cdot P(D_n^i \cap MT_n^j) \quad n \in [1; N] \quad (2.10)$$

On utilise la loi des Grands Nombres pour estimer l'espérance du terme d'erreur par la moyenne sur l'échantillon de l'exponentielle du résidu. En ce qui concerne la probabilité de l'événement $D_n^i \cap MT_n^j$, elle est égale par définition au produit de la probabilité de MT_n^j sachant D_n^i par la probabilité de D_n^i .

$$E[E_n | \text{CES}_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{a \cdot \text{CSE}_n} \cdot \sum_{i,j} e^{c^i + e^j} \cdot P(MT_n^j | D_n^i) \cdot P(D_n^i) \quad n \in [1; N] \quad (2.11)$$

que l'on peut également écrire :

$$E[E_n | \text{CES}_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{a \cdot \text{CSE}_n} \cdot \sum_{i,j} e^{c^i + e^j} \cdot P(D_n^i | MT_n^j) \cdot P(MT_n^j) \quad n \in [1; N] \quad (2.12)$$

A partir de ces dernières équations et des estimations des modèles de mode de transport et de classes de distance ((2.3) et (2.4)) donnant les probabilités de D_n^i et MT_n^j , on peut quantifier l'effet de la densité de population sur la demande énergétique des ménages en fonction du/des mécanisme(s) considéré(s). Ainsi on déduit l'impact de la densité sur la consommation d'énergie : i) à travers la variation de la distance parcourue ; ii) à travers le changement du mode de transport ; iii) à travers les deux mécanismes cumulés. Les expressions correspondantes à chacune de ces trois options sont décrites dans le TABLEAU 13.

TABLEAU 13 – Effet de la densité de population par mécanisme d’impact sur la demande énergétique

Mécanismes considérés

Expression de la demande énergétique

Distance parcourue

Expression de la demande énergétique à CES et MT^J fixés

$$E[E_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{a \cdot CSE_n} \cdot \sum_{i,j} e^{c^i + e^j} \cdot f_i(CES_n, d_n) \cdot P(MT_n^J)^{fixe} \quad n \in [1; N]$$

Mode de transport

Expression de la demande énergétique à CES et D^l fixés

$$E[E_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{a \cdot CSE_n} \cdot \sum_j e^{c^j + e^j} \cdot g_j(CES_n, d_n, D^j = 1, D^{k \neq j} = 0) \cdot P(D_n^l)^{fixe} \quad n \in [1; N]$$

Distance parcourue et mode de transport

Expression de la demande énergétique à CES fixé

$$E[E_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{a \cdot CSE_n} \cdot \sum_{i,j} e^{c^i + e^j} \cdot g_j(CES_n, d_n, D^j = 1, D^{k \neq j} = 0) \cdot f_i(CES_n, d_n) \quad n \in [1; N]$$

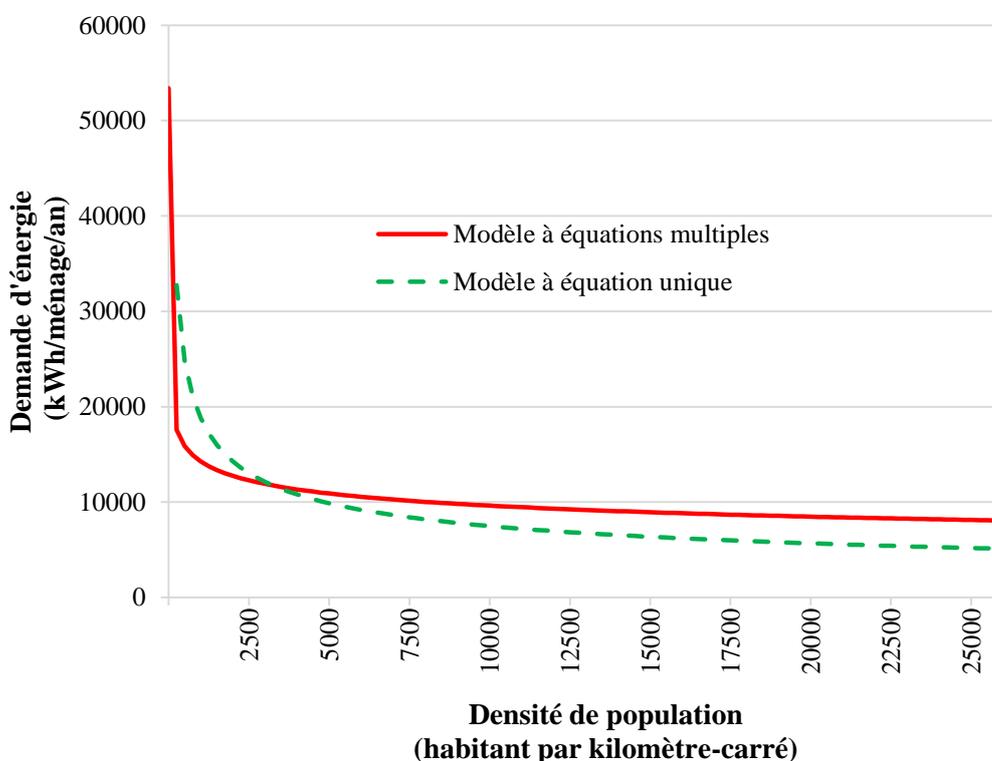
d. Interprétation et discussion : comparaison des résultats des deux modèles et application numérique dans le cas d’un ménage type

Les modèles et les expressions définies dans les sections précédentes mettent en évidence la complexité de la relation entre forme urbaine et demande énergétique, que l’on s’intéresse à l’effet global de la densité ou bien à son impact à travers un mécanisme d’interaction donné. Nous avons utilisé deux méthodes pour s’intéresser à cet effet : la première consiste à estimer l’effet agrégé de la densité sur la demande énergétique dans un modèle à équation unique alors que la deuxième consiste à représenter les différents mécanismes d’impact par un système d’équations permettant une estimation de l’effet global de la densité mais également une décomposition de cet effet par type d’interaction. Afin de pouvoir comparer les résultats de ces deux méthodes, on considère un ménage type et étudie l’effet de la densité sur la demande énergétique de ce ménage type. Les caractéristiques de ce ménage type correspondent au point moyen de l’échantillon de la base de données décrites dans le descriptif statistique (TABLEAU 7). On utilise également les valeurs au point moyen pour les variables inobservables et de termes d’erreur, construites lors des estimations (ces valeurs sont reportées dans le TABLEAU 19 en annexe).

En substituant les caractéristiques socio-économiques du ménage type dans les différentes expressions de la demande énergétique liée aux déplacements, on obtient la consommation d’énergie comme une fonction de la densité de population de la commune de résidence du ménage. Dans le cas du modèle à équations multiples, les probabilités des classes de variables de distance parcourue et de modes de transport sont utilisées pour la détermination de la demande énergétique. Leurs variations avec la densité de population sont représentées FIGURE 20 et FIGURE 21 en annexe. Les variations de la

demande d'énergie avec la densité sont représentées sur la FIGURE 3 dans deux cas : i) prise en compte de l'effet global de la densité sur la demande énergétique estimé avec le modèle à équation unique (2.5) ; ii) prise en compte de l'effet global de la densité sur la demande énergétique dans le cas d'une estimation à équations multiples. Les consommations d'énergie ont été normalisées par rapport au point moyen. Rappelons que les deux modèles sont estimés sur le même échantillon et visent à évaluer l'effet de la densité sur la demande énergétique des ménages sachant que le premier modèle le fait par l'intermédiaire d'une seule équation et sans analyse des mécanismes d'impact alors que le deuxième modèle est plus précis et désagrège les mécanismes d'interaction.

FIGURE 3 – Demande énergétique liée aux déplacements et densité de population (pour un ménage type correspondant au point moyen de l'échantillon)²³



Les deux modèles de demande énergétique estimés, qu'il s'agisse de celui à équation unique ou bien de celui à équations multiples, révèlent un impact significatif et négatif de la densité de population de la commune de résidence sur la consommation d'énergie liée aux déplacements du ménage.

La forme du modèle à équations multiples ne repose pas sur l'hypothèse d'une élasticité fixe contrairement au modèle à équation unique. En l'absence d'élasticité fixe comparable et afin de comparer deux situations à densités différentes, d d'une part et $(1 + \alpha)d$ d'autre part, on détermine alors le taux de variation TV de la demande énergétique (équation (2.13)). On introduit ainsi le paramètre α afin de décrire la variation de la densité que l'on étudie.

²³ Les calculs ont été effectués en kWh afin d'assurer la compatibilité avec les mesures de l'énergie dans le logement. 1000kWh correspondent à 0,086tep.

$$TV(\alpha, d) = \frac{E_n((1 + \alpha) \cdot d) - E_n(d)}{E_n(d)} \quad (2.13)$$

Dans le cas de αd infinitésimal, ce taux de variation correspond à l'élasticité multipliée par α . TV est représenté pour chacun des deux modèles estimés sur la FIGURE 4 ; la FIGURE 5 représente TV dans le cas du modèle à équation unique (TV ne dépend alors que de α et pas de d) et la FIGURE 6 représente TV en fonction de d dans le cas du modèle à équations multiples pour différentes valeurs de α (10 %, 25 %, 50 %, 100 %).

FIGURE 4 – Taux de variation de la demande énergétique en fonction de la densité d et de α

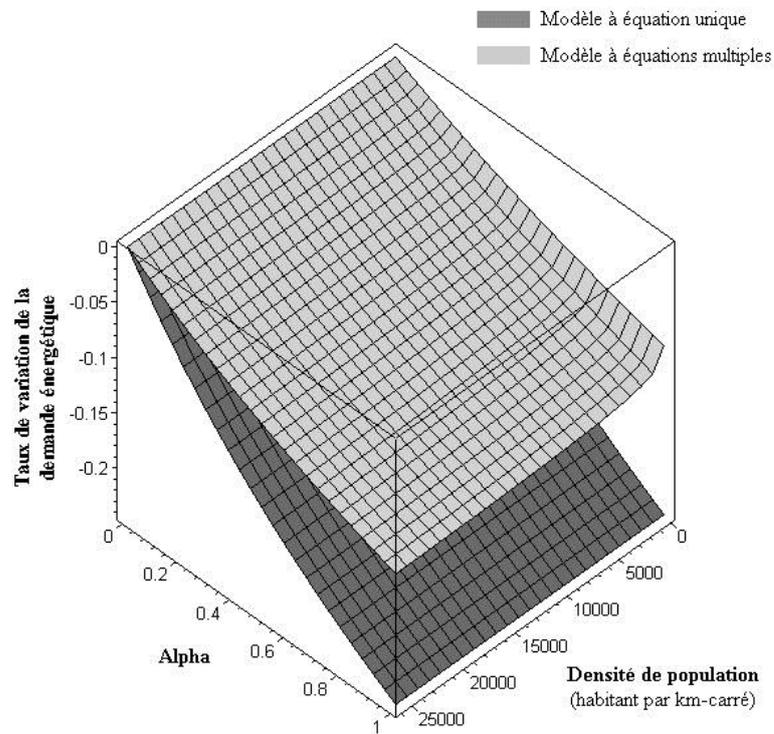


FIGURE 5 – Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de α (Modèle à équation unique)

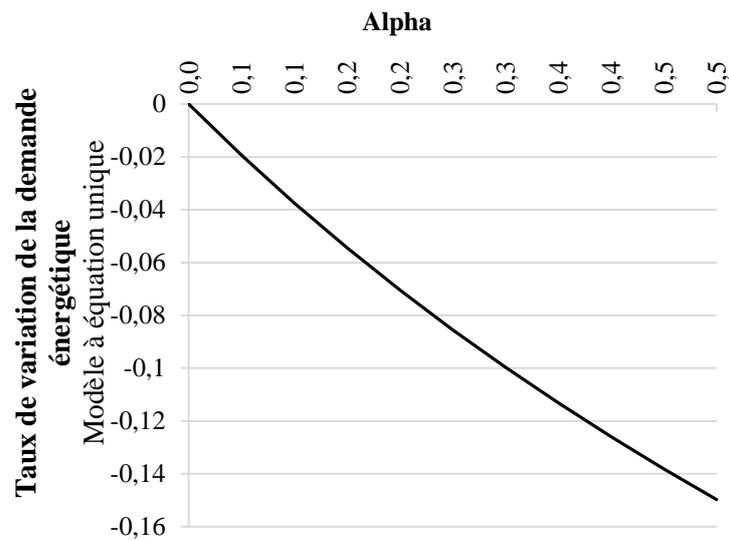
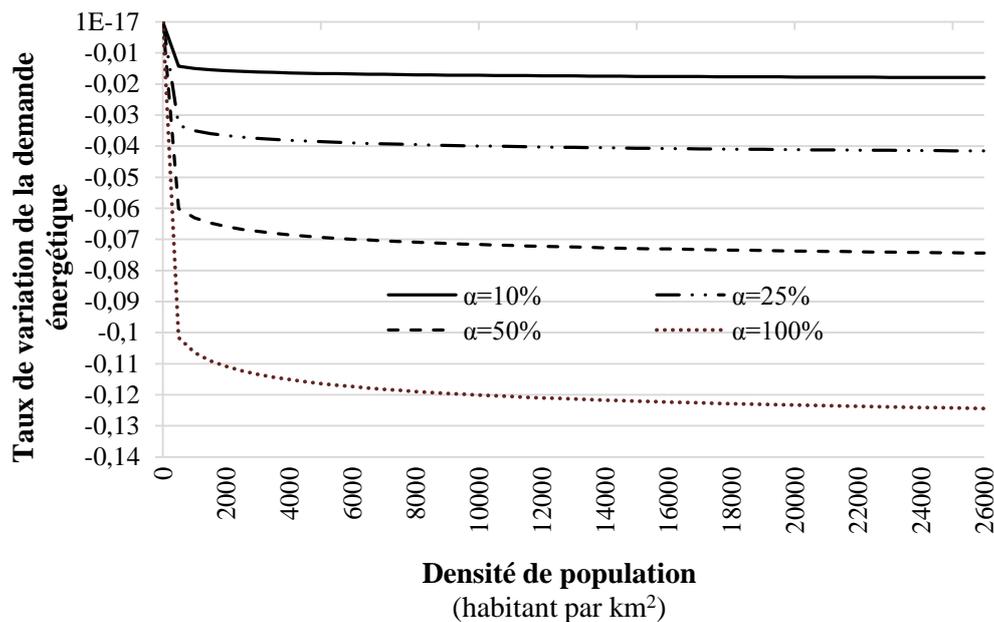


FIGURE 6 – Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % (Modèle à équations multiples)



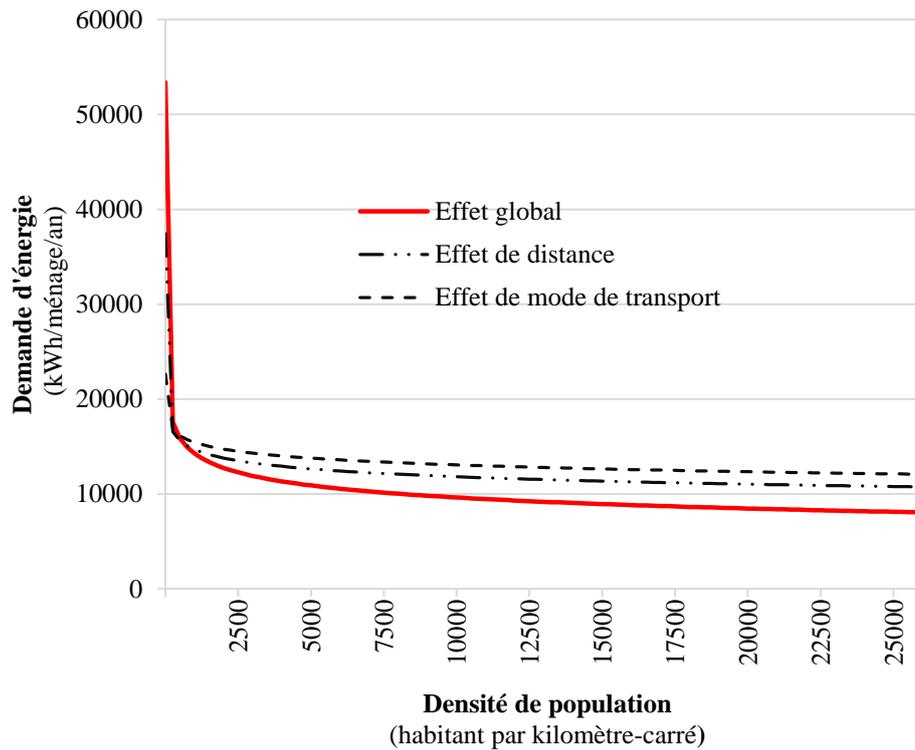
La FIGURE 4 révèle que le taux de variation de la demande énergétique est plus élevé en absolu dans le cas du modèle à équation unique que dans le cas du modèle à équations multiples. En effet, les résultats de l'estimation du premier modèle conduisent à une différence de demande énergétique allant de 0 à 24,2 % pour une densité deux fois plus élevée, différence qui ne s'élève qu'à 12,4 % selon les résultats du deuxième modèle. Si les deux modèles permettent de conclure à un effet significatif et négatif de la densité sur la demande énergétique, ils diffèrent d'un facteur deux dans l'estimation de l'amplitude de cet effet. Or, alors que le deuxième modèle représente explicitement les mécanismes d'impact entre densité et énergie, le premier modèle est susceptible de mesurer l'impact

de la densité sur la demande énergétique à travers des interactions non contrôlées, potentiellement propres à la base de données, issues de variables annexes à la distance et au mode de transport. Dans notre cas, la précision du deuxième modèle permet de mettre en évidence une surestimation du premier modèle de l'impact de la densité résidentielle sur la demande énergétique. C'est donc le modèle à équations multiples que nous retenons pour évaluer l'effet de la densité sur la demande énergétique et conservons le premier modèle pour information.

Dans le cas du modèle à équations multiples, la densité d joue un rôle sur le taux de variation de la demande énergétique. Les calculs précédents mettent en évidence que pour une différence de densité de population de 10 %, la différence de consommation énergétique liée à la mobilité des ménages est de l'ordre de 0 à 1,8 % ; pour une différence d'un facteur deux entre les densités de population (soit le cas où α est égal à 100 % sur la FIGURE 6), la variation de la demande d'énergie s'étend de 0 à 12,4 %. On note que ces ordres de grandeur, estimés sur le cas de la France, correspondent aux estimations du chapitre précédent. En effet, une élasticité constante de la densité par rapport à la demande énergétique de -0,12, correspondant au résultat de la méta-analyse du chapitre 1, induirait un taux de variation de l'ordre de -8 % dans le cas d'une différence d'un facteur 2 de la densité.

Afin de comprendre les mécanismes derrière cette relation entre densité et consommation, FIGURE 7 décompose les variations de la demande énergétique (calculées à partir des résultats de l'estimation à équations multiples) en fonction de la relation causale considérée : i) prise en compte de l'effet de la densité sur la demande énergétique à travers son impact sur la distance parcourue ; ii) prise en compte de l'effet de la densité sur la demande énergétique à travers son impact sur le mode de transport principal du ménage.

FIGURE 7 –Demande énergétique normalisée et densité de population en fonction du mécanisme d'interaction considéré (calculées pour un ménage type correspondant au point moyen de l'échantillon)



L'application numérique montre que l'interaction de la densité de population sur la demande énergétique liée aux déplacements a lieu par l'intermédiaire de deux mécanismes, d'une part à travers la distance parcourue par le ménage pour se rendre sur les lieux contraints, et d'autre part à travers le mode de transport principal utilisé. Ces deux mécanismes vont dans le même sens : pour chacun d'eux considérés séparément, la demande énergétique décroît avec la densité de population. Pour comparer les mécanismes d'impact l'un à l'autre, on détermine les taux de variation de la demande énergétique pour chacun des deux mécanismes. Ces taux de variation, fonction de la densité de population et de α , sont représentés sur la FIGURE 8 et une coupe de cette dernière pour les valeurs de α de 10 %, 25 %, 50 % et 100 % est représentée FIGURE 9.

FIGURE 8 – Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d’impact

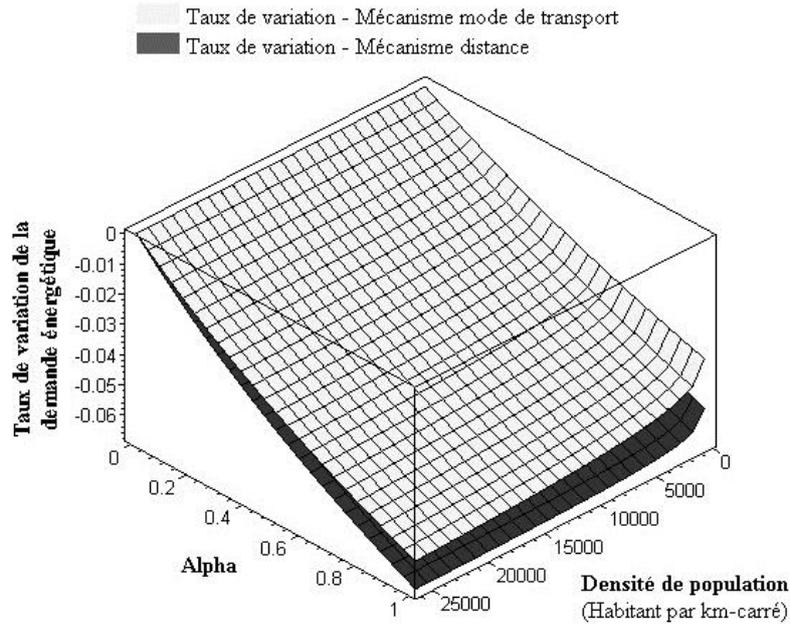
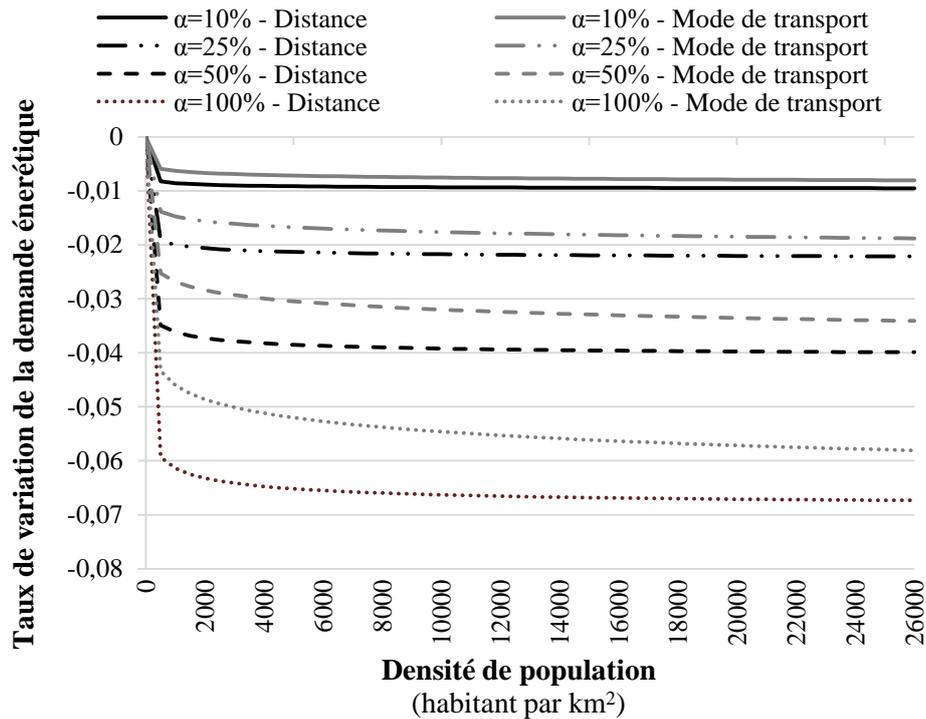


FIGURE 9 – Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d’impact pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 %



Le calcul du taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d’impact permet de mettre en évidence que :

- ces deux mécanismes sont dans le même sens et se cumulent donc pour conduire à l’impact global de la densité ;
- ces deux mécanismes sont du même ordre de grandeur puisqu’une différence d’un facteur deux de la densité de population conduit à une différence de consommation d’énergie

- allant de 0 à 6,7 % à travers le mécanisme distance et de 0 à 5,8 % à travers le mode de transport ;
- dans les deux cas, le taux de variation croît en absolu avec la densité. Plus la densité est élevée, plus l'impact marginal de la densité sur la demande énergétique s'avère importante dans le cas du ménage type considéré ;
 - le mécanisme de distance est légèrement plus important que celui du mode de transport dans le cas du ménage type considéré, et ce indépendamment de la valeur de α comme on peut s'en rendre compte sur la FIGURE 9.

Analyse de sensibilité

Afin d'explorer la sensibilité de ces applications numériques aux choix des caractéristiques du ménage type retenu, on effectue les calculs avec les caractéristiques minimum et maximum de la base de données pour les comparer aux simulations effectuées avec les caractéristiques du ménage moyen en France. On définit un scénario E_n^- en retenant les caractéristiques extrêmes induisant la demande énergétique la plus faible ; ce scénario est appelé scénario *sobre*. De même, on définit un scénario E_n^+ en retenant les caractéristiques extrêmes induisant la demande énergétique la plus élevée : il s'agira du scénario *consommateur*. Le scénario *sobre* correspond entre autres aux ménages les plus pauvres et de petite taille alors que le scénario *consommateur* aux ménages riches et de grande taille. Le détail des modalités et valeurs retenues pour les deux scénarios (E_n^- et E_n^+) est présenté dans le TABLEAU 20 en annexe sachant que les caractéristiques relatives à l'éducation et à la nationalité de la personne de référence du ménage ne sont pas modifiées, tout comme les valeurs des inobservables et termes d'erreur. Les résultats des nouveaux calculs de simulation de la demande énergétique des ménages pour leurs déplacements sont présentés sur la FIGURE 10 pour le scénario *sobre* (E_n^-) et sur la FIGURE 11 pour le scénario *consommateur* (E_n^+). Les taux de variations correspondants sont représentés FIGURE 12 et FIGURE 13 pour le scénario *sobre*, et FIGURE 14 et FIGURE 15 pour le scénario *consommateur*.

FIGURE 10 - Variations de la demande énergétique liée aux déplacements avec la densité de population dans le cas du scénario *sobre*

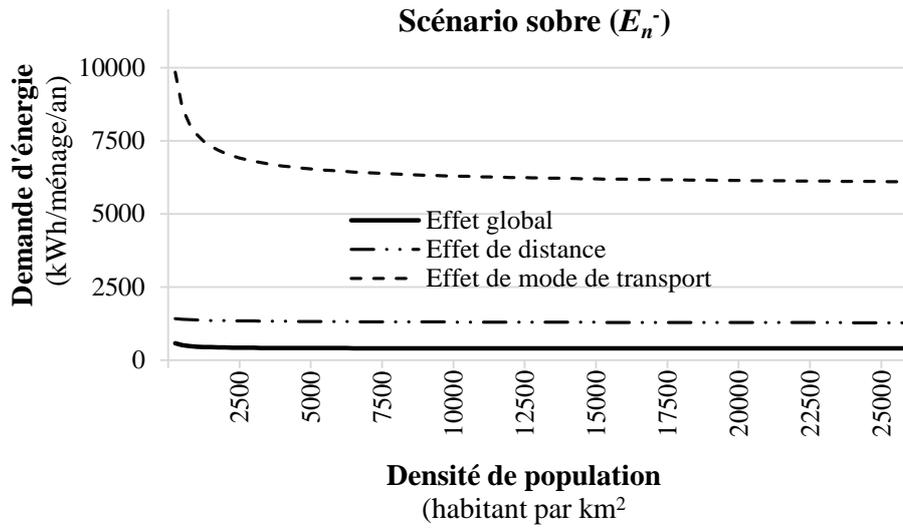


FIGURE 11 - Variations de la demande énergétique liée aux déplacements avec la densité de population dans le cas du scénario *consommateur*

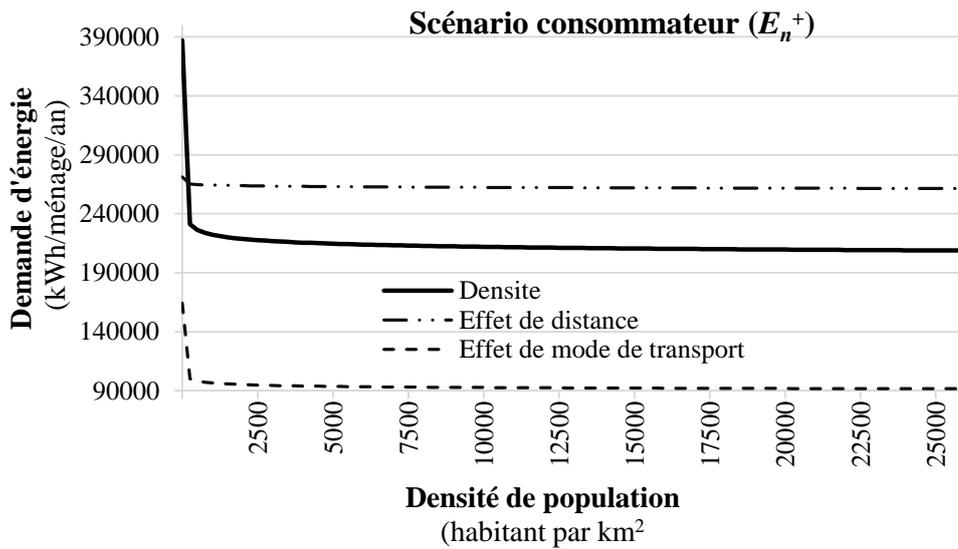


FIGURE 12 - Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % (Modèle à équations multiples, scénario *sobre*)

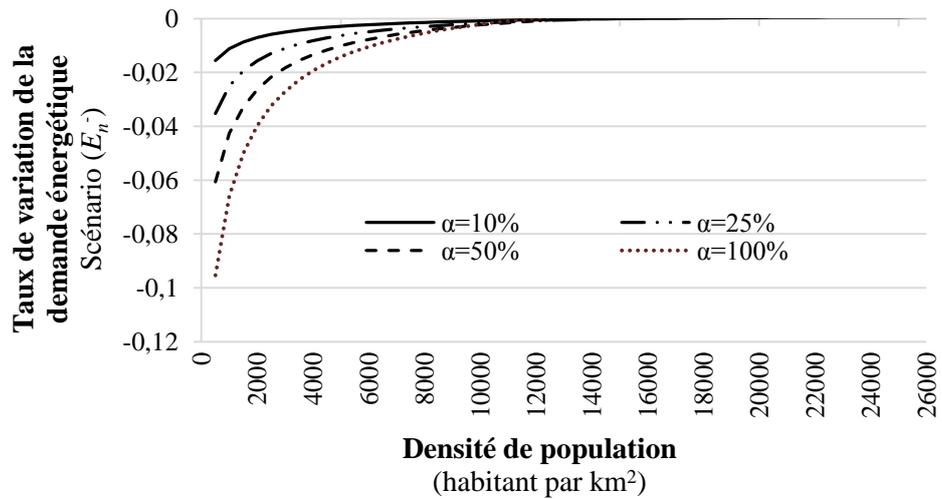


FIGURE 13 - Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d'impact (Modèle à équations multiples, scénario *sobre*)

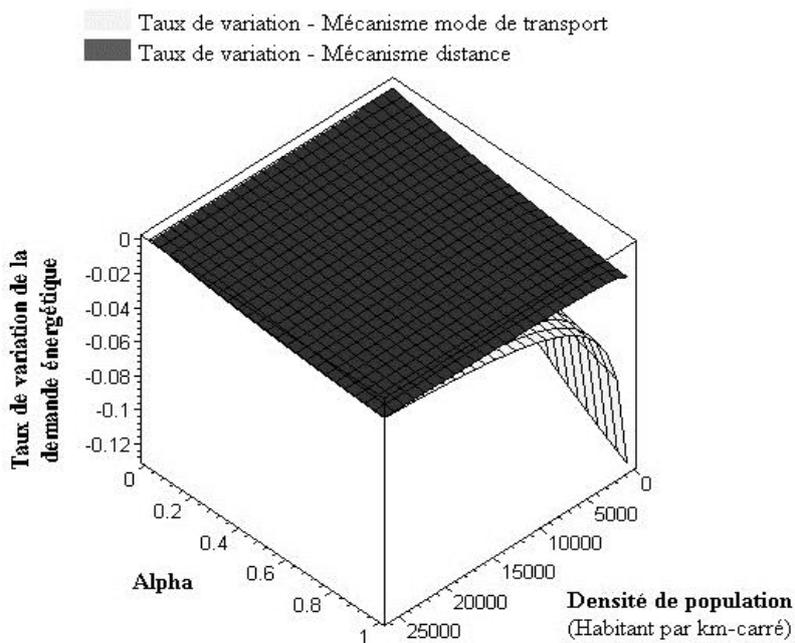


FIGURE 14 - Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % (Modèle à équations multiples, scénario *consommateur*)

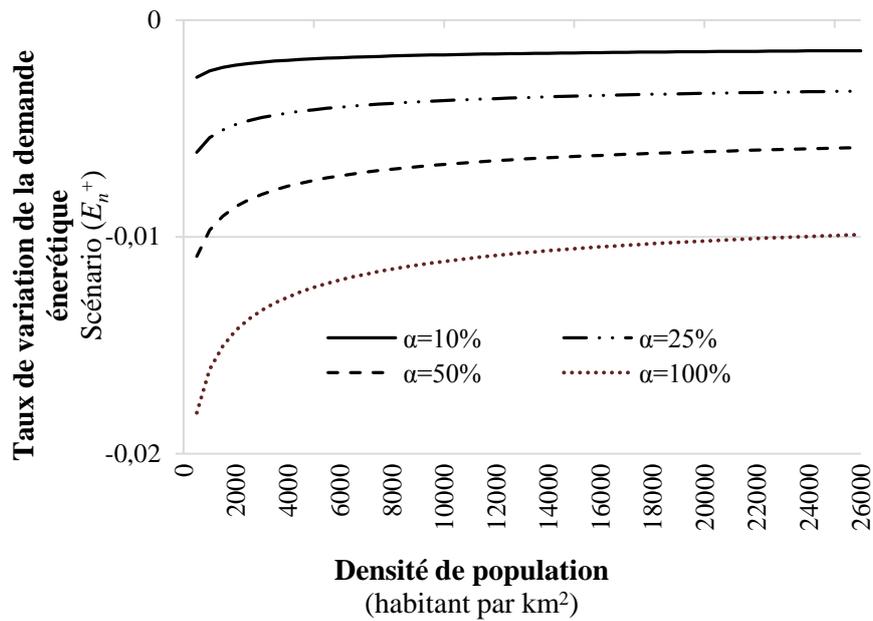
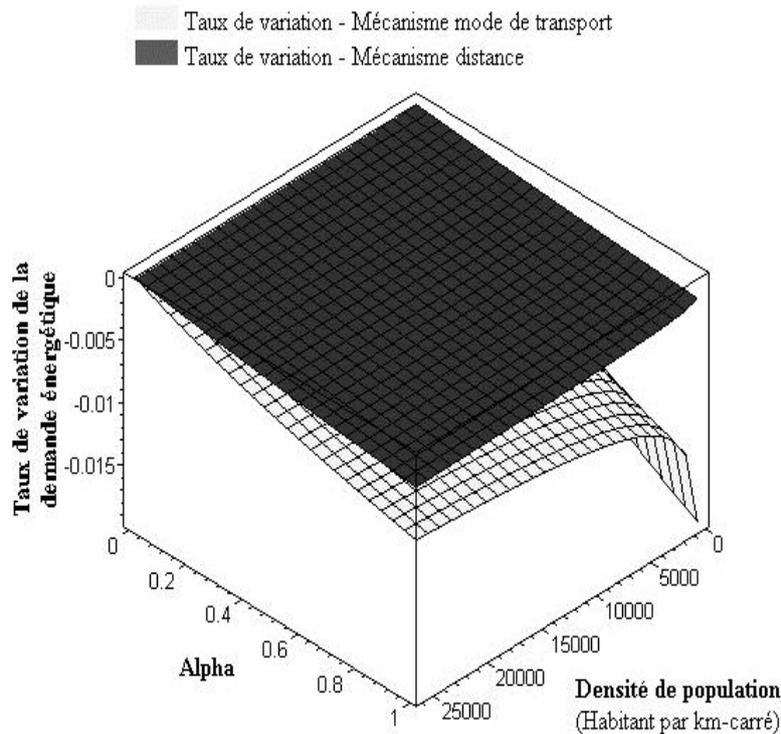


FIGURE 15 - Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d'impact (Modèle à équations multiples, scénario *consommateur*)



Les résultats de l'analyse de sensibilité présentée ci-dessus révèlent que, d'une part, l'amplitude de l'impact de la densité de population sur la demande énergétique liée à la mobilité des ménages évolue en fonction des caractéristiques du ménage considéré, et que, d'autre part, les variations de cet effet avec la densité évoluent également. Ainsi, tout comme dans les simulations réalisées avec les caractéristiques moyennes des ménages, on retrouve dans les deux scénarios *sobre* et

consommateur : i) un effet significatif négatif de la densité sur la consommation énergétique à travers une modification de la distance parcourue ; ii) un effet significatif négatif de la densité de consommation énergétique à travers un changement du mode de transport utilisé ; iii) un effet global négatif de la densité sur demande énergétique (FIGURE 10 et FIGURE 11). Pour ce qui est du taux de variation (FIGURE 12 et FIGURE 14), alors que celui-ci varie de 0 à 12,4 % dans le cas du ménage type moyen, on observe un intervalle de 0 à 15 % pour le taux de variation dans le cas du scénario *sobre* et de 0 à 1,8 % dans le cas du scénario *consommateur*, soit une différence d'un facteur 6 à 7 entre les scénarios. L'amplitude de l'effet de la densité sur la demande énergétique dépend donc fortement des caractéristiques du ménage considéré. Contrairement au cas du ménage type moyen, le taux de variation de la demande énergétique diminue en absolu avec la densité de population pour les deux scénarios *sobre* et *consommateur*. En d'autres termes, dans ces deux scénarios, une différence de densité a proportionnellement plus d'impact sur la demande énergétique dans les zones à faible densité de population que dans les zones à haute densité de population. Ceci est d'autant plus important que c'est dans les zones à faibles densités que l'on retrouve les plus grosses demandes énergétiques. Enfin, en ce qui concerne les mécanismes d'impact : alors que le mécanisme distance est prépondérant dans le cas du ménage type moyen, c'est le mécanisme mode de transport qui prend le dessus dans les deux scénarios *sobre* et *consommateur* considérés. L'interprétation derrière est que dans le cas des ménages extrêmes, les caractéristiques socio-économiques telles que revenu ou taille prennent le pas sur la densité dans la détermination des distances à parcourir, alors que ce n'est pas le cas dans la détermination des choix modaux. En revanche, c'est l'inverse si on s'intéresse à un ménage type. Les principaux résultats de cette analyse de sensibilité sont synthétisés dans le TABLEAU 14.

TABLEAU 14 – Principaux résultats de l'analyse de sensibilité aux caractéristiques des ménages de l'effet de la densité sur la demande énergétique

	Ménage type moyen	Scénario <i>sobre</i> (E_n^-)	Scénario <i>consommateur</i> (E_n^+)
Sens de variation de la demande énergétique E_n avec la densité	Décroissante	Décroissante	Décroissante
Sens de variation du taux de variation TV (en valeur absolue) avec la densité	Croissant	Décroissant	Décroissant
Intervalle du taux de variation (en valeur absolue)	[0% ; 12,4 %]	[0% ; 15 %]	[0% ; 1,8 %]
Rôle relatif du mécanisme distance par rapport au mécanisme mode de transport	Mécanisme distance prépondérant	Mécanisme mode de transport prépondérant	Mécanisme mode de transport prépondérant

L'analyse de sensibilité conduite sur les variables socio-économiques des ménages permet de mettre en évidence des spécificités propres aux ménages présentant des caractéristiques de faible et forte consommation énergétique. Tout d'abord, la demande d'énergie des ménages susceptibles de

consommer beaucoup (à savoir les ménages riches, jeunes, de grande taille et sans enfant) est beaucoup moins sensibles à la densité résidentielle que celle des autres ménages (taux de variation de moins de 2 % de la demande énergétique entre une densité d et une densité $2d$ alors que pour un ménage moyen ou un ménage susceptible de consommer peu, ce taux de variation est de 12 à 15 %). Ceci peut s'expliquer notamment par la flexibilité de ces ménages notamment en termes de revenu et pour lesquels les choix de mobilité sont moins dépendants des caractéristiques de leur localisation que pour les autres ménages. Le deuxième enseignement de l'analyse de sensibilité concerne le rôle relatif de la distance et du mode de transport dans l'effet de la densité résidentielle sur la demande d'énergie. L'effet distance est prépondérant pour le ménage moyen alors que l'effet mode de transport domine pour le ménage pauvre, vieux, réduit et avec enfant. Ainsi, alors que les distances parcourues par le ménage moyen dépendent de manière importante de ses choix de localisation à faible ou forte densité, la deuxième catégorie de ménage révèle des déplacements peu compressibles en termes de distance mais très sensibles aux modes de transports disponibles. Autrement dit, la densité résidentielle n'affecte que peu les distances parcourues par les ménages pauvres mais leur offre un choix plus varié de mode de transport.

Ainsi cette analyse de sensibilité a permis de mettre en évidence qu'au-delà de l'effet moyen de la forme urbaine sur la demande énergétique des ménages, des spécificités existent notamment en fonction des caractéristiques des ménages considérés. Cet aspect est important en perspective de l'implémentation d'une politique spatiale dans le cadre d'une stratégie nationale de sécurité énergétique. En effet, cette étude souligne l'hétérogénéité potentielle de l'impact d'une telle politique sur les ménages. Or la demande énergétique liée aux transports constituant un poste principal de consommation et donc de dépenses des ménages, cette hétérogénéité laisse entrevoir des enjeux d'équité, notamment par rapport aux questions de financement de politique. Ces éléments viennent s'ajouter au débat plus large de l'acceptation sociale et du bien-être individuel versus bien global dans lequel s'inscrivent de manière générale les politiques de planification du territoire.

Des différences entre faibles et hautes densités en termes de sensibilité de la demande énergétique à l'organisation spatiale ont également été révélées. Estimée plus forte pour des densités élevées dans le cas de l'application numérique avec le ménage type moyen, cette sensibilité se révèle au contraire bien plus importante dans les zones à faible densité que dans les zones à forte densité dans le scénario *sobre*. La dernière partie de ce chapitre a pour objectif d'éclairer le rôle des zones rurales, zones de faibles densités, dans la perspective de mise en place de politiques publiques visant à réduire les consommations d'énergie à travers la planification du territoire.

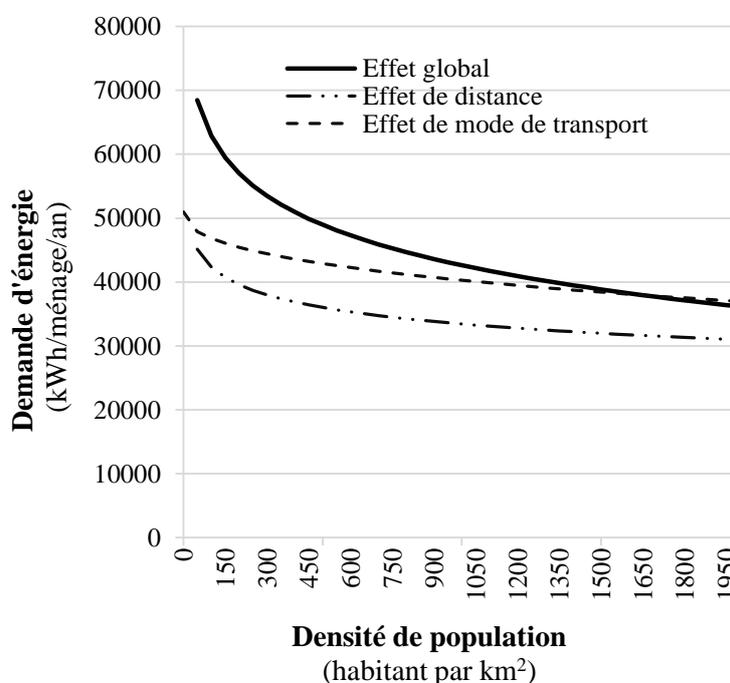
Cas des territoires ruraux

Le premier chapitre a permis de mettre en évidence une différence entre territoires ruraux et territoires urbains en ce qui concerne le lien entre organisation du territoire et demande énergétique liée aux déplacements des ménages. Notamment, la méta-analyse a révélé que la mobilité dans les zones

rurales semble être plus sensible aux déterminants spatiaux que dans les zones urbaines, sur lesquelles se concentrent pourtant la plupart des études empiriques en matière de transport. Or cette question peut s'avérer particulièrement pertinente pour un pays à forte proportion rurale comme la France. L'objectif de cette fin de chapitre est donc d'apporter un éclairage quantitatif sur le rôle des zones rurales en France.

Le modèle à équations multiples, défini précédemment, est ainsi ré-estimé sur deux sous-échantillons de la base de ménages : i) sur les 4135 ménages ruraux d'un côté ; et ii) sur les 8 518 ménages urbains de l'autre²⁴. Les FIGURE 16 et FIGURE 17 représentent les variations des demandes énergétiques avec la densité de population dans le cas respectivement des ménages ruraux et des ménages urbains.²⁵

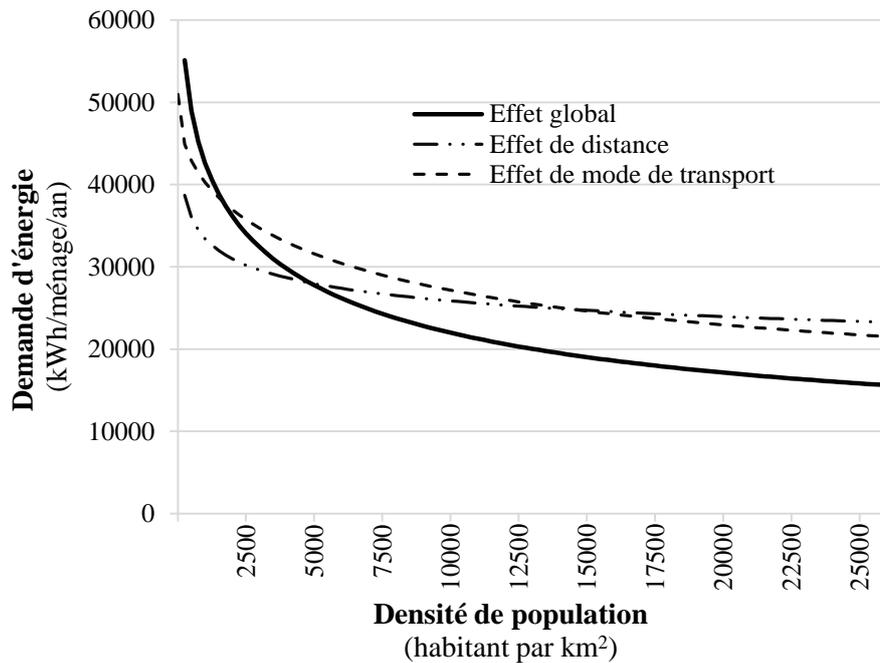
FIGURE 16 - Variations de la demande énergétique liée aux déplacements avec la densité de population dans le cas des ménages ruraux



²⁴ Les deux sous-échantillons sont construits à partir de l'information de l'appartenance ou non du ménage à une commune dite *rurale* selon la définition de l'INSEE, c'est-à-dire n'appartenant pas à une unité urbaine.

²⁵ La densité de population 2006 maximum dans les communes rurales française atteint 1948 habitants/km² : l'intervalle de densité [0 ; 2000] en habitants/km² est donc retenu pour étudier les résultats des estimations réalisées sur le sous-échantillon des ménages ruraux.

FIGURE 17 - Variations de la demande énergétique liée aux déplacements avec la densité de population dans le cas des ménages urbains



Dans les deux cas des ménages ruraux et des ménages urbains, on observe une décroissance de la demande énergétique avec la densité de population, et ce, que l'on prenne les deux mécanismes d'impact en compte ou bien séparément. Les FIGURE 18 et FIGURE 19 permettent d'analyser l'évolution du taux de variation TV avec la densité.

FIGURE 18 – Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % dans le cas des ménages ruraux (Modèle à équations multiples)

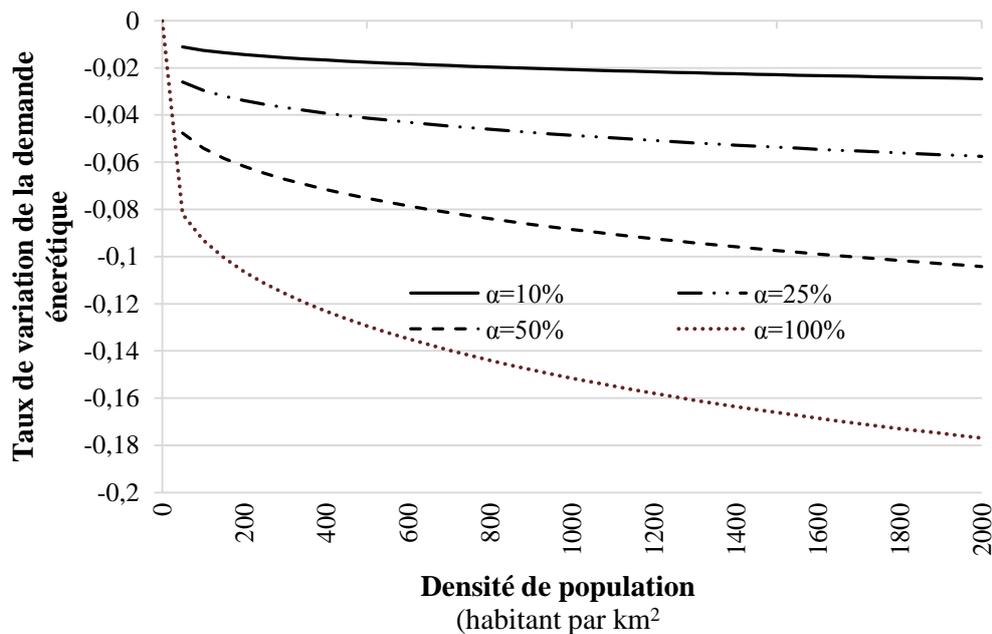
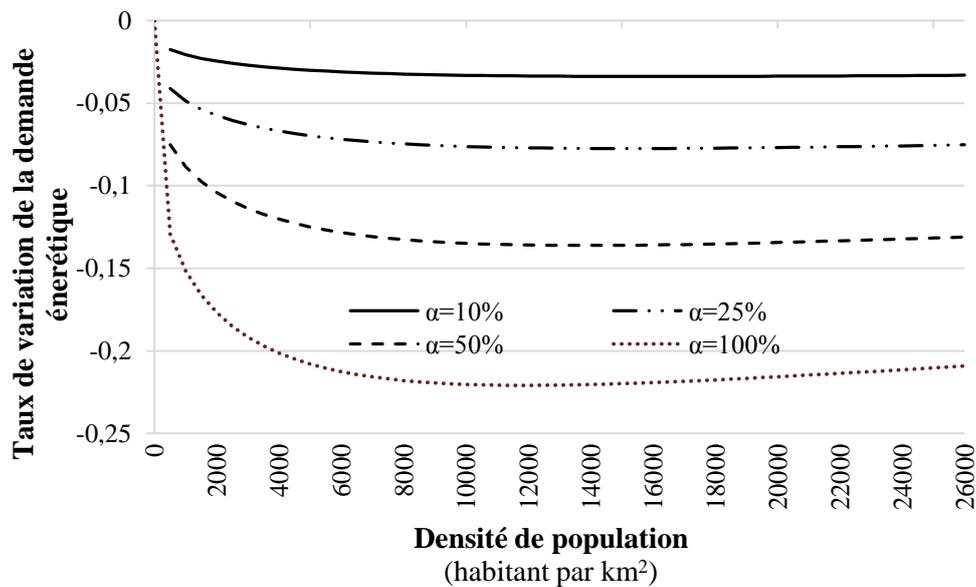


FIGURE 19 – Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % dans le cas des ménages urbains (Modèle à équations multiples)



Pour les ménages ruraux comme pour les ménages urbains, le taux de variation est négatif. Il décroît avec la densité pour les zones rurales tout comme c'était le cas des simulations effectuées sur l'ensemble des ménages ruraux et urbains. En revanche, on note que dans le cas des ménages urbains seuls, le taux de variation décroît jusqu'à des valeurs de densité de 12 000 à 16 000 habitants/km² puis croît ensuite. Il existe ainsi un minimum pour le taux de variation, et donc un intervalle de densité pour lequel l'impact de l'organisation sur la demande énergétique des ménages urbains est le plus fort. Dans la perspective de mise en place d'une politique spatiale, cibler ces densités en priorité serait le plus efficace en termes de réduction des consommations d'énergie. En ce qui concerne les ordres de grandeur de l'effet de l'organisation spatiale sur la demande énergétique liée aux déplacements des ménages, le taux de variation atteint -17,7 % dans la zone rurale alors qu'un même facteur 2 rapporté au cas des ménages urbains pour une densité de référence de 16 000 habitants/km² correspond à une différence de consommation d'énergie de -22 %. Ces valeurs sont nettement au-dessus des simulations réalisées à partir des estimations menées sur l'ensemble du territoire (zones rurales et urbaines), pour lesquelles le taux de variation similaire s'élevait à -12,4 % (voir TABLEAU 14).

Ainsi, lorsque l'estimation de l'effet de la densité résidentielle sur la demande énergétique est réalisée sur deux sous-échantillons, les ménages ruraux et les ménages urbains, les résultats révèlent un impact plus fort de la densité résidentielle que lorsque celui-ci est estimé sur l'ensemble de la population. Cela suggère que chaque sous-échantillon a des caractéristiques de mobilité hétérogènes, dans chaque cas relativement sensibles de façon spécifique aux caractéristiques spatiales locales. Et l'agrégation des échantillons induit une sensibilité globale atténuée. Il est donc important de réaliser des estimations propres à chaque type de population. Enfin, si l'ordre de grandeur de l'effet de la densité résidentielle sur la demande énergétique est le même pour les ruraux et les urbains, une

différence de 10 % de densité a des conséquences différentes en fonction de la typologie de population considéré. Pour les ruraux ayant en moyenne une consommation énergétique plus élevée, 10 % de densité correspond à un différentiel énergétique absolu plus important que pour les urbains. Dans le cas des urbains, 10 % de densité correspond à une concentration beaucoup plus importante et concerne une plus grande part de population.

Les enseignements de cette analyse comparative des zones rurales et urbaines sont donc les suivants :

- i) nos résultats de confirment pas, dans le cas de la France, les conclusions du chapitre précédent à savoir une influence relative plus forte de la densité sur la consommation d'énergie liée au transport dans les zones rurales par rapport aux zones urbaine. D'où l'importance d'effectuer des estimations régionales spécifiques ;
- ii) si l'estimation de l'effet de la densité résidentielle sur la demande énergétique est du même ordre de grandeur pour les ménages ruraux et urbains, ces deux typologies ont leurs dynamiques spatiales propres et donc requièrent une analyse spécifique dans l'évaluation et la mise en place de potentielles stratégies spatiales ;
- iii) ces spécificités entraînent dans notre cas une sous-estimation de l'effet de la densité résidentielle lorsqu'il est estimé sur l'ensemble de la population ;
- iv) pour un différentiel relatif de densité résidentielle donné (par exemple 10%) :
 - le différentiel énergétique absolu correspondant est plus important pour les ruraux que pour les urbains ;
 - l'augmentation absolue de densité est plus importante pour les fortes densités donc pour les urbains ;
 - plus de personnes sont concernées par la réduction de consommation dans les zones à forte concentration.

V. CONCLUSION

Afin d'éclairer le débat sur le rôle de l'organisation spatiale du territoire sur les déplacements des ménages et la consommation énergétique associée, ce chapitre a présenté une analyse de l'influence de la densité de population sur la demande énergétique à travers les choix de mobilité. D'un point de vue de politique publique, les résultats ont mis en évidence la contribution potentielle d'actions visant à intervenir sur la localisation des ménages (notamment à travers des mesures de planification) en termes d'effort de réduction des consommations d'énergie du secteur des transports.

L'influence de la densité sur les choix de mobilité contrainte des ménages français et sur la demande énergétique associée a ainsi été étudiée à travers une analyse économétrique. La construction du modèle empirique a nécessité l'estimation de modèles continus par la méthode des Moindres Carrés et de modèles discrets à choix multiples. La question de l'endogénéité, cruciale lorsqu'il s'agit de densité, a été adressée dans les deux types de modèles par l'utilisation de variables instrumentales avec

estimations en deux étapes (2SLS pour les modèles continus et 2SRI pour les modèles discrets). Le cadre d'analyse a été conçu afin de permettre la décomposition de l'effet de la densité sur la demande énergétique des ménages à travers leurs choix de mobilité en termes de distance parcourue et de mode de transport.

Nos résultats mettent en évidence le rôle significatif et négatif de la densité dans la formation de la demande énergétique des ménages associée à leur mobilité contrainte. De plus, cet impact est également significatif et négatif pour chacun des deux mécanismes d'interaction. Des simulations ont ensuite été réalisées à caractéristiques de ménages fixées afin d'estimer le potentiel des déterminants spatiaux dans l'effort de sécurité énergétique. Ces applications numériques révèlent que les deux mécanismes d'impact, à savoir l'effet de la densité sur la demande énergétique à travers la longueur des déplacements et à travers le type de transport utilisé, sont du même ordre de grandeur pour un ménage moyen. Ainsi, si la distance est un paramètre clé lorsque l'on parle de localisation, mobilité et consommation d'énergie, le choix modal l'est tout autant.

En termes de potentiel de réduction des consommations d'énergie dans le cas d'un ménage moyen en France, une différence d'un facteur 2 de la densité de population correspond à une différence de 12,4 % de la demande énergétique. Cette évaluation est du même ordre de grandeur que la moyenne estimée dans le chapitre précédent qui conduirait à une variation équivalente de la demande énergétique d'environ 8 %.

L'analyse comparative de différents scénarios de simulation réalisée a d'importantes implications politiques. Ainsi l'amplitude de l'impact de la densité sur la demande énergétique est très sensible aux caractéristiques socio-économiques des ménages. Cet aspect est important en perspective de l'implémentation d'une politique spatiale dans le cadre de la stratégie nationale de sécurité énergétique. En effet, cette étude souligne l'hétérogénéité potentielle de l'impact d'une telle politique sur les ménages. Or la demande énergétique liée aux transports constituant un poste principal de consommation et donc de dépenses des ménages, cette hétérogénéité laisse entrevoir des enjeux d'équité notamment par rapport aux questions de financement de politique. Ces éléments viennent s'ajouter au débat plus large de l'acceptation sociale et du bien-être individuel versus bien global dans lequel s'inscrivent de manière générale les politiques de planification du territoire.

Enfin, l'estimation du modèle construit sur les sous-échantillons rural et urbain a mis en évidence que l'amplitude de l'effet de l'organisation spatiale sur la demande énergétique liée aux déplacements contraints des ménages est du même ordre de grandeur dans les zones urbaines et dans les zones rurales. Les zones rurales représentent ainsi un enjeu au même titre que les zones urbaines dans l'effort de réduction de la demande énergétique nationale à travers la mise en place de politiques spatiales.

Alors que ces résultats confirment l'effet de l'espace sur la demande énergétique liée au secteur des transports, il est nécessaire d'explorer également son impact sur l'autre poste énergétique

clé des ménages, à savoir le résidentiel, afin de pouvoir tirer des conclusions robustes sur le rôle de la dimension spatiale dans la boîte à outils des politiques publiques. C'est l'objectif du chapitre 3.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, 2008. Efficacité énergétique, émissions de CO2 et autres émissions spécifiques des modes de transport.
- Alonso, W., 1964. *Location and land use: Toward a general theory of land rent*, Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Angrist, J.D. & Krueger, A.B., 2001. Instrumental Variables and the Search for Identification: From Supply and Demand to Natural Experiments. *Journal of Economic Perspectives*, 15(4), p.69-85.
- Bento, A.M. et al., 2005. The Effects of Urban Spatial Structure on Travel Demand in the United States. *Review of Economics and Statistics*, 87(3), p.466-478.
- Bhat, C. & Guo, J., 2007. A comprehensive analysis of built environment characteristics on household residential choice and auto ownership levels. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(5), p.506-526.
- Boarnet, M. & Greenwald, M., 2000. Land Use, Urban Design, and Nonwork Travel: Reproducing Other Urban Areas' Empirical Test Results in Portland, Oregon. *Transportation Research Record*, 1722(1), p.27-37.
- Boarnet, M., Greenwald, M. & McMillan, T.E., 2008. Walking, Urban Design, and Health. *Journal of Planning Education and Research*, 27(3), p.341-358.
- Boarnet, M., Nesamani, K.S. & Smith, S., 2003. Comparing the influence of Land Use on Nonwork Trip Generation and Vehicle Distance Traveled: An Analysis using Travel Diary Data. *Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine*.
- Boarnet, M. & Sarmiento, S., 1998. Can Land-use Policy Really Affect Travel Behaviour? A Study of the Link between Non-work Travel and Land-use Characteristics. *Urban Studies*, 35(7), p.1155-1169.
- Brownstone, D. & Golob, T.F., 2009. The impact of residential density on vehicle usage and energy consumption. *Journal of Urban Economics*, 65(1), p.91-98.
- Burchfield, M. et al., 2005. Causes of Sprawl: A Portrait from Space*. *The Quarterly journal of economics*, 121(2), p.587-633.
- Cao, X., Handy, S. & Mokhtarian, P.L., 2006. The Influences of the Built Environment and Residential Self-Selection on Pedestrian Behavior: Evidence from Austin, TX. *Transportation*, 33(1), p.1-20.
- Cao, X., Mokhtarian, P.L. & Handy, S., 2009. The relationship between the built environment and nonwork travel: A case study of Northern California. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, In Press, Corrected Proof.
- Cervero, R., 2006. Alternative Approaches to Modeling the Travel-Demand Impacts of Smart Growth. *Journal of the American Planning Association*, 72(3), p.285-295.
- Cervero, R. & Duncan, M., 2003. Walking, Bicycling, and Urban Landscapes: Evidence From the San Francisco Bay Area. *American Journal of Public Health*, 93(9), p.1478-1483.
- Cervero, R. & Gorham, R., 1995. Commuting in transit versus automobile neighborhoods. *Journal of the American Planning Association*, 61(2), p.210.
- Cervero, R. & Murakami, J., 2010. Effects of built environments on vehicle miles traveled: evidence from 370 US urbanized areas. *Environment and Planning A*, 42(2), p.400 –

- Chatman, D., 2003. How Density and Mixed Uses at the Workplace Affect Personal Commercial Travel and Commute Mode Choice. *Transportation Research Record*, 1831(1), p.193-201.
- Chatman, D.G., 2009. Residential choice, the built environment, and nonwork travel: evidence using new data and methods. *Environment and Planning A*, 41(5), p.1072 – 1089.
- Ciccone, A. & Hall, R.E., 1996. Productivity and the Density of Economic Activity. *The American Economic Review*, 86(1), p.54-70.
- van de Coevering, P. & Schwanen, T., 2006. Re-evaluating the impact of urban form on travel patterns in Europe and North-America. *Transport Policy*, 13(3), p.229-239.
- Daniel Chatman, 2009. Residential choice, the built environment, and nonwork travel: evidence using new data and methods. *Environment and Planning A*, 41(5), p.1072 – 1089.
- Dender, K.V., 2003. Transport Taxes with Multiple Trip Purposes. *The Scandinavian Journal of Economics*, 105(2), p.295-310.
- Dubin, J.A. & McFadden, D.L., 1984. An Econometric Analysis of Residential Electric Appliance Holdings and Consumption. *Econometrica*, 52(2), p.345-362.
- Emrath, P. & Liu, F., 2008. Vehicle Carbon Dioxide Emissions and the Compactness of Residential Development. *Cityscape: A Journal of Policy Development and Research*, 10(3), p.185-202.
- Ewing, R., 1995. Beyond density, mode choice, and single-purpose trips. *Transportation Quarterly*, 49(4).
- Ewing, R. & Cervero, R., 2010. Travel and the Built Environment. *Journal of the American Planning Association*, 76, p.265-294.
- Ewing, R., Deanna, M. & Li, S.-C., 1996. Land Use Impacts on Trip Generation Rates. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1518(1), p.1-6.
- Ewing, R., Schieber, R.A. & Zegeer, C.V., 2003. Urban Sprawl as a Risk Factor in Motor Vehicle Occupant and Pedestrian Fatalities. *Am J Public Health*, 93(9), p.1541-1545.
- Frank, L. et al., 2010. Carbonless footprints: Promoting health and climate stabilization through active transportation. *Preventive Medicine*, 50(Supplement 1), p.S99-S105.
- Frank, L., Saelens, B.E., et al., 2007. Stepping towards causation: Do built environments or neighborhood and travel preferences explain physical activity, driving, and obesity? *Social Science & Medicine*, 65(9), p.1898-1914.
- Frank, L., Bradley, M., et al., 2007. Urban form, travel time, and cost relationships with tour complexity and mode choice. *Transportation*, 35(1), p.37-54.
- Frank, L. & Pivo, G., 1995. Impacts of Mixed Use and Density on Utilization of Three Modes of Travel: Single-Occupant Vehicle, Transit, and Walking. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1466).
- Frankel, J.A. & Rose, A.K., 2005. Is Trade Good or Bad for the Environment? Sorting out the Causality. *Review of Economics & Statistics*, 87(1), p.85-91.

- Fujita, M., 1989. *Urban economic theory: land use and city size*, Cambridge University Press.
- Fulton, W. et al., 2001. *Who Sprawls Most? How Growth Patterns Differ Across the U.S.* Brookings Institution., Washington, DC. Available at: http://www.brookings.edu/reports/2001/07metropolitanpolicy_fulton.aspx [Consulté mars 12, 2012].
- Galster, G. et al., 2001. Wrestling Sprawl to the Ground: Defining and measuring an elusive concept. *Housing Policy Debate*, 12(4), p.681-717.
- Giuliano, G. & Narayan, D., 2003. Another Look at Travel Patterns and Urban Form: The US and Great Britain. *Urban Studies*, 40(11), p.2295 -2312.
- Grazi, F., van den Bergh, J.C.J.M. & van Ommeren, 2008. An Empirical Analysis of Urban Form, Transport and Global Warming. *The Energy Journal*, 29(4), p.97-122.
- Greenwald, M. & Boarnet, M., 2001. Built Environment as Determinant of Walking Behavior: Analyzing Nonwork Pedestrian Travel in Portland, Oregon. *Transportation Research Record*, 1780(1), p.33-41.
- Guo, J., Bhat, C. & Copperman, R., 2007. Effect of the Built Environment on Motorized and Nonmotorized Trip Making: Substitutive, Complementary, or Synergistic? *Transportation Research Record*, 2010(1), p.1-11.
- Handy, S., Cao, X. & Mokhtarian, P., 2005. Correlation or causality between the built environment and travel behavior? Evidence from Northern California. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 10(6), p.427-444.
- Handy, S., Cao, X. & Mokhtarian, P.L., 2006. Self-Selection in the Relationship between the Built Environment and Walking: Empirical Evidence from Northern California. *Journal of the American Planning Association*, 72(1), p.55-74.
- Handy, S. & Clifton, K., 2001. Local shopping as a strategy for reducing automobile travel. *Transportation*, 28(4), p.317-346.
- Karathodorou, N., Graham, D.J. & Noland, R.B., 2010. Estimating the effect of urban density on fuel demand. *Energy Economics*, 32(1), p.86-92.
- Kitamura, R., Mokhtarian, P.L. & Laidet, L., 1997. A micro-analysis of land use and travel in five neighborhoods in the San Francisco Bay Area. *Transportation*, 24(2), p.125-158.
- Kockelman, K., 1997. Travel Behavior as Function of Accessibility, Land Use Mixing, and Land Use Balance: Evidence from San Francisco Bay Area. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1607(-1), p.116-125.
- Lafourcade, M. & Baudin-de-Thé, C., 2012. Périurbanisation et dépenses de carburant des ménages : le cas des villes françaises.
- Leck, E., 2006. The Impact of Urban Form on Travel Behavior: A Meta-Analysis. *Berkeley Planning Journal*, 19.
- Levinson, D.M. & Kumar, A., 1997. Density and the journey to work. *Growth and Change*, 28(2), p.147-172.
- Lopez, R. & Hynes, H.P., 2003. Sprawl In The 1990s Measurement, Distribution, and Trends. *Urban Affairs Review*, 38(3), p.325-355.
- Mokhtarian, P.L. & Bagley, M.N., 2002. The impact of residential neighborhood type on travel behavior: A structural equations modeling approach. *The Annals of Regional Science*, 36(2), p.279-297.

- Muñiz, I. & Galindo, A., 2005. Urban form and the ecological footprint of commuting. The case of Barcelona. *Ecological Economics*, 55(4), p.499-514.
- Nass, 2005. Residential location affects travel behavior?but how and why? The case of Copenhagen metropolitan area. *Progress in Planning*, 63(2), p.167-257.
- Newman, P.W.G. & Kenworthy, J.R., 1989. *Cities and automobile dependence : a sourcebook*, Brookfield, Vt., USA: Gower Technical.
- Niemeier, D. & Rutherford, G., 1994. Nonmotorized Transportation, NPTS: Travel Mode Special Reports. *Washington, DC : Report*.
- Schimek, P., 1996. Household Motor Vehicle Ownership and Use: How Much Does Residential Density Matter? *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1552(-1), p.120-125.
- Service de l'observation et des statistiques, 2011. Un habitant de pôle urbain émet deux fois moins de CO2 que la moyenne pour se rendre à son lieu de travail ou d'études. *Le point Sur*, (87). Available at: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/LPS87.pdf>.
- Shay, E. et al., 2006. Drive or Walk? Utilitarian Trips Within a Neotraditional Neighborhood. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1985).
- SOES, 2010. La consommation d'énergie et les émissions polluantes liées aux déplacements des ménages. Available at: <http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/donnees-essentielles/societe/menages/la-consommation-denergie-et-les-emissions-polluantes-liees-aux-deplacements.html>.
- Souche, S., 2010. Measuring the structural determinants of urban travel demand. *Transport Policy*, 17(3), p.127-134.
- Stock, J.H., Wright, J.H. & Yogo, M., 2002. A Survey of Weak Instruments and Weak Identification in Generalized Method of Moments. *American Statistical Association Journal of Business & Economic Statistics*, 20(4), p.518-529.
- Stock, J.H. & Yogo, M., 2001. Testing for Weak Instruments in Linear IV Regression. Available at: http://www.economics.harvard.edu/faculty/stock/files/rfa_6.pdf.
- Su, Q., 2011. The effect of population density, road network density, and congestion on household gasoline consumption in U.S. urban areas. *Energy Economics*, 33(3), p.445-452.
- Su, Q., 2010. Travel demand in the US urban areas: A system dynamic panel data approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(2), p.110-117.
- Sun, X., Wilmot, C. & Kasturi, T., 1998. Household Travel, Household Characteristics, and Land Use: An Empirical Study from the 1994 Portland Activity-Based Travel Survey. *Transportation Research Record*, 1617(1), p.10-17.
- Terza, J.V., Basu, A. & Rathouz, P.J., 2008. Two-Stage Residual Inclusion Estimation: Addressing Endogeneity in Health Econometric Modeling. *Journal of health economics*, 27(3), p.531-543.
- Von Thünen, J.H. von, 1826. *Der isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie* Perthes., Hambourg.
- Train, K., 2003. *Discrete choice methods with simulation*, Cambridge University Press.

- Wolman, H. et al., 2005. The Fundamental Challenge in Measuring Sprawl: Which Land Should Be Considered? *The Professional Geographer*, 57(1), p.94-105.
- Wooldridge, J.M., 2002. *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*, MIT Press.
- Yoon, S.Y., Golob, T.F. & Goulias, K.G., 2008. *A California Statewide Exploratory Analysis Correlating Land Use Density, Infrastructure Supply and Travel Behavior*, University of California Transportation Center.
- Zegras, C., 2010. The Built Environment and Motor Vehicle Ownership and Use: Evidence from Santiago de Chile. *Urban Studies*, 47(8), p.1793 -1817.
- Zhou, B. (Brenda) & Kockelman, K., 2008. Self-Selection in Home Choice: Use of Treatment Effects in Evaluating Relationship Between Built Environment and Travel Behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2077, p.54-61.

ANNEXE

a. Traitement de l'endogénéité de la densité dans le modèle de distance parcourue et dans le modèle de consommation énergétique

Le TABLEAU 15 présente les résultats de la régression de la densité sur ses instruments et sur les variables exogènes du modèle de distance parcourue par le ménage. Cette régression est utilisée pour le traitement de l'endogénéité dans deux modèles :

- i) dans le modèle de distance parcourue : le terme d'erreur de cette régression, constituant la variabilité inobservable de la densité, permet de créer une nouvelle variable appelée $Inob_{dens}^D$ qui sera utilisé dans les estimations de la distance parcourue pour contrôler l'endogénéité potentielle de la densité de population selon la méthode 2SRI ;
- ii) dans le modèle de consommation énergétique incluant la densité : cette régression constitue la première étape de la méthode 2SLS et permet de créer la prédiction de la densité en fonction des variables exogènes et des instruments. Cette prédiction est utilisée ensuite comme variable explicative dans la régression de la consommation énergétique afin de capter l'effet de la densité de population en contrôlant l'endogénéité potentielle.

TABLEAU 15 – Régression de la densité sur ses instruments et sur les variables exogènes du modèle de la distance parcourue

Densité de population (log. ^a)	Coef.	Err. St.	p-value
Revenu mensuel du ménage (log. ^a)	0,561***	0,037	>0,001
Age de la personne de référence			
< 30 ans	Réf.		
de 30 à 39 ans	-0,421***	0,060	>0,001
de 40 à 49	-0,148**	0,060	0,014
de 50 à 64	-0,181***	0,061	0,003
>65 ans	-0,126	0,132	0,340
Nombre d'unité de consommation (log. ^a)	-0,665***	0,094	>0,001
Présence d'enfant	0,286***	0,055	>0,001
Education de la personne de référence			
Aucun diplôme	Réf.		
Certificat d'études primaires (CEP)	-0,122	0,100	0,222
Brevet d'études du 1er cycle (BEPC) ou BE, ou brevet des collèges	0,120	0,085	0,157
CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau	-0,264***	0,061	>0,001
Niveau baccalauréat	0,319***	0,073	>0,001
Niveau Bac+2	0,345***	0,073	>0,001
Niveau supérieur à Bac+2	1,092***	0,069	>0,001
Nationalité de la personne de référence			
Français de naissance, y compris par réintégration	Réf.		
Français par naturalisation, mariage, déclaration ou option à sa majorité	1,287***	0,081	>0,001
De nationalité de l'Union européenne des 15 (hors France)	1,155***	0,116	>0,001
De nationalité des pays entrés en 2004 dans l'Union européenne	1,262***	0,472	0,008
De nationalité algérienne, marocaine ou tunisienne	1,687***	0,132	>0,001
De nationalité d'Afrique (hors Maghreb)	1,983***	0,174	>0,001
De nationalités autres ou apatride	1,490***	0,167	>0,001
Instruments de la densité			
Accroissement de population de l'aire urbaine	0,959***	0,055	>0,001
Nombre de pièce du logement	-0,506***	0,013	>0,001
Constante	4,036***	0,257	>0,001

Nombre d'observations	N=11 910 F(21,11 888)=254,39 Prob.>F=0
R-carré	0,31

^alog. : *Forme logarithmique.*

*, **, *** : *Significatif à respectivement 10 %, 5 %, 1 %.*

Variabiles exogènes et instruments permettent d'expliquer environ un tiers de la variance de la densité de population. La F-statistique est égale à 254,39. Or Stock et al. (2002) indique une valeur critique à 5 % de 11,59 pour cette statistique dans le cas d'instruments pas assez robustes. 254,39 étant bien supérieur à la valeur critique, la robustesse des instruments retenus pour la densité de population est ainsi validée.

b. Traitement de l'endogénéité de la densité dans le modèle de mode de transport principal

Le TABLEAU 16 présente les résultats de la régression de la densité de population sur ses instruments, sur les instruments de la variable discrète de distance parcourue et sur les variables exogènes du modèle de mode de transport principal. Le terme d'erreur de cette régression permet de construire la variable $Inob_{dens}^{MT}$ qui représente la variabilité non observable de la densité et est incluse comme variable explicative du modèle de mode de transport afin d'assurer que le coefficient relatif à la densité ne soit pas biaisé par une endogénéité potentielle.

TABLEAU 16 – Régression de la densité sur ses instruments et sur les variables exogènes du modèle de mode de transport

Densité de population (log. ^a)	Coef.	Err. St.	p-value
Revenu mensuel du ménage (log. ^a)	3,282***	0,011	>0,001
Age de la personne de référence			
< 30 ans	Réf.		
de 30 à 39 ans	-1,216***	0,014	>0,001
de 40 à 49	-1,405***	0,014	>0,001
de 50 à 64	-2,176***	0,015	>0,001
> 65 ans	-4,819***	0,032	>0,001
Nombre d'unité de consommation (log. ^a)	7,939***	0,037	>0,001
Présence d'enfant	-0,728***	0,014	>0,001
Education de la personne de référence			
Aucun diplôme	Réf.		
Certificat d'études primaires (CEP)	-0,321***	0,023	>0,001
Brevet d'études du 1er cycle (BEPC) ou BE, ou brevet des collèges	0,068***	0,020	0,001
CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau	0,621***	0,016	>0,001
Niveau baccalauréat	0,734***	0,018	>0,001
Niveau Bac+2	1,092***	0,017	>0,001
Niveau supérieur à Bac+2	0,505***	0,019	>0,001
Nationalité de la personne de référence			
Français de naissance, y compris par réintégration	Réf.		
Français par naturalisation, mariage, déclaration ou option à sa majorité	-0,059***	0,020	0,003
De nationalité de l'Union européenne des 15 (hors France)	-0,783***	0,027	>0,001
De nationalité des pays entrés en 2004 dans l'Union européenne	-3,294***	0,126	>0,001
De nationalité algérienne, marocaine ou tunisienne	-0,062*	0,032	0,051
De nationalité d'Afrique (hors Maghreb)	0,265***	0,042	>0,001
De nationalités autres ou apatride	-0,962***	0,043	>0,001

Instruments de la densité			
<i>Accroissement de population de l'aire urbaine</i>	0,057***	0,013	>0,001
<i>Nombre de pièce du logement</i>	-0,050***	0,003	>0,001
Instruments de la distance parcourue			
<i>Prédiction de la classe 1</i>	25,028***	0,148	>0,001
<i>Prédiction de la classe 2</i>	9,239***	0,101	>0,001
<i>Prédiction de la classe 3</i>	11,318***	0,240	>0,001
<i>Prédiction de la classe 4</i>	Réf.		
Constante	-33,559***	0,150	>0,001
Nombre d'observations			
	N=11 910		
	F(24,11885)=13 433,59		
	Prob.>F=0		
R-carré	0,96		

^alog. : Forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 %, 1 %.

96 % de la variance de la densité de population est expliquée par les variables exogènes et les instruments du modèle et la F-statistique est égale à 13 433,59.

c. Traitement de l'endogénéité de la variable de distance parcourue dans le modèle de mode de transport

Le TABLEAU 17 présente le résultat de l'estimation réalisée pour la construction des variables instrumentales de la distance parcourue par le ménage.

TABLEAU 17 – Estimation des classes de distance parcourue en fonction des caractéristiques socio-économiques des ménages pour la construction des instruments de la distance parcourue

Distance parcourue (Classe 4 comme référence)	Classe 1		Classe 2		Classe 3	
	Coef.	Err. St.	Coef.	Err. St.	Coef.	Err. St.
Revenu mensuel du ménage (log. ^a)	-1.174***	0.068	-0.634***	0.064	-0.237***	0.062
Age de la personne de référence						
< 30 ans	Réf.		Réf.		Réf.	
de 30 à 39 ans	0.293***	0.107	0.359***	0.104	0.308***	0.103
de 40 à 49	0.411***	0.106	0.380***	0.103	0.244**	0.102
de 50 à 64	0.624***	0.105	0.454***	0.102	0.172*	0.103
>65 ans	1.719***	0.251	1.240***	0.253	0.696***	0.263
Nombre d'unité de consommation (log. ^a)	-3.869***	0.170	-2.641***	0.161	-1.635***	0.156
Présence d'enfant	0.403***	0.097	0.229**	0.093	0.192**	0.092
Education de la personne de référence						
Aucun diplôme	Réf.		Réf.		Réf.	
Certificat d'études primaires (CEP)	0.102	0.175	0.148	0.175	0.009	0.176
Brevet d'études du 1er cycle (BEPC) ou BE, ou brevet des collèges	0.077	0.150	0.167	0.146	0.053	0.141
CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau	-0.315***	0.107	-0.067	0.104	-0.137	0.100
Niveau baccalauréat	-0.133	0.130	0.079	0.126	-0.045	0.122
Niveau Bac+2	-0.288**	0.128	-0.084	0.123	-0.104	0.117
Niveau supérieur à Bac+2	0.309**	0.123	0.459***	0.118	0.050	0.115
Nationalité de la personne de référence						
Français de naissance, y compris par réintégration	Réf.		Réf.		Réf.	
Français par naturalisation, mariage, déclaration ou option à sa majorité	0.701***	0.142	0.551	0.135	0.092	0.142
De nationalité de l'Union européenne des 15 (hors France)	0.878***	0.206	0.511	0.205	0.303	0.203
De nationalité des pays entrés en	1.684	1.105	-0.321	1.427	1.220	1.122

<i>2004 dans l'Union européenne</i>						
<i>De nationalité algérienne, marocaine ou tunisienne</i>	0.921***	0.241	0.504	0.247	0.374	0.243
<i>De nationalité d'Afrique (hors Maghreb)</i>	1.185***	0.375	0.990	0.373	0.965***	0.363
<i>De nationalités autres ou apatride</i>	1.307***	0.348	0.841	0.356	0.843**	0.347
Constante	10.701***	0.495	6.011	0.470	2.640***	0.462
<i>Nombre d'observations</i>			N=11 922			
<i>Pseudo R-carré</i>			Log likelihood = -15157.489 0,0829			

^a log. : forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 % et 1 %.

Le TABLEAU 18 présente les résultats de la régression de la distance parcourue sur ses instruments, à savoir les prédictions de classes de densité, ainsi que sur les variables de caractéristiques socio-économiques des ménages et sur les instruments de la densité. Le terme d'erreur de cette régression permet de construire la variable $Inob_{dist}^{MT}$ qui représente la variabilité non observable de la distance parcourue et est incluse comme variable explicative du modèle de mode de transport afin d'assurer que le coefficient relatif à la distance parcourue ne soit pas biaisé par une endogénéité potentielle.

TABLEAU 18 – Régression de la distance parcourue sur ses instruments et sur les variables exogènes du modèle de mode de transport

Distance parcourue	Coef.	Err. St.	p-value
Revenu mensuel du ménage (log.)	-0,002	0,028	0,931
Age de la personne de référence			
< 30 ans	Réf.		
de 30 à 39 ans	0,040	0,033	0,227
de 40 à 49	0,028	0,033	0,394
de 50 à 64	0,032	0,035	0,370
> 65 ans	0,066	0,076	0,389
Nombre d'unité de consommation (log.)	-0,096	0,086	0,264
Présence d'enfant	0,021	0,034	0,549
Education de la personne de référence			
Aucun diplôme	Réf.		
Certificat d'études primaires (CEP)	-0,003	0,056	0,958
Brevet d'études du 1er cycle (BEPC) ou BE, ou brevet des collèges	>0,001	0,048	0,995
CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau	-0,014	0,038	0,717
Niveau baccalauréat	-0,011	0,042	0,790
Niveau Bac+2	-0,014	0,041	0,741
Niveau supérieur à Bac+2	-0,015	0,045	0,736
Nationalité de la personne de référence			
Français de naissance, y compris par réintégration	Réf.		
Français par naturalisation, mariage, déclaration ou option à sa majorité	-0,017	0,048	0,725
De nationalité de l'Union européenne des 15 (hors France)	0,008	0,067	0,910
De nationalité des pays entrés en 2004 dans l'Union européenne	0,115	0,274	0,676
De nationalité algérienne, marocaine ou tunisienne	0,004	0,079	0,961
De nationalité d'Afrique (hors Maghreb)	0,039	0,097	0,692
De nationalités autres ou apatride	0,041	0,098	0,674
Instruments de la densité			
Accroissement de population de l'aire urbaine	0,095**	0,038	0,012
Nombre de pièce du logement	-0,016**	0,008	0,030
Instruments de la distance parcourue			
Prédiction de la classe 1	-3,512***	0,333	>0,001
Prédiction de la classe 2	-2,309***	0,228	>0,001
Prédiction de la classe 3	-2,012***	0,536	>0,001

Prédiction de la classe 4		Réf.	
Constante		4,559***	0,365 >0,001
Nombre d'observations		N=11 910	F(24,11 885)=213,89
		Prob.>F=0	
R-carré		0,26	

^alog. : Forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 %, 1 %.

26 % de la variance de la variable de classe de distance est expliquée par la variabilité des régresseurs de l'estimation. On note également que les prédictions de classes de distance, construites à partir des variables exogènes, intègrent la dépendance entre distance parcourue et variables socio-économiques ce qui explique la non significativité de ces dernières dans le tableau ci-dessous.

d. Applications numériques et simulations

TABLEAU 19 – Valeurs au point moyen pour les variables inobservables et de termes d'erreur, utilisées pour les applications numériques

	Moyenne
$Inob_{dens}^D$	1,99E-10
$Inob_{dens}^{MT}$	-7,46E-12
$Inob_{dist}^{MT}$	-1,08E-10
$\varepsilon_n^{MODELE\ AGREGE}$	-6,09E-10
$\exp(\varepsilon_n^{MODELE\ AGREGE})$	4,24
$\varepsilon_n^{MODELE\ DESAGREGE}$	1,10E-10
$\exp(\varepsilon_n^{MODELE\ DESAGREGE})$	4,65

FIGURE 20 – Variation des probabilités d'occurrence des classes de distance avec la densité (modèle à équations multiples)

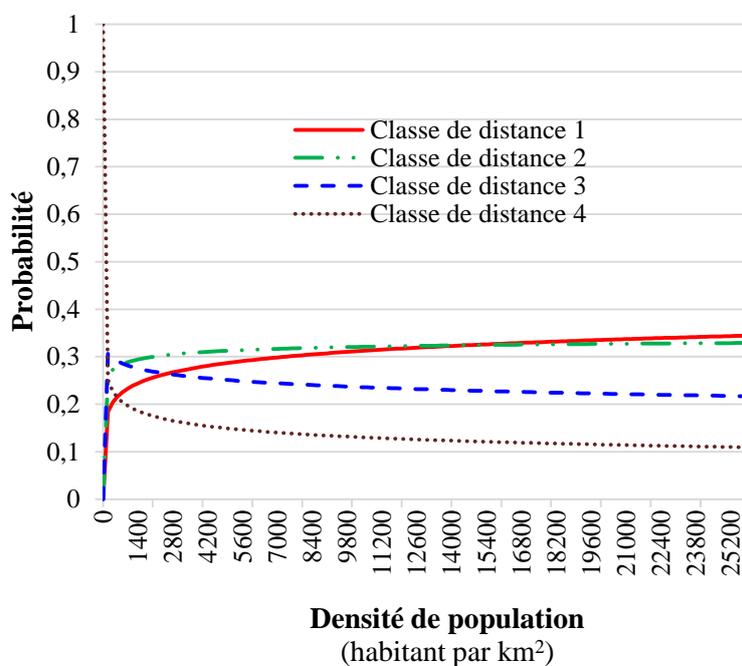


FIGURE 21 – Variation des probabilités d’occurrence des modes de transport avec la densité (modèle à équations multiples)

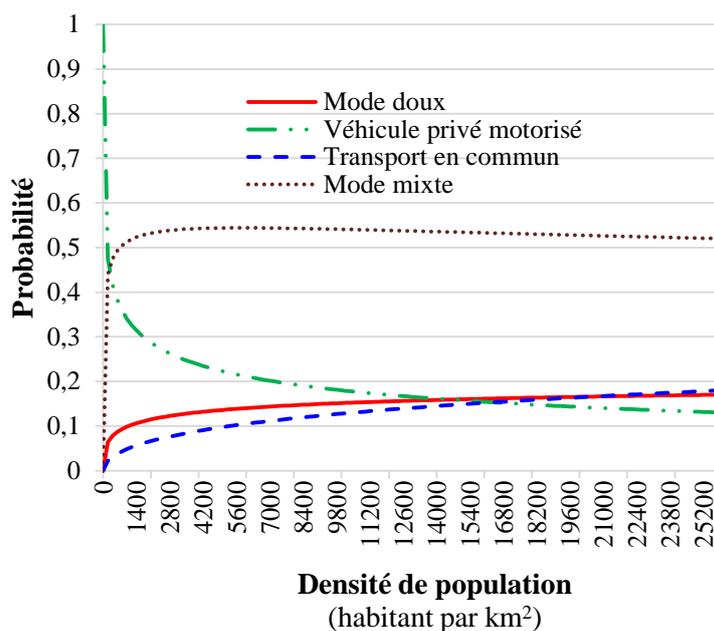


TABLEAU 20 – Valeurs minimum et maximum retenues pour les caractéristiques des ménages dans le cas des deux scénarios extrêmes de demande énergétiques

	Scénario <i>sobre</i> (E_n^-)	Scénario <i>consommateur</i> (E_n^+)
Revenu mensuel du ménage (log.)	4,09	11,23
Age de la personne de référence	>65 ans	< 30 ans
Nombre d'unité de consommation (log.)	0	1.7
Présence d'enfant	Oui	Non

Chapitre 3 :

Localisation, Energie et Logement : Le Cas des Ménages Français

I. INTRODUCTION

Lorsque l'on s'intéresse à l'organisation du territoire et notamment à la contribution potentielle de politiques spatiales en termes de réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre associées, le secteur concentrant la majorité des efforts est celui des transports. En effet les besoins de mobilité représentent une part importante de la demande énergétique totale et sont intimement liés aux choix de localisation des acteurs économiques, qu'il s'agisse des ménages ou des différentes activités. Or le secteur du bâtiment qui représente 40 % de la demande énergétique primaire selon l'AIE dépend en fait également des choix de localisation. Face à une augmentation de 67 % du nombre de ménage et de presque 195 % de la surface des bâtiments commerciaux d'ici 2050 (IEA, 2011), les prévisions de croissance du secteur imposent de redoubler les efforts d'efficacité énergétique afin de changer les trajectoires de consommation énergétique et d'impacts environnementaux.

De nombreuses actions sectorielles sont en cours dans ce sens. Les mesures règlementaires tout d'abord : il s'agit de mesures internationales comme la Directive Européenne de Performance Energétique dans les Bâtiments (directive 2002/91/EC actualisée en 2010 par la directive 2010/31/EU) contraignant les pays membres à inscrire des obligations de performance énergétique dans les codes de bâtiments, ou bien de réglementation nationale ou infranationale comme la réglementation thermique 2012 en France, ou l'*International Energy Conservation Code* pouvant servir de base pour la mise en place non obligatoire dans les états des Etats-Unis de contraintes sur les consommations d'énergie dans les bâtiments. Aux réglementations s'ajoute l'utilisation d'instruments économiques. Les énergéticiens sont ainsi soumis aux permis d'émissions européens ce qui permet d'encourager le développement d'équipements sobres en énergie dans les bâtiments ; les choix des ménages sont orientés vers les bâtiments performants par des incitations financières telles que le prêt à taux 0 % ou les crédits d'impôts en France. Enfin, un dernier volet de communication et sensibilisation permet d'encourager les comportements sobres en énergie au sein des logements.

Cependant, face à l'ampleur des questions de crise énergétique et de changement climatique, les objectifs de réduction des consommations se doivent d'être ambitieux et on ne peut éviter de s'interroger sur les différents déterminants de la demande d'énergie dans les bâtiments. Or si l'organisation spatiale est sérieusement étudiée pour les transports, il y a un déficit d'analyse sur ses implications sur le contenu énergétique d'un secteur si important du point de vue économique et social que celui des bâtiments.

Ce chapitre a pour objectif de combler autant que faire se peut ce déficit à partir d'éléments quantitatifs. Comme cela a été fait pour le secteur des transports dans le deuxième chapitre, l'analyse et l'estimation empirique de l'interaction entre forme urbaine et demande énergétique résidentielle des ménages sont appuyées par une étude approfondie des différents mécanismes par lesquels cette interaction se produit. Reposant sur l'utilisation de méthodes économétriques, ce travail exploite une base de données à l'échelle du ménage.

Après une synthèse de la littérature sur le lien entre organisation spatiale et demande résidentielle, nous définirons les principaux paramètres de l'interface entre forme urbaine et demande énergétique des ménages pour leur logement, puis le cadre conceptuel de l'analyse économétrique. Données et méthodes sont présentées section III alors que la section IV développe les résultats empiriques obtenus, résultats qui sont interprétés dans la conclusion de ce chapitre.

II. FORME URBAINE ET DEMANDE ENERGETIQUE RESIDENTIELLE

a. Synthèse de la littérature

Le champ de l'économie de l'énergie offre une large littérature proposant des estimations empiriques de la demande énergétique liée aux bâtiments et en particulier de la demande résidentielle. Parmi les principaux facteurs se révélant significatifs dans la formation de la consommation énergétique liée au logement, on compte : i) les caractéristiques du logement telles que sa surface ou bien sa typologie (maison individuelle isolée, maison accolée, appartement) ; ii) les caractéristiques socio-économiques du ménage comme son revenu ou sa taille ; et iii) les tarifs énergétiques pratiqués²⁶. Mais malgré le poids du secteur résidentiel dans la demande énergétique totale, ce secteur est resté en dehors du débat sur le potentiel des déterminants spatiaux pour faire face à la crise énergétique et au changement climatique. Or l'organisation spatiale et les choix de localisation sont susceptibles d'influencer les infrastructures de bâtiments et leurs besoins en énergie. Ainsi, à partir d'une régression multivariée de la demande énergétique des 45 villes les plus peuplées du Québec, Larivière & Lafrance (1999) mettent en évidence l'effet significatif et négatif de la densité de population sur la consommation électrique du secteur des bâtiments. Ce résultat est confirmé et étendu aux consommations de gaz par les travaux de Chen et al. (2008) menés sur 45 villes chinoises. Holden & Norland (2005) tirent des conclusions similaires à partir de l'analyse empirique du comportement de 1 000 individus norvégiens en ce qui concerne leur demande énergétique résidentielle. Ewing & Rong (2008) étudient la relation entre organisation spatiale et consommation d'énergie liée au logement et leur étude fournit des informations sur les mécanismes d'interaction en jeu : ils mettent en évidence le rôle significatif et négatif de la densité sur la demande énergétique à travers les caractéristiques du logement et à travers le phénomène d'îlot de chaleur. Face à ces travaux qui défendent la thèse d'un effet des choix de

²⁶ Voir entre autres Halvorsen (1975) ; Hartman & Werth (1981) ; Reiss & White (2005) ; Risch & Salmon (2010) ; Alberini et al. (2011).

localisation sur les besoins en énergie des logements, Kaza (2010) conclut en revanche à un effet non significatif de la densité pour les mécanismes d'interaction ne faisant pas intervenir les caractéristiques du logement. Enfin, au-delà de la discipline de l'économie de l'énergie, la modélisation physique et thermique de bâtiments sous le climat danois permet à Stromann-Andersen (2011) de conclure que la densité, en réduisant de façon significative les apports solaires (apports thermiques et lumineux), tend à engendrer une demande énergétique plus forte. Les caractéristiques, méthodes et résultats des études mentionnées sont synthétisés dans le TABLEAU 1.

TABLEAU 1 - Synthèse de la littérature proposant des estimations empiriques de l'impact de la densité sur la demande énergétique du secteur résidentiel

Etudes	Région	Unité d'observation	Impact évalué	Conclusions sur l'impact évalué	Elasticité approx. ^a	Méthode
(Larivière & Lafrance 1999)	Québec, Canada	Ville	Densité de population sur la consommation électrique des secteurs résidentiel, commercial et autre qu'industrie.	Significatif/ Négatif	-0,07	Régression multivariée
(Holden & Norland 2005)	Oslo, Norvège	Individu	Densité résidentielle sur demande énergétique résidentielle.	Significatif/ Négatif	-0,07	Régression multivariée
(Ewing & Rong 2008)	Etats-Unis	Ménage	Indice de forme urbaine sur demande énergétique résidentielle à travers les caractéristiques du logement et l'effet d'îlot de chaleur	Significatif/ Négatif	-0,39	Régression multivariée sur plusieurs bases de données
(Chen et al. 2008)	Chine	Ville	Densité de population sur la consommation résidentielle d'électricité et de gaz.	Significatif/ Négatif	N.d. ^b	Analyse de corrélation
(Kaza, 2010)	Etats-Unis	Ménage	Densité de population sur la demande énergétique résidentielle à caractéristiques de logement constantes.	Non significatif	0	Analyse qualitative
(Stromann-Andersen, 2011)	Dane-mark	Bâtiment	Densité résidentielle sur la demande énergétique résidentielle à travers les apports solaires.	Significatif/ Positif	N.d. ^b	Modélisation physique et thermique

^a Estimations de l'auteur à partir des informations disponibles dans l'article.

^b N.d. : Non disponible.

Cette littérature explore le lien entre organisation spatiale et demande énergétique résidentielle avec toutefois un certain nombre de limites parmi lesquelles : i) une analyse partielle de l'interaction entre densité et énergie ; ii) une échelle d'analyse agrégée ; iii) un nombre d'observations relativement restreint ; iv) un manque d'une base de données unique intégrant l'ensemble des variables dépendantes ; v) l'absence de variables de contrôle. A travers l'utilisation de méthodes économétriques sur une unique base de données désagrégée et fournie, notre étude dépasse ces limites

pour proposer d'une part une analyse robuste de l'interaction entre densité de population et demande énergétique résidentielle, et d'autre part une estimation empirique des différents mécanismes causaux par lesquels cette interaction a lieu.

b. Mécanismes d'impact de la forme urbaine sur la demande énergétique liée au logement

1) « *Effet surface du logement* » et « *effet type de logement* » : l'*effet surface du logement* décrit l'effet de la densité résidentielle sur la taille du logement à travers la contrainte sur la surface au sol disponible par ménage à la localisation considérée, taille du logement qui influence à son tour le besoin énergétique. Ce lien entre densité et taille de logement est explicite dans la théorie d'économie urbaine selon laquelle plus la demande de logement est importante, plus la densité est élevée et moins grands sont les logements (Alonso 1964 ; Fujita 1989). Et la taille du logement fait partie des déterminants significatifs de la consommation d'énergie résidentielle (Hirst et al., 1982 ; Wilson & Boehland, 2005). Ainsi, dans sa description des facteurs induisant une faible consommation d'énergie en ville, Dodman (2009) écrit :

“[...] first is the density of the city's buildings and the smaller than average dwelling unit size, which means less energy is needed to heat, light, cool and power these buildings”, Dodman (2009), pp. 190.

La densité de population et la pression foncière associée influencent également le type de logements disponibles : les logements de ville et centre-ville notamment sont principalement constitués d'appartements alors que les maisons individuelles se retrouvent plutôt en périphérie. Et le type de logement à son tour est susceptible de modifier les besoins en énergie du ménage ; c'est l'*effet type de logement*. Ainsi le stock de bâtiments est impacté par la densité et la rareté du sol, qui privilégient les bâtiments à plusieurs étages par rapport aux maisons individuelles comme souligné par Parikh & Shukla (1995). Puis à son tour le type de logements intervient de façon significative sur la demande énergétique résidentielle (Stemmers, 2003) : Madlener & Sunak (2011) soulignent ainsi :

“[...] buildings in densely-built areas compared to detached houses in suburban areas have fewer exposed walls that release waste heat”, Madlener & Sunak (2011), pp. 49.

2) « *Effet source d'énergie* » : il s'agit de l'influence de la densité sur les sources d'énergie disponibles, ce qui impacte ensuite la demande énergétique résidentielle à travers des paramètres énergétiques tels que le rendement énergétique ou bien le prix de l'énergie. Les zones denses, offrant des capacités de stockage réduites, tendent à favoriser le développement de l'accès aux énergies de

réseaux telles que l'électricité et le gaz (Poumanyvong & Kaneko, 2010). De plus, l'installation d'infrastructures énergétiques et les coûts de maintenance associés sont liés à la densité des utilisateurs, ce qui tend à défavoriser les énergies de réseaux dans les zones à faible densité. Concernant le lien entre source d'énergie et consommation d'énergie, Pachauri & Jiang (2008) concluent à partir d'observations empiriques en Chine et en Inde que l'abandon des sources énergétiques traditionnelles (charbon, bois, fuel) pour des énergies modernes (électricité et gaz) induit une diminution de la demande énergétique.

3) « *Effet îlot de chaleur* » : il désigne l'impact de la densité sur les besoins énergétiques des individus à travers une modification de la température moyenne de la ville.

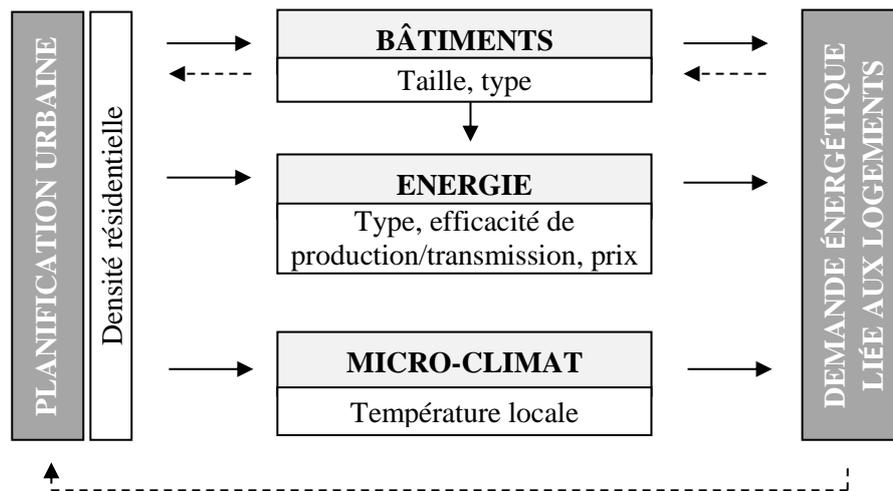
“Building density and plot layout are directly associated with urban canyon geometry and orientation, which have significant impacts on UHI [Urban Heat Island phenomenon] intensity”, Yang et al. (2010), pp. 116.

Les densités élevées sont susceptibles d'intervenir dans la géométrie des rues (ou canyons urbains) qui constitue d'un des paramètres responsables du phénomène d'îlot de chaleur et par conséquent de la modification du climat local selon Oke et al. (1991). La température de l'air est plus élevée dans les zones denses que dans la campagne environnante (Santamouris et al., 2001) et la densité de population a un impact significatif sur le climat local de la zone considérée (Ewing & Rong, 2008 ; Rizwan et al., 2008). Or un changement de la température extérieure est susceptible à son tour d'engendrer une modification de la demande énergétique. Le phénomène d'îlot de chaleur entraîne ainsi :

- a. une augmentation de la demande de refroidissement. Wong et al. (2011) estiment à partir de données sur Singapour que les besoins de climatisation pourraient être réduits de 5 % à 10 % si la question de l'îlot de chaleur était adressée efficacement ;
- b. une diminution des besoins de chaleurs allant jusqu'à 30 % selon les travaux de Santamouris et al. (2001) reposant sur des observations empiriques en Grèce ;
- c. une diminution des besoins énergétiques globaux de climatisation et de refroidissement atteignant 8% pour la ville de Tokyo (Hirano & Fujita, 2012).

Les différents mécanismes d'interaction entre densité de population et demande énergétique résidentielle sont illustrés sur la FIGURE 1. Les flèches en pointillé représentent les interactions potentielles, sources d'endogénéité : elles sont explicitées par la suite.

FIGURE 1 – Vision intégrée des liens testés entre organisation spatiale et demande énergétique résidentielle



III. ANALYSE ÉCONOMÉTRIQUE

a. Données

Les données utilisées dans ce chapitre proviennent de l'Enquête Nationale Logement (ENL) 2006 effectuée par l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE). Le territoire étudié est la France métropolitaine. Cette enquête, réalisée à l'échelle du ménage, fournit des informations sur les caractéristiques socio-économiques des individus, sur les caractéristiques de leur logement et sur leur consommation énergétique. Les données concernant la localisation des ménages en dessous de l'échelle du département sont présentes dans l'enquête mais confidentielles. Notre étude nécessitant l'utilisation de la densité de population de la commune de résidence, une procédure d'accès aux données confidentielles a été engagée pour pouvoir accéder à l'information sur la commune de résidence des ménages. L'autorisation a été obtenue après passage en commission devant le Comité du Secret Statistique et les données ont été mises à disposition par l'intermédiaire du Centre d'Accès Sécurisé aux Données (CASD) de la statistique publique française, un outil mis en place par l'INSEE pour les chercheurs. Les estimations empiriques ont été réalisées sur un échantillon de 27 940 observations valides.

Afin d'explorer le rôle de la densité de population sur la demande énergétique résidentielle et les différents mécanismes d'interaction associés, nous nous intéressons à quatre variables dépendantes :

- i) la *demande énergétique résidentielle*, correspondant à la consommation d'énergie annuelle finale du ménage pour son logement. Cette consommation recouvre l'ensemble des usages du logement à savoir le chauffage et la climatisation, l'approvisionnement en eau chaude, la cuisson et l'utilisation d'électricité spécifique (incluant l'éclairage). Cette variable, exprimée en kWh/an/ménage est continue et construite à partir des factures

énergétiques disponibles dans l'enquête et des prix mensuels de l'énergie fournis par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL, 2010). Etant donné l'existence de plusieurs tarifications de l'énergie, nous avons retenu l'hypothèse que le choix des ménages reposait sur une maximisation de leur utilité par rapport aux différentes options de tarifs. Une description complète de la procédure de construction de la demande énergétique résidentielle est présentée en annexe ;

- ii) la *taille du logement*, soit la surface en mètre carré de l'habitation du ménage. Cette variable a été discrétisée en quatre classes ;
- iii) le *type de logement*, variable qualitative décrivant le type d'habitation où réside le ménage selon qu'il s'agit d'une maison individuelle isolée, d'une maison accolée ou bien d'un appartement ;
- iv) le *type d'énergie* précisant la source principale d'énergie utilisée par le ménage pour répondre à ses besoins énergétiques. Cette variable qualitative se décline en quatre classes qui sont l'électricité, le gaz, le fuel et autres sources d'énergie.

La *densité de population* est la variable indépendante à laquelle nous nous intéressons. Mesurée au niveau de la commune comme le ratio de la population de 2006 sur la surface en kilomètre carré, elle provient des bases communales de l'INSEE et a été ajoutée à l'Enquête Logement pour chaque ménage en fonction de sa commune de résidence. Au-delà de la densité, les autres variables explicatives continues sont constituées du revenu annuel des ménages et de la taille du ménage.²⁷ Toutes les variables continues sont exprimées sous leur forme logarithmique. Du fait de son étendue, le territoire métropolitain français présente des variations climatiques régionales qu'il est nécessaire de contrôler afin d'assurer la robustesse des estimations de l'impact de la densité sur la demande énergétique. Pour ce faire, nous utilisons l'indice de Degré Jour Unifié (DJU) du département de résidence du ménage comme variable climatique continue (MEDDTL, 2006a).²⁸ Les variables explicatives qualitatives comprennent l'âge de la personne de référence du ménage, son niveau d'éducation, sa nationalité et la présence ou non d'enfant dans le logement. Enfin, une variable binaire prenant la valeur 1 quand le logement a été construit avant 1975 (soit avant la première réglementation thermique française) et 0 sinon est utilisée comme indication de la période de construction du bâtiment de l'habitation. Le TABLEAU 2 présente les statistiques descriptives de ces variables sur notre échantillon.

²⁷ La variable de taille de ménage correspond au nombre d'unité de consommation du ménage selon les standards de l'OCDE.

²⁸ L'indice de Degré Jour Unifié (*Heating Degree Day* en anglais) est un indice quantitatif construit pour refléter le besoin énergétique pour chauffer un bâtiment en fonction du seul climat extérieur. Cet indice dérive des observations de températures extérieures. Les besoins en chauffage sont considérés comme directement proportionnels au nombre de Degré Jour Unifié de la localisation considérée. Plus l'indice est élevé, plus le climat est froid et plus les besoins de chauffage sont importants.

TABLEAU 2 – Statistiques descriptives de l'échantillon de 27 940 ménages de l'ENL 2006

	%	Moy.	Err. Type ²⁹
Consommation d'énergie et émissions			
Forme absolue			
Energie finale (kWh/ménage/an)		19 653	24 675
Energie finale par surface (kWh/m ² /ménage/an)		217	388
Energie primaire (kWh/ménage)		29 221	27 887
Energie primaire par surface (kWh/m ² /ménage)		336	510
Emissions de CO ₂ (tonne/ménage/an)		3,3	3,4
Forme logarithme			
Energie finale (kWh/ménage/an)		9,6	0,8
Energie finale par surface (kWh/m ² /ménage/an)		5,1	0,7
Energie primaire (kWh/ménage)		10,1	0,7
Energie primaire par surface (kWh/m ² /ménage)		5,6	0,7
Emissions de CO ₂ (tonne/ménage/an)		14,5	1,1
Caractéristiques des bâtiments et sources d'énergie			
Classe de surface			
<i>Surface < 67 m²</i>	25,3		
<i>De 67 m² à 90 m²</i>	28,0		
<i>De 90 m² à 120 m²</i>	26,3		
<i>> 120 m²</i>	20,4		
Type de logement			
<i>Maison individuelle isolée</i>	46,7		
<i>Maison accolée</i>	20,3		
<i>Appartement</i>	33,1		
Source d'énergie principale			
<i>Electricité</i>	38,4		
<i>Gaz</i>	39,5		
<i>Fuel</i>	13,7		
<i>Autres</i>	8,4		
Caractéristiques socio-économiques du ménage			
Revenu annuel (euro) (log. ^a)		10,1	0,8
Nombre d'unité de consommation (log. ^a)		2,8	0,3
Age de la personne de référence			
<i>< 30 ans</i>	9,3		
<i>de 30 à 39 ans</i>	21,2		
<i>de 40 à 49</i>	22,3		
<i>de 50 à 64</i>	25,4		
<i>➤ 65 ans</i>	21,7		
Niveau d'éducation de la personne de référence			
<i>Aucun diplôme</i>	16,1		
<i>Certificat d'études primaires (CEP)</i>	11,3		
<i>Brevet d'études du 1er cycle (BEPC) ou BE, ou brevet des collèges</i>	6,5		
<i>CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau</i>	26,1		
<i>Baccalauréat professionnel</i>	3,5		
<i>Baccalauréat technique ou technologique</i>	3,1		

²⁹ Ecart-type observé sur l'échantillon.

<i>Baccalauréat général</i>	7,0		
<i>Niveau Bac+2</i>	10,2		
<i>Niveau supérieur à Bac+2</i>	16,2		
Nationalité de la personne de référence			
<i>Français de naissance, y compris par réintégration</i>	87,2		
<i>Français par naturalisation, mariage, déclaration ou option à sa majorité</i>	4,6		
<i>De nationalité de l'Union européenne des 15 (hors France)</i>	1,9		
<i>De nationalité des pays entrés en 2004 dans l'Union européenne</i>	0,1		
<i>De nationalité algérienne, marocaine ou tunisienne</i>	3,0		
<i>De nationalité d'Afrique (hors Maghreb)</i>	1,5		
<i>De nationalités autres ou apatride</i>	1,6		
Présence d'enfant	61,9		
Densité de population (habitants/km ²)			
<i>En forme absolue</i>		2483	4387
<i>En forme logarithmique</i>		6,5	1,8
Variables de contrôle			
Degré Jour Unifié au carré (10e-6)		5,1	1,8
Construit après 1975	47,9		

^a log. : sous forme logarithmique.

La consommation d'énergie finale annuelle moyenne s'élève à 19 653 kWh/ménage dans notre échantillon pour une consommation d'énergie primaire 29 221 kWh/an/ménage. Le total des émissions de CO₂ associées est de 3,3 tonnes, ce qui correspond aux estimations que l'on peut trouver dans la littérature (CEREN & INRETS, 2006 ; ADEME, 2007). La surface moyenne des logements est de 95m². Les maisons individuelles isolées prédominent puisqu'elles représentent 47 % de l'échantillon contre 33 % pour les appartements et 20 % pour les maisons accolées. Electricité et gaz constituent les deux premières sources d'énergie utilisées : chacune représente l'énergie principale pour environ 40% des ménages. 14 % des logements fonctionnent principalement au fuel et 8 % sur d'autres sources d'énergie. Le revenu annuel moyen atteint 30 982 euro en absolu. En ce qui concerne la taille moyenne du ménage, elle est de 16,8 unités de consommation. Les classes d'âge sont relativement équilibrées avec un peu moins de ménages dont la personne de référence est âgée de moins de 30 ans. En termes de diplômes, le niveau CAP/BEP est le plus répandu et les ménages interrogés sont français à 92 %. Des enfants sont présents dans 62 % des ménages. Enfin, près de la moitié des ménages interrogés résident dans un logement construit après la mise en place de la première réglementation thermique et la moyenne des degrés jour unifiés est de 2209 (pour une moyenne de la variable au carré de plus de cinq millions).

Afin de tester la robustesse de notre méthode de reconstruction des consommations d'énergie, on compare nos résultats aux valeurs disponibles dans la littérature pour le cas des ménages français. Les détails de cette analyse comparative sont présentés dans le TABLEAU 3.

TABLEAU 3 – Estimations de l’impact environnemental des logements français dans la littérature

Sources	Année	Energie finale (kWh/m ²)	Energie primaire (kWh/m ²)	Emissions (tonne CO ₂)	
Calculs de l’auteur	2006	217	336	3,3	
Valeur moyenne annuelle par ménage	(ADEME, 2007)	2006	216	-	3,4
	(ANAH, 2008)	2008	-	272	-
	(Sidler, 2006)	2006	-	277	-
	(CEREN & INRETS, 2006)	1999	-	-	3,55

Bien que nous travaillions sur un échantillon réduit de la population, nos valeurs sont en ligne avec la littérature, excepté pour la demande d’énergie primaire. Notons les différences méthodologiques entre les estimations comme source d’explication de ces différences : les valeurs de la littérature proviennent soit de simulations issues de modélisation des propriétés thermiques de bâtiment (les données ne sont alors pas réellement observées mais construites à partir de données descriptives du parc de bâtiments existants ; c’est le cas des valeurs de l’ANAH et de Sidler), soit de calcul dit *top-down*, consistant à désagréger des valeurs observées au niveau agrégé (du niveau national à l’échelle du ménage notamment, pour l’ADEME). Seul l’étude CEREN & INRETS (2006) utilise une méthodologie semblable à la nôtre reposant sur des données réelles désagrégées à l’échelle du ménage, mais il s’agit d’une étude régionale et non nationale.

Les estimations réalisées sur les données décrites ci-dessus suivent une procédure en deux étapes. Dans un premier temps sont estimés trois modèles qualitatifs, respectivement de la taille du logement, du type du logement et de la source d’énergie principale du ménage, comme des fonctions des caractéristiques socio-économiques des individus et de la densité de population. Puis dans un deuxième temps la demande énergétique résidentielle finale est estimée sous forme logarithmique comme une fonction de la taille et du type du logement, de la source d’énergie principale et de la densité de population (en plus des variables de contrôle).

b. Modèles discrets

1) Spécifications

L’objectif des trois modèles discrets est de capter l’effet de l’organisation spatiale respectivement sur la surface du logement, sur le type du logement et sur la source d’énergie principale, qui ont à leur tour un effet sur la demande énergétique des ménages. En sus des caractéristiques socio-économiques et la densité de population, les variables explicatives incluent la surface pour le modèle de type de logement, et la typologie et la surface de logement pour le modèle de source d’énergie. De façon totalement analogue à la méthodologie développée dans le chapitre 2, on utilise un modèle à utilité aléatoire (*‘random utility model’*) avec une spécification logit pour représenter les trois décisions à choix multiple des ménages. Ce choix de modélisation repose sur deux hypothèses principales : i) les

ménages maximisent leur utilité, que l'on suppose être une fonction linéaire des variables explicatives du modèle ; et ii) les préférences des ménages pour un choix donné (de surface, type ou énergie principale du logement) suivent une distribution de Gumbel³⁰ (Train, 2003). L'utilité U_{ni} du ménage n pour le choix de l'alternative i est décrite par l'équation (3.1), où \mathbf{X}_n est le vecteur de variables explicatives, β_i est le vecteur de coefficients relatifs au choix de l'alternative i et ε_{ni} représente les préférences du ménage n pour le choix i . La probabilité que le ménage n choisisse l'alternative i parmi toutes les alternatives disponibles est définie dans l'équation (3.2) comme la probabilité que le choix i induise une utilité plus grande pour le ménage que les autres choix.

$$U_{n,i} = \mathbf{X}_n \cdot \beta_i + \varepsilon_{n,i} \quad (3.1)$$

$$P_n(i) = P(U_{n,i} > U_{n,j}, \forall j \neq i) \quad (3.2)$$

Les spécifications testées pour modéliser la surface, le type et la source d'énergie principale du logement sont détaillées respectivement dans les équations (3.3), (3.4) et (3.5) où la densité de population est notée d , et CSE est une liste de variables comprenant m Caractéristiques Socio-Economiques du ménage n (dans laquelle on inclut la constante 1). f , g et h sont trois fonctions logit d'une combinaison linéaire de leurs arguments. i , j et k sont les alternatives respectivement de la classe de surface (S^i), du type de logement (TL^j) et de la source d'énergie (SE^k).

$$P_n(S^i) = f_i(CES_n, d_n) \quad i \in \{1; 2; 3; 4\} \quad (3.3)$$

$$P_n(TL^j) = g_j(CES_n, d_n, S^1..S^4) \quad j \in \{1; 2; 3\} \quad (3.4)$$

$$P_n(SE^k) = h_k(CES_n, d_n, S^1..S^4, TL^1..TL^3) \quad k \in \{1; 2; 3; 4\} \quad (3.5)$$

2) Traitement de l'endogénéité

L'objectif de l'estimation des modèles discrets est de quantifier l'effet de la densité de population de la commune de résidence à travers différents mécanismes. Ces mécanismes se mesurent à travers différentes variables que l'on peut qualifier d'*indirectes* ou encore d'*intermédiaires*, qui sont la surface, le type et la source d'énergie principale du logement. Afin d'assurer la relation de causalité entre densité et ces variables indirectes dépendantes, il est nécessaire de garantir qu'il n'y a pas de facteur externe au modèle établissant un lien entre ces variables (Wooldridge, 2002). Trois sources potentielles d'endogénéité sont traitées :

- i) les préférences non observables des individus pour une surface donnée seraient susceptibles d'influencer leurs choix de localisation en fonction des prix au m² ce

³⁰ Distribution utilisée entre autres pour représenter les valeurs extrêmes de variables aléatoires.

qui serait alors reflété par la forme urbaine (densité peu élevée pour des prix bas). Ce risque d'endogénéité concerne la variable densité du modèle de surface ;

- ii) les préférences non observables des individus pour un type de logement donné (maison individuelle isolée par exemple) seraient susceptibles d'influencer leurs choix de localisation (périphérie) qui seraient alors reflétés par la forme urbaine (densité peu élevée). Ce risque d'endogénéité concerne la variable densité du modèle de type de logement ;
- iii) ces mêmes préférences pour un type de logement donné pourraient également influencer le choix de surface du logement (les préférences pour des appartements favorisant les surfaces réduites par exemple). La variable concernée par ce risque d'endogénéité est celle de surface dans le modèle de type de logement.

Si le modèle estimé ne prend pas en compte les préférences des ménages comme variable explicative de la surface et du type de logement, on est dans la situation où on peut ne pas voir qu'un facteur externe participe à la liaison entre variables explicative (densité / densité et surface) et dépendante (surface / type de logement). Il y a alors endogénéité et biais potentiel dans les estimations du rôle de la forme urbaine sur les choix résidentiels des ménages.

Comme dans le chapitre 2, l'endogénéité est traitée en utilisant des variables instrumentales (VI) (Boarnet & Sarmiento, 1998 ; Angrist & Krueger, 2001 ; Frankel & Rose, 2005 ; Grazi et al., 2008). Si la méthode des Doubles Moindres Carrés, aussi appelée la méthode des Moindres Carrés en Deux Etapes (*Two-Stage Least Square* soit 2SLS en anglais), est valide dans le cas des modèles linéaires, la méthode de l'Inclusion du Résidu en Deux Etapes ou bien *Two-Stage Residual Inclusion* (2SRI) en anglais doit être utilisée dans le cas d'estimation de modèles non linéaires (voir Terza et al. (2008)). Cette dernière approche 2SRI est donc utilisée pour contrôler l'endogénéité potentielle des modèles de surface et type de logement. Le principe est de capter la partie inobservable de la variable potentiellement endogène (dans laquelle sont incluses les préférences des ménages) par le résidu de la régression de cette même variable sur les variables exogènes et les instruments. Puis ce résidu intégrant les préférences des ménages est inclus dans le modèle à choix multiple : ainsi, l'effet des préférences des ménages est alors explicitement représenté et l'impact de la densité et de la surface du logement est alors estimé sans biais.

Traitement de l'endogénéité de la densité de population

Pour instrumenter la variable densité, on s'intéresse aux variables décrivant l'organisation spatiale passée des territoires comme le font Ciccone & Hall (1996) : on emploie la densité de population de 1968 ainsi que la densité d'emploi de 1968. D'une part ces variables ne sont liées aux choix de surface et typologie de logement qu'indirectement à travers leur choix de localisation et donc de densité résidentielle. Et d'autre part la densité de population de 2006 utilisée dans notre analyse est fortement

corrélée avec ces variables spatiales passées. Les régressions de la densité sur les variables explicatives des modèles de surface et de typologie de logement, utilisées pour la construction des variables proxy des préférences inobservables de localisation des ménages ($Inobs_{dens}^S$ pour le modèle de surface et $Inobs_{dens}^{TL}$ pour le modèle de type de logement), sont présentées TABLEAU 17 et TABLEAU 18 en annexe.

Traitement de l'endogénéité de la variable de classe de surface du logement

Les variables instrumentales utilisées pour la surface du logement sont construites à partir des prédictions d'un modèle logit multinomial dépendant des variables exogènes : ces prédictions constituent de robustes instruments car elles sont fortement corrélées avec les variables observées tout en étant purgées de l'effet de facteurs non observables tels que les préférences des ménages³¹. Le TABLEAU 19 en annexe présente le résultat de l'estimation réalisée pour la construction des variables instrumentales de la variable de classe de surface, et le TABLEAU 20 le résultat de la régression réalisée pour la construction du proxy des préférences inobservables de surface ($Inobs_{surf}^{TL}$).

3) Résultats

Dans le cas de la classe de surface et de la typologie de logement, les deux méthodes 2SRI et standard sont testées : or les variables proxy des préférences des ménages s'avèrent significatives ; c'est donc la méthode 2SRI qui est retenue afin d'assurer un contrôle de l'endogénéité dans les deux modèles. Les estimations standard de la classe de logement et du type de logement sont reportées dans les TABLEAU 21 et TABLEAU 22 en annexe, et les TABLEAU 4, TABLEAU 5 et TABLEAU 6 détaillent les résultats des estimations des trois modèles multinomiaux respectivement de la classe de surface (méthode 2SRI), de la typologie de logement (méthode 2SRI) et de la source d'énergie principale du logement (méthode standard).

³¹ Voir Dubin and McFadden (1984) et Wooldridge (2002) comme référence pour l'utilisation de prédiction de probabilité comme instruments d'une variable discrète.

TABEAU 4 - Estimation du modèle logit multinomial de la classe de surface du logement avec traitement de l'endogénéité de la densité (méthode 2SRI)

Classe de surface (Réf. : Classe 2)	Coef.	Classe 1		Coef.	Classe 3		Classe 4	
		Err. T.	Marg.		Err. T.	Marg.	Coef.	Err. Marg.
Age de la P.R.								
< 30 ans	Réf.			Réf.			Réf.	
de 30 à 39 ans	-0,589***	0,072	-0,127***	0,636***	0,092	0,077***	0,907***	0,126 0,058***
de 40 à 49	-1,033***	0,074	-0,203***	0,847***	0,091	0,103***	1,386***	0,125 0,105***
de 50 à 64	-1,784***	0,074	-0,310***	1,218***	0,091	0,147***	2,037***	0,125 0,176***
>65 ans	-2,074***	0,079	-0,343***	1,292***	0,096	0,137***	2,384***	0,130 0,227***
Revenu (log. ^a)	-0,387***	0,030	-0,071***	0,477***	0,032	0,025***	1,023***	0,040 0,105***
Nb UC (log. ^a)	-2,351***	0,092	-0,312***	1,043***	0,080	0,142***	1,648***	0,095 0,173***
Education P.R.								
Aucun diplôme	Réf.			Réf.			Réf.	
CEP	-0,206***	0,072	-0,028***	0,043	0,066	0,004	0,191**	0,085 0,020**
BEPC, BE	-0,148*	0,089	-0,040***	0,398***	0,081	0,030**	0,758***	0,098 0,065***
CAP, BEP ou autre	-0,237***	0,062	-0,042***	0,267***	0,056	0,025***	0,526***	0,071 0,046***
Bac. Prof.	-0,410***	0,116	-0,070***	0,451***	0,103	0,040**	0,865***	0,123 0,079***
Bac. Tech.	-0,207*	0,124	-0,050***	0,436***	0,110	0,027	0,918***	0,127 0,085***
Bac. Gén.	-0,203**	0,091	-0,056***	0,514***	0,085	0,018	1,202***	0,099 0,120***
Niveau Bac+2	-0,217***	0,084	-0,059***	0,521***	0,077	0,014	1,267***	0,090 0,129***
> Bac+2	-0,164**	0,078	-0,065***	0,645***	0,074	-0,007	1,721***	0,086 0,190***
Nationalité P.R.								
Français de nais.	Réf.			Réf.			Réf.	
Français autre	0,311***	0,086	0,042***	-0,076	0,083	-0,012	-0,180*	0,100 -0,022**
UE des 15	0,350**	0,142	0,025*	0,207	0,128	-0,009	0,454***	0,143 0,041**
UE entrés 2004	1,139**	0,544	0,203**	-1,156	1,114	-0,156	-0,755	1,167 -0,053
Alg., maroc. tunis.	1,545***	0,111	0,227***	-0,296**	0,148	-0,082***	-0,457**	0,208 -0,065***
Afrique	2,041***	0,177	0,350***	-1,072***	0,377	-0,169***	-1,004**	0,513 -0,100***
Autre	1,510***	0,151	0,178***	0,120	0,203	-0,068***	0,420*	0,249 0,014
Présence d'enfant	-0,317***	0,064	-0,039***	0,048	0,057	0,006	0,183***	0,065 0,025**
Densité de pop. (log. ^a)	0,362***	0,013	0,054***	-0,254***	0,011	-0,025***	-0,447***	0,013 -0,045**
Inob _{dens} ^{s b}	0,058	0,045	-0,001	0,167***	0,036	0,017***	0,145***	0,040 0,006
Constante	8,614***	0,303		-7,508***	0,315		-15,299***	0,409
Nombre d'obs.					27 289			
Log-likelihood					-29 293,085			
Pseudo R-carré					0,2223			

^a log. : forme logarithmique.

^b Inob_{dens}^s : Variable capturant la variabilité non observable de la densité de population (définie en annexe).

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 % et 1 %.

TABEAU 5 - Estimations du modèle logit multinomial du type de logement avec traitement de l'endogénéité de la densité et de la surface (méthode 2SRI)

Type de logement (Réf. : Maison individuelle)	Coef.	Appartement		Coef.	Maison accolée	
		Err. T.	Marg.		Err. T.	Marg.
Classe de surface						
Classe 1	Réf.			Réf.		
Classe 2	-1,591***	0,193	-0,293***	0,296	0,183	0,146***
Classe 3	-3,475***	0,372	-0,531***	0,101	0,351	0,237***
Classe 4	-4,758***	0,552	-0,612***	0,062	0,521	0,275***
Age de la P.R.						
< 30 ans	Réf.			Réf.		
de 30 à 39 ans	-0,487***	0,111	-0,038***	-0,258**	0,109	-0,012
de 40 à 49	-0,659***	0,137	-0,036***	-0,623***	0,131	-0,061***
de 50 à 64	-0,961***	0,186	-0,062***	-0,747***	0,174	-0,064**
>65 ans	-1,295***	0,210	-0,090***	-0,879***	0,197	-0,067**
Revenu (log. ^a)	-0,220***	0,064	-0,004	-0,367***	0,062	-0,044***
Nb UC (log. ^a)	-0,870***	0,199	-0,069***	-0,392**	0,170	-0,015
Education P.R.						

<i>Aucun diplôme</i>	Réf.			Réf.		
<i>CEP</i>	-0,312***	0,082	-0,017**	-0,263***	0,066	-0,027***
<i>BEPC, BE</i>	0,211**	0,104	0,036***	-0,228**	0,090	-0,050***
<i>CAP, BEP ou autre diplôme</i>	-0,094	0,076	0,007	-0,295***	0,064	-0,044***
<i>Bac. Prof.</i>	-0,123	0,137	0,009	-0,388***	0,115	-0,057***
<i>Bac. Tech. technologique</i>	0,069	0,140	0,030**	-0,398***	0,121	-0,069***
<i>Bac. Gén.</i>	0,139	0,119	0,044***	-0,547***	0,109	-0,093***
<i>Niveau Bac+2</i>	0,112	0,112	0,039***	-0,494***	0,102	-0,084***
<i>> Bac+2</i>	0,450***	0,125	0,080***	-0,596***	0,120	-0,113***
Nationalité P.R.	Réf.			Réf.		
<i>Français de nais.</i>	Réf.			Réf.		
<i>Français autre</i>	0,137	0,097	0,014	0,001	0,086	-0,007
<i>UE des 15</i>	-0,066	0,151	0,003	-0,187	0,128	-0,024
<i>UE entrés 2004</i>	-2,065***	0,608	-0,119***	-2,299**	1,100	-0,159***
<i>Alg., maroc. tunis.</i>	0,969***	0,180	0,075***	0,551***	0,171	0,030
<i>Afrique</i>	0,749**	0,339	0,082***	0,004	0,379	-0,038
<i>Autre</i>	0,802***	0,230	0,087***	0,019	0,238	-0,039
Présence d'enfant	0,114	0,070	0,015**	-0,065	0,059	-0,016*
Densité de pop. (log. ^a)	0,849***	0,037	0,063***	0,467***	0,034	0,027***
Inob _{dens} ^{TL b}	-0,296***	0,057	<0.001	-0,585***	0,049	-0,074***
Inob _{surf} ^{TL c}	0,286	0,184	0,051***	-0,425**	0,174	-0,079***
Constante	1,212	0,776		2,066***	0,724	
<i>Nombre d'obs.</i>				27 289		
<i>Log-likelihood d'observations</i>				-19 075,079		
<i>Pseudo R-carré</i>				0,3310		

^a log. : forme logarithmique.

^b Inob_{dens}^{TL} : Variable capturant la variabilité non observable de la densité de population (définie en annexe).

^c Inob_{surf}^{TL} : Variable capturant la variabilité non observable de la surface (définie en annexe).

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 % et 1 %.

TABLEAU 6 - Estimation du modèle logit multinomial de source d'énergie principale du logement (estimation standard)

Source d'énergie (Réf. : Gaz)	Electricité			Fuel			Autres		
	Coef.	Err. T.	Marg.	Coef.	Err. T.	Marg.	Coef.	Err. T.	Marg.
Classe de surface									
<i>Classe 1</i>									
<i>Classe 2</i>	-0,930***	0,044	-0,187***	0,117	0,100	0,053***	-0,816***	0,086	-0,025***
<i>Classe 3</i>	-0,964***	0,052	-0,206***	0,354***	0,103	0,076***	-0,753***	0,093	-0,024***
<i>Classe 4</i>	-1,290***	0,061	-0,286***	0,653***	0,107	0,123***	-0,695***	0,101	-0,018**
Type de logement									
<i>Appartement</i>									
<i>Maison ind. isolée</i>	0,120***	0,045	-0,080***	2,435***	0,128	0,142***	1,098***	0,095	0,045***
<i>Maison accolée</i>	-0,413***	0,045	-0,147***	1,812***	0,129	0,106***	0,569***	0,096	0,032***
Age de la P.R.									
<i>< 30 ans</i>									
<i>de 30 à 39 ans</i>	-0,253***	0,058	-0,069***	0,115	0,133	0,016	0,248*	0,132	0,022***
<i>de 40 à 49</i>	-0,208***	0,059	-0,074***	0,304**	0,131	0,027***	0,456***	0,131	0,033***
<i>de 50 à 64</i>	-0,291***	0,059	-0,093***	0,381***	0,131	0,040***	0,380***	0,131	0,028***
<i>>65 ans</i>	-0,598***	0,064	-0,168***	0,775***	0,134	0,103***	0,168	0,137	0,013*
Revenu (log. ^a)	0,004	0,023	0,011**	-0,030	0,037	0,002	-0,284***	0,039	-0,020***
Nb UC (log. ^a)	-0,287***	0,068	-0,069***	-0,133	0,099	-0,010	0,466***	0,114	0,044***
Education P.R.									
<i>Aucun diplôme</i>									
<i>CEP</i>	-0,007	0,061	0,003	0,004	0,078	0,004	-0,153*	0,089	-0,013*
<i>BEPC, BE</i>	0,361***	0,068	0,087***	-0,002	0,100	-0,009	-0,326***	0,118	-0,036***
<i>CAP, BEP ou autre</i>	0,154***	0,049	0,043***	-0,014	0,070	<0.001	-0,335***	0,076	-0,031***
<i>Bac. Prof.</i>	0,151*	0,087	0,052***	-0,229*	0,132	-0,021*	-0,386***	0,147	-0,030***
<i>Bac. Tech.</i>	0,224**	0,089	0,077***	-0,250*	0,138	-0,021*	-0,691***	0,169	-0,050***
<i>Bac. Gén.</i>	0,458***	0,066	0,121***	-0,206*	0,107	-0,031***	-0,435***	0,126	-0,043***

<i>Niveau Bac+2</i>	0,261***	0,062	0,075***	-0,229**	0,096	-0,026***	-0,346***	0,107	-0,031***
<i>> Bac+2</i>	0,396***	0,058	0,100***	-0,070	0,088	-0,016**	-0,402***	0,104	-0,041***
Nationalité PR									
<i>Français de nais.</i>									
<i>Français autre</i>	0,001	0,067	0,014	-0,296***	0,114	-0,027***	-0,074	0,127	<0.001
<i>UE des 15</i>	0,183*	0,103	0,050**	-0,093	0,157	-0,013	-0,218	0,191	-0,017*
<i>UE entrés 2004</i>	1,163**	0,487	0,291***	-11,870	385,9	-0,138***	0,515	1,132	0,006
<i>Alg., maroc. tunis.</i>	0,530***	0,085	0,057***	0,477**	0,211	0,003	0,952***	0,160	0,051***
<i>Afrique</i>	1,268***	0,119	0,269***	-0,376	1,015	-0,085*	0,689*	0,403	0,003
<i>Autre</i>	0,717***	0,108	0,130***	0,144	0,350	-0,030	0,623**	0,275	0,019
Présence d'enfant	-0,116**	0,046	-0,011	-0,120*	0,072	-0,002	-0,287***	0,081	-0,015***
Densité de pop. (log. ^a)	-0,391***	0,011	-0,036***	-0,593***	0,015	-0,029***	-0,755***	0,018	-0,031***
Constante	4,234***	0,234		0,671*	0,385		4,589***	0,393	
<i>Nombre d'obs.</i>					27 909				
<i>Log-likelihood</i>					-28936.991				
<i>Pseudo R-carré</i>					0,1466				

^alog. : forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 % et 1 %.

Dans le TABLEAU 4 présentant les résultats de l'estimation du modèle de choix de classes de surface de logement, on note tout d'abord que la densité de population est significative à 1% pour l'ensemble des classes : plus la densité est élevée, plus la probabilité que le ménage, à toute autre caractéristique constante, réside sur une faible surface est élevée. D'autre part, on observe que la taille du logement augmente avec l'âge de la personne de référence. Le revenu du ménage est également significatif et lié de façon croissante avec la taille de l'habitation : plus le revenu du ménage est important, plus le ménage est susceptible d'habiter un grand logement. De même, plus le nombre d'unité de consommation est élevé, plus le ménage favorisera une grande surface. A taille de ménage constante, la présence d'enfant est significative et favorise les grandes surfaces de logement. Enfin, un niveau d'éducation élevé augmente la probabilité du ménage d'habiter dans une grande surface, et le fait de ne pas être français mais de nationalité africaine notamment semble favoriser les plus petites surfaces, toute caractéristique égale par ailleurs.

Dans le TABLEAU 5, on note tout d'abord que les coefficients relatifs à la densité sont significatifs à 1 % pour les alternatives *appartement* et *maison accolée*. Les signe et amplitude des effets marginaux de la variable de densité de population indiquent que la probabilité pour le ménage de résider dans un appartement ou une maison accolée augmente avec la densité, et ce plus fortement pour le cas de l'appartement. Les ménages sont donc plus susceptibles de choisir une maison individuelle isolée en faible densité. En ce qui concerne la variable de surface, on observe qu'elle est significative à 1 % pour l'alternative *appartement* : plus le ménage a choisi une grande surface, plus la probabilité qu'il réside dans un appartement est faible. L'âge de la personne de référence est un facteur augmentant la probabilité du ménage de résider dans une maison individuelle isolée par rapport à un appartement. En termes de revenu, variable significative à 1 %, plus celui-ci augmente, plus les préférences des ménages pour la maison individuelle isolée augmentent alors que celles pour la maison accolée diminuent. Un nombre élevé d'unité de consommation dans le ménage favorise la maison isolée par rapport à l'appartement. Enfin, un niveau d'éducation élevé semble favoriser la

maison isolée alors que la nationalité africaine ou autre semble augmenter la probabilité du ménage de résider dans un appartement. Toutefois ce dernier résultat est à mettre en perspective avec le fort déséquilibre de la base de données composée à 90 % par des ménages français.

Pour finir, la variable de densité de population est significative à 1 % pour l'ensemble des alternatives de sources d'énergie du TABLEAU 6 : plus la densité augmente, plus la probabilité pour le ménage d'utiliser le gaz comme énergie principale est élevée alors que les probabilités d'utiliser l'électricité, le fuel ou bien d'autres sources diminuent. La surface du logement intervient également dans le choix des ménages en ce qui concerne le type d'énergie utilisée : ainsi, plus le logement est petit, plus la probabilité d'utiliser de l'électricité augmente alors que plus celle d'utiliser du fuel diminue. Les appartements jouent également en la faveur de l'électricité alors que le fuel est plus utilisé dans les maisons individuelles, à toute autre caractéristique constante. Les ménages aisés tendent à délaisser les sources d'énergie autres que gaz, fuel et électricité (soit principalement le bois), au profil éventuellement de l'électricité alors que les familles nombreuses sont moins susceptibles d'utiliser de l'électricité comme énergie principale mais plutôt du bois. Enfin, les personnes âgées ont une préférence pour le fuel et le gaz par rapport à l'électricité notamment.

Les estimations précédentes ont permis de mettre en évidence l'effet significatif de l'organisation spatiale sur les trois variables de surface, type et énergie principale du logement. Il s'agit maintenant d'estimer l'impact de ces trois variables sur la consommation énergétique résidentielle afin de pouvoir conclure sur l'effet de la densité dans la formation de la demande d'énergie du logement et sur les différents mécanismes à travers lesquels cette interaction se manifeste.

c. Demande énergétique – Modèle continu

1) Effet agrégé de la densité sur la demande énergétique

La demande énergétique des ménages est tout d'abord estimée sous forme logarithmique comme une fonction linéaire des caractéristiques des ménages et de la densité de population (également sous forme logarithmique) afin de quantifier l'effet agrégé de l'organisation spatiale sur la consommation d'énergie. La spécification testée est décrite dans l'équation (3.6) où \mathbf{a} est le vecteur de coefficients à estimer relatifs aux variables de caractéristiques socio-économiques du ménage, b est le coefficient relatif à la densité et \mathbf{c} le vecteur de coefficients relatifs aux variables de contrôle regroupées dans la liste CV_n ; ε_n est le terme d'erreur et N est le nombre total de ménages.³²

$$\log(E_n) = \mathbf{a} \cdot {}^t \mathbf{CSE}_n + b \cdot \log(d_n) + \mathbf{c} \cdot {}^t \mathbf{CV}_n + \varepsilon_n \quad n \in [1; N] \quad (3.6)$$

³² La liste CV_n de variables de contrôle comprend la variable du nombre de Degré Jour Unifié au carré et la binaire *Construit après 1975*.

Afin d'assurer la relation de causalité entre densité et consommation d'énergie, il est nécessaire de garantir qu'il n'y a pas de facteur externe au modèle établissant un lien entre ces variables. En particulier, les préférences non observées des ménages pour un comportement sobre en énergie sont susceptibles de les orienter soit vers des appartements aux consommations plus basses en moyenne et donc vers des localisations à forte densité ou au contraire vers des logements en maison individuelle, offrant plus de flexibilité en termes de choix d'équipements énergétiquement performants, et de privilégier ainsi les localisations à faible densité. Etant donné la linéarité du modèle, on repose sur la méthode 2SLS pour contrôler l'endogénéité potentielle de la variable densité de population. Les instruments utilisés sont la densité de population de 1968 ainsi que les accroissements de population et d'emploi entre 1990 et 1999 comme indicateur de l'attractivité du territoire concerné. Afin de tester la robustesse des instruments retenus, on effectue une régression de la densité de population sur ses instruments et sur les variables exogènes du modèle. On réalise ensuite un test, le *Weak Instrument Test*, construit sur la F-statistique de ces régressions, qui confirme la validité des instruments retenus par rapport au critère 2 (Stock & Yogo, 2001; Stock et al., 2002). Les résultats sont reportés TABLEAU 23 en annexe. Les résultats des estimations sans et avec contrôle de l'endogénéité du modèle agrégé de la demande énergétique des ménages sont présentés dans le TABLEAU 7.

TABLEAU 7 – Estimations des paramètres du modèle agrégé de demande énergétique des ménages

Demande énergétique (log. ^a)	Moindres Carrés			IV (2SLS)		
	Coef.	Err. Type	p-value	Coef.	Std. Err.	p-value
Variables de contrôle						
Degré Jour Unifié au carré	0,057***	0,002	<0.001	0,057***	0,002	<0.001
Bâtiment construit après 1975	-0,265***	0,009	<0.001	-0,266***	0,009	<0.001
Variables socio-économiques du ménage						
Age de la personne de référence						
< 30 ans						
de 30 à 39 ans	0,219***	0,019	<0.001	0,218***	0,019	<0.001
de 40 à 49	0,327***	0,019	<0.001	0,327***	0,019	<0.001
de 50 à 64	0,505***	0,018	<0.001	0,504***	0,018	<0.001
>65 ans	0,639***	0,020	<0.001	0,638***	0,020	<0.001
Revenu du ménage (log. ^a)	0,120***	0,007	<0.001	0,120***	0,007	<0.001
Nombre d'unité de consommation (log. ^a)	0,702***	0,020	<0.001	0,701***	0,020	<0.001
Niveau d'éducation de la P.R.						
<i>Aucun diplôme</i>						
<i>Certificat d'études primaires (CEP)</i>	0,052***	0,018	0,003	0,052***	0,018	0,003
<i>BEPC ou BE ou brevet des collèges</i>	0,067***	0,021	0,001	0,067***	0,021	0,001
<i>CAP, BEP ou autre de ce niveau</i>	0,035**	0,015	0,020	0,035**	0,015	0,019
<i>Baccalauréat professionnel</i>	0,025	0,027	0,351	0,025	0,027	0,351
<i>Bac. technique ou technologique</i>	0,010	0,028	0,717	0,010	0,028	0,710
<i>Baccalauréat général</i>	0,057***	0,021	0,006	0,058***	0,021	0,005
<i>Niveau Bac+2</i>	0,063***	0,019	0,001	0,064***	0,019	0,001
<i>Niveau supérieur à Bac+2</i>	0,125***	0,018	<0.001	0,127***	0,018	<0.001
Nationalité de la personne de référence						
<i>Français de nais.</i>						
<i>Français autre</i>	-0,004	0,021	0,862	-0,002	0,021	0,922
<i>UE des 15</i>	0,044	0,033	0,189	0,045	0,033	0,180
<i>UE entrés 2004</i>	-0,215	0,156	0,167	-0,212	0,156	0,173
<i>Alg., maroc. tunis.</i>	-0,208***	0,028	<0.001	-0,205***	0,028	<0.001

<i>Afrique</i>	-0,125***	0,038	0,001	-0,121***	0,038	0,002
<i>Autre</i>	-0,081**	0,038	0,033	-0,078**	0,038	0,042
Présence d'enfant	0,054***	0,014	<0.001	0,054***	0,014	<0.001
Densité de population (log. ^a)	-0,104***	0,003	<0.001	-0,106***	0,003	<0.001
Constante	6,499***	0,068	<0.001	6,514***	0,069	<0.001
<i>Nombre d'observations</i>			N=27 525			
	F(24, 27 500)=390,20		Wald chi2(24)=9 310,29			
	Prob.> F=0		Prob.>chi2=0			
<i>R-carré</i>	0,2540		0,2541			

^a log. : forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 % et 1 %.

Les estimations des coefficients de l'ensemble des variables explicatives sont relativement proches entre les deux approches utilisées. Dans le cas de la densité de population, l'élasticité-densité est estimée à -0,10 par la méthode des Moindres Carrés et à -0,11 par la méthode 2SLS. Dans le cas où aucune différence statistique n'est mise en évidence entre les estimations des deux méthodes, les Moindres Carrés sont à privilégier car ils fournissent des erreurs type plus faibles que la méthode 2SLS. Afin de savoir quelles estimations privilégier, on réalise un test de Hausman (Wooldridge, 2002) : sous l'hypothèse de référence H_0 , à savoir l'absence de différence significative entre les estimations des deux méthodes, la statistique de test égale à 5,47 dans notre cas suit une loi du $\chi^2(24)$. La probabilité qu'une variable suivant cette loi soit supérieure à la statistique de test étant 1,000, l'hypothèse de référence n'est pas rejetée : il n'y a donc pas de différence significative entre les estimations des deux méthodes. Le biais induit par l'endogénéité potentielle de la variable de densité de population n'est pas confirmé et l'utilisation de la méthode des Moindres Carrés est donc robuste pour estimer l'effet de la forme urbaine sur la demande énergétique des ménages pour leur logement.

Les résultats de l'estimation des Moindres Carrés du TABLEAU 7 indiquent que la densité de population (sous forme logarithmique) est significative à 1 %. L'élasticité de la consommation d'énergie par rapport à la densité est estimée à -0,104 dans ce modèle agrégé. Ainsi non seulement l'organisation spatiale joue un rôle dans la formation de la demande énergétique résidentielle, mais plus la densité est élevée, plus les demandes énergétiques des ménages pour leur logement sont faibles. Au-delà des déterminants spatiaux, les variables de contrôle incluses dans la régression sont toutes deux significatives à 1 % : d'une part plus le climat est froid, c'est-à-dire plus le nombre de Degré Jour Unifié est élevé, plus la demande énergétique est importante, et d'autre part la consommation énergétique des logements des ménages est moins conséquente lorsque l'habitation a été construite après 1975 (soit après l'entrée en vigueur de la première réglementation thermique en France). En ce qui concerne les caractéristiques socio-économiques du ménage, plus le ménage est aisé, plus sa demande énergétique est forte : l'élasticité-revenu de la consommation énergétique est estimée à 0,12 avec ce modèle. Cette consommation augmente également avec l'âge de la personne de référence du foyer, ainsi qu'avec le nombre d'unité de consommation du ménage. A taille de ménage constante, la présence d'enfant augmente également la consommation énergétique de manière

statistiquement significative. Enfin, la demande énergétique semble être plus élevée pour les ménages dont la personne de référence a un niveau d'étude supérieur à deux années d'étude après le baccalauréat.

Cette partie a permis d'identifier un effet agrégé *significatif* et *négatif* de la densité sur la demande énergétique du logement. L'élasticité correspondante est estimée à -0,10. Le modèle présenté dans la section suivante vise à déterminer quelles parts de cet effet agrégé sont à attribuer aux différents mécanismes d'impact, comprenant l'effet de surface, l'effet de type de logement, l'effet de source d'énergie et l'effet d'ilot de chaleur.

2) Effet de la surface, du type et de la source d'énergie du logement sur la demande énergétique

Le logarithme de la demande énergétique est maintenant modélisé comme une fonction linéaire de la surface, du type et de la source d'énergie principale du logement ainsi que des caractéristiques socio-économiques du ménage et de la densité de population. Les variables discrètes à m alternatives sont converties en m variables binaires prenant la valeur 1 lorsque l'alternative considérée est vérifiée et 0 sinon. Ainsi les régresseurs de la demande énergétique sont constitués de variables continues et de variables binaires. La spécification utilisée pour estimer la consommation d'énergie E_n du logement du ménage n est décrite dans l'équation (3.7), où p^i , q^j et r^k sont les coefficients à estimer relatifs respectivement aux classes de surface, type et source d'énergie du logement.

$$\log(E_n) = \mathbf{a} \cdot {}^t \mathbf{CSE}_n + b \cdot \log(d_n) + \mathbf{c} \cdot {}^t \mathbf{CV}_n + \sum_i p^i \cdot S_n^i + \sum_j q^j \cdot TL_n^j + \sum_k r^k \cdot SE_n^k + \varepsilon_n \quad n \in [1; N]$$

(3.7)

Les préférences pour les maisons individuelles des ménages soucieux de l'environnement étant susceptibles de créer un problème d'endogénéité par rapport à la variable de type de logement, on utilise à nouveau la méthode 2SLS pour contrôler ce risque. Les variables utilisées pour instrumenter la variable type de logement sont construites à partir des prédictions d'un modèle logit multinomial (dont les estimations sont présentées TABLEAU 17 en annexe), auxquelles on ajoute l'ensemble des instruments utilisées pour contrôler la densité de population. Le TABLEAU 25 en annexe présente la première étape de l'estimation 2SLS, à savoir la régression de la variable type de logement sur ses instruments et les variables exogènes du modèle. Les résultats de l'estimation de la demande énergétique sans et avec traitement de l'endogénéité sont présentés dans le TABLEAU 8.

TABEAU 8– Estimation de la demande énergétique comme fonction des caractéristiques socio-économiques du ménage, et de la surface, du type et de la source d'énergie principale du logement ainsi que de la densité de population

Demande énergétique (log. ^a)	Moindres Carrés			IV (2SLS)		
	Coef.	Err. T.	p-value	Coef.	Err. T.	p-value
Classes de surface						
<i>Classe 1</i>	Réf.					
<i>Classe 2</i>	0.220***	0.013	<0.001	0.217***	0.017	<0.001
<i>Classe 3</i>	0.360***	0.015	<0.001	0.312***	0.025	<0.001
<i>Classe 4</i>	0.534***	0.017	<0.001	0.461***	0.029	<0.001
Type de logement						
<i>Appartement</i>	-0.228***	0.013	<0.001	-0.101*	0.052	0.053
<i>Maison individuelle isolée</i>	0.118***	0.011	<0.001	0.439***	0.069	<0.001
<i>Maison accolée</i>	Réf.					
Source d'énergie						
<i>Electricité</i>	-0.295***	0.016	<0.001	-0.280***	0.016	<0.001
<i>Gaz</i>	0.197***	0.016	<0.001	0.228***	0.018	<0.001
<i>Fuel</i>	0.321***	0.017	<0.001	0.309***	0.018	<0.001
<i>Autre</i>	Réf.					
Variables de contrôle						
Degré Jour Unifié au carré	0.027***	0.002	<0.001	0.027***	0.002	<0.001
Bâtiment construit après 1975	-0.153***	0.009	<0.001	-0.177***	0.010	<0.001
Variables socio-économiques du ménage						
Age de la personne de référence						
< 30 ans						
de 30 à 39 ans	0.067***	0.017	<0.001	0.059***	0.017	0.001
de 40 à 49	0.105***	0.017	<0.001	0.087***	0.018	<0.001
de 50 à 64	0.159***	0.017	<0.001	0.142***	0.019	<0.001
>65 ans	0.205***	0.018	<0.001	0.181***	0.021	<0.001
Revenu du ménage (log.)	0.030***	0.007	<0.001	0.022***	0.007	0.002
Nombre d'unité de consommation (log.)	0.368***	0.019	<0.001	0.363***	0.020	<0.001
Education de la personne de référence						
<i>Aucun diplôme</i>						
<i>Certificat d'études primaires (CEP)</i>	0.026	0.016	0.103	0.013	0.016	0.411
<i>BEPC ou BE ou brevet des collèges</i>	0.042**	0.019	0.024	0.038**	0.019	0.047
<i>CAP, BEP ou autre de ce niveau</i>	-0.002	0.013	0.873	-0.012	0.014	0.365
<i>Baccalauréat professionnel</i>	-0.044*	0.024	0.068	-0.056**	0.024	0.022
<i>Bac. technique ou technologique</i>	-0.034	0.025	0.177	-0.045*	0.025	0.074
<i>Baccalauréat général</i>	0.001	0.019	0.943	-0.015	0.019	0.434
<i>Niveau Bac+2</i>	-0.005	0.017	0.781	-0.018	0.018	0.298
<i>Niveau supérieur à Bac+2</i>	0.045***	0.016	0.005	0.029*	0.017	0.078
Nationalité de la personne de référence						
<i>Français de nais.</i>						
<i>Français autre</i>	0.045**	0.019	0.018	0.044**	0.019	0.024
<i>UE des 15</i>	0.068**	0.030	0.023	0.062**	0.031	0.043
<i>UE entrés 2004</i>	0.084	0.137	0.540	0.032	0.140	0.816
<i>Alg., maroc. tunis.</i>	0.037	0.026	0.142	0.037	0.027	0.167
<i>Afrique</i>	0.252***	0.034	<0.001	0.237***	0.036	<0.001
<i>Autre</i>	0.173***	0.034	<0.001	0.160***	0.035	<0.001
Présence d'enfant	0.005	0.013	0.724	0.004	0.013	0.779
Densité de population (log.)	-0.035***	0.003	<0.001	-0.021***	0.005	<0.001
Constante	8.026***	0.066	<0.001	7.885***	0.082	<0.001
<i>Nombre d'observations</i>			N=26 913			
			F(32, 26 680)=611,36	Wald chi2(32)=18 385,83		
			Prob.> F=0	Prob.>chi2=0		
<i>R-carré</i>			0,4212	0,4026		

^a log. : forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 % et 1 %.

Afin de savoir quelles estimations privilégier, on réalise un test de Hausman (Wooldridge, 2002) : sous l'hypothèse de référence H_0 , à savoir l'absence de différence significative entre les estimations des deux méthodes, la statistique de test égale à 22,44 dans notre cas suit une loi du $\chi^2(32)$. La probabilité qu'une variable suivant cette loi soit supérieure à la statistique de test étant 0,8962, l'hypothèse de référence n'est pas rejetée : il n'y a pas de différence significative entre les estimations des deux méthodes. Le biais induit par l'endogénéité potentielle de la variable type de logement n'est pas confirmé et l'utilisation de la méthode des Moindres Carrés est donc robuste pour estimer à l'aide du modèle désagrégé l'effet de la forme urbaine sur la demande énergétique des ménages pour leur logement.

L'estimation Moindres Carrés du TABLEAU 8 révèle que classes de surface, variables de type de logement et variables de sources d'énergie du logement sont toutes significatives à 1% dans la formation de la demande énergétique des ménages. La consommation d'énergie augmente avec la surface du logement : à surface constante, elle est plus faible dans les maisons accolées et encore plus faible dans les appartements par rapport aux maisons isolées : elle diminue donc avec la compacité du type de logement. Enfin, la source d'énergie utilisée influence également la demande énergétique puisque l'électricité (en énergie finale et sur l'échantillon étudié du parc existant) induit des consommations plus faibles que celles induites par le gaz, elles-mêmes plus faibles que celles induites par le fuel. Si on s'intéresse à la densité de population, on remarque qu'à surface, type de logement et source d'énergie constante, la densité de population a toujours un effet significatif à 1 % sur la demande énergétique : cet effet résiduel de l'organisation spatiale capture le phénomène d'îlot de chaleur. Plus la densité de population augmente, plus la demande énergétique diminue et l'élasticité associée à cet effet résiduel de la densité est estimée à -0,04. Ainsi la densité de population modifie le microclimat de telle sorte qu'il augmente la température en hiver ce qui diminue les besoins en chauffage des ménages.

Tout comme dans le modèle agrégé, on retrouve un impact significatif et positif du revenu (mais plus faible suite à l'inclusion des variables caractéristiques du logement), de l'âge de la personne de référence et de la taille du ménage.³³ En revanche, la présence d'enfant n'est plus significative. En ce qui concerne les variables de contrôle, on retrouve bien un effet significatif positif du carré du nombre de degré jour unifié et un effet significatif négatif de l'âge de construction du bâtiment.

d. Exploitation des résultats économétriques : modélisation de la demande énergétique à l'aide d'un modèle à équation unique et d'un modèle à équations multiples

L'estimation agrégée de l'impact de la densité de population sur la demande énergétique des ménages pour leur logement a permis de mettre en évidence la significativité, le sens et l'ampleur de l'effet de

³³ L'élasticité-revenu est estimée à 0,03 à caractéristiques de logement constantes alors qu'elle est estimée à 0,12 sans contrôle des choix résidentiels des ménages.

la variable de forme urbaine dans la formation de la consommation énergétique résidentielle. L'élasticité-densité est ainsi estimée à -0,10 sur l'échantillon français considéré. Afin de préciser cet effet et de le désagréger pour identifier et quantifier les différents mécanismes par lesquels il influence la demande énergétique, on suit la méthodologie exposée au chapitre 2 de cette thèse et on combine les trois modèles de surface, type et source d'énergie principale du logement avec celui de la demande énergétique (équations (3.3), (3.4), (3.5) et (3.7)).

Tout d'abord, on exprime la demande énergétique en fonction des caractéristiques socio-économiques des ménages, de la surface, du type et de la source d'énergie du logement et de la densité en passant à l'exponentielle l'équation (3.7).

$$E_n = e^{\varepsilon_n} \cdot e^{\mathbf{a}' \cdot \mathbf{CSE}_n} \cdot d_n^b \cdot e^{\mathbf{c}' \cdot \mathbf{CV}_n} \prod_i e^{p^i \cdot D_n^i} \cdot \prod_j e^{q^j \cdot TL_n^j} \cdot \prod_k e^{r^k \cdot SE_n^k} \quad n \in [1; N] \quad (3.8)$$

S_n^i , TL_n^j et SE_n^k étant des variables binaires, on en déduit l'espérance de la demande énergétique du ménage n pour son logement, sachant ses caractéristiques socio-économiques, la densité, les variables de contrôle, sa surface de logement S_n^i , son type de logement TL_n^j et sa source d'énergie SE_n^k (surface, type et source d'énergie du logement sont supposés connus dans ce cas et correspondre aux alternatives I , J et K parmi les 4 alternatives i possibles, les 3 de j et les 4 de k).

$$E[E_n | \mathbf{CES}_n, d, S_n^i \cap TL_n^j \cap SE_n^k] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{\mathbf{a}' \cdot \mathbf{CSE}_n} \cdot d^b \cdot e^{\mathbf{c}' \cdot \mathbf{CV}_n} \cdot e^{p^i} \cdot e^{q^j} \cdot e^{r^k} \quad n \in [1; N] \quad (3.9)$$

Or on a également par définition de l'espérance que :

$$E[E_n | \mathbf{CES}_n, d, \mathbf{CV}_n] = \sum_{i,j,k} E[E_n | \mathbf{CES}_n, d, \mathbf{CV}_n, S_n^i \cap TL_n^j \cap SE_n^k] \cdot P(S_n^i \cap TL_n^j \cap SE_n^k) \quad n \in [1; N] \quad (3.10)$$

Et par substitution de l'équation (2.8) dans l'équation (3.10) on obtient :

$$E[E_n | \mathbf{CES}_n, d, \mathbf{CV}_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{\mathbf{a}' \cdot \mathbf{CSE}_n} \cdot d_n^b \cdot e^{\mathbf{c}' \cdot \mathbf{CV}_n} \cdot \sum_{i,j,k} e^{p^i + q^j + r^k} \cdot P(S_n^i \cap TL_n^j \cap SE_n^k) \quad n \in [1; N] \quad (3.11)$$

On utilise la loi des Grands Nombres pour estimer l'espérance du terme d'erreur par la moyenne sur l'échantillon de l'exponentielle du résidu. En ce qui concerne la probabilité de l'événement $S_n^i \cap TL_n^j \cap SE_n^k$, elle est égale par définition au produit de la probabilité de SE_n^k sachant $S_n^i \cap TL_n^j$ par la probabilité de TL_n^j sachant S_n^i et par la probabilité de S_n^i (chaque variable pouvant permuter).

$$E[E_n | \mathbf{CES}_n, d_n, \mathbf{CV}_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{\mathbf{a}' \mathbf{CSE}_n} \cdot d_n^b \cdot e^{\mathbf{c}' \mathbf{CV}_n} \cdot \sum_{i,j,k} e^{p^i + q^j + r^k} \cdot P(SE_n^k | TL_n^j \cap S_n^i) \cdot P(TL_n^j | S_n^i) \cdot P(S_n^i)$$

$$n \in [1; N]$$

(3.12)

ou encore avec permutation des variables S^i, TL^j, SE^k

$$E[E_n | \mathbf{CES}_n, d_n, \mathbf{CV}_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{\mathbf{a}' \mathbf{CSE}_n} \cdot d_n^b \cdot e^{\mathbf{c}' \mathbf{CV}_n} \cdot \sum_{i,j,k} e^{p^i + q^j + r^k} \cdot P(TL_n^j | SE_n^k \cap S_n^i) \cdot P(SE_n^k | S_n^i) \cdot P(S_n^i)$$

$$n \in [1; N]$$

(3.13)

ou encore

$$E[E_n | \mathbf{CES}_n, d_n, \mathbf{CV}_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{\mathbf{a}' \mathbf{CSE}_n} \cdot d_n^b \cdot e^{\mathbf{c}' \mathbf{CV}_n} \cdot \sum_{i,j,k} e^{p^i + q^j + r^k} \cdot P(S_n^i | SE_n^k \cap TL_n^j) \cdot P(SE_n^k | TL_n^j) \cdot P(TL_n^j)$$

$$n \in [1; N]$$

(3.14)

A partir de ces dernières équations et des estimations des modèles de surface, type et source d'énergie du logement, on peut quantifier l'effet de la densité de population sur la demande énergétique des ménages en fonction du/des mécanisme(s) considéré(s). Ainsi on déduit l'impact de la densité sur la consommation d'énergie à travers: i) la variation de la surface de leur logement ; ii) le type de logement ; iii) la modification de la source d'énergie principale du logement ; iv) l'effet résiduel de la densité capturant le phénomène d'îlot de chaleur ; v) les quatre mécanismes cumulés. Dans la fonction de demande énergétique, on note $d_{résiduel}$ l'expression de la variable de densité correspondant au phénomène d'îlot de chaleur. Les expressions correspondantes à chacune de ces cinq options sont décrites dans le TABLEAU 13.

TABLEAU 9 – Effet de la densité de population sur la demande énergétique

Mécanismes considérés

Expression de la demande énergétique

Surface du logement

Expression de la demande énergétique à CES, CV, $d_{résiduelle}$, TL et SE fixés

$$E[E_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{a \cdot CES_n} \cdot d_{résiduelle}^b \cdot e^{c \cdot CV_n} \cdot \sum_{i,J,K} e^{p^i + q^j + r^k} \cdot f_i(CES_n, d_n) \cdot P(SE_k | TL_J)^{observe} \cdot P(TL_J)^{observe} \quad n \in [1; N]$$

Type de logement

Expression de la demande énergétique à CES, CV, $d_{résiduelle}$, S et SE fixés

$$E[E_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{a \cdot CES_n} \cdot d_{résiduelle}^b \cdot e^{c \cdot CV_n} \cdot \sum_{j,I,K} e^{p^j + q^j + r^k} \cdot g_j(CES_n, d_n, S^I = 1, S^{I \neq I} = 0) \cdot P(SE_K | S_I)^{observe} \cdot P(S_I)^{observe} \quad n \in [1; N]$$

Source d'énergie

Expression de la demande énergétique à CES, CV, $d_{résiduelle}$, S et TL fixés

$$E[E_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{a \cdot CES_n} \cdot d_{résiduelle}^b \cdot e^{c \cdot CV_n} \cdot \sum_{k,I,J} e^{p^j + q^j + r^k} \cdot h_k(CES_n, d_n, S^I = 1, S^{I \neq I} = 0, TL^J = 1, TL^{S \neq J} = 0) \cdot P(TL_J | S_I)^{observe} \cdot P(S_I)^{observe} \quad n \in [1; N]$$

Ilot de chaleur

Expression de la demande énergétique à CES, CV, S, TL et SE fixés

$$E[E_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{a \cdot CES_n} \cdot d_{résiduelle}^b \cdot e^{c \cdot CV_n} \cdot \sum_{I,J,K} e^{p^j + q^j + r^k} \cdot P(SE_K \cap TL_J \cap S_I)^{observe} \quad n \in [1; N]$$

Effet cumulé

Expression de la demande énergétique à CES et CV fixés

$$E[E_n] = E[e^{\varepsilon_n}] \cdot e^{a \cdot CES_n} \cdot d_{résiduelle}^b \cdot e^{c \cdot CV_n} \cdot \sum_{i,j,k} e^{p^i + q^j + r^k} \cdot h_k(CES_n, d_n, S^i = 1, S^{l \neq i} = 0, TL^j = 1, TL^{s \neq j} = 0) \cdot g_j(CES_n, d_n, S^i = 1, S^{l \neq i} = 0) \cdot f_i(CES_n, d_n)$$

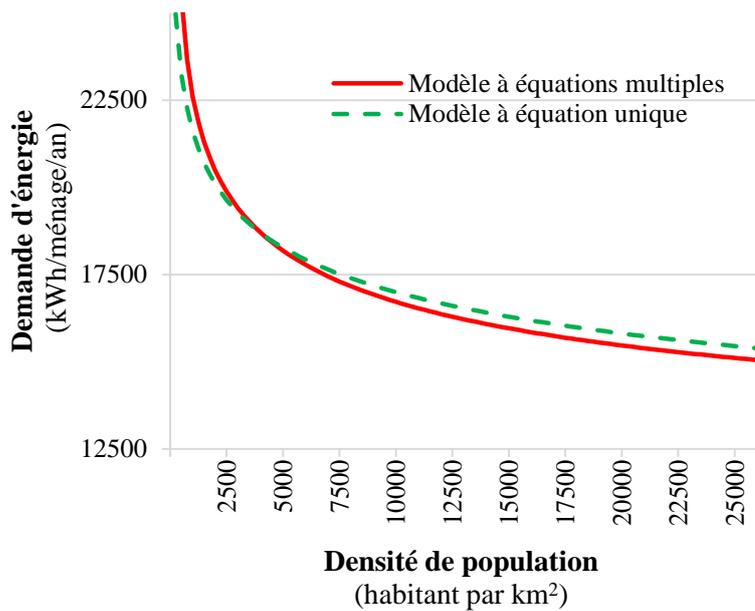
Les expressions du tableau précédent donnent la demande énergétique en fonction des mécanismes d'impact considérés.

e. Interprétation et discussion : comparaison des résultats des deux modèles et application numérique dans le cas d'un ménage type

Les modèles et les expressions définies dans les sections précédentes mettent en évidence la complexité de la relation entre forme urbaine et demande énergétique, que l'on s'intéresse à l'effet global de la densité ou bien à son impact à travers un mécanisme d'interaction donné. Nous avons utilisé deux méthodes : la première consiste à estimer l'effet agrégé de la densité sur la demande énergétique dans un modèle unique alors que la deuxième consiste à représenter les différents mécanismes d'impact par un système d'équations permettant une estimation de l'effet global de la densité mais également une décomposition de cet effet par type d'interaction avec la demande énergétique. Afin de pouvoir comparer les résultats de ces deux méthodes, on considère un ménage type et étudie l'effet de la densité sur la demande énergétique de ce ménage type, à variables de contrôle fixées. Les caractéristiques de ce ménage type ainsi que les valeurs retenues pour les variables de contrôle correspondent au point moyen de l'échantillon de la base de données considérée et sont détaillées dans les statistiques descriptives des variables (TABLEAU 2). On utilise également les valeurs au point moyen pour les variables inobservables et de termes d'erreur, construites lors des estimations (ces valeurs sont reportées dans le TABLEAU 19 en annexe).

En substituant les caractéristiques socio-économiques du ménage type et les valeurs des variables de contrôle dans les différentes expressions de la demande énergétique résidentielle, on obtient la consommation d'énergie comme une fonction de la densité de population de la commune de résidence du ménage. Dans le cas du modèle à équations multiples, les probabilités des classes de surface, de type de logement et de source d'énergie principale sont utilisées pour la détermination de la demande énergétique. Leurs variations avec la densité de population sont représentées FIGURE 20, FIGURE 20 et FIGURE 21 en annexe. Les variations de la demande d'énergie avec la densité sont représentées sur la FIGURE 2 dans deux cas : i) prise en compte de l'effet global de la densité sur la demande énergétique estimé avec le modèle à équation unique (3.6) ; ii) prise en compte de l'effet global de la densité sur la demande énergétique dans le cas d'une estimation à équations multiples (3.7). Les consommations d'énergie ont été normalisées pour que la consommation moyenne de l'échantillon corresponde à la densité moyenne. Rappelons que les deux modèles sont estimés sur le même échantillon et visent à évaluer l'effet de la densité sur la demande énergétique des ménages sachant que le premier modèle le fait par l'intermédiaire d'une seule équation et sans analyse des mécanismes d'impact alors que le deuxième modèle est plus précis et désagrège les mécanismes d'interaction.

FIGURE 2 –Demande énergétique normalisée du logement et densité de population (calculées pour un ménage type correspondant au point moyen de l'échantillon)



Les deux modèles de demande énergétique estimés, qu'il s'agisse de celui à équation unique ou bien de celui à équations multiples, révèlent un impact significatif et négatif de la densité de population de la commune de résidence sur la consommation d'énergie du logement des ménages. La forme du modèle à équations multiples ne repose pas sur l'hypothèse d'une élasticité fixe contrairement au modèle à équation unique. En l'absence d'élasticité fixe comparable et afin de comparer deux situations à densité différente, d d'une part et $(1 + \alpha)d$ d'autre part, on détermine le taux de variation TV de la demande énergétique (équation (3.15)) tout comme dans le chapitre 2. Le paramètre α décrit la variation de la densité que l'on étudie.

$$TV(\alpha, d) = \frac{E_n((1 + \alpha) \cdot d) - E_n(d)}{E_n(d)} \quad (3.15)$$

TV est représenté pour chacun des deux modèles estimés sur la FIGURE 3 ; la FIGURE 4 représente TV dans le cas du modèle à équation unique (TV ne dépend alors que de α et pas de d) et la FIGURE 5 représente TV en fonction de d dans le cas du modèle à équations multiples pour différentes valeurs de α (10 %, 25 %, 50 %, 100 %).

FIGURE 3– Taux de variation de la demande énergétique en fonction de la densité d et de α

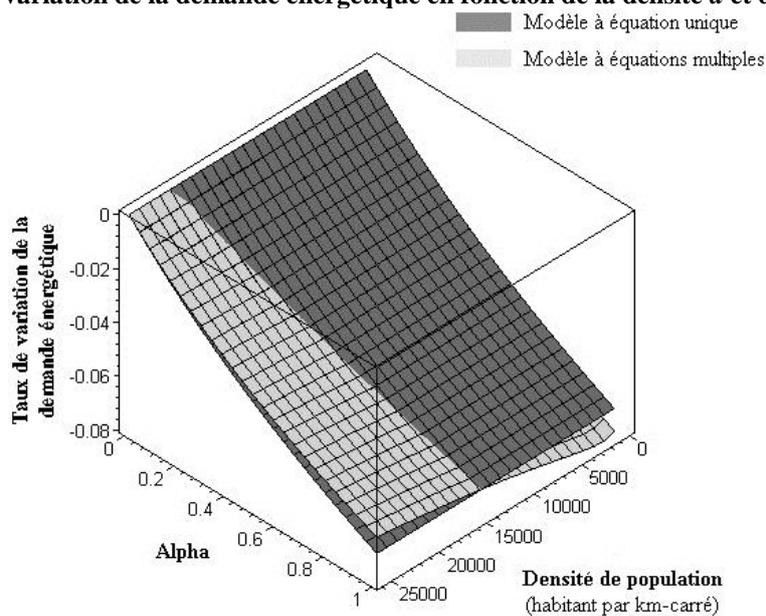


FIGURE 4– Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de α (Modèle à équation unique)

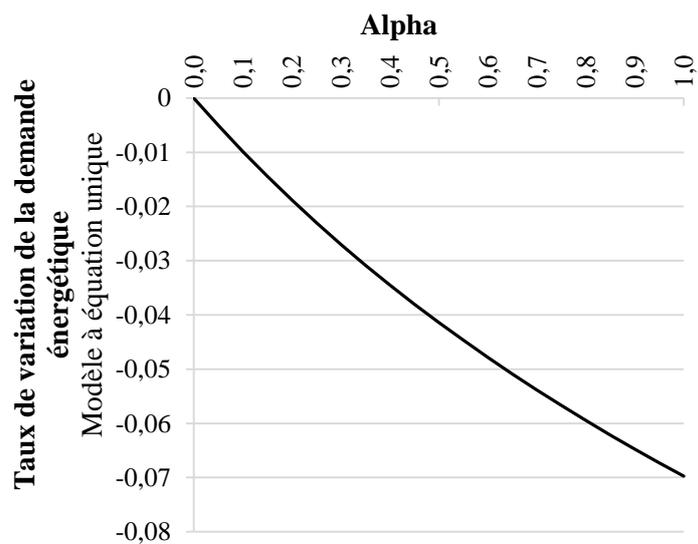
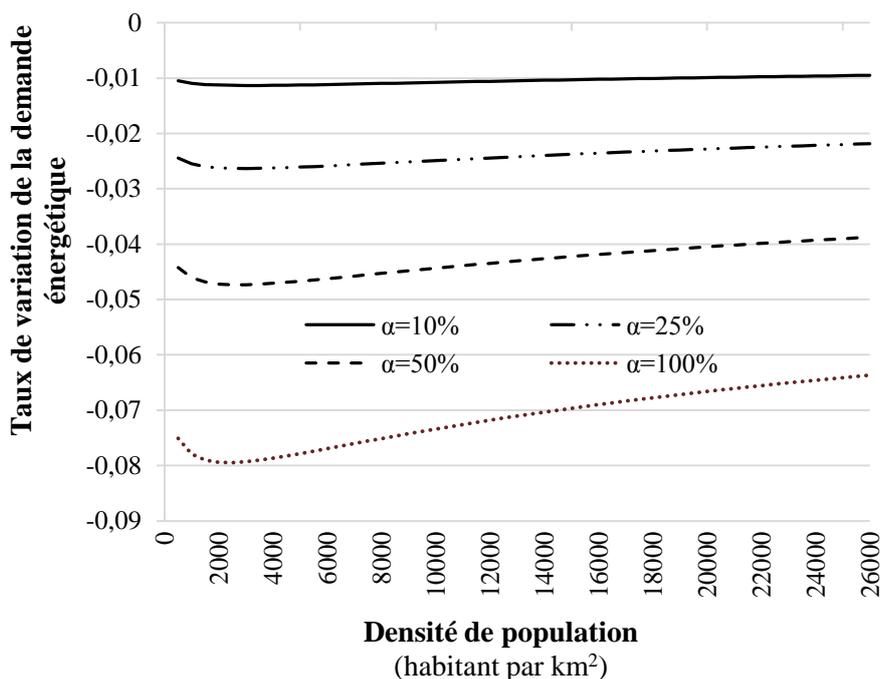


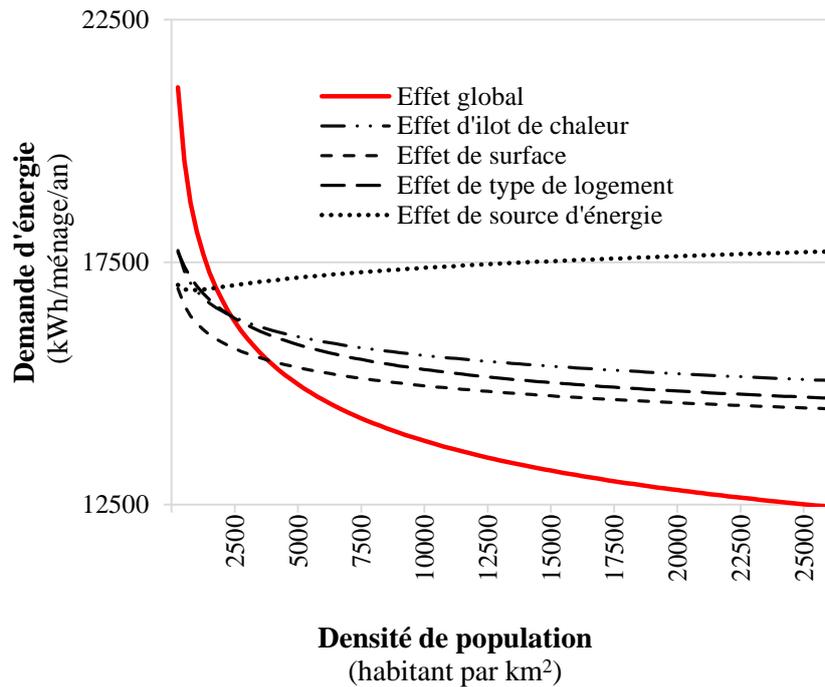
FIGURE 5– Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % (Modèle à équations multiples)



La FIGURE 3 révèle que les évaluations des taux de variation sont du même ordre de grandeur pour les deux modèles estimés : les estimations de TV pour des valeurs de α allant de 0 à 1 s'échelonnent de 0 à -7,0 % pour le modèle à équation unique et de 0 à -7,9 % dans le cas du modèle à équations multiples. Par construction, le taux de variation est indépendant de la densité de la commune de résidence dans le premier modèle, ce que l'on retrouve avec la FIGURE 4. En revanche, le deuxième modèle, qui représente de manière plus fine les mécanismes d'interaction entre densité de population et consommation d'énergie, révèle que le taux de variation diminue tout d'abord avec la densité pour atteindre son minimum pour des densités avoisinants les 2 500 habitants par km², puis augmente ensuite pour des densités plus élevées (FIGURE 5).

Afin de comprendre les mécanismes derrière cette relation entre densité et consommation, la FIGURE 6 décompose les variations de la demande énergétique (calculées à partir des résultats de l'estimation à équations multiples) en fonction de la relation causale considérée : i) prise en compte de l'effet de la densité sur la demande énergétique à travers son impact sur la surface du logement ; ii) prise en compte de l'effet de la densité sur la demande énergétique à travers son impact sur le type du logement ; iii) prise en compte de l'effet de la densité sur la demande énergétique à travers son impact sur la source d'énergie ; et iv) prise en compte de l'effet de la densité sur la demande énergétique à travers l'effet d'îlot de chaleur.

FIGURE 6– Décomposition des variations de la demande énergétique avec la densité de population en fonction du mécanisme d’interaction considéré (calculées pour un ménage type correspondant au point moyen de l’échantillon)



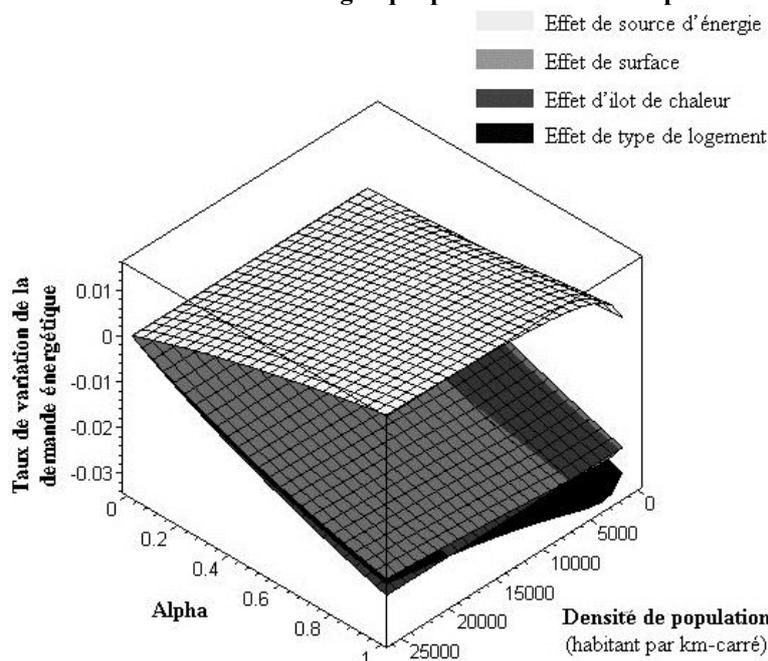
L'application numérique met en évidence que l'interaction de la densité de population sur la demande énergétique des logements des ménages a lieu par l'intermédiaire de quatre mécanismes : à travers la surface du logement, le type du logement, sa source d'énergie principale et l'effet d'îlot de chaleur. La FIGURE 6 représente les variations de chacun de ces mécanismes d'impact avec la densité. Il y a ainsi trois mécanismes *négatifs*, c'est-à-dire pour lequel une augmentation de la densité correspond à une demande énergétique plus faible : il s'agit de l'effet de surface, l'effet de type de logement et l'effet d'îlot de chaleur. La diminution des surfaces avec la densité (FIGURE 20 en annexe) est un premier facteur de réduction de la demande énergétique dans les zones à forte densité par rapport aux zones à plus faible densité. Les zones denses concentrent également une plus forte proportion d'appartements qui sont des logements compacts avec moins de murs donnant sur l'extérieur et ainsi moins de pertes thermiques potentielles : à surface égale, ces logements induisent en moyenne une plus faible demande énergétique que les maisons. Enfin, les températures plus élevées en hiver dans les zones plus denses contribuent également à réduire la facture énergétique des logements des ménages dont la commune de résidence présente une forte densité de population.

En parallèle de ces trois effets *négatifs*, l'effet de source d'énergie est *positif* également pour les densités de 0 à 800 habitants par km² : la répartition des parts de marché des sources énergétiques dans les zones à faible densité est en faveur du fioul et autre, incluant le bois principalement (FIGURE 21 en annexe), ce qui tend à induire des demandes d'énergie plus fortes que pour les ménages utilisant gaz et électricité. Ce résultat s'explique par une efficacité énergétique moyenne plus faible des équipements fioul et bois installés sur le parc de logements en 2006 par rapport aux équipements gaz

et électricité. L'effet de source d'énergie devient en revanche *positif* pour les densités supérieures à 800 habitants par km² : l'augmentation de la proportion de gaz avec la densité induit une augmentation de la demande énergétique. L'explication de ce phénomène s'explique entre autres par les prix relatifs du gaz et de l'électricité, en faveur du gaz en 2006 : l'utilisation par les ménages du gaz, moins cher que l'électricité sur la période considérée, induit des consommations énergétiques finales plus élevées que celle de l'électricité.

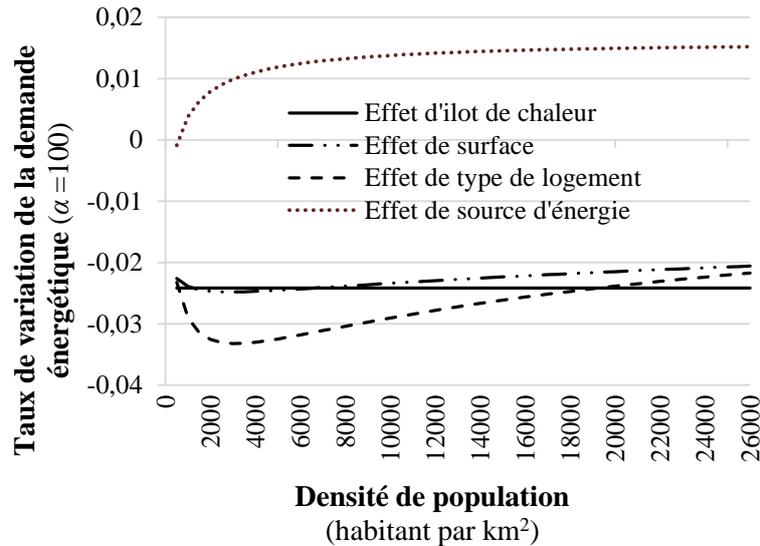
Pour comparer les mécanismes d'impact l'un à l'autre, on détermine les taux de variation de la demande énergétique pour chacun des quatre mécanismes. Ces taux de variation, fonction de la densité de population et de α , sont représentés sur la FIGURE 7.

FIGURE 7– Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d'impact



La FIGURE 7 révèle que les trois mécanismes de surface, typologie de logement et îlot de chaleur sont en moyenne du même ordre de grandeur : le taux de variation est de l'ordre de -2 % à -3 % pour une différence d'un facteur 2 de la densité. L'effet de source d'énergie est en revanche de l'ordre de -1 % à +1,5 % pour une même différence de densité, avec un changement de signe autour de 600-700 habitants par km² (en fonction des valeurs de α considérées). La FIGURE 8 représente une coupe verticale de la FIGURE 7 pour α égal à 100 %.

FIGURE 8 - Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d'impact pour α égal à 100 %



Si le taux de variation dû à l'effet d'îlot de chaleur est invariant avec la densité, la FIGURE 8 révèle que ceux de surface et typologie de logement présentent un minimum pour des densités respectivement de 2 850 et 3 100 habitants par km². C'est donc pour des densités de cet ordre de grandeur que l'impact de la densité sur la demande d'énergie à travers l'effet de surface et l'effet de typologie de logement est le plus important. Le taux de variation dû à l'effet de source d'énergie croît avec la densité, et s'annule pour la densité de 570 habitants par km².

Analyse de sensibilité

Afin d'explorer la sensibilité de ces applications numériques aux choix des caractéristiques du ménage type retenu, on effectue les calculs avec les caractéristiques minimum et maximum de la base de données afin de les comparer aux simulations effectuées avec les caractéristiques du ménage moyen en France. On définit un scénario E_n^- en retenant les caractéristiques extrêmes induisant la demande énergétique la plus faible ; ce scénario est appelé scénario *sobre*. De même, on définit un scénario E_n^+ en retenant les caractéristiques extrêmes induisant la demande énergétique la plus élevée : il s'agira du scénario *consommateur*. Le scénario *sobre* correspond entre autres aux ménages les plus pauvres et de petite taille alors que le scénario *consommateur* aux ménages riches et de grande taille. Le détail des modalités et valeurs retenues pour les deux scénarios extrêmes (E_n^- et E_n^+) est présenté dans le TABLEAU 27 en annexe sachant que les caractéristiques relatives à l'éducation et à la nationalité de la personne de référence du ménage ne sont pas modifiées, tout comme les valeurs des inobservables et termes d'erreur.³⁴ Les résultats des nouveaux calculs de simulation de la demande énergétique des logements des ménages sont présentés sur la FIGURE 9 pour le scénario *sobre* et sur la FIGURE 10 pour

³⁴ Les scénarios *sobre* et *consommateur* de ce chapitre ne correspondent pas à ceux du chapitre 2. Notamment le fait d'être âgé et la présence d'enfant, facteurs de moins grande consommation d'énergie pour les déplacements, caractérisent le scénario *sobre* du secteur des transports. Ces mêmes facteurs induisent une demande énergétique plus forte pour le logement, et caractérisent donc le scénario *consommateur* du secteur logement.

le scénario *consommateur*. Les taux de variations correspondants sont représentés FIGURE 11 et FIGURE 12 pour le scénario *sobre*, et FIGURE 13 et FIGURE 14 pour le scénario *consommateur*.

FIGURE 9 - Variations de la demande énergétique résidentielle avec la densité de population dans le cas du scénario *sobre*

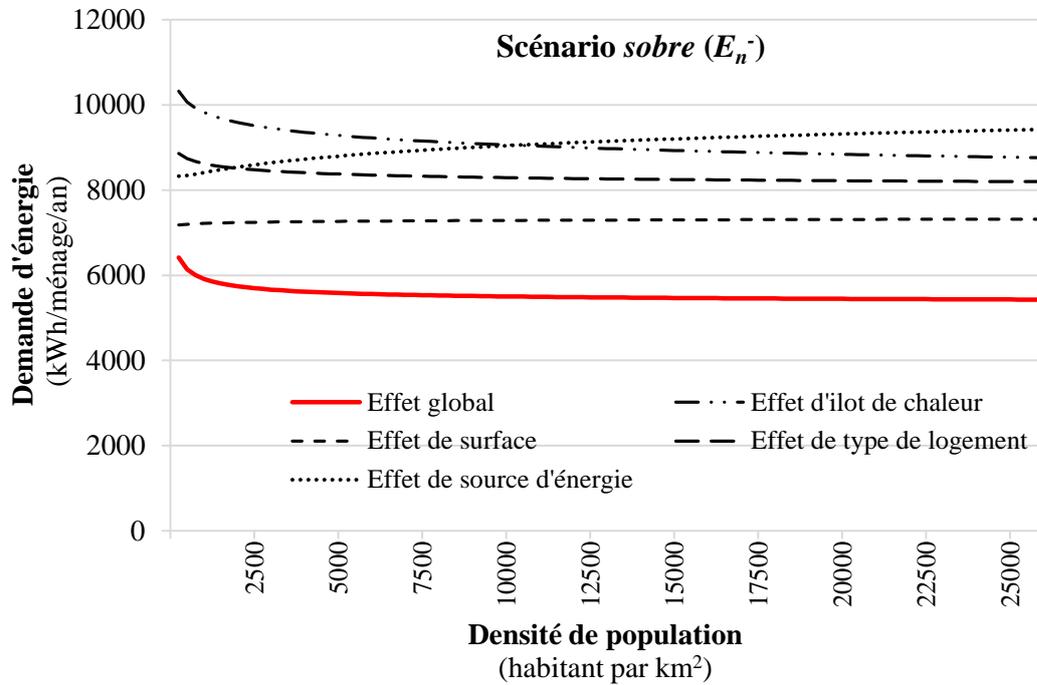


FIGURE 10 - Variations de la demande énergétique résidentielle avec la densité de population dans le cas du scénario *consommateur*

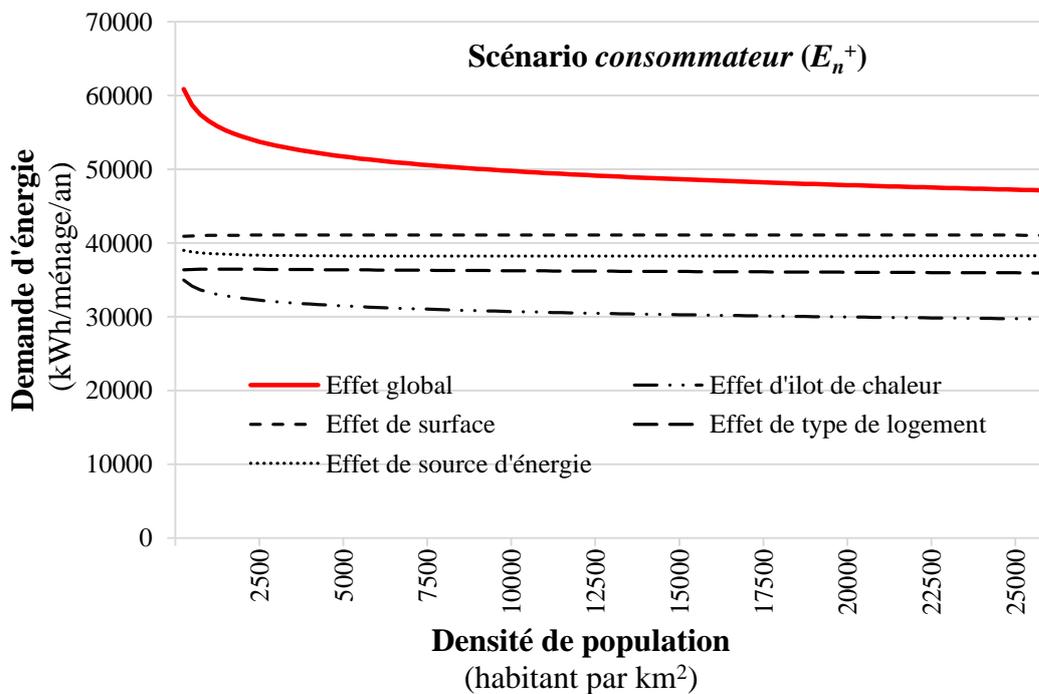


FIGURE 11 – Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % (Modèle à équations multiples, scénario *sobre*)

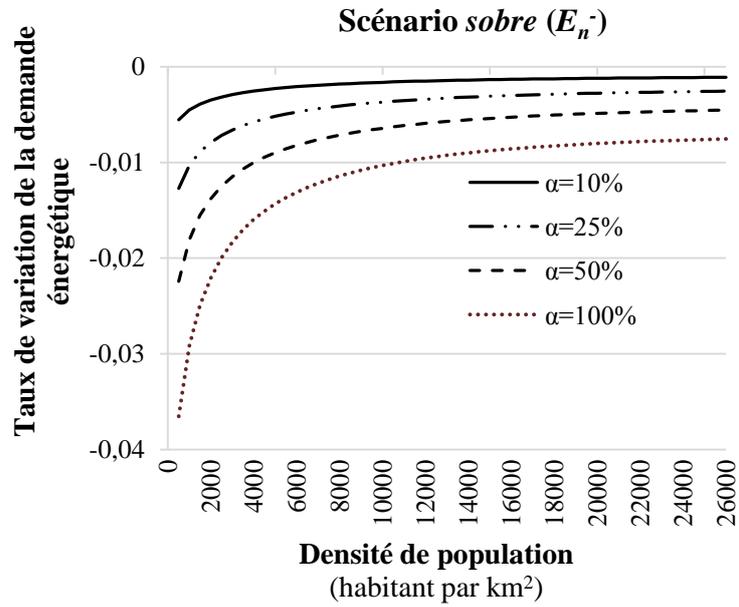


FIGURE 12 - Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d'impact (Modèle à équations multiples, scénario *sobre*)

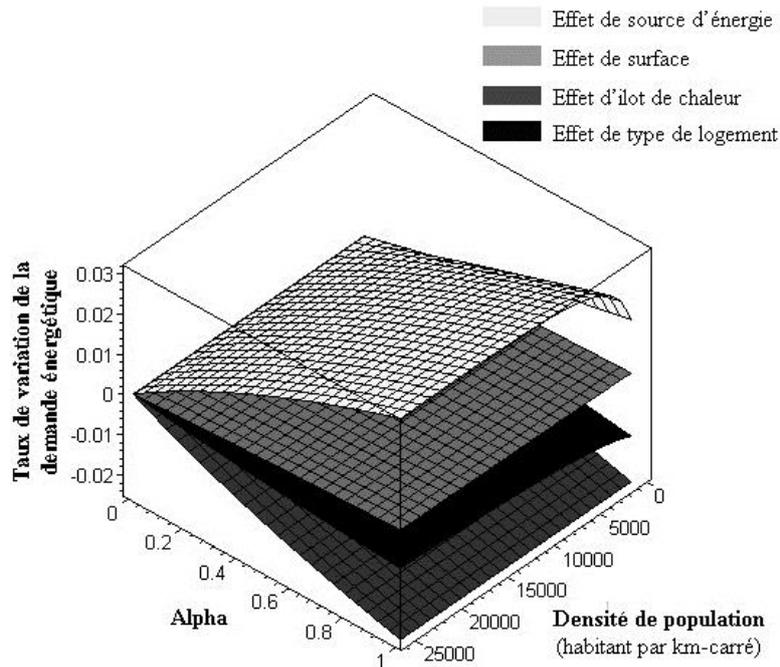


FIGURE 13 - Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % (Modèle à équations multiples, scénario *consommateur*)

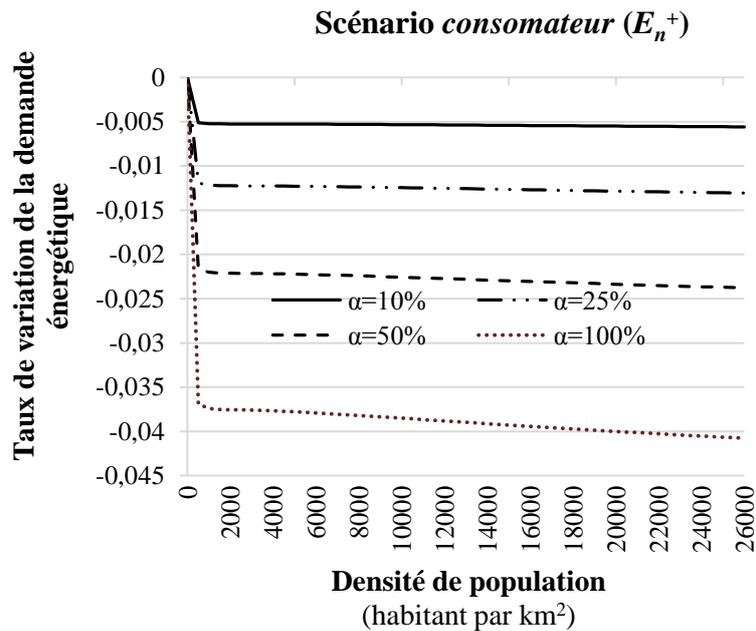
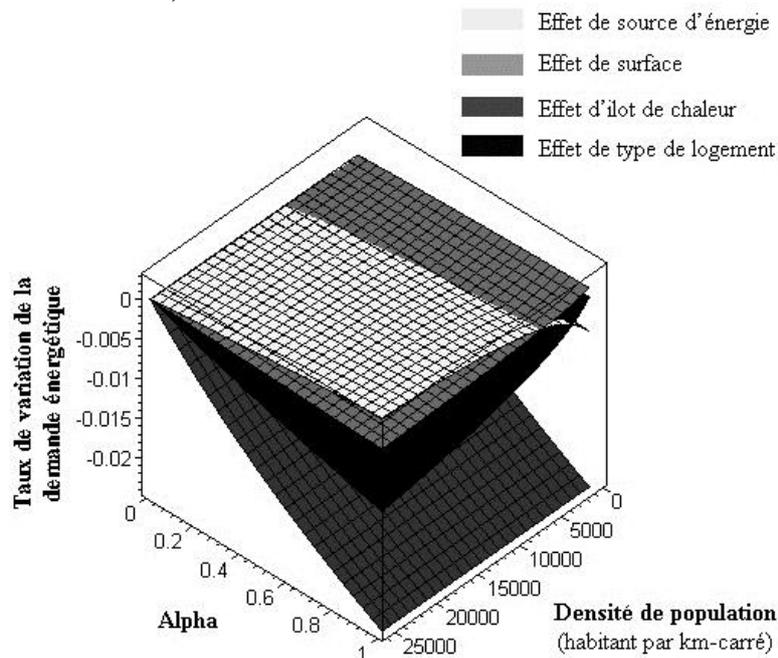


FIGURE 14 - Taux de variation de la demande énergétique par mécanisme d'impact (Modèle à équations multiples, scénario *consommateur*)



Les résultats de l'analyse de sensibilité présentée ci-dessus révèlent que la variation des caractéristiques socio-économiques des ménages ne modifient pas la significativité ni le sens de l'effet de la densité sur la demande énergétique des logements des ménages : on retrouve un effet *significatif* et *négatif* de la densité dans les deux scénarios extrêmes, comme l'illustrent les FIGURE 9 et FIGURE 10. En revanche, l'amplitude de l'impact de la densité et les variations de cet effet avec la densité évoluent. Ainsi, le taux de variation de la demande énergétique s'échelonne de 0 à -5,0 % et -4,1 %

respectivement pour les scénarios *sobre* et *consommateur* alors qu'il atteint -7,9 % dans le cas du ménage-type. Ainsi, l'organisation spatiale semble jouer un rôle plus réduit sur les consommations extrêmes que sur les consommations énergétiques moyennes. L'interprétation derrière est que dans le cas des ménages extrêmes, les caractéristiques socio-économiques telles que revenu ou taille prennent le pas sur la densité dans la détermination de la demande énergétique résidentielle. D'autre part, le taux de variation diminue en absolu avec la densité dans le cas du scénario *sobre* (FIGURE 11) et croît avec la densité dans le cas du scénario *consommateur* (FIGURE 13). On ne retrouve plus l'existence d'un optimum aux alentours de 2 500 habitants/km² comme c'était le cas avec les caractéristiques du ménage-type. Les choix de localisation ont ainsi d'autant plus d'importance sur les consommations d'énergie élevées que l'on considère des zones à fortes densités initiales. Enfin, la décomposition de l'interaction de l'organisation spatiale sur la demande énergétique est également sensible aux spécificités des ménages. Dans le scénario *sobre* représenté FIGURE 12, on retrouve un taux de variation relatif à l'îlot de chaleur *néгатif*, s'échelonnant de 0 à -2,4 %, plus important en termes d'amplitude que le taux de variation relatif au type de logement également *néгатif* de l'ordre de -1 % et que celui relatif à l'effet de surface avoisinant zéro. L'effet de source d'énergie reste majoritairement *positif* (pour une densité supérieure à 210) avec une amplitude plus élevée (+3,1 %) que dans le cas du ménage-type. En revanche, dans le cas du scénario *consommateur* illustré sur la FIGURE 14, les deux effets majeurs sont l'effet d'îlot de chaleur et l'effet de type de logement, tous deux *néгатifs*. Le premier s'échelonne de 0 à -2,4 % et le deuxième atteint -0,9 % pour les densités élevées. Les principaux résultats de cette analyse de sensibilité sont synthétisés dans le TABLEAU 10.

TABLEAU 10 - Principaux résultats de l'analyse de sensibilité aux caractéristiques des ménages de l'effet de la densité sur la demande énergétique des logements

	Ménage-type moyen	Scénario <i>sobre</i> (E_n^-)	Scénario <i>consommateur</i> (E_n^+)
Sens de variation de la demande énergétique E_n avec la densité	Décroissante	Décroissante	Décroissante
Sens de variation du taux de variation TV (en valeur absolue) avec la densité	Croissant de 0 à 2 500, optimum à 2 500 habitants/km ² , décroissant ensuite	Décroissant	Croissant
Intervalle du taux de variation (en valeur absolue)	[0 % ; 7,9 %]	[0 % ; 5 %]	[0 % ; 4,1 %]
Rôle relatif des différents mécanismes d'impact	Effets surface, type de logement et îlot de chaleur <i>négatifs</i> (de -2 à -3 %) ; effet source d'énergie <i>négatif</i> ($d < 700$) puis <i>positif</i> [-1 %, 1,5 %]	Effet surface quasi nul ; effets type de logement et îlot de chaleur <i>négatifs</i> , de 0 à -1% et -2,4 % ; effet source d'énergie <i>positif</i> (+3,1 %)	Effet surface quasi nul ; effet type de logement <i>positif</i> puis <i>négatif</i> (-0,9 %) ; effet îlot de chaleur <i>négatif</i> prépondérant (-2,4 %) ; effet source d'énergie <i>négatif</i> puis <i>positif</i> [-0,5 % ; 0,3 %]

L'analyse de sensibilité a permis de confirmer la conclusion d'un effet *significatif et négatif* de la densité de population sur demande énergétique associé aux logements des ménages, indépendamment des caractéristiques des ménages considérés. Ceci est un résultat majeur pour nourrir la réflexion sur les politiques spatiales comme actions complémentaires aux mesures énergétiques et climatiques prises à l'échelon national : l'organisation spatiale et l'aménagement du territoire représentent un levier potentiel non plus pour un seul mais pour deux secteurs clé Transport et Bâtiment dans le contexte de sécurité énergétique et changement climatique. En revanche, l'amplitude et les variations de l'effet de la densité sur la demande énergétique associée aux logements des ménages se révèlent sensibles aux caractéristiques de ces derniers.

En termes d'évaluation, on note un effet global de la densité sur la demande énergétique moins fort dans le cas des scénarios extrêmes que dans le cas du ménage-type : cette différence provient principalement des mécanismes de surface et de type de logement, pas toujours négatifs dans le cas des deux scénarios *sobre* et *consommateur*, et de plus faible amplitude. La raison derrière ce phénomène est le rôle prépondérant des variables de revenu et de taille du logement dans la décision de surface et de typologie de logement. Dans le cas des scénarios extrêmes, la densité n'a que très peu ou pas d'influence sur la taille du logement et son type ; l'effet de surface et l'effet de typologie de logement sont donc moins important que dans le cas du ménage-type et l'effet global de la densité sur la demande énergétique diminue donc. Les caractéristiques des ménages interviennent ainsi dans l'évaluation de l'effet de l'organisation spatiale sur la demande énergétique liée au logement, et ceci

est un élément clé à prendre en compte dans la conception et l'analyse d'impact d'une potentielle politique spatiale.

Cas des territoires ruraux versus territoires urbains

De manière complémentaire au travail présenté chapitre 2 dans le cadre du secteur des transports, on s'intéresse maintenant aux spécificités des territoires ruraux par rapport aux territoires urbains dans la formation de la demande énergétique associée aux logements des ménages. L'objectif de cette fin de chapitre est d'apporter un éclairage quantitatif sur les rôles respectifs des zones rurales et urbaines en France dans la perspective de réduction des consommations énergétiques des logements à travers une modification de l'organisation du territoire. Ce travail vise à affiner l'analyse de l'impact de la densité dans le contexte de sécurité énergétique et identifier les éventuelles régions à cibler dans le cadre d'une action politique.

Le modèle à équations multiples défini précédemment est ré-estimé sur deux sous-échantillons de la base de ménages : i) sur les 5 740 ménages ruraux d'un côté ; et ii) sur les 22 200 ménages urbains de l'autre.³⁵ Les FIGURE 15 et FIGURE 16 représentent les variations des demandes énergétiques avec la densité de population dans le cas respectivement des ménages ruraux et des ménages urbains.³⁶

³⁵ Les deux sous-échantillons sont construits à partir de l'information de l'appartenance ou non du ménage à une commune dite *rurale* selon la définition de l'INSEE, c'est-à-dire n'appartenant pas à une unité urbaine.

³⁶ La densité de population 2006 maximum dans les communes rurales française atteint 1 948 habitants/km² : l'intervalle de densité [0, 2 000] en habitants/km² est donc retenu pour étudier les résultats des estimations réalisées sur le sous-échantillon des ménages ruraux.

FIGURE 15 - Variations de la demande énergétique du logement avec la densité de population dans le cas des ménages ruraux

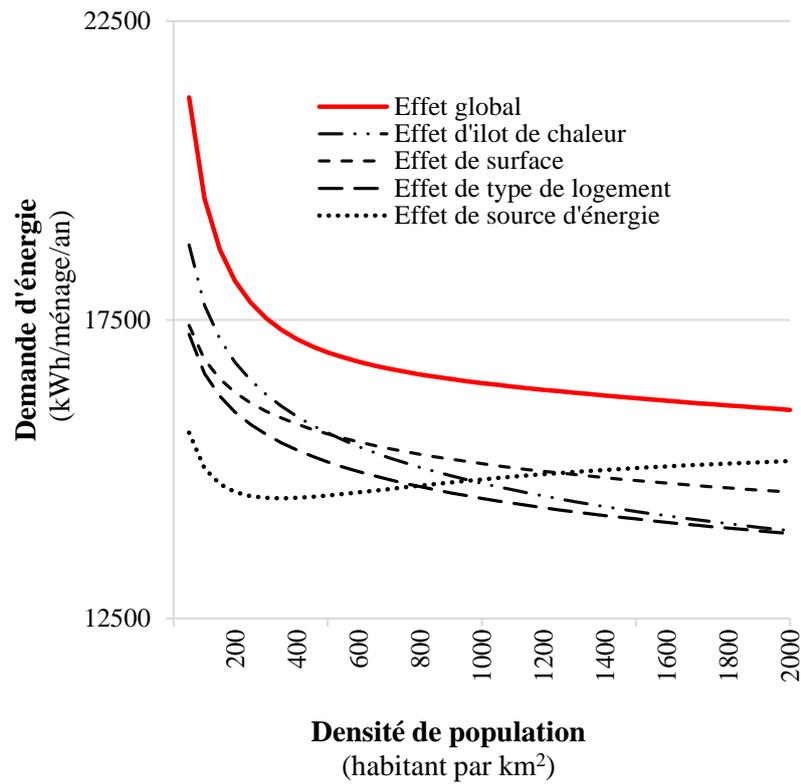
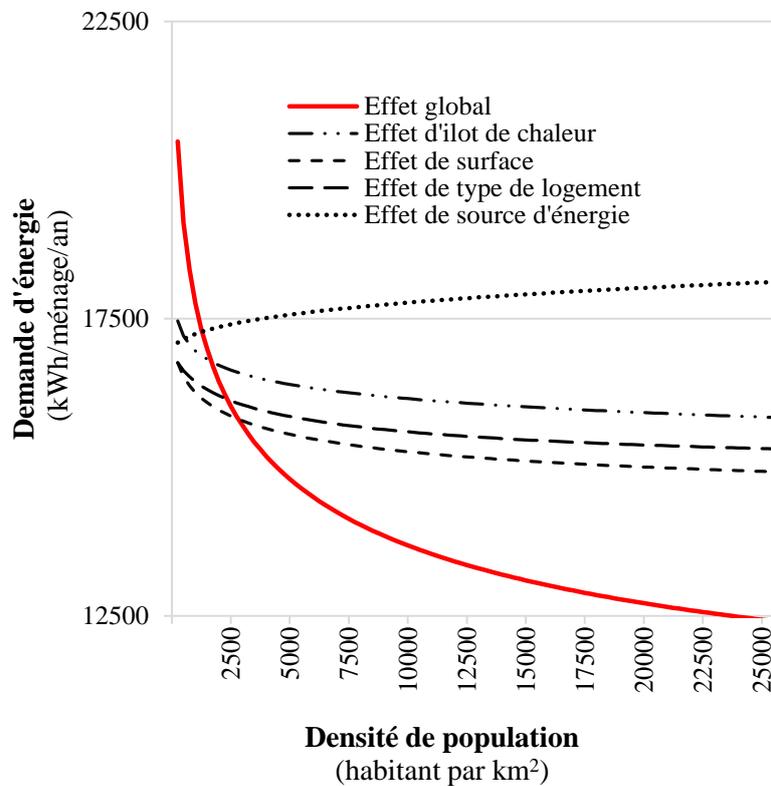


FIGURE 16 - Variations de la demande énergétique du logement avec la densité de population dans le cas des ménages urbains



Qu'il s'agisse des zones rurales (FIGURE 15) ou bien des zones urbaines (FIGURE 16), on retrouve un effet *significatif* et *néгатif* de la densité de population sur la demande énergétique des logements des ménages. Cet effet se décompose en trois effets *néгатifs* : l'effet de surface, l'effet de type de logement et l'effet d'îlot de chaleur. L'effet de source d'énergie quant à lui diffère en fonction de la zone considérée. Dans les cas des territoires ruraux, on observe un effet *néгатif* dû à une diminution progressive de l'utilisation du fioul et du bois avec la densité, effet qui devient ensuite *positif* avec l'augmentation de la proportion de gaz avec la densité. En revanche, fioul et bois étant très peu présents dans les zones urbaines, l'effet de source d'énergie est quant à lui uniquement *positif* sur l'ensemble des densités considérées. Les FIGURE 17 et FIGURE 18 représentent les taux de variation dans le cas respectivement des ménages ruraux et des ménages urbains.

FIGURE 17 - Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % dans le cas des ménages ruraux (Modèle à équations multiples)

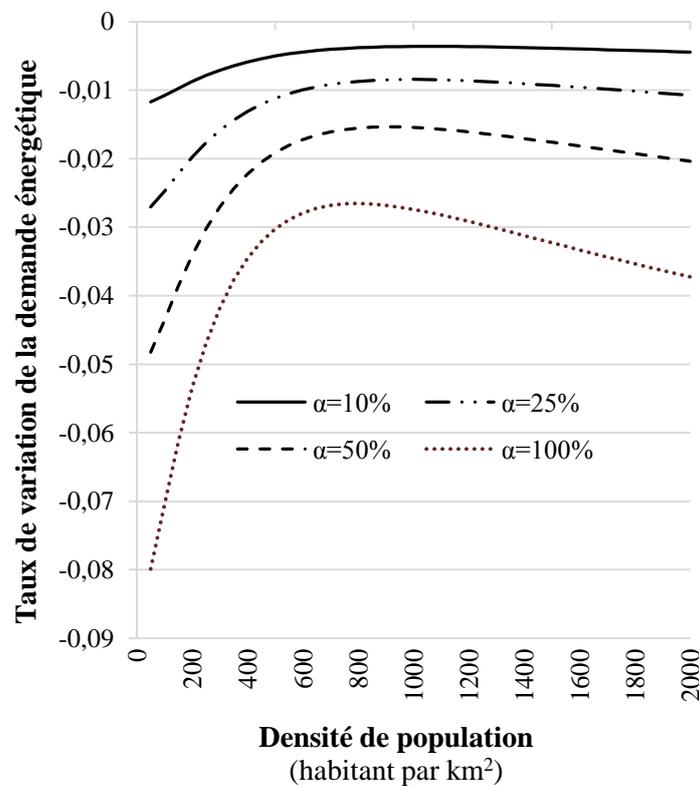
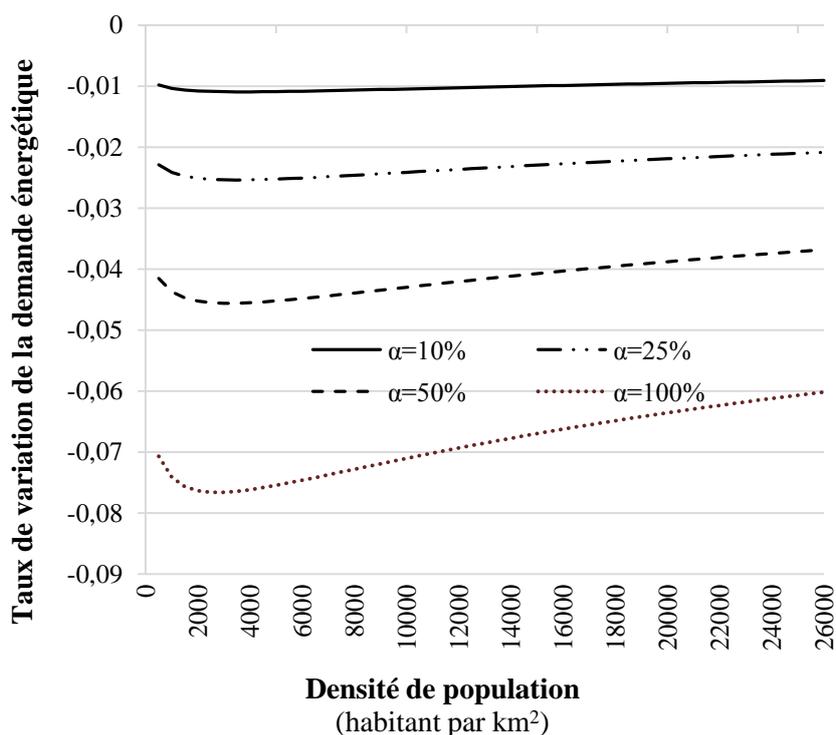


FIGURE 18 - Taux de variation de la demande énergétique comme une fonction de la densité pour α égal à 10 %, 25 %, 50 % et 100 % dans le cas des ménages urbains (Modèle à équations multiples)



Les taux de variation dans les zones rurales, représentés FIGURE 17 pour différentes valeurs de α , présentent un maximum pour les densités de l'ordre de 800-1 000 habitants par km² et s'échelonne de -2,7 % à -8,0 % pour α égal à 100. L'évolution des taux de variation dans les zones urbaines est en revanche inverse puisqu'on observe un minimum pour 2 500 – 3 500. Les taux de variation dans le cas des territoires vont de -6 % à -7,7 % pour α égal à 100.

A nouveau on retrouve un effet *significatif* et *néгатif* de la densité de population sur la demande énergétique du logement des ménages pour les deux territoires spécifiques étudiés, résultats de quatre mécanismes d'interaction de signes contraires. L'amplitude de l'effet global de l'organisation spatiale sur la consommation d'énergie diffère légèrement entre les deux zones considérées et la demande énergétique du secteur résidentiel des territoires urbains apparaît plus sensible aux choix de localisation des ménages.

IV. CONCLUSION

Afin d'éclairer le débat concernant le rôle de l'organisation spatiale du territoire sur la consommation énergétique résidentielle des ménages, ce chapitre a présenté une analyse de l'influence de la densité de population sur la demande énergétique à travers les choix liés au logement. D'un point de vue de politique publique, les résultats ont mis en évidence la contribution potentielle d'actions visant à intervenir sur la localisation des ménages (notamment à travers des mesures de planification) en termes d'effort de réduction des consommations d'énergie du secteur résidentiel.

L'influence de la densité sur la demande énergétique des logements des ménages a été étudiée à travers une analyse économétrique. La construction du modèle empirique a nécessité l'estimation de modèles continus par la méthode des Moindres Carrés et de modèles discrets à choix multiples. La question de l'endogénéité a été adressée dans les deux types de modèles par l'utilisation de variables instrumentales avec estimations en deux étapes (2SLS pour les modèles continus et 2SRI pour les modèles discrets). Le cadre d'analyse a été conçu afin de permettre la décomposition de l'effet de la densité sur la demande énergétique des ménages à travers leurs choix de surface, type et énergie principale du logement, ainsi qu'à travers le phénomène d'îlot de chaleur.

Nos résultats mettent en évidence le rôle *significatif* et *néгатif* de la densité dans la formation de la demande énergétique des logements des ménages. Cet effet global correspond au cumul de quatre mécanismes d'interaction : trois effets *néгатifs*, à savoir l'effet de surface, l'effet de type de logement et l'effet d'îlot de chaleur, et un effet mixte, l'effet de source d'énergie qui est *néгатif* pour les faibles densités et *positif* pour les densités plus élevées. Des simulations ont été réalisées à caractéristiques de ménages fixées afin de quantifier le potentiel des déterminants spatiaux dans l'effort de sécurité énergétique. Ces applications numériques révèlent que les quatre mécanismes d'impact sont globalement du même ordre de grandeur pour un ménage moyen. En termes de potentiel de réduction des consommations d'énergie dans le cas d'un ménage moyen en France, une différence d'un facteur 2 de la densité de population correspond à une différence de 6,4 % à 7,9 % de la demande énergétique, avec un optimum autour de 2 500 habitants par km². Cette évaluation est à mettre en regard avec la valeur correspondante de 12,4 % estimée dans le cas du secteur des transports. L'organisation spatiale et l'aménagement du territoire représentent un levier potentiel non plus pour un seul mais pour deux secteurs clé dans le contexte de sécurité énergétique et changement climatique, à savoir celui des transports et celui du bâtiment.

L'analyse de sensibilité de ces résultats, menée à travers une étude comparative de différents scénarios de simulation, révèle d'importantes implications politiques. L'amplitude de l'impact de la densité sur la demande énergétique s'avère sensible aux caractéristiques socio-économiques des ménages. Notamment, la densité n'intervient que très peu dans les choix de décision de surface et de type de logement pour les ménages aux revenus et taille extrêmes : l'effet global de la densité, réduit aux mécanismes d'îlot de chaleur et de source d'énergie, est alors réduit de l'ordre d'un facteur 2. Bien que moins forte que dans le cas du secteur des transports, cette sensibilité de l'effet de la densité est importante car elle révèle une hétérogénéité de l'impact sur les ménages de l'implémentation de politiques spatiales dans le cadre de la stratégie de sécurité nationale de sécurité énergétique. Or la demande énergétique résidentielle constituant un poste principal de consommation et donc de dépenses des ménages, cette hétérogénéité laisse entrevoir des enjeux d'équité. Ces éléments viennent s'ajouter au débat plus large de l'acceptation sociale et du bien-être individuel versus bien global dans lequel s'inscrivent de manière générale les politiques de planification du territoire.

Enfin, l'estimation du modèle construit sur les sous-échantillons rural et urbain a mis en évidence d'une part que l'effet *significatif* et *négalif* de la densité sur la formation de la demande résidentielle se retrouve dans les deux cas particuliers des zones rurale et urbaine, et d'autre part que la demande énergétique du secteur résidentiel des territoires urbains apparaît plus sensible aux choix de localisation des ménages.

Les chapitres 2 et 3 de cette thèse ont éclairé le lien entre espace et demande énergétique des ménages dans le cas de la France. L'évaluation du rôle de la densité de population dans la formation des consommations d'énergie liées aux transports et aux logements est effectuée sur des coupes transversales d'échantillons de la population. Au niveau désagrégé visé par notre étude, cette approche était la seule envisageable : en effet, étant donné l'inertie de l'organisation spatiale, une étude temporelle requerrait des séries sur plusieurs dizaines d'années, indisponibles en France à l'échelle du ménage. Une conséquence de ce choix méthodologique est l'absence des variations du prix de l'énergie comme déterminant de la demande puisque l'analyse considère un unique point dans le temps³⁷. Se pose alors la question du poids des prix de l'énergie par rapport à la dimension spatiale étudiée. De plus, l'évaluation présentée considère l'espace comme une variable exogène de l'économie. Dans le chapitre qui suit, on se propose de construire un cadre d'analyse prenant en compte ces deux aspects dans le cas particulier des transports : d'une part, l'espace n'est plus considéré comme une donnée mais comme une résultante de mécanismes économiques avec pour objectif de mettre en évidence son rôle dans la formation de la demande énergétique, et d'autre part la dépendance de la consommation d'énergie aux mécanismes de prix et notamment celui de l'énergie et celui des logements est analysée.

³⁷ Si les variations du prix de l'énergie ne sont pas incluses comme déterminant de la demande, l'effet des prix relatifs entre sources d'énergie est capté à travers l'effet sur la demande du choix de l'énergie utilisée.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, 2007. Les chiffres clés du bâtiment.
- Alberini, A., Gans, W., Velez-Lopez, D., 2011. Residential consumption of gas and electricity in the U.S.: The role of prices and income. *Energy Economics* 33, 870–881.
- Alonso, W., 1964. *Location and land use: Toward a general theory of land rent*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- ANAH, 2008. Modélisation des performances énergétiques du parc de logements – Etat du parc en 2008.
- Angrist, J.D., Krueger, A.B., 2001. Instrumental Variables and the Search for Identification: From Supply and Demand to Natural Experiments. *Journal of Economic Perspectives* 15, 69–85.
- Boarnet, M., Sarmiento, S., 1998. Can Land-use Policy Really Affect Travel Behaviour? A Study of the Link between Non-work Travel and Land-use Characteristics. *Urban Studies* 35, 1155 – 1169.
- CEREN & INRETS, 2006. Bilan CO2 des Ménages - Le cas de l'Île-de-France et de l'arrondissement de Lille.
- Chen, H., Jia, B., Lau, S.S.Y., 2008. Sustainable urban form for Chinese compact cities: Challenges of a rapid urbanized economy. *Habitat International* 32, 28–40.
- Ciccone, A., Hall, R.E., 1996. Productivity and the Density of Economic Activity. *The American Economic Review* 86, 54–70.
- Dodman, D., 2009. Blaming cities for climate change? An analysis of urban greenhouse gas emissions inventories. *Environment and Urbanization* 21, 185–201.
- Dubin, J.A., McFadden, D.L., 1984. An Econometric Analysis of Residential Electric Appliance Holdings and Consumption. *Econometrica* 52, 345–362.
- Ewing, R., Rong, F., 2008. The Impact of Urban Form on U.S. Residential Energy Use. *Housing Policy debate* 19.
- Frankel, J.A., Rose, A.K., 2005. Is Trade Good or Bad for the Environment? Sorting out the Causality. *Review of Economics & Statistics* 87, 85–91.
- Fujita, M., 1989. *Urban economic theory: land use and city size*. Cambridge University Press.
- Grazi, F., van den Bergh, J.C.J.M., van Ommeren, 2008. An Empirical Analysis of Urban Form, Transport and Global Warming. *The Energy Journal* 29, 97–122.
- Halvorsen, R., 1975. Residential Demand for Electric Energy. *The Review of Economics and Statistics* 57, 12–18.
- Hartman, R.S., Werth, A., 1981. Short-Run Residential Demand for Fuels: A Disaggregated Approach. *Land Economics* 57, 197–212.
- Hirano, Y., Fujita, T., 2012. Evaluation of the impact of the urban heat island on residential and commercial energy consumption in Tokyo. *Energy* 37, 371–383.
- Hirst, E., Goeltz, R., Carney, J., 1982. Residential energy use: Analysis of disaggregate data. *Energy Economics* 4, 74–82.
- Holden, E., Norland, I.T., 2005. Three Challenges for the Compact City as a Sustainable Urban Form: Household Consumption of Energy and Transport in Eight Residential Areas in the Greater Oslo Region. *Urban Stud* 42, 2145–2166.
- IEA, 2011. *Technology Roadmap - Energy-efficient Buildings: Heating and Cooling Equipments*.
- INSEE, 2006a. Taux d'équipement des ménages selon la zone d'étude et d'aménagement du territoire.

- INSEE, 2006b. Ménages par taille du ménage et catégorie socioprofessionnelle de la personne de référence.
- Kaza, N., 2010. Understanding the spectrum of residential energy consumption: A quantile regression approach. *Energy Policy* 38, 6574–6585.
- Lariviere, I., Lafrance, G., 1999. Modelling the electricity consumption of cities: effect of urban density. *Energy Economics* 21, 53–66.
- Madlener, R., Sunak, Y., 2011. Impacts of urbanization on urban structures and energy demand: What can we learn for urban energy planning and urbanization management? *Sustainable Cities and Society* 1, 45–53.
- MEDDTL, 2006a. Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles bâtiments. *Journal de la République Française du 25 Mai 2006*.
- MEDDTL, 2006b. Arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine. *Journal de la République Française du 28 septembre 2006*, texte 10.
- MEDDTL, 2010. Base de données Pégase.
- Oke, T.R., Johnson, G.T., Steyn, D.G., Watson, I.D., 1991. Simulation of surface urban heat islands under ideal conditions at night part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology* 56, 339–358.
- Pachauri, S., Jiang, L., 2008. The household energy transition in India and China. *Energy Policy* 36, 4022–4035.
- Parikh, J., Shukla, V., 1995. Urbanization, energy use and greenhouse effects in economic development: Results from a cross-national study of developing countries. *Global Environmental Change* 5, 87–103.
- Poumanyong, P., Kaneko, S., 2010. Does urbanization lead to less energy use and lower CO2 emissions? A cross-country analysis. *Ecological Economics* 70, 434–444.
- Reiss, P.C., White, M.W., 2005. Household Electricity Demand, Revisited. *The Review of Economic Studies* 72, 853–883.
- Risch, A., Salmon, C., 2010. French residential energy demand: Micro-econometric analysis of household multi-fuel energy consumption. *University of Savoie Working Paper*.
- Rizwan, A.M., Dennis, L.Y.C., Liu, C., 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences* 20, 120–128.
- RTE, 2009. *Statistique de l’Energie Electrique en France, 2008*.
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., Assimakopoulos, D., 2001. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy* 70, 201–216.
- Sidler, O., 2006. Les enjeux de la consommation énergétique dans le bâtiment. Presented at the Rendez-vous du CSTB: vers des bâtiments à énergie positive.
- Stemmers, K., 2003. Energy and the city: density, buildings and transport. *Energy and Buildings* 35, 3–14.
- Stock, J.H., Wright, J.H., Yogo, M., 2002. A Survey of Weak Instruments and Weak Identification in Generalized Method of Moments. *American Statistical Association Journal of Business & Economic Statistics* 20, 518–529.
- Stock, J.H., Yogo, M., 2001. Testing for Weak Instruments in Linear IV Regression.
- Stromann-Andersen, J., 2011. The urban canyon and building energy use: Urban density versus

- daylight and passive solar gains. *Energy & Buildings* 43, 2011–2020.
- Terza, J.V., Basu, A., Rathouz, P.J., 2008. Two-Stage Residual Inclusion Estimation: Addressing Endogeneity in Health Econometric Modeling. *J Health Econ* 27, 531–543.
- Train, K., 2003. *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge University Press.
- Wilson, A., Boehland, J., 2005. Small is Beautiful U.S. House Size, Resource Use, and the Environment. *Journal of Industrial Ecology* 9, 277–287.
- Wong, N.H., Jusuf, S.K., Syafii, N.I., Chen, Y., Hajadi, N., Sathyanarayanan, H., Manickavasagam, Y.V., 2011. Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption. *Solar Energy* 85, 57–71.
- Wooldridge, J.M., 2002. *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*. MIT Press.
- Yang, F., Lau, S.S.Y., Qian, F., 2010. Summertime heat island intensities in three high-rise housing quarters in inner-city Shanghai China: Building layout, density and greenery. *Building and Environment* 45, 115–134.

ANNEXES

a. Méthodologie de construction de la variable de demande énergétique résidentielle dans l'Enquête Nationale Logement 2006 de l'INSEE

Les données utilisées dans cette étude proviennent de l'Enquête Nationale Logement (ENL) 2006 réalisée par l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE). Pour assurer une homogénéité des caractéristiques économiques et énergétiques des ménages observés, l'analyse se restreint au territoire français métropolitain, excluant les départements et territoires d'Outre-Mer.³⁸ Le travail se concentre sur les ménages payant leurs factures énergétiques directement auprès du fournisseur d'énergie et non par l'intermédiaire de charges de copropriété. Cette approche nous permet de disposer d'une base de données conséquente de 27 940 ménages.

1) Calcul de la demande énergétique finale

A partir des factures énergétiques annuelles des ménages fournies par l'ENL, l'objectif est de construire la demande énergétique annuelle du ménage en kWh et les émissions de Gaz à Effet de Serre associées. Pour cela, les prix de l'énergie observés sur les 12 mois précédents la réalisation de l'enquête sont nécessaires. Or l'enquête s'étant étalée de mars 2006 à décembre 2006, les prix de l'énergie sont donc collectés et moyennés pour la période allant de février 2005 à novembre 2006 à partir de la base de données Pégase du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL, 2010).

Les consommations de fuel, gaz de pétrole liquéfié, charbon et bois sont obtenues linéairement à partir des factures et des prix moyens. En revanche, les structures de tarification de l'électricité et du gaz impliquent un choix de tarification du ménage en fonction de la quantité d'énergie qu'ils consomment puisqu'elles comprennent : i) un prix forfaitaire d'abonnement annuel en fonction de la capacité requise (en kW pour l'électricité et kWh pour le gaz) ; et ii) un prix marginal pour l'énergie effectivement consommée. Electricité et gaz ont donc nécessité un traitement particulier pour l'obtention des consommations d'énergie en kWh à partir des factures en euros fournies par l'ENL 2006. La tarification de l'électricité propose 5 options de tarifs et celle du gaz 4. Etant donné que l'enquête ne fournit pas d'information sur les choix tarifaires des ménages, nous avons construit deux variables représentant le choix de tarif électricité et gaz du ménage, afin de pouvoir convertir les factures du ménage en consommation physique.

Electricité

Les options tarifaires diffèrent en fonction de la capacité de puissance requise et proposent deux prix marginaux : soit un tarif unique valable 24 heures, soit un double tarif comprenant un tarif élevé

³⁸ Outre l'homogénéité des caractéristiques socio-économiques, la raison de cette restriction réside dans la différence substantielle de climat entre territoires métropolitain et d'Outre Mer, modifiant les besoins de chauffage et induisant ainsi des différences dans la formation des demandes énergétiques résidentielles.

durant les heures de forte demande dites *heures pleines* et un tarif faible pendant les heures de faible demande dites *heures creuses*. Les différentes options tarifaires sont détaillées dans le TABLEAU 11.

TABLEAU 11 – Détail des options tarifaires électriques moyennées sur la période février 2005 – novembre 2006 (MEDDTL, 2010)

Capacité de puissance	Abonnement (€ par an)	Prix marginal (c€ par kWh)	
<i>Tarification marginal simple</i>			
3kWh	23.87	12.94	
6kWh	60.80	10.60	
<i>Tarification marginal double</i>			
		<i>Heures creuses</i>	<i>Heures pleines</i>
6 kWh	105.33		
9 kWh	189.15	6.46	10.60
12 kWh	272.96		

Nous reposons sur l'hypothèse que le choix tarifaire des ménages est rationnel et effectué de manière à maximiser leur utilité. L'option tarifaire maximisant l'utilité du ménage est déterminée en fonction de ses besoins électriques dépendant de la taille et du type de son logement, et des caractéristiques de ses équipements comme détaillé dans le TABLEAU 12.

TABLEAU 12 – Options tarifaires optimales selon les recommandations d'EDF, fournisseur français d'électricité

		Caractéristiques du logement du ménage	Option tarifaire optimale
Chauffage électrique	Appartement	Surface inférieure à 70m ²	6 kWh double tarification
		Surface supérieure à 70m ²	9 kWh double tarification
	Maison	Surface inférieure à 100m ²	9 kWh double tarification
		Surface supérieure 100m ²	12 kWh double tarification
Pas de chauffage électrique	Chauffe-eau électrique	Moins de 3 appareils électroménagers ³⁹	6 kWh unique tarification
		3 ou + appareils électroménagers	9 kWh double tarification
	Pas de chauffe-eau électrique	Moins de 3 appareils électroménagers	6 kWh unique tarification
		3 ou + appareils électroménagers	6 kWh unique tarification

L'ENL 2006 fournit les informations relatives à la typologie et la surface du logement ainsi qu'aux caractéristiques des équipements de chauffage et de chauffe-eau, mais pas sur l'équipement électroménagers des ménages. Nous avons donc construit une variable binaire *3 ou + appareils électroménagers* qui prend la valeur 1 lorsque le ménage possède effectivement au moins 3 appareils électroménagers et 0 sinon.⁴⁰ Pour la construction de cette variable, nous utilisons la proportion de ménages français possédant au moins trois appareils électroménagers. Cette part est déterminée à partir des informations relatives à l'équipement des ménages détaillé dans le TABLEAU 13 et en faisant l'hypothèse que les ménages propriétaires d'un appareil à faible taux d'équipement possèdent également les appareils à taux d'équipement supérieurs (INSEE, 2006a).

³⁹ "Appareils électro-ménagers" inclut réfrigérateur, machine à laver, congélateur indépendant, lave-vaisselle et sèche-linge.

⁴⁰ A noter que cette variable n'est nécessaire que pour les ménages n'utilisant pas de chauffage électrique.

TABLEAU 13– Taux d'équipement en appareils électroménagers des ménages français en 2006

Appareils électroménagers	Taux d'équipement
Réfrigérateur	97,5 %
Machine à laver	91,0 %
Congélateur	53,8 %
Lave-vaisselle	44,8 %
Sèche-linge	28,7 %
<i>3 ou + appareils électroménagers</i>	<i>53,8 %</i>

Source : (INSEE, 2006a) ; calculs de l'auteur.

Selon le TABLEAU 13 et notre hypothèse, 53,8 % de la population en 2006 possédait au moins 3 appareils électroménagers en 2006. Parmi les ménages n'utilisant pas le chauffage électrique, on considère alors deux classes : i) les ménages ayant un chauffe-eau électrique et les autres. L'hypothèse du taux national d'équipement est étendu à chacune des deux classes et on fait la supposition que les plus gros consommateurs d'électricité de chaque classe correspondent aux ménages possédant le plus d'appareils électroménagers. La valeur 1 est alors attribuée à la variable binaire *3 ou + appareils électroménagers* aux 53,8 % des ménages de chaque classe présentant les plus fortes factures électriques, et la valeur 0 est attribuée aux ménages restants. La détermination de cette variable binaire permet d'identifier l'option tarifaire électrique retenue par chaque ménage.

La demande énergétique des ménages ayant retenu une tarification marginale simple se détermine directement à partir du tarif d'abonnement, du prix marginal et de la facture annuelle. En revanche, dans le cas d'une double tarification marginale, il est nécessaire de déterminer le prix marginal observé c'est-à-dire le prix marginal payé sur l'année qui dépend des parts d'heures pleines et d'heures creuses pendant lesquelles le ménage a consommé de l'électricité. Etant donné que ces parts sont liées à l'usage de l'électricité, nous décomposons la facture électrique par usage final en fonction de la décomposition fournie par l'ADEME.⁴¹ Nous calculons ensuite pour chaque usage final le prix marginal observé en fonction des parts heures pleines / heures creuses données dans le TABLEAU 14. Ceci permet, après calcul de la consommation énergétique en kWh pour chaque usage et agrégation des différents usages, de déterminer la demande électrique totale annuelle du ménage.

TABLEAU 14 – Hypothèses de part d'utilisation heures pleines et heures creuses en fonction des usages électriques

	Part d'utilisation heures creuses	Part d'utilisation heures pleines
Chauffage	0,4	0,6
Eau chaude	1	0
Cuisson	0	1
Electricité spécifique	0	1

Sources : (MEDDTL, 2006b) ; hypothèses de l'auteur.

Afin de tester la robustesse de nos résultats, nous les comparons à la valeur moyenne de la demande électrique par ménage calculée à partir de la demande électrique nationale des ménages en

⁴¹La demande énergétique résidentielle des ménages en 2006 avait pour finalité le chauffage à 65 %, l'eau chaude à 12,3 %, la cuisson à 6,5 % et l'électricité spécifique à 16,2 % (ADEME, 2007).

2006.⁴² La moyenne observée sur les 27 940 observations valides de l'ENL 2006 est de 5 922 kWh/ménage/an alors qu'un calcul *top-down* pour la même année conduit à un résultat de 5 650 kWh/ménage/an. La similarité des résultats nous permet de conclure à la robustesse de notre méthode de construction et de nos estimations de la demande électrique des ménages dans l'ENL 2006.

Gaz

Quatre options de tarification du gaz sont disponibles. Les tarifs dépendent de la quantité totale annuelle consommée, et sont détaillés dans le TABLEAU 15.

TABLEAU 15 - Détail des options tarifaires de gaz moyennées sur la période février 2005 – novembre 2006 (MEDDTL, 2010)

	Quantité annuelle consommée	Abonnement (€ par an)	Prix marginal (c€ par kWh)
1	0 à 1 000 kWh	25.32	6.74
2	1 000 à 7 000 kWh	35.95	5.53
3	7 000 à 30 000 kWh	125.21	3.85
4	Supérieure à 30 000 kWh	187.62	3.69

En fonction du montant des factures de gaz des ménages, soit la facture ne peut correspondre qu'à une unique option de tarification, soit elle peut correspondre à deux options tarifaires.⁴³ Dans le premier cas, l'option de tarification et la demande énergétique correspondante se déduisent immédiatement du montant de la facture de gaz. Mais environ 2 % des ménages de la base de données sont dans le deuxième cas à savoir que leur facture de gaz peut provenir de deux options tarifaires différentes : on leur attribue aléatoirement une ou l'autre des options tarifaires selon une distribution de Bernoulli.⁴⁴ Cette attribution permet de finaliser la construction de la variable renseignant sur l'option de tarification de gaz des ménages et donc d'identifier pour l'ensemble des ménages de la base de données les consommations annuelles de gaz.

La demande d'énergie finale annuelle totale par ménage est ensuite obtenue en sommant l'ensemble des consommations annuelles des ménages des différentes sources d'énergie.⁴⁵

⁴²La demande d'électricité finale en France métropolitaine en 2006 fut de 144 441 GWh pour un nombre de 26 069 046 ménages (INSEE, 2006b ; RTE, 2009).

⁴³Par exemple, une facture annuelle de 400 € peut soit correspondre à une consommation annuelle de 6 583 kWh en utilisant la deuxième option de tarification, soit à une consommation annuelle de 7 137 kWh en utilisant la troisième option tarifaire, alors qu'une facture de 350 € ne peut être obtenue qu'avec la tarification 2 et correspond à une consommation annuelle de 5 679 kWh.

⁴⁴Considérant les deux options tarifaires a et b se chevauchant, on appelle card(a) (respectivement card(b)) le nombre d'observations pour lesquelles la tarification a (respectivement b) est attribuée immédiatement. Le paramètre de Bernoulli, c'est-à-dire la probabilité pour le ménage de bénéficier de la tarification a, est alors $\text{card}(a)/(\text{card}(a)+\text{card}(b))$.

⁴⁵ La différence entre énergie primaire et énergie finale se compose des pertes énergétiques due à l'inefficacité des systèmes de production et des réseaux de transmission et de distribution énergétiques.

2) Demande d'énergie primaire et émissions de CO₂ associées

L'énergie primaire prend en compte les pertes dues aux inefficacités des systèmes de production, de transmission et de distribution énergétiques. En ce qui concerne l'électricité en France, ces pertes sont estimées à 1,58 fois la demande d'énergie finale alors qu'elles sont négligeables pour les autres sources d'énergie. Pour les émissions de CO₂ associées à la demande énergétique résidentielle, elles sont déterminées à partir des consommations énergétiques finales et de facteurs de conversion (détaillés dans le TABLEAU 16) prenant en compte l'ensemble du cycle de vie.

TABLEAU 16 – Facteurs de conversion des émissions de CO₂ par source d'énergie pour la demande énergétique résidentielle finale (MEDDTL, 2006b)

	Tout usage (kg CO ₂ /kWh)
Bois, biomasse	0,013
Gaz naturel	0,234
Fuel	0,300
Charbon	0,384
Gaz propane et butane	0,274
Electricité renouvelable utilisée dans les bâtiments ⁴⁶	0
Electricité (excepté renouvelable)	0,084

b. Traitement de l'endogénéité de la densité dans les modèles de classe de surface et de typologie de logement

Modèle de classe de surface

Le TABLEAU 17 présente les résultats de la régression de la densité de population sur les variables exogènes du modèle de classe de surface. Le terme d'erreur de cette régression permet de construire la variable $Inob_{dens}^S$ qui représente la variabilité non observable de la densité et est incluse comme variable explicative du modèle de classe de surface afin d'assurer que le coefficient relatif à la densité ne soit pas biaisé par une endogénéité potentielle.

TABLEAU 17 - Régression de la densité sur les variables explicatives du modèle de classe de surface

Densité de population (log. ^a)	Coef.	Err. Typ.	p-value
Age de la personne de référence			
< 30 ans	Réf.		
de 30 à 39 ans	-0,017	0,013	0,166
de 40 à 49	0,036***	0,013	0,004
de 50 à 64	0,031***	0,012	0,010
> 65 ans	0,004	0,013	0,784
Revenu du ménage (log. ^a)	0,075***	0,005	<0.001
Nombre d'unité de consommation (log. ^a)	-0,066***	0,014	<0.001
Niveau d'éducation de la personne de référence			
Aucun diplôme	Réf.		
Certificat d'études primaires (CEP)	0,016	0,012	0,193
Brevet d'études du 1er cycle (BEPC) ou BE, ou brevet des collèges	0,091***	0,014	<0.001
CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau	0,044***	0,010	<0.001

⁴⁶Hydraulique, éolien et solaire sont les principales sources d'électricité renouvelable.

<i>Baccalauréat professionnel</i>	0,068***	0,018	<0.001
<i>Baccalauréat technique ou technologique</i>	0,091***	0,019	<0.001
<i>Baccalauréat général</i>	0,162***	0,014	<0.001
<i>Niveau Bac+2</i>	0,143***	0,013	<0.001
<i>Niveau supérieur à Bac+2</i>	0,175***	0,012	<0.001
Nationalité de la personne de référence			
<i>Français de naissance, y compris par réintégration</i>	Réf.		
<i>Français par naturalisation, mariage, déclaration ou option à sa majorité</i>	0,147***	0,014	<0.001
<i>De nationalité de l'Union européenne des 15 (hors France)</i>	0,095***	0,022	<0.001
<i>De nationalité des pays entrés en 2004 dans l'Union européenne</i>	0,128	0,100	0,203
<i>De nationalité algérienne, marocaine ou tunisienne</i>	0,129***	0,019	<0.001
<i>De nationalité d'Afrique (hors Maghreb)</i>	0,190***	0,025	<0.001
<i>De nationalités autres ou apatride</i>	0,134***	0,024	<0.001
Présence d'enfant	0,032***	0,010	0,001
Densité de population en 1968 (log. ^a)	0,867***	0,002	<0.001
Densité d'emploi en 1968 (log. ^a)	-0,005***	0,002	0,006
Constante	0,524***	0,046	<0.001
Nombre d'observations	N=27 289		
	F(23,27 265)=15 043,13		
	Prob.>F=0		
R-carré	0,9269		

^alog. : Forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 %, 1 %.

Modèle de typologie de logement

Le TABLEAU 18 présente les résultats de la régression de la densité de population sur les variables explicatives du modèle de type de logement. Le terme d'erreur de cette régression permet de construire la variable $Inob_{dens}^{TL}$ qui représente la variabilité non observable de la densité et est incluse comme variable explicative du modèle de type de logement afin d'assurer que le coefficient relatif à la densité ne soit pas biaisé par une endogénéité potentielle.

TABLEAU 18 – Régression de la densité sur les variables explicatives du modèle du type de logement et ses instruments

Densité de population (log. ^a)	Coef.	Err. Typ.	p-value
Age de la personne de référence			
< 30 ans	Réf.		
de 30 à 39 ans	0.447***	0.012	<0.001
de 40 à 49	0.803***	0.014	<0.001
de 50 à 64	1.305***	0.018	<0.001
> 65 ans	1.502***	0.021	<0.001
Revenu du ménage (log. ^a)	0.472***	0.006	<0.001
Nombre d'unité de consommation (log. ^a)	1.317***	0.020	<0.001
Niveau d'éducation de la personne de référence			
Aucun diplôme	Réf.		
Certificat d'études primaires (CEP)	0.113***	0.011	<0.001
Brevet d'études du 1er cycle (BEPC) ou BE, ou brevet des collèges	0.381***	0.013	<0.001
CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau	0.273***	0.009	<0.001
Baccalauréat professionnel	0.475***	0.016	<0.001
Baccalauréat technique ou technologique	0.467***	0.017	<0.001
Baccalauréat général	0.666***	0.014	<0.001

<i>Niveau Bac+2</i>	0.654***	0.013	<0.001
<i>Niveau supérieur à Bac+2</i>	0.864***	0.014	<0.001
Nationalité de la personne de référence			
<i>Français de nais.</i>	Réf.		
<i>Français autre</i>	-0.080***	0.013	<0.001
<i>UE des 15</i>	0.123***	0.019	<0.001
<i>UE entrés 2004</i>	-0.643***	0.088	<0.001
<i>Alg., maroc. tunis.</i>	-0.584***	0.019	<0.001
<i>Afrique</i>	-0.693***	0.026	<0.001
<i>Autre</i>	-0.445***	0.023	<0.001
Présence d'enfant	0.215***	0.009	<0.001
Densité de population en 1968 (log. ^a)	0.636***	0.003	<0.001
Densité d'emploi en 1968 (log. ^a)	-0.006***	0.002	<0.001
Prédiction de la classe 2 de surface	-1.987***	0.050	<0.001
Prédiction de la classe 3 de surface	-2.594***	0.050	<0.001
Prédiction de la classe 4 de surface	-4.893***	0.065	<0.001
Constante	-4.887***	0.072	<0.001
Nombre d'observations	N=27 289 F(26,27 262)=17 651,06 Prob.>F=0 0,9439		
R-carré	0,9439		

^alog. : *Forme logarithmique.*

*, **, *** : *Significatif à respectivement 10 %, 5 %, 1 %.*

c. Traitement de l'endogénéité de la variable de classe de surface dans le modèle de type de logement

Le TABLEAU 19 présente les résultats de l'estimation réalisée pour la construction des variables instrumentales de la classe de surface du logement des ménages.

TABLEAU 19 – Estimation des classes de surface du logement en fonction des variables explicatives du modèle de type de logement

Classe de surface (Réf. : Classe 2)	Classe 1		Classe 3		Classe 4	
	Coef.	Err. T.	Coef.	Err. T.	Coef.	Err. T.
Age de la P.R.						
<i>< 30 ans</i>	Réf.		Réf.		Réf.	
<i>de 30 à 39 ans</i>	-0,586***	0,072	0,646***	0,092	0,916***	0,126
<i>de 40 à 49</i>	-1,031***	0,074	0,855***	0,091	1,393***	0,125
<i>de 50 à 64</i>	-1,782***	0,074	1,225***	0,091	2,043***	0,125
<i>>65 ans</i>	-2,071***	0,079	1,302***	0,096	2,392***	0,130
Revenu (log. ^a)	-0,386***	0,030	0,480***	0,032	1,027***	0,040
Nb UC (log. ^a)	-2,348***	0,092	1,048***	0,080	1,654***	0,095
Education P.R. personne de référence						
<i>Aucun diplôme</i>	Réf.		Réf.		Réf.	
<i>CEP</i>	-0,205***	0,072	0,045	0,066	0,193**	0,085
<i>BEPC, BE</i>	-0,150*	0,089	0,393***	0,081	0,754***	0,098
<i>CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau</i>	-0,236***	0,062	0,268***	0,056	0,527***	0,071
<i>Bac. Prof.</i>	-0,409***	0,116	0,454***	0,103	0,867***	0,123
<i>Bac. Tech. technologique</i>	-0,208*	0,124	0,434***	0,110	0,917***	0,127
<i>Bac. Gén.</i>	-0,206**	0,091	0,505***	0,085	1,195***	0,099
<i>Niveau Bac+2</i>	-0,219***	0,084	0,515***	0,077	1,262***	0,090
<i>> Bac+2</i>	-0,168**	0,078	0,629***	0,074	1,707***	0,085
Nationalité P.R. personne de référence						
<i>Français de nais.</i>	Réf.		Réf.		Réf.	
<i>Français autre</i>	0,306***	0,086	-0,087	0,082	-0,189*	0,099
<i>UE des 15</i>	0,349**	0,142	0,199	0,128	0,448***	0,143
<i>UE entrés 2004</i>	1,136**	0,545	-1,146	1,112	-0,733	1,162

<i>Alg., maroc. tunis.</i>	1,535***	0,111	-0,321**	0,148	-0,480**	0,208
<i>Afrique</i>	2,030***	0,177	-1,099***	0,376	-1,027**	0,513
<i>Autre</i>	1,501***	0,151	0,092	0,203	0,396	0,249
Présence d'enfant	-0,318***	0,064	0,049	0,057	0,183***	0,065
Densité de pop. (log. ^a)	0,368***	0,013	-0,238***	0,011	-0,433***	0,012
Constante	8,568***	0,303	-7,659***	0,314	-15,437***	0,407
<i>Nombre d'obs.</i>	27 289					
<i>Log-likelihood d'observations</i>	-29 304,77					
<i>Pseudo R-carré</i>	0,2220					

^a log. : forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10%, 5% et 1%.

Le TABLEAU 20 présente les résultats de la régression de la surface sur les variables explicatives du modèle de type de logement. Le terme d'erreur de cette régression permet de construire la variable $Inob_{surf}^{TL}$ qui représente la variabilité non observable de la surface et est incluse comme variable explicative du modèle de type de logement afin d'assurer que le coefficient relatif à la surface ne soit pas biaisé par une endogénéité potentielle.

TABLEAU 20 - Régression de la surface sur les variables explicatives du modèle du type de logement et ses instruments

Classe de surface	Coef.	Err. Typ.	p-value
Age de la personne de référence			
< 30 ans	Réf.		
de 30 à 39 ans	-0.019	0.020	0.343
de 40 à 49	-0.063***	0.024	0.008
de 50 à 64	-0.117***	0.031	<0.001
> 65 ans	-0.156***	0.036	<0.001
Revenu du ménage (log. ^a)	-0.038***	0.011	<0.001
Nombre d'unité de consommation (log. ^a)	-0.105***	0.035	0.002
Niveau d'éducation de la personne de référence			
<i>Aucun diplôme</i>			
<i>Certificat d'études primaires (CEP)</i>	-0.012	0.021	0.570
<i>Brevet d'études du 1er cycle (BEPC) ou BE, ou brevet des collèges</i>	-0.011	0.024	0.644
<i>CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau</i>	-0.007	0.017	0.695
<i>Baccalauréat professionnel</i>	-0.031	0.030	0.293
<i>Baccalauréat technique ou technologique</i>	-0.029	0.031	0.350
<i>Baccalauréat général</i>	-0.049**	0.024	0.042
<i>Niveau Bac+2</i>	-0.061***	0.023	0.008
<i>Niveau supérieur à Bac+2</i>	-0.106***	0.024	<0.001
Nationalité de la personne de référence			
<i>Français de nais.</i>			
<i>Français autre</i>	0.027	0.024	0.254
<i>UE des 15</i>	-0.002	0.038	0.955
<i>UE entrés 2004</i>	0.072	0.126	0.566
<i>Alg., maroc. tunis.</i>	0.084***	0.031	0.007
<i>Afrique</i>	0.116***	0.033	0.001
<i>Autre</i>	0.095**	0.037	0.011
Présence d'enfant	-0.036**	0.017	0.030
Densité de population en 1968 (log. ^a)	0.005	0.005	0.316
Densité d'emploi en 1968 (log. ^a)	0.015***	0.002	<0.001
Prédiction de la classe 2 de surface	1.572***	0.088	<0.001
Prédiction de la classe 3 de surface	1.644***	0.084	<0.001
Prédiction de la classe 4 de surface	3.895***	0.107	<0.001
Constante	1.442***	0.118	<0.001
Nombre d'observations	N=27 289		
	F(26,27 262)=1 629,76		
	Prob.>F=0		

^alog. : Forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 %, 1 %.

d. Résultats des estimations standard des modèles de classes de surface et de type de logement

Le TABLEAU 21 présente les résultats de l'estimation standard du modèle logit multinomial de la variable de classe de surface comme une fonction des caractéristiques socio-économiques du ménage et de la densité de population.

TABLEAU 21 – Estimation standard du modèle logit multinomial de classe de surface

Classe de surface (Réf. : Classe 2)	Classe 1		Classe 3		Classe 4	
	Coef.	Err. T.	Coef.	Err. T.	Coef.	Err. T.
Age de la P.R.						
< 30 ans	Réf.		Réf.		Réf.	
de 30 à 39 ans	-0,586***	0,072	0,646***	0,092	0,916***	0,126
de 40 à 49	-1,031***	0,074	0,855***	0,091	1,393***	0,125
de 50 à 64	-1,782***	0,074	1,225***	0,091	2,043***	0,125
>65 ans	-2,071***	0,079	1,302***	0,096	2,392***	0,130
Revenu (log. ^a)	-0,386***	0,030	0,480***	0,032	1,027***	0,040
Nb UC (log. ^a)	-2,348***	0,092	1,048***	0,080	1,654***	0,095
Education P.R. personne de référence						
Aucun diplôme						
CEP	-0,205***	0,072	0,045	0,066	0,193**	0,085
BEPC, BE	-0,150*	0,089	0,393***	0,081	0,754***	0,098
CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau	-0,236***	0,062	0,268***	0,056	0,527***	0,071
Bac. Prof.	-0,409***	0,116	0,454***	0,103	0,867***	0,123
Bac. Tech. technologique	-0,208*	0,124	0,434***	0,110	0,917***	0,127
Bac. Gén.	-0,206**	0,091	0,505***	0,085	1,195***	0,099
Niveau Bac+2	-0,219***	0,084	0,515***	0,077	1,262***	0,090
> Bac+2	-0,168**	0,078	0,629***	0,074	1,707***	0,085
Nationalité P.R. personne de référence						
Français de nais.						
Français autre	0,306***	0,086	-0,087	0,082	-0,189*	0,099
UE des 15	0,349**	0,142	0,199	0,128	0,448***	0,143
UE entrés 2004	1,136**	0,545	-1,146	1,112	-0,733	1,162
Alg., maroc. tunis.	1,535***	0,111	-0,321**	0,148	-0,480**	0,208
Afrique	2,030***	0,177	-1,099***	0,376	-1,027**	0,513
Autre	1,501***	0,151	0,092	0,203	0,396	0,249
Présence d'enfant	-0,318***	0,064	0,049	0,057	0,183***	0,065
Densité de pop. (log. ^a)	0,368***	0,013	-0,238***	0,011	-0,433***	0,012
Constante	8,568***	0,303	-7,659***	0,314	-15,437***	0,407
Nombre d'obs.				27 289		
Log-likelihood d'observations				-29304,777		
Pseudo R-carré				0,2220		

^alog. : forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 % et 1 %.

Le TABLEAU 22 présente les résultats de l'estimation standard du modèle logit multinomial de la variable de type de logement comme une fonction des caractéristiques socio-économiques du ménage, de la classe de surface du logement et de la densité de population de la commune de résidence.

TABLEAU 22 – Estimation standard du modèle logit multinomial de type de logement

Type de logement (Réf. : Maison individuelle)	Appartement		Maison accolée	
	Coef.	Err. T.	Coef.	Err. T.
Classe de surface				
<i>Classe 1</i>	Réf.		Réf.	
<i>Classe 2</i>	-1,306***	0,059	-0,131**	0,063
<i>Classe 3</i>	-2,918***	0,070	-0,759***	0,065
<i>Classe 4</i>	-3,926***	0,097	-1,212***	0,072
Age de la P.R.				
< 30 ans				
de 30 à 39 ans	-0,632***	0,091	-0,196**	0,089
de 40 à 49	-0,861***	0,091	-0,465***	0,089
de 50 à 64	-1,255***	0,091	-0,441***	0,088
>65 ans	-1,628***	0,097	-0,524***	0,093
Revenu (log. ^a)	-0,312***	0,035	-0,272***	0,030
Nb UC (log. ^a)	-1,169***	0,097	0,001	0,080
Education P.R.				
<i>Aucun diplôme</i>				
<i>CEP</i>	-0,341***	0,081	-0,245***	0,064
<i>BEPC, B</i>	0,160*	0,096	-0,128	0,080
<i>CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau</i>	-0,146**	0,069	-0,229***	0,055
<i>Bac. Prof.</i>	-0,215***	0,127	-0,278***	0,103
<i>Bac. Tech. technologique</i>	<0.001	0,131	-0,281***	0,110
<i>Bac. Gén.</i>	0,060	0,100	-0,373***	0,086
<i>Niveau Bac+2</i>	0,028	0,090	-0,335***	0,076
< <i>Bac+2</i>	0,328***	0,084	-0,385***	0,072
Nationalité P.R.				
<i>Français de nais.</i>				
<i>Français autre</i>	0,180*	0,095	-0,027	0,084
<i>UE des 15</i>	-0,058	0,149	-0,166	0,126
<i>UE entrés 2004</i>	-1,930***	0,596	-2,472**	1,096
<i>Alg., maroc. tunis.</i>	1,169***	0,159	0,450***	0,155
<i>Afrique</i>	1,056***	0,320	-0,050	0,364
<i>Autre</i>	0,900***	0,219	-0,103	0,232
Présence d'enfant	0,082	0,067	-0,013	0,056
Densité de pop. (log. ^a)	0,879***	0,016	0,346***	0,011
Constante	2,639***	0,334	1,089***	0,289
<i>Nombre d'obs.</i>			27 289	
<i>Log-likelihood d'observations</i>			-19156,929	
<i>Pseudo R-carré</i>			0,3282	

^a log. : forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 % et 1 %.

e. Traitement de l'endogénéité de la densité dans le modèle agrégé de consommation énergétique

Le TABLEAU 23 présente les résultats de la régression de la densité sur ses instruments et sur les variables exogènes du modèle de consommation énergétique du ménage pour son logement. Cette régression constitue la première étape de la méthode 2SLS et permet de créer la prédiction de la densité en fonction des variables exogènes et des instruments. Cette prédiction est utilisée ensuite comme variable explicative dans la régression de la consommation énergétique afin de capter l'effet de la densité de population en contrôlant l'endogénéité potentielle.

TABLEAU 23 – Régression de la densité sur ses instruments et sur les variables exogènes du modèle agrégé de demande énergétique résidentielle (first stage)

Densité de population (log. ^a)	Coef.	Err. Typ.	p-value
Variables de contrôle			
Degré Jour Unifié au carré	-0,026***	0,002	<0.001
Bâtiment construit après 1975	0,150***	0,006	<0.001
Caractéristiques socio-économiques du ménage			
Age de la personne de référence			
< 30 ans	Réf.		
de 30 à 39 ans	-0,005	0,011	0,648
de 40 à 49	0,030***	0,011	0,010
de 50 à 64	0,034***	0,011	0,002
>65 ans	0,031***	0,012	0,009
Revenu annuel (log. ^a)	0,056***	0,004	<0.001
Nombre d'unité de consommation (log. ^a)	-0,049***	0,012	<0.001
Education de la personne de référence			
Aucun diplôme	Réf.		
CEP	0,011	0,011	0,303
BEPC, B	0,059***	0,013	<0.001
CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau	0,022**	0,009	0,014
Bac. Prof.	0,036**	0,016	0,026
Bac. Tech. technologique	0,039**	0,017	0,021
Bac. Gén.	0,109***	0,013	<0.001
Niveau Bac+2	0,095***	0,012	<0.001
> Bac+2	0,118***	0,011	<0.001
Nationalité de la personne de référence			
Français de nais.	Réf.		
Français autre	0,121***	0,013	<0.001
UE des 15	0,076***	0,020	<0.001
UE entrés 2004	0,202**	0,094	0,032
Alg., maroc. tunis.	0,147***	0,017	<0.001
Afrique	0,210***	0,023	<0.001
Autre	0,167***	0,023	<0.001
Présence d'enfant	0,020**	0,009	0,020
Instruments de la densité			
Densité de population de 1968 (log. ^a)	0,895***	0,002	<0.001
Accroissement de population 1990-1999	1,376***	0,020	<0.001
Accroissement d'emploi 1990-1999	0,002*	0,001	0,070
Constante	0,489***	0,041	<0.001
Nombre d'observations			
	N=27 5325		
	F(26,27 498)=16500,98		
	Prob.>F=0		
R-carré	0,9398		

^alog. : Forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 %, 1 %.

Variables exogènes et instruments permettent d'expliquer environ un 94 % de la variance de la densité de population. La F-statistique est égale à 16 501. Or Stock et al. (2002) indique une valeur critique à 5 % de 12,83 pour cette statistique dans le cas de trois instruments pas assez robustes. 16 501 étant bien supérieur à la valeur critique, la robustesse des instruments retenus pour la densité de population est ainsi validée.

f. Traitement de l'endogénéité de la variable type de logement dans le modèle désagrégé de consommation énergétique

Le TABLEAU 17 présente le résultat de l'estimation réalisée pour la construction des variables instrumentales de la typologie de logement.

TABLEAU 24 – Estimation du type de logement pour la construction de ses instruments

Type de logement (Maison isolée comme référence)	Appartement		Maison accolée	
	Coef.	Err. T.	Coef.	Err. T.
Classe de surface				
<i>Classe 1</i>	Réf.		Réf.	
<i>Classe 2</i>	-1,306***	0,059	-0,131**	0,063
<i>Classe 3</i>	-2,918***	0,070	-0,759***	0,065
<i>Classe 4</i>	-3,926***	0,097	-1,212***	0,072
Age de la P.R.				
< 30 ans	Réf.		Réf.	
de 30 à 39 ans	-0,632***	0,091	-0,196**	0,089
de 40 à 49	-0,861***	0,091	-0,465***	0,089
de 50 à 64	-1,255***	0,091	-0,441***	0,088
>65 ans	-1,628***	0,097	-0,524***	0,093
Revenu (log. ^a)	-0,312***	0,035	-0,272***	0,030
Nb UC (log. ^a)	-1,169***	0,097	0,001	0,080
Education P.R.				
<i>Aucun diplôme</i>	Réf.		Réf.	
<i>CEP</i>	-0,341***	0,081	-0,245***	0,064
<i>BEPC, BE</i>	0,160*	0,096	-0,128	0,080
<i>CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau</i>	-0,146**	0,069	-0,229***	0,055
<i>Bac. Prof.</i>	-0,215***	0,127	-0,278***	0,103
<i>Bac. Tech. technologique</i>	<0.001	0,131	-0,281***	0,110
<i>Bac. Gén.</i>	0,060	0,100	-0,373***	0,086
<i>Niveau Bac+2</i>	0,028	0,090	-0,335***	0,076
< i>Bac+2	0,328***	0,084	-0,385***	0,072
Nationalité P.R.				
<i>Français de nais.</i>	Réf.		Réf.	
<i>Français autre</i>	0,180*	0,095	-0,027	0,084
<i>UE des 15</i>	-0,058	0,149	-0,166	0,126
<i>UE entrés 2004</i>	-1,930***	0,596	-2,472**	1,096
<i>Alg., maroc. tunis.</i>	1,169***	0,159	0,450***	0,155
<i>Afrique</i>	1,056***	0,320	-0,050	0,364
<i>Autre</i>	0,900***	0,219	-0,103	0,232
Présence d'enfant	0,082	0,067	-0,013	0,056
Densité de pop. (log. ^a)	0,879***	0,016	0,346***	0,011
Constante	2,639***	0,334	1,089***	0,289
<i>Nombre d'observations</i>			N=27 289	
<i>Pseudo R-carré</i>			Log likelihood = -19156,929	
			0,3282	

^alog. : forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 % et 1 %.

Le TABLEAU 25 présente les résultats de la régression de la variable type de logement sur ses instruments et les variables exogènes du modèle désagrégé de demande énergétique.

TABLEAU 25 – Régression de la variable type de logement sur ses instruments (first stage)

Type de logement (Maison accolée comme référence)	Appartement			Maison individuelle isolée		
	Coef.	Err. T.	p-value	Coef.	Err. T.	p-value
Classes de surface						
<i>Classe 1</i>	Réf.			Réf.		
<i>Classe 2</i>	0,013	0,009	0,136	0,038***	0,011	<0,001
<i>Classe 3</i>	0,041***	0,013	0,002	0,013	0,016	0,420
<i>Classe 4</i>	0,061***	0,016	<0,001	-0,016	0,020	0,421
Source d'énergie						
<i>Electricité</i>	0,078***	0,008	<0,001	-0,080***	0,009	<0,001
<i>Gaz</i>	0,088***	0,008	<0,001	-0,111***	0,010	<0,001
<i>Fuel</i>	-0,002	0,009	0,809	0,035***	0,010	0,001
<i>Autre</i>	Réf.			Réf.		
Variables de contrôle						
Degré Jour Unifié au carré	-0,020***	0,001	<0,001	0,006	0,001	<0,001
Bâtiment construit après 1975	0,047***	0,004	<0,001	0,045***	0,005	<0,001
Variables socio-économiques du ménage						
Age de la personne de référence						
< 30 ans	Réf.			Réf.		
de 30 à 39 ans	0,002	0,008	0,814	0,010	0,010	0,327
de 40 à 49	0,006	0,009	0,479	0,003	0,011	0,749
de 50 à 64	0,007	0,009	0,458	0,014	0,011	0,227
>65 ans	0,019*	0,010	0,068	0,019	0,013	0,134
Revenu du ménage (log.)	0,003	0,003	0,437	-0,007*	0,004	0,083
Nombre d'unité de consommation (log.)	0,011	0,010	0,274	0,015	0,012	0,218
Education de la personne de référence						
<i>Aucun diplôme</i>	Réf.			Réf.		
<i>CEP</i>	0,008	0,008	0,342	-0,010	0,010	0,294
<i>BEPC, BE</i>	-0,011	0,009	0,216	-0,008	0,011	0,454
<i>CAP, BEP ou autre dip. de ce niveau</i>	-0,002	0,007	0,807	-0,011	0,008	0,195
<i>Bac. Prof.</i>	-0,007	0,012	0,574	-0,008	0,015	0,580
<i>Bac. Tech. technologique</i>	-0,010	0,012	0,415	-0,009	0,015	0,558
<i>Bac. Gén.</i>	-0,009	0,010	0,367	-0,018	0,012	0,130
<i>Niveau Bac+2</i>	-0,007	0,009	0,448	-0,014	0,011	0,175
<i>> Bac+2</i>	-0,009	0,008	0,301	-0,017*	0,010	0,093
Nationalité de la personne de référence						
<i>Français de nais.</i>	Réf.			Réf.		
<i>Français autre</i>	-0,008	0,009	0,380	-0,002	0,011	0,866
<i>UE des 15</i>	-0,002	0,015	0,906	-0,001	0,018	0,969
<i>UE entrés 2004</i>	0,053	0,068	0,434	-0,057	0,083	0,495
<i>Alg., maroc. tunis.</i>	0,004	0,013	0,784	-0,019	0,016	0,223
<i>Afrique</i>	0,028	0,017	0,114	-0,050**	0,021	0,019
<i>Autre</i>	0,015	0,017	0,398	-0,035*	0,021	0,093
Présence d'enfant	-0,007	0,006	0,301	0,004	0,008	0,612
Densité de population (log.)	-0,030*	0,005	<0,001	0,012**	0,006	0,026
Instruments de type de logement						
<i>Prédiction d'appartement</i>	0,976***	0,032	<0,001	0,259***	0,039	<0,001
<i>Prédiction de maison isolée</i>	-0,127***	0,045	0,005	1,275***	0,056	<0,001
<i>Accroissement de pop. 1990-1999</i>	0,038**	0,016	0,020	-0,018	0,020	0,360
<i>Accroissement d'emp. 1990-1999</i>	<0,001	0,001	0,745	<0,001	0,001	0,977
<i>Densité de population de 1968 (log.^a)</i>	0,024***	0,005	<0,001	-0,001	0,006	0,836
<i>Densité d'emploi de 1968 (log.^a)</i>	-0,010***	0,001	<0,001	0,006***	0,002	<0,001
Constante	0,092**	0,044	0,035	-	0,277***	0,054
			N=26 913			
			F(36, 26876)=876,43		F(36, 26876) = 501,32	
			Prob> F=0		Prob.> F=0	
<i>R-carré</i>			0,5400		0,4017	

^a log. : forme logarithmique.

*, **, *** : Significatif à respectivement 10 %, 5 % et 1 %.

g. Applications numériques et simulations

TABEAU 26 – Valeurs au point moyen pour les variables inobservables et de termes d’erreur, utilisées pour les applications numériques

	Moyenne
$Inob_{dens}^S$	-1,97E-11
$Inob_{dens}^{TL}$	-5,60E-11
$Inob_{surf}^{TL}$	2,56E-11
$\varepsilon_n^{MODELE\ AGREGE}$	-1,72E-03
$\exp(\varepsilon_n^{MODELE\ AGREGE})$	1,265
$\varepsilon_n^{MODELE\ DESAGREGE}$	-3,33E-04
$\exp(\varepsilon_n^{MODELE\ DESAGREGE})$	1,206

FIGURE 19 – Variation des probabilités d’occurrence des classes de surface avec la densité (modèle à équations multiples)

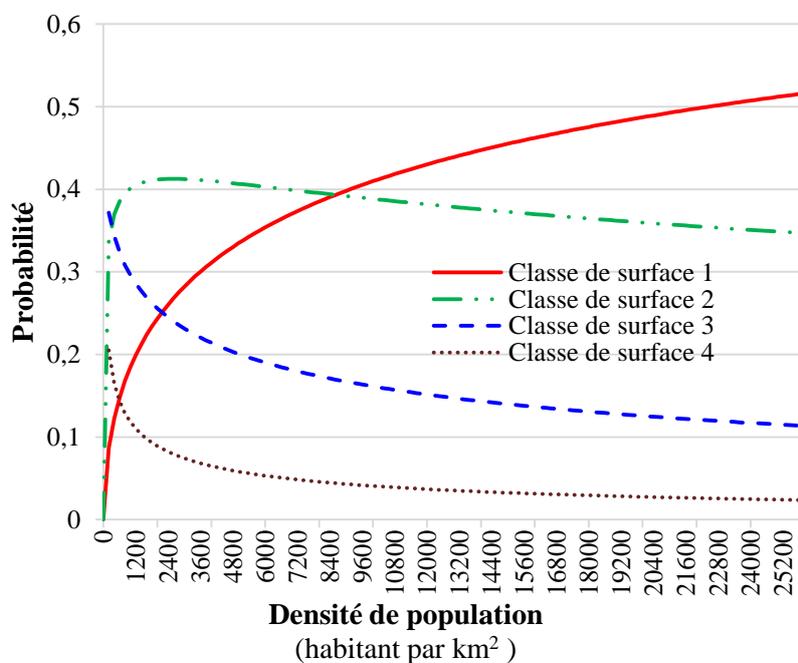


FIGURE 20 - Variation des probabilités d'occurrence des types de logement avec la densité (modèle à équations multiples)

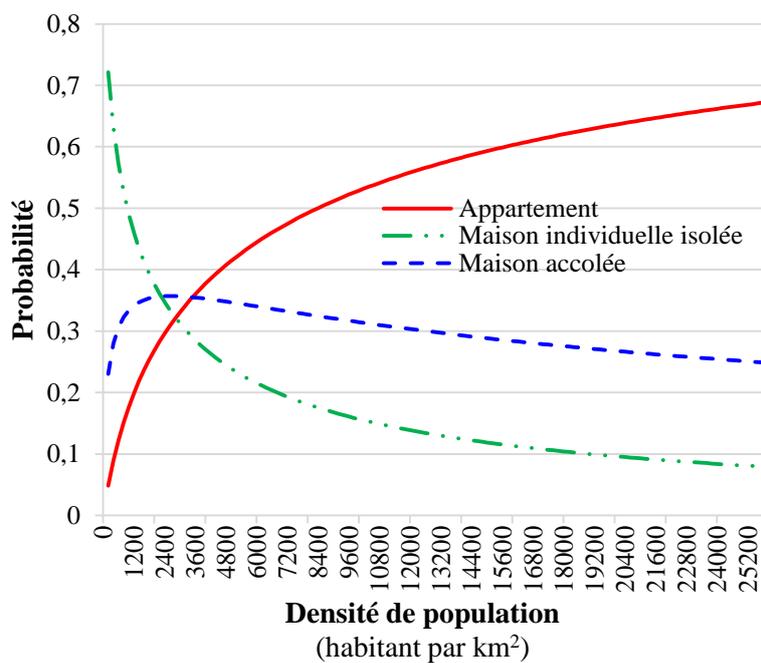


FIGURE 21 - Variation des probabilités d'occurrence des sources principales d'énergie du logement avec la densité (modèle à équations multiples)

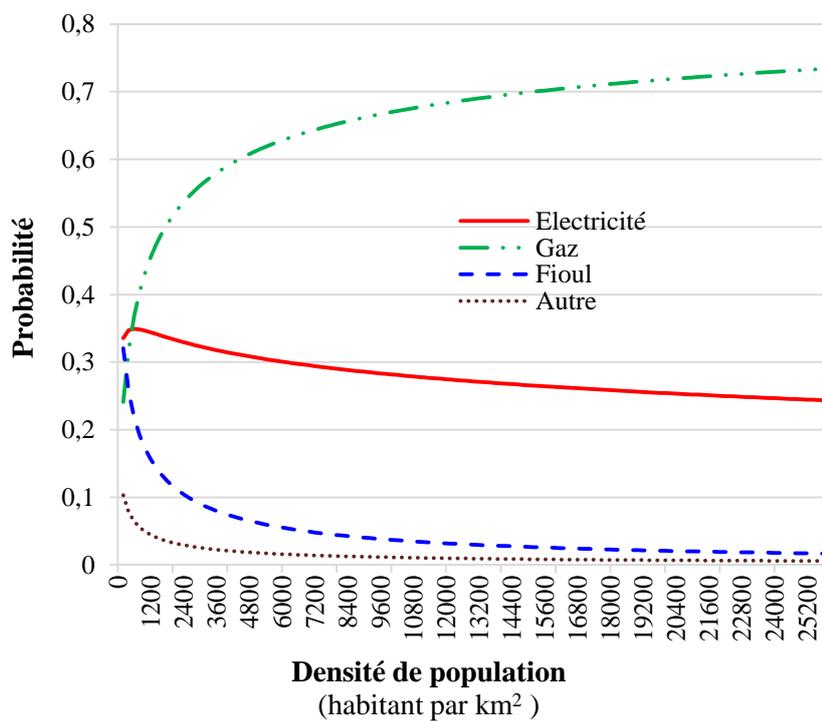


TABLEAU 27 – Valeurs minimum et maximum retenues pour les caractéristiques des ménages dans le cas des deux scénarios extrêmes de demande énergétique

	Scénario <i>sobre</i> (E_n^-)	Scénario <i>consommateur</i> (E_n^+)
Revenu annuel du ménage (log.)	1,95	13,47
Age de la personne de référence	< 30 ans	> 65 ans
Nombre d'unité de consommation (log.)	2,3	4,11
Présence d'enfant	Non	Oui

Chapitre 4 :

Prix versus espace : quel rôle sur la demande d'énergie des ménages ?

I. INTRODUCTION

Avec un avantage compétitif sur les sources d'énergie alternatives et technologies associées, les carburants sont dominants sur le secteur des transports pour lequel ils représentent 95 % de la consommation d'énergie ; ils sont utilisés entre autres pour les déplacements de passagers reposant à 88 % sur l'utilisation de véhicules particuliers (IEA 2007 ; IEA 2009). Or aujourd'hui, l'analyse des facteurs économiques de la demande de carburant révèle une faible marge de manœuvre pour réduire la dépendance de nos déplacements aux énergies fossiles. En effet, à travers une méta-analyse menée sur 175 études, Goodwin et al. (2004) concluent à une forte influence sur le long terme du revenu sur la consommation de carburant qui s'avère en revanche moins élastique au prix de l'énergie. Les résultats de leurs travaux indiquent ainsi une élasticité-revenu long terme de 1,00 et une élasticité-prix long terme de -0,60 ; ces valeurs impliquent qu'un doublement du revenu nécessiterait une multiplication par plus de trois du prix de l'énergie pour stabiliser la demande de carburant, et par dix pour la diviser par deux.

Face à l'enjeu croissant que représente le secteur des transports et la consommation de carburant en particulier dans le contexte de sécurité énergétique et de lutte contre le changement climatique, les travaux s'intéressant à la maîtrise de la demande énergétique s'articulent autour de deux axes principaux : d'un côté l'analyse des facteurs macro-économiques de la formation de la demande de transports et de l'autre l'étude de ses déterminants spatiaux. Alors que la littérature en économie de l'énergie met en regard les dynamiques de la consommation de carburant avec les variables économiques telles que revenu et prix de carburant⁴⁷, elle néglige le rôle de l'organisation spatiale sur la mobilité des ménages. Les déterminants spatiaux relèvent en effet de l'économie urbaine (Alonso 1964) et de la Nouvelle Économie Géographique (Krugman 1991) qui s'intéressent à l'arbitrage entre coût du trajet domicile-travail et coût du logement pour expliquer les choix de localisation des individus et leurs besoins de mobilité associés. Mais seulement peu de travaux dans cette littérature adressent la question des dynamiques de la demande énergétique (Brueckner & Fansler 1983 ; Glaeser et al. 2008 ; Ingram 1998).

L'objectif de ce chapitre est de proposer un cadre d'analyse intégrant les deux dimensions clé que sont les dynamiques macro-économiques et l'organisation spatiale pour étudier les mécanismes de formation de la demande énergétique dans le cas des transports et le potentiel d'action pour maîtriser cette demande. La mise en regard de ces deux dimensions généralement considérées séparément dans

⁴⁷ Voir par exemple Akinboade et al. (2008) ; Hughes et al. (2008).

la littérature permet ainsi de tester le rôle des mécanismes spatiaux au-delà de leur échelle strictement locale et de fournir une évaluation de l'impact des dynamiques de localisation sur la mobilité à travers l'évolution du prix des logements. Le dialogue local-global reposant sur l'interaction entre mécanismes spatiaux et mécanismes de prix est exploré économétriquement sur 50 ans de données (de 1960 à 2009) de consommation de carburant, de prix et de revenu en France. Son potentiel en termes d'action politique visant à réduire la demande de carburant est ensuite analysé.

La deuxième section de ce chapitre présente le contexte français du secteur des transports et du logement sur la période considérée en l'illustrant avec les données utilisées pour l'analyse. Un modèle stylisé reposant sur l'économie urbaine traditionnelle est ensuite développé pour mettre en évidence le rôle théorique du prix des logements dans la formation de la demande de transport. Les différentes fonctions de demande de carburant testées pour co-intégration ainsi que les résultats des estimations sont présentés en section quatre. Enfin, le potentiel de maîtrise de la consommation d'énergie à travers une action politique sur le prix des logements est évalué et comparé à différents scénarios de taxe carbone, puis la dernière section conclut sur les principaux résultats de l'analyse.

II. LES SECTEURS DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT EN FRANCE DE 1960 À 2009

a. Les données utilisées

Les données temporelles utilisées dans ce chapitre couvrent la période de 1960 à 2009. Elles ont été construites en harmonisant les informations de trois bases de données primaires sur :

- i) la demande de carburant et les prix des différents types de carburant fournis par le Comité Professionnel Du Pétrole (CPDP) ;
- ii) les prix de vente des logements en France extraits des Comptes Nationaux du Logement publiés par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL) ;
- iii) les données de population, le revenu agrégé, le prix de service logement et les indices de prix de consommation publiés par l'Institut National de la Statistiques et des Études Économiques (INSEE).

Les deux variables dépendantes auxquelles on s'intéresse sont la *consommation de carburant* et la *consommation de carburant per capita*. La consommation annuelle de carburant, exprimée en milliers de mètres cube, est déterminée par la moyenne des demandes annuelles de diesel, essence 95 et essence 98, que l'on pondère par les parts annuelles de marché en quantité de chaque type de carburant. Les variables indépendantes incluses dans l'analyse sont le *prix du carburant*, le *revenu des ménages* et le *prix des logements*. De manière analogue au calcul de la demande dite *composite* de carburant, le *prix du carburant* est déterminé comme la moyenne pondérée des prix de chaque type de carburant. Le *revenu de la population*, qu'il soit exprimé per capita ou non, correspond au revenu réel

disponible des ménages. Enfin, deux variables *prix des logements* sont considérées dans ce travail. La première correspond au prix de vente des logements alors que la deuxième correspond au prix du « service logement » diffusé par l'INSEE. Le premier prix capture l'ensemble des prix de vente des transactions immobilières observées sur le marché immobilier alors que le deuxième prix représente le coût de la satisfaction du besoin logement pour un ménage et se calcule à partir du prix du loyer (ou bien du loyer imputé dans le cas de ménages propriétaires) et des coûts liés à l'utilisation du logement. L'ensemble des variables prix de cette étude sont des prix nominaux déflatés de l'indice de prix à la consommation ayant pour référence l'année 2000. Les statistiques descriptives des données utilisées sont présentées dans le TABLEAU 1, à la fois sous forme absolue et sous forme logarithme.

TABLEAU 1 – Statistiques descriptives des données

Variable	Minimum :	Maximum :	Moyenne :	Er. type:	Coeff. de
	'm'	'M'	'μ'	'Σ'	variation : 'σ/μ'
<i>Sous forme absolue</i>					
Demande de carburant (10 ³ m ³)	4285,00	29115,00	20715,30	7877,56	0,38
Demande de carburant per capita (m ³ per capita)	0,09	0,49	0,37	0,12	0,33
Revenu réel disponible (10 ⁹ euro)	258,35	1119,20	682,88	241,86	0,35
Revenu réel disponible per capita (10 ³ euro per capita)	5,63	17,82	12,13	3,45	0,28
Prix du carburant (indice)	0,78	1,22	0,95	0,11	0,12
Prix de vente des logements (indice)	27,89	179,21	86,86	34,58	0,40
Prix du service logement (indice)	0,67	1,09	0,90	0,10	0,11
<i>Sous forme logarithme</i>					
Demande de carburant	8,36	10,28	9,83	0,53	0,05
Demande de carburant per capita	-2,37	-0,72	-1,08	0,46	-0,42
Revenu réel disponible	5,55	7,02	6,46	0,40	0,06
Revenu réel disponible per capita	1,73	2,88	2,45	0,32	0,13
Prix du carburant	-0,24	0,20	-0,06	0,11	-1,85
Prix de vente des logements	3,33	5,19	4,39	0,39	0,09
Prix du service logement	-0,41	0,09	-0,11	0,12	-1,06

La consommation moyenne de carburant sur la période considérée s'élève à 20,7 millions de mètres cube, avec un minimum de 4,3 millions en 1960 et un maximum de plus de 29 millions en 2001. En ce qui concerne la consommation moyenne par personne, elle passe de 0,09 mètre cube, soit 90 litres par personne en 1960 à 0,9 mètre cube soit 490 litres par personne en 1999, pour décliner ensuite. La moyenne sur la période 1960-2009 est de 0,37 mètre cube par personne. Le revenu disponible moyen approche les 683 milliard d'euro pour le territoire et dépasse les 12 000 euro par personne par an. Enfin, on note que le coefficient de variation des prix est 2 à 3 fois plus élevé pour le

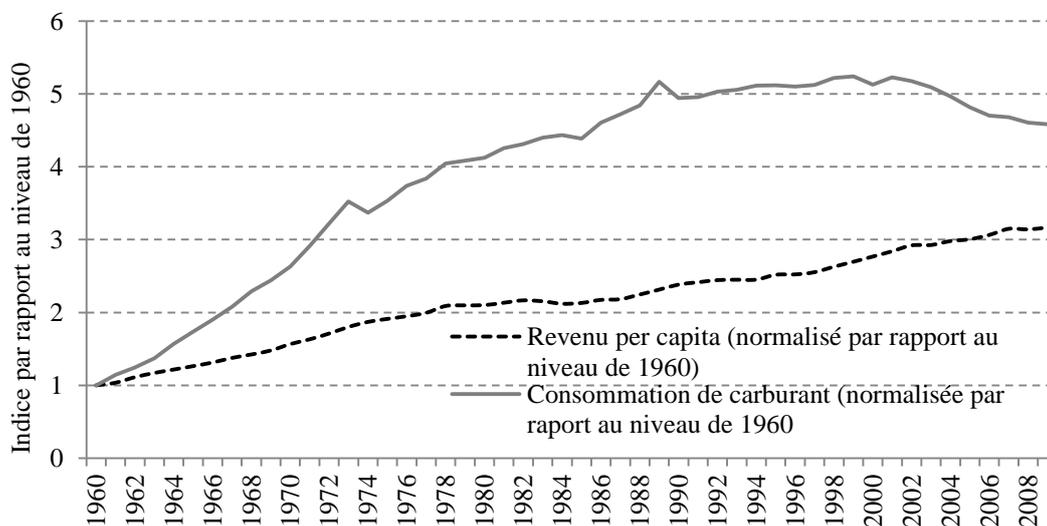
carburant que pour les logements en fonction de la forme absolue ou logarithmique des variables. L'analyse économétrique développée dans la quatrième section de ce chapitre est réalisée à partir des formes logarithmiques des différentes variables présentées.

b. Le secteur des transports en France de 1960 à 2009

Suite aux débuts de l'automobile en France, la diffusion progressive de ce nouveau bien de consommation au sein de la société fut étroitement liée aux évolutions de revenu, comme ce fut et c'est le cas dans bien d'autres pays. L'Agence Internationale de l'Énergie souligne ainsi l'influence observée du revenu sur le taux d'équipement des ménages et sur l'utilisation de l'automobile (AIE 2007 ; AIE 2009).

Fruit de l'augmentation croissante de l'utilisation des transports routiers en France sur la période 1960-2009, la demande de carburant présente pourtant des variations que l'on ne retrouve pas dans les évolutions du revenu : la simple relation linéaire entre diffusion de l'automobile et richesse du pays n'est pas suffisante pour expliquer la complexité des mécanismes déterminants la formation de la consommation de carburant. La FIGURE 1 présente les évolutions du revenu per capita et de la demande de carburant per capita en France sur la période considérée.

FIGURE 1 – Evolutions du revenu per capita et de la demande de carburant per capita en France de 1960 à 2009



Alors que l'on observe une augmentation relativement régulière du revenu sur l'ensemble de la période 1960-2009, la demande de carburant est marquée par une croissance spectaculaire jusqu'à la fin des années 1980 suivie d'un très fort ralentissement voire d'une stagnation de la demande qui commence à décroître même à partir de 2003.

Si la croissance de la consommation de carburant observée pendant les 30 premières années de la période considérée s'explique par une très forte augmentation du taux d'équipement des ménages français qui passe de 30,2 % en 1960 à 76,5 % en 1990, le plateau dans la demande de carburant en absence de crise énergétique peut se voir comme la conséquence de la concomitance de trois différents facteurs :

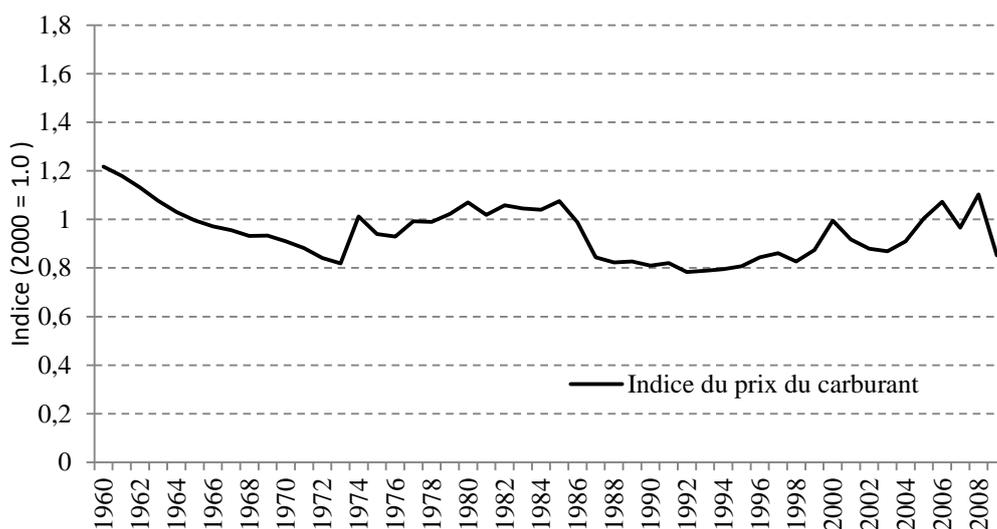
- i) un ralentissement de la croissance du marché automobile qui approche la saturation : avec déjà 76,5 % de taux d'équipement des ménages en 1990, seulement 5 % de plus se sont équipés en 2000 (Meot 2009) ;
- ii) une forte pénétration du diesel sur le marché comme le montre l'évolution des parts de marché essence-diesel présentées dans le TABLEAU 2 et qui reflètent la structure du parc de véhicule français : 14 % des automobiles utilisaient du diesel en 1990 contre 10 % de plus (soit 34 %) en 2000. L'avantage comparatif du diesel repose sur la politique de taxation en faveur du diesel permettant de faire plus de kilomètres qu'un litre d'essence. Cette évolution dans les parts de marché entraîne un changement des caractéristiques du parc de véhicules équivalent approximativement à une augmentation de 10 % de son efficacité énergétique moyenne (Girault et al. 2000 ; SOES 2010) ;
- iii) une augmentation du nombre d'automobiles à petite puissance moins consommatrices que les plus grandes cylindrées.

Les deux derniers facteurs correspondent à une augmentation de l'efficacité énergétique apparente du parc de véhicule, augmentation qui fut forte ces dernières années puisque la part de diesel a atteint les 58 % en 2009 (CCFA 2011) et les innovations technologiques ont permis de diminuer les consommations énergétiques de 4 et 10 % respectivement pour les moteurs diesel et les moteurs essence. D'autre part, le contexte économique de l'époque ne permit qu'une croissance modérée de la consommation des ménages équivalente à environ 1,5 % par an entre 2000 et 2009 selon l'INSEE (2011). La combinaison de ces deux mécanismes explique la baisse de la demande de carburant per capita que l'on observe ces dix dernières années alors que le revenu lui a continué de croître.

TABLEAU 2 - Evolution des parts de marché et des prix de carburant en France de 1960 à 2009

Année	Parts de marché des carburants (en % de la quantité totale de carburant consommée)		Prix déflatés	
	<i>Essence</i>	<i>Diesel</i>	<i>Essence</i>	<i>Diesel</i>
1960	99,5	0,5	1,22	0,81
1970	97,8	2,2	0,92	0,58
1980	90,4	9,6	1,10	0,78
1990	79,4	20,6	0,87	0,59
2000	57,2	42,8	1,11	0,85
2009	35,9	64,1	0,91	0,82

Au-delà des différents mécanismes structurels développés ci-dessus et dans lequel le coût de l'énergie est intervenu par l'intermédiaire de la politique de taxation favorisant le diesel, la formation de la demande de carburant est influencée par l'évolution du prix de l'énergie représenté FIGURE 2.

FIGURE 2 – Evolution de l'indice du prix du carburant de 1960 à 2009 (indice 1.0 en 2000)

L'analyse de la FIGURE 2 montre que le prix du carburant a diminué de façon constante entre 1960 et 1973, augmenté brutalement après 1973 pour rester relativement stable jusqu'à 1986. Sachant que ce prix se compose en France pour 35 à 40 % de coût du pétrole, pour 50 à 55 % de la taxe sur les carburants et que le reste correspond aux coûts de transport et de distribution, les variations du prix du carburant reposent principalement sur les variations du cours du pétrole et sur les politiques de taxation en vigueur. Notamment, la diminution observée après 1986 s'explique par trois phénomènes :

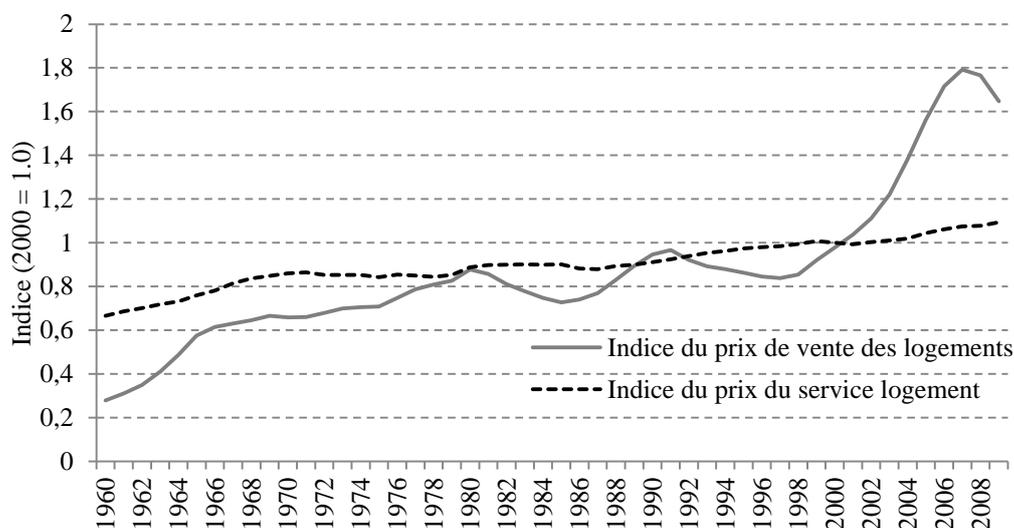
- i) le contrecoup du choc pétrolier a engendré une baisse du cours du pétrole dans les années 1980 ;
- ii) la pénétration du diesel moins taxé sur le marché se traduit par une diminution du taux moyen de taxation du carburant ;

- iii) les changements des taux de change dollar/franc et dollar/euro ont en moyenne été en faveur des francs ou des euro et ce principalement après 2003, ce qui a contribué à maîtriser l'augmentation des prix du carburant en France.

c. Le secteur de l'immobilier en France de 1960 à 2009

La période 1960-2009 a connu une croissance constante des prix de l'immobilier et une très forte augmentation de prix de vente à partir du début des années 2000, comme le montrent les évolutions des prix de service logement et de vente représentées sur la FIGURE 3.

FIGURE 3 – Evolutions des indices du prix de vente des logements et du prix du service logement de 1960 à 2009 (Indice 1 en 2000).



Trois mécanismes principaux du marché de l'immobilier français sont à l'origine de ces trajectoires de prix. Tout d'abord, marqué par une forte pénurie de logements depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, le pays a connu par la suite une grande vague de construction qui lui a permis de maîtriser en partie le déséquilibre entre demande et offre de logement et donc ainsi de contenir l'explosion des prix. Puis, l'effondrement du marché de l'immobilier au Japon à la fin des années 1980 engendra une brusque libération de capitaux qui furent alors investis dans les différents marchés immobiliers du monde, y compris celui de la France. Ce phénomène contribua à alimenter la trajectoire de forte croissance des prix des logements. Enfin, après 2000, les effets de la bulle immobilière mondiale se sont fait sentir en France et ont affecté le marché immobilier du pays en induisant une explosion des prix dans le secteur de la vente notamment. Si les fortes contraintes réglementaires en termes d'attribution de crédit bancaire ont limité l'impact de l'explosion de cette bulle immobilière en France, les actions publiques menées depuis les années 1990 pour soutenir le secteur de la construction ont encouragé la création de logements ne correspondant pas toujours à la

demande pour ce qui est de la localisation ou bien de la qualité et ont ainsi soutenu la croissance de prix des logements de ces dernières années.

III. PRIX DES LOGEMENTS, CHOIX DE LOCALISATION ET DEPENDANCE A LA VOITURE : FONDEMENTS THEORIQUES ET MODELE CONCEPTUEL

Afin d'explorer le lien entre les variations du prix des logements, l'organisation spatiale des ménages et leur demande de transport, cette section utilise le modèle urbain mono-centrique développé par Alonso (1964). La consommation du service logement, représentée par la surface S du logement, est considérée comme un besoin essentiel (autrement dit un « *basic need* ») dépendant strictement des caractéristiques des ménages que l'on supposera tous identiques dans ce modèle. L'utilité U de chaque ménage est définie comme sa consommation de bien composite Z . p_L et p_E sont respectivement le prix du logement par mètre carré et le coût global de transport par kilomètre parcouru. x représente la distance au Central Business District (CBD), c'est-à-dire au centre de l'agglomération urbaine. Les revenus des ménages sont supposés exogènes et identiques pour tous les ménages. L'utilité la contrainte de revenu des ménages sont définies respectivement par les équations (4.1) et (4.2).

$$U = Z \quad (4.1)$$

$$R = Z + p_L \cdot S + p_E \cdot x \quad (4.2)$$

L'hypothèse d'utilité constante parmi les ménages permet d'identifier le prix de logement que les ménages sont prêts à payer en fonction de leur localisation au sein de l'agglomération urbaine. On note p_L^0 le prix de logement dans le CBD.

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow \left\{ p_L(x) = p_L^0 - \frac{p_E}{S} \cdot x \right. \quad (4.3)$$

Le prix de logement au sein de l'agglomération dépend ainsi de deux mécanismes : d'une part les déterminants macro-économiques comme les taux d'intérêts et le contexte économique en général influencent le prix de logement p_L^0 absolu que l'on retrouve au centre de l'agglomération ; et d'autre part le mécanisme d'arbitrage des ménages entre coûts de logement et coûts de transport influence la distribution spatiale des prix relatifs au sein de l'agglomération.

Les ménages acceptent de se localiser plus loin de leur lieu de travail, c'est-à-dire plus loin du CBD, tant que les coûts de transport sont compensés par des coûts de logement plus faibles. À la limite extérieure de l'agglomération, le prix de logement que les ménages sont prêts à payer est nul, ce qui permet de déduire la distance maximale x_{lim}^0 du CBD à laquelle les ménages acceptent de s'installer (équation (4.4)).

$$p_L(x_{lim}^0) = 0 \Leftrightarrow x_{lim}^0 = \frac{p_L^0 \cdot S}{p_E} \quad (4.4)$$

La distance limite du CBD x_{lim}^0 jusqu'à laquelle les ménages acceptent de s'installer est proportionnelle à p_L^0 : une augmentation de δp_L^0 du prix des logements induit ainsi une augmentation de δx_{lim}^0 de la taille de la ville. On note $p_L^{inc}(x)$ le nouveau profil de prix des logements et x_{lim}^1 la taille de la ville après hausse du prix au centre-ville de δp_L^0 . $p_L^{inc}(x)$ et x_{lim}^1 sont définis dans les équations (4.5) et (4.6).

$$p_L^{inc}(x) = (1 + \delta) \cdot p_L^0 + \frac{p_E}{S} \cdot x \quad (4.5)$$

$$p_L^{inc}(x_{lim}^1) = 0 \Leftrightarrow x_{lim}^1 = (1 + \delta) \cdot \frac{p_L^0 \cdot S}{p_E} = (1 + \delta) \cdot x_{lim}^0 \quad (4.6)$$

Après une hausse du prix des logements, les ménages sont susceptibles de se localiser plus loin du centre de la ville et donc d'augmenter leur trajet et le coût associé de δx_{lim}^0 . Dans le cas où le ménage utilise le véhicule particulier pour se déplacer, ce mécanisme se traduit par une augmentation de la demande de carburant. Dans le cas d'un ménage utilisant les transports en commun, l'éloignement du centre peut causer une perte d'accès à ce mode de transport donc accroître la dépendance aux véhicules particuliers.

Le modèle stylisé développé ci-dessus permet de mettre en évidence le rôle du prix des logements dans les déplacements des ménages par l'intermédiaire de leur choix de localisation et du mécanisme d'arbitrage entre coûts de transport et coûts de logement. L'analyse présentée dans la section suivante teste économétriquement cette relation et en propose une évaluation empirique.

IV. ANALYSE ECONOMETRIQUE DU ROLE DU PRIX DES LOGEMENTS DANS LA FORMATION DE LA DEMANDE DE CARBURANT

a. Spécifications et méthodes

Afin de tester et quantifier le rôle du prix des logements dans la formation de la demande de carburant, nous comparons deux modèles intégrant tous deux une tendance déterministe quadratique $D(t)$ définie dans l'équation (4.7). Dans le premier modèle, la demande de carburant est une fonction du revenu et du prix de l'énergie uniquement (équation (4.8)) alors que dans le deuxième modèle, le prix des logements est inclus comme variable explicative de la fonction de demande de carburant (équation (4.9)).

$$D(t) = \mu + \delta t + \gamma t^2 \quad (4.7)$$

$$\ln(E_t) = D(t) + \alpha \ln(Y_t) + \beta \ln(p_t^E) + e_t \quad (4.8)$$

$$\ln(E_t) = D(t) + \alpha \ln(Y_t) + \beta \ln(p_t^E) + \gamma \ln(p_t^L) + e_t \quad (4.9)$$

On note E_t la consommation de carburant (en unité physique) per capita, Y_t le revenu réel disponible des ménages per capita, p_t^E le prix du carburant et p_t^L le prix des logements (qui représente soit le prix de vente soit le prix de service). $D(t)$ se compose de trois tendances, une constante, une linéaire et une quadratique dont les coefficients sont respectivement μ , δ et γ . Les coefficients α , β et γ correspondent aux élasticités de la demande de carburant par rapport au revenu, au prix moyen de carburant et au prix des logements. e_t est le terme d'erreur.

Alors que les élasticités long-terme sont directement données par les spécifications testées, les élasticités court-terme sont estimées par l'*Error Correction Model* (ECM). Construits sur les différences premières des variables ($\Delta X_t = X_t - X_{t-1}$) des spécifications (4.8) et (4.9), ils sont définis respectivement dans les équations (4.10) et (4.11) où $d(t)$ est la tendance temporelle, a , b et c correspondent aux élasticités court terme de la demande de carburant par rapport au revenu, au prix du carburant et au prix des logements, et u_t est le terme d'erreur.

$$\Delta \ln(E_t) = d(t) + a \cdot \Delta \ln(Y_t) + b \cdot \Delta \ln(p_t^E) + q \cdot e_t + u_t \quad (4.10)$$

$$\Delta \ln(E_t) = d(t) + a \cdot \Delta \ln(Y_t) + b \cdot \Delta \ln(p_t^E) + c \cdot \Delta \ln(p_t^L) + q \cdot e_t + u_t \quad (4.11)$$

Afin d'identifier les dynamiques de long terme, les deux équations (4.8) et (4.9) sont estimées par la méthode traditionnelle des moindres carrés puis testées pour co-intégration (Engle & Granger 1987) alors que les ECM également estimés par la méthode des moindres carrés permettent d'isoler les mécanismes de court terme (Phillips 1954 ; Phillips 1957). Les valeurs critiques utilisées pour le test de co-intégration de Engle & Granger (1987) sont celles proposées par Ericsson & MacKinnon (2002). La stabilité de la dynamique de long terme est également testée par l'intermédiaire du test de Harvey & Collier (1977).

Nous avons donc construit deux modèles de demande de carburant, un premier modèle dit *Modèle 1* reposant uniquement sur le revenu et le prix du carburant (équations (4.8) et (4.10)) et un deuxième modèle dit *Modèle 2* intégrant le prix des logements comme variables explicatives (équations (4.9) et (4.11)).

'Spécification per capita' versus 'spécification agrégée'

En ce qui concerne la demande de carburant, des travaux de méta-analyse ont montré que le choix entre spécification per capita ou bien en niveau à l'échelle nationale n'a pas d'impact significatif sur le

résultat des estimations menées (Espey 1998). Or les variations potentielles auxquelles on pourrait s'attendre proviennent de l'effet de la variable de population, exclue dans le cas de la spécification per capita mais indirectement incluse dans la spécification agrégée. Les impacts du choix de spécification sur l'élasticité de la demande de carburant sont explicités dans les équations (4.12) et (4.13), où E représente la consommation d'énergie, N la population et ε l'élasticité relative au prix.

$$E_t^{Agrege} = E_t^{PerCapita} \cdot N \quad (4.12)$$

$$\varepsilon^{Agrege} = \frac{dE_t^{Agrege} / E_t^{Agrege}}{dP / P} \quad (4.13)$$

Après substitution, on obtient l'équation (4.14) :

$$\varepsilon^{Agrege} = \varepsilon^{PerCapita} + \frac{dN}{dP} \cdot \frac{P}{N} \quad (4.14)$$

Dans le cas du prix du carburant, l'hypothèse d'indépendance de la population et de prix est valable, dN/dP est donc nul ce qui élimine le second terme du membre droit de l'équation (4.14) et permet de conclure à l'indifférence de choix entre les spécifications per capita et agrégée. Toutefois, comme la population est susceptible d'interagir avec le prix des logements (auquel cas le facteur dN/dP n'est alors plus nul) et que l'on s'intéresse dans cette étude au comportement individuel des agents pour expliquer les déterminants de leur demande de carburant, la suite de notre analyse est construite sur des spécifications per capita.

b. Demande de carburant, fonction du revenu et du prix de l'énergie

Les résultats de l'estimation du premier modèle et du test de co-intégration sont présentés dans TABLEAU 3.

TABLEAU 3 – Estimations et test de co-intégration de la demande de carburant comme une fonction du revenu et du prix du carburant

Horizon temporel	Variable	Coeff.	Erreur type
<i>Long terme</i>	Constante	-4,434***	0,131
	Temps	0,040***	0,003
	Temps ²	-0,001***	<0,001
	Revenu	1,219***	0,075
	Prix du carburant	-0,259***	0,040
	Test de co-intégration ^{(a) (b)}	-4,124*(0,059)	
	Stabilité ^{(b) (c)}	2,01* (0,050)	
<i>Court terme</i>	Constante	0,064***	0,012
	Temps	-0,002***	<0,001
	Δ revenu	0,780***	0,229
	Δ prix du carburant	-0,200***	0,042
	e_{t-1}	-0,391**	0,137

Note : *Significatif à 10 %, **Significatif à 5 %, ***Significatif à 1 %.

^(a) Paramètres de test : statistique $\kappa(\text{ctt})$, $T = 49$ observations, $k = 2$ variables, constante, tendance temporelle linéaire et quadratique, Tableau 5 de Ericsson & MacKinnon (2002).

^(b) La p-value est entre parenthèse.

^(c) Test CUSUM récursif de Harvey & Collier.

D'une part l'ensemble des variables explicatives de l'équation de long terme (4.8) sont significatives à 1 % et d'autre part le test de co-intégration rejette à 10 % l'hypothèse de non-stationarité des résidus de l'équation de long terme : les résidus du *Modèle 1* suivent donc un processus aléatoire dont les caractéristiques ne changent pas au cours du temps ce qui valide la spécification testée. Les résultats du TABLEAU 3 révèlent une élasticité-revenu plus haute que ce que l'on trouve en général comme estimation dans la littérature : 1,22 contre une moyenne de 1,00 sur 175 estimations selon la méta-analyse de Goodwin et al. (2004). En revanche, la valeur de -0,26 comme élasticité-prix est en-dessous de la moyenne de -0,60 sur les mêmes 175 études.

Si la co-intégration entre variables est validée, le test de Harvey & Collier (1977) révèle une instabilité significative à 10 % : l'analyse des termes d'erreur estimés à l'année t à l'aide des $t-1$ observations précédentes montre une rupture dans la trajectoire d'évolution de la série. Cette instabilité suggère que les coefficients estimés changent au cours du temps et/ou que l'ensemble des facteurs clé de la demande de carburant ne font pas partie du modèle estimé. Cette deuxième option est explorée avec le *Modèle 2*.

c. Demande de carburant, fonction du revenu, du prix de l'énergie et du prix des logements

Le *Modèle 2* est estimé pour les deux variables du prix des logements : la *Variante 1* inclut le l'indice de prix de vente des logements comme variable explicative alors que la *Variante 2* prend en compte l'indice de prix de service logement. Les estimations des deux variantes ainsi que les résultats des tests de co-intégration et de stabilité sont présentés dans le TABLEAU 4.

TABLEAU 4 - Estimations et test de co-intégration de la demande de carburant comme une fonction du revenu, du prix du carburant et du prix des logements

Horizon temporel	Variable	Prix de vente des logements		Prix du service logement	
		Modèle 2, Variante 1		Modèle 2, Variante 2	
		<i>Coeff.</i>	<i>Erreur Type</i>	<i>Coeff.</i>	<i>Erreur Type</i>
<i>Long terme</i>	Constante	-4,385***	0,135	-3,869***	0,163
	Temps	0,044***	0,004	0,044***	0,003
	Temps ²	-0,001***	<0,001	-0,001***	<0,001
	Revenu	1,098***	0,118	0,997***	0,078
	Prix du carburant	-0,251***	0,040	-0,204***	0,035
	Prix des logements	0,044	0,033	0,537***	0,116
	Test de co-intégration ^{(a) (b)}	-3,924(0,123)		-4,790**(0,022)	
	Stabilité ^{(b) (c)}	1,922* (0,061)		1,004 (0,321)	
<i>Court terme</i>	Constante	0,064***	0,012	0,058***	0,011
	Temps	-0,002***	<0,001	-0,002***	<0,001
	Δrevenu	0,678**	0,257	0,905***	0,207
	Δprix du carburant	-0,200***	0,042	-0,192***	0,038
	Δprix des logements	-0,059	0,060	-0,017	0,218
	e _{t-1}	-0,370**	0,143	-0,685***	0,151

Note : *Significatif 10 %, **Significatif à 5 %, ***Significatif à 1 %.

^(a) Paramètres de test : statistique $\kappa(\text{ctt})$, $T = 49$ observations, $k = 3$ variables, constante, tendance temporelle linéaire et quadratique, Tableau 5 de Ericsson & MacKinnon (2002).

^(b) La p-value est entre parenthèse.

^(c) Test CUSUM récursif de Harvey & Collier.

La première variante du *Modèle 2* ne satisfait ni l'hypothèse de co-intégration des variables ni l'hypothèse de stabilité. En revanche, l'indice de prix du service logement se révèle significatif à 1 % ; la co-intégration est validée à 5 % ; l'instabilité n'est pas significative contrairement au *Modèle 1* n'intégrant pas de facteurs spatiaux : le rôle du prix des logements dans la formation de la demande de carburant est ainsi confirmé. La différence du rôle des prix des logements entre les deux variantes peut s'expliquer par le fait que les seuls prix de ventes observés ne capturent et représentent pas l'ensemble des caractéristiques du marché immobilier. En effet, ces prix de vente concernent une partie seulement du parc de logements en France et sont fortement liés aux mécanismes de spéculation immobilière.

En ce qui concerne le court terme de la deuxième variante, l'ensemble des tendances temporelles sont significatives à 1 %. L'absence de terme quadratique s'explique par le fait que l'équation de court terme repose sur les différences premières des variables ($\Delta X_t = X_t - X_{t-1}$) : la cohérence entre les modèles court et long termes implique que la tendance temporelle de $G_t - G_{t-1}$ soit de la forme $D(t) - D(t-1)$ qui est linéaire en t. La vitesse d'ajustement à l'équilibre, capturée par le coefficient e_{t-1} , est égale à -0,69. Le signe négatif assure la stabilité dynamique du modèle et sa

valeur absolue inférieure à 1 reflète les inerties du mécanisme d’ajustement puisqu’un ajustement parfait correspondrait à une valeur de vitesse d’ajustement de -1 .

Au vu de la différence de robustesse entre les deux variantes testées, l’utilisation de *Modèle 2* dans la suite de ce chapitre fera référence à la deuxième variante incluant le prix du service logement comme indice du prix des logements. L’ensemble des coefficients estimés pour le *Modèle 1* et le *Modèle 2* sont rappelés dans le TABLEAU 5.

TABLEAU 5 – Synthèse des estimations des élasticités court et long terme des *Modèle 1* et *Modèle 2*

	<i>Modèle 1</i>		<i>Modèle 2</i>	
	Court terme	Long terme	Court terme	Long terme
<i>Elasticité revenu</i>	0,780	1,219	0,905	0,997
<i>Elasticité prix de carburant</i>	-0,200	-0,259	-0,192	-0,204
<i>Elasticité prix des logements</i>	Non inclus	Non inclus	0	0,537

La variable du prix des logements n’est pas significative sur le court terme comme le montre la synthèse des estimations du *Modèle 2* présentée dans le TABLEAU 5. Ainsi, sur le court terme, la consommation de carburant des ménages n’est pas affectée par un changement du prix du service logement. Cette inélasticité court terme reflète le fait que le poste de consommation transport n’est pas un poste permettant une compensation immédiate d’une hausse de la dépense logement par une baisse de la dépense carburant par exemple ce qui souligne la dépendance des ménages aux véhicules particuliers. D’autre part, cela s’explique également par l’inertie inhérente aux choix de localisation des ménages : modifier sa consommation de logement signifie déménager (et éventuellement modifier ainsi sa demande de transport) ce qui est difficilement réalisable à court terme. En revanche, sur le long terme, le prix des logements affecte de manière significative la demande de carburant et ce avec une élasticité positive de 0,54. Non seulement le prix des logements intervient sur le long terme dans la formation de la demande de transport, mais il intervient de telle sorte qu’une hausse du prix des logements entraîne une augmentation de la demande de carburant : on vérifie ainsi le mécanisme mis en évidence dans notre modèle mono-centrique stylisé. Confrontés à une hausse du prix des logements, les ménages sont incités à changer de localisation vers une zone où les logements sont moins chers afin de minimiser leur coût de logement. Ils se délocalisent alors vers l’extérieur de la ville ce qui accroît leur dépendance à la voiture en augmentant d’une part les distances à parcourir et en diminuant d’autre part l’accessibilité aux transports en commun.

Au-delà du mécanisme spatial capturé par la variable du prix des logements, les deux modèles 1 et 2 fournissent des estimations relativement différentes des élasticités-revenu de carburant. Ainsi, pour le long terme, le *Modèle 2* évalue l’élasticité-revenu à 1,00 contre une valeur de 1,22 pour le *Modèle 1*, et 0,91 contre 0,78 pour le court terme. Cette différence peut s’interpréter comme le fait que le *Modèle 1* attribue à la croissance du revenu des ménages une composante de la demande de carburant en réalité dépendante des évolutions du coût de logement. Le risque de cette surestimation

de l'élasticité-revenu est une surestimation des projections de la demande de carburant sur le long terme : dans le cas d'une multiplication par deux du revenu, le *Modèle 1* conduit à une surestimation de 33 % de la demande de carburant par rapport au *Modèle 2* (augmentation de 133 % de la demande énergétique dans le premier cas contre 100 % dans le deuxième cas). On rappelle ici le périmètre de notre étude, à savoir la France. Ainsi les données analysées mettent en évidence un effet du prix des logements sur la demande de carburant à travers une modification de l'organisation spatiale, et la prise en compte de ce mécanisme modifie les estimations des élasticités traditionnelles telles que l'élasticité-revenu. Toutefois la prudence est de mise avant toute généralisation à d'autres territoires tels que l'Allemagne par exemple où les prix des logements, relativement stables sur la période considérée, sont peu susceptibles d'avoir joué un rôle dans la formation de la demande de carburant du pays.

Les estimations des élasticités-prix de carburant diffèrent également entre les deux modèles 1 et 2 avec une valeur de -0,20 dans le *Modèle 2* contre -0,26 dans le *Modèle 1*. La différence en termes de projections de la demande de carburant est moins importante que dans le cas précédent puisqu'elle est de 3 % dans le cas d'un doublement du prix du carburant : baisses de 16 % de la demande d'énergie avec le *Modèle 1* et 13 % avec le *Modèle 2*. Ces valeurs d'élasticité-prix de la demande de carburant sont inférieures en valeur absolue à ce que l'on retrouve dans la littérature, notamment dans les deux méta-analyses de Espey (1998) et Goodwin et al. (2004) qui proposent des valeurs moyennes respectivement de -0,58 et -0,60. On peut expliquer ces différences par deux caractéristiques du contexte français. D'une part, la part importante des petites et moyennes voitures dans le parc automobile et l'apparente efficacité énergétique élevée de cette flotte de véhicules tendent à réduire les effets du prix du carburant sur les déplacements. D'autre part, le haut niveau de taxe sur les carburants permet de limiter l'impact de variations abruptes du prix du pétrole sur le prix du carburant et d'atténuer les répercussions sur le budget transport des ménages.

La comparaison des estimations des *Modèle 1* et *Modèle 2* a permis la mise en évidence du rôle du prix des logements dans la consommation de carburant des ménages : en influençant les choix de localisation des ménages sur le long terme, le coût du logement modifie l'organisation spatiale et donc les distances à parcourir et modes de transport accessibles pour les ménages qui ajustent leur demande de carburant en conséquence. Ainsi, les consommations d'énergie sont modifiées par ce signal-prix par l'intermédiaire de la forme urbaine. Afin d'estimer le potentiel de ce mécanisme dans la maîtrise de la demande énergétique, et notamment d'évaluer le rôle indirect de l'organisation du territoire dans la formation de la demande de carburant à travers le levier prix des logements, des exercices de simulations de politiques énergétiques sont réalisés et analysés dans la section suivante.

V. MODELISATION DE POLITIQUES ENERGETIQUES : TAXE CARBONE VERSUS REGULATION DU PRIX DES LOGEMENTS

Outil clé des politiques énergétiques et climatiques, les taxes sur le prix de l'énergie et le contenu carbone ont fait l'objet de nombreuses études pour en évaluer les effets, notamment sur la demande de transport⁴⁸, et les débats sur les niveaux de taxation requis pour atteindre les objectifs de réduction soulèvent la question du coût, de l'impact social et de l'acceptabilité de telles politiques de taxations énergétiques. Or la mise en évidence d'un second mécanisme-prix dans la formation de la demande de carburant, en fournissant un levier complémentaire pour l'action publique dans ses mesures de maîtrise de la consommation énergétique, présente un fort potentiel en termes d'implication politique.

Cette section a pour objectif d'analyser le potentiel d'une politique reposant sur le prix des logements par rapport à la mise en place d'une taxe carbone dans le contexte de sécurité énergétique. Les mécanismes en jeu entre demande de carburant et secteur du logement sont évalués en considérant une mesure conceptuelle de régulation du prix des logements. La traduction de cette mesure stylisée en politique effective nécessiterait une exploration et compréhension du système complexe de formation des prix du marché immobilier. Ainsi la littérature sur le sujet souligne le rôle des déterminants macro-économiques tels que le revenu national ou la croissance de la population (Capozza et al. 2002 ; Malpezzi et al. 1998). D'autres études mettent en évidence l'impact de politiques fiscales et monétaires sur le marché immobilier à travers une modification des revenus disponibles des ménages et des taux d'intérêt. Enfin, la régulation locale et/ou régionale régissant les contraintes pesant sur les terrains fonciers et donc sur l'offre de logements est également mise en avant comme un des facteurs contribuant à l'évolution des prix du secteur (Hilbers et al. 2008 ; Quigley & Raphael 2005 ; Vermeulen & van Ommeren 2009). Dans ce chapitre nous proposons des éléments pour évaluer l'effet d'une politique d'intervention sur le prix des logements en termes de réduction de la demande énergétique mais la définition de mesures effectives est en dehors de notre champ d'étude.

La demande de carburant est modélisée selon la fonction de demande du *Modèle 2* et les estimations empiriques correspondantes sont utilisées pour réaliser les simulations de politiques énergétiques à savoir taxe carbone et régulation du prix des logements. Ces simulations sont réalisées par rapport à une consommation de carburant de référence $E_t^{\text{Reference}}$ en l'absence de mesure de maîtrise énergétique. Le prix du carburant p_t^E est fixé à 1,3€ par litre pour le calcul des simulations mais cette variable est conservée explicitement dans les équations ci-dessous afin de faciliter la compréhension. Le contenu moyen en carbone du carburant est calculé en utilisant le contenu en carbone de l'essence (2,3 kg CO₂/L) et celui du diesel (2,6 kg CO₂/L), puis en pondérant ces valeurs par les quantités respectives d'essence et de diesel consommées en France en 2009. On obtient un contenu moyen en carbone de 2,5 kilogrammes de CO₂ par litre de carburant ce qui revient à 0,0025

⁴⁸ Voir par exemple Bento et al. (2005) ou Glaeser & Kahn (2010).

tonne de CO₂ par litre. $E_t^{\text{Reference}}$ est explicitée dans l'équation (4.15), où les notations de la section IV sont conservées.

$$E_t^{\text{Reference}} = e^{D(t)} Y_t^\alpha (p_t^E)^\beta (p_t^L)^\gamma \quad (4.15)$$

On note τ la valeur de la taxe carbone en euro par tonne de CO₂ émise, et λ le taux de régulation du prix des logements. La demande de carburant lorsque les mesures énergétiques ont été mises en place, notée $E_t^{\text{Politiques}}$, est alors donnée par l'équation (4.16).

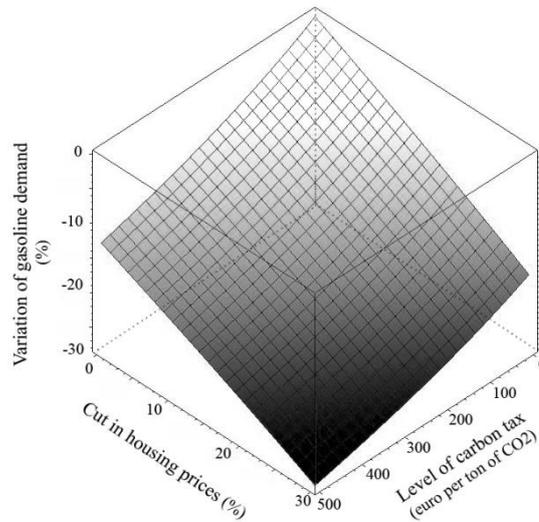
$$E_t^{\text{Politiques}} = e^{D(t)} Y_t^\alpha (p_t^E + 0.0025\tau)^\beta [(1-\lambda)p_t^L]^\gamma \quad (4.16)$$

La combinaison des deux équations précédentes permet de déterminer le pourcentage ρ de variation de la demande de carburant induit par les politiques énergétiques comme une fonction du couple (τ, λ) .

$$\rho(\tau, \lambda) = \frac{E_t^{\text{Politiques}}}{E_t^{\text{Reference}}} - 1 = \left[1 + \frac{0.0025\tau}{p_t^E} \right]^\beta (1-\lambda)^\gamma - 1 \quad (4.17)$$

Les simulations sont réalisées pour des valeurs de taxe carbone allant de 0 à 500 euro la tonne de CO₂ émise et pour une régulation du prix des logements de 0 à 30 %. Ces intervalles comprennent des valeurs induisant des effets d'ordre de grandeur similaire en absolu sur le revenu des ménages (effet positif dans le cas d'une régulation du prix des logements et négatif dans le cas d'une taxe carbone sans prise en compte des mécanismes d'équilibre général ou bien des mesures de redistribution). Ainsi une taxe carbone de 500 euro la tonne de CO₂ induirait un surcoût d'environ 1 400 euro par ménage sur la base de la consommation de carburant des ménages français en 2009, somme qui correspond à 20 % des dépenses du poste logement des ménages la même année. La Figure 3 représente le pourcentage de variation ρ de la demande de carburant comme une fonction du niveau de taxe carbone τ et du niveau de régulation du prix des logements λ .

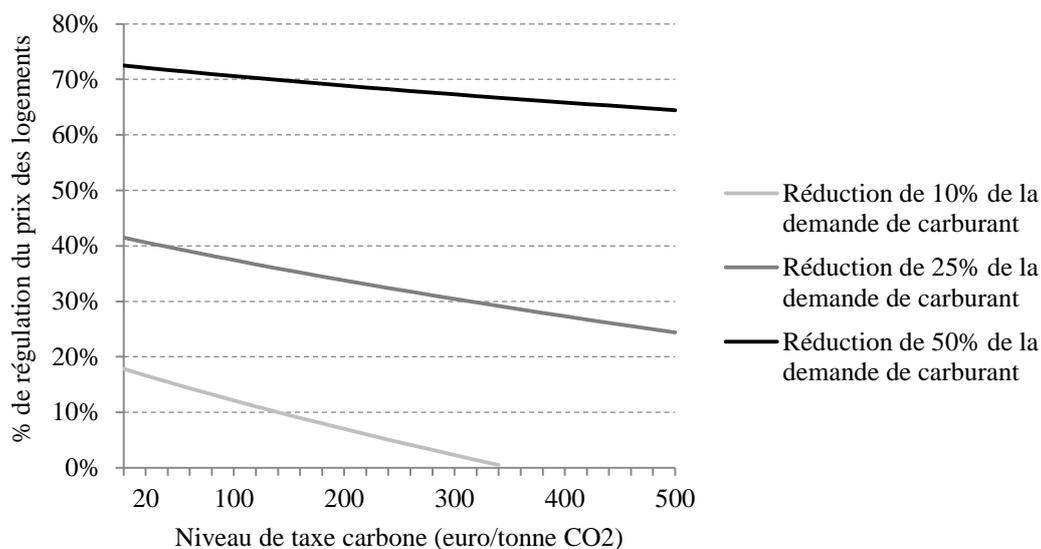
FIGURE 4 – Variation de la demande de carburant en fonction des niveaux de politiques énergétiques τ et λ .



L'analyse du graphique ci-dessus révèle la croissance de ρ par rapport à τ et γ , c'est-à-dire que la demande de carburant diminue lorsque le niveau de taxe augmente, et diminue également lorsque le niveau de régulation du prix des logements augmente. On observe qu'une taxe de 500 euro la tonne de CO₂ émise induit une réduction de la demande de carburant de 13 % et que des prix des logements 30 % plus bas que leur niveau de référence conduirait à une diminution de 17 % de la même demande. La combinaison de ces deux mesures, soit une taxe carbone de 500 euro la tonne et une régulation du prix des logements de 30 %, engendrerait une baisse de la consommation d'énergie liée au transport de 28 %.

La FIGURE 5 propose une coupe horizontale de la FIGURE 4 pour des réductions de la demande de carburant de 10 %, 25 % et 50 % afin de pouvoir analyser plus en détail l'interaction des deux politiques taxe carbone et régulation du prix des logements en fonction des objectifs de maîtrise énergétique à atteindre.

FIGURE 5 – Combinaison requise de politiques énergétiques pour maîtriser la demande de carburant de 10%, 25% et 50%



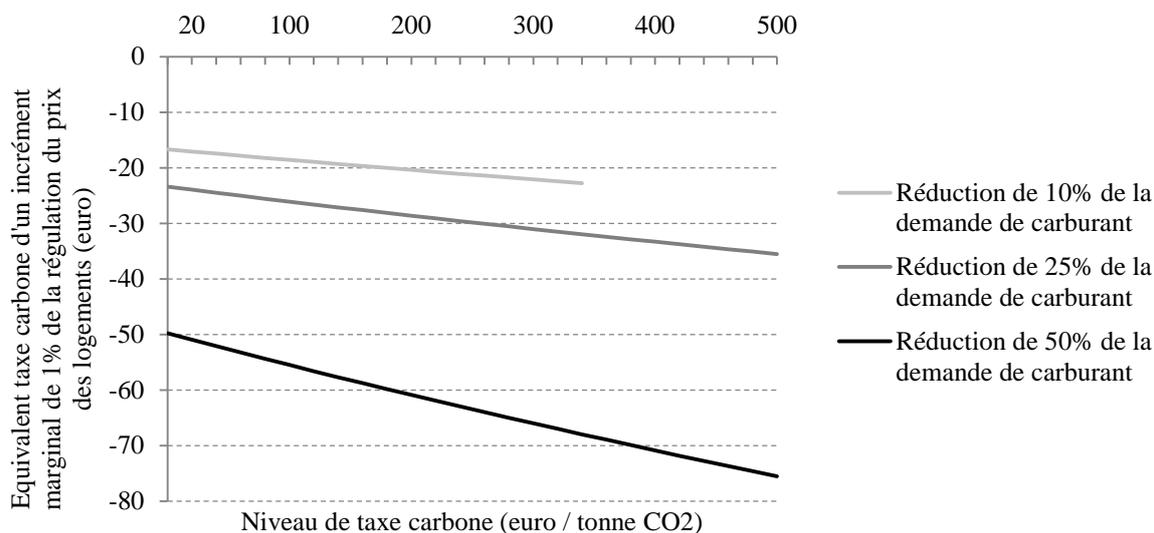
Les courbes de la FIGURE 5 indiquent que :

- une réduction de 10 % de la demande de carburant peut être atteinte soit par une taxe carbone de 352 euro la tonne de CO₂ émise soit en absence de taxe par une régulation de 18 % du prix des logements. Ainsi, pour un objectif de maîtrise de l'énergie de 10 % par rapport à la situation de référence, une diminution de 1% du prix des logements permet en moyenne d'alléger la taxe carbone de 20 euro ;
- face à un objectif de réduire d'un quart, soit de 25 %, la demande de carburant, réguler le prix des logements de 24% permet de baisser le niveau de taxe carbone requis de 1 610 euro la tonne de CO₂ à 500 euro la tonne de CO₂ émise. Chaque pourcentage supplémentaire de diminution du coût des logements engendre ainsi une réduction moyenne de 46 euro de la taxe carbone ;
- enfin, si l'objectif est la division par deux de la consommation de carburant, une baisse de 64 % du prix des logements par rapport à leur niveau de référence induit une réduction drastique du niveau de taxe carbone requis de plus de 15 000 euro la tonne de CO₂ à 500 euro la tonne de CO₂. En moyenne, un pourcent supplémentaire de régulation du prix des logements induit une baisse de 227 euro de la taxe carbone nécessaire pour atteindre l'objectif de réduction de 50 % de la demande de carburant.

Les résultats détaillés ci-dessus montrent que plus les objectifs de réduction de la demande de carburant sont ambitieux, plus l'utilisation d'un levier d'action additionnel par rapport à la taxe carbone s'avère nécessaire. En effet sans la régulation du prix des logements, la division par deux de la consommation d'énergie n'est que très difficilement envisageable au vue des niveaux de taxe carbone requis. Afin de comprendre plus finement l'effet marginal d'une baisse du prix des logements sur le

niveau de taxe requis pour atteindre un objectif fixé de maîtrise de la consommation de carburant, la FIGURE 6 montre la variation de taxe carbone nécessaire face à un incrément de 1 % de la régulation du prix des logements. L'intervalle de niveaux de taxe carbone considérés va de 0 à 500 euro la tonne de CO₂ alors que le niveau absolu de régulation du prix des logements n'est pas limité.

FIGURE 6 – Equivalent taxe carbone d'un incrément marginal de 1 % de la régulation du prix des logements sous contrainte de réduction de 10 %, 25 % et 50 % de la consommation de carburant

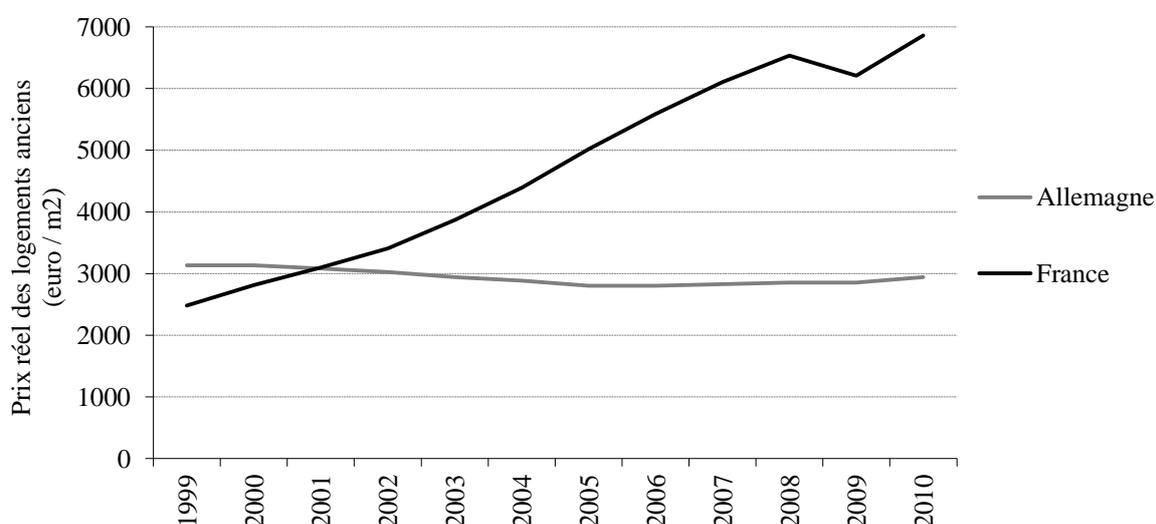


Pour l'ensemble des valeurs de taxe carbone de 0 à 500 euro la tonne de CO₂ émise, une variation de 1 % du prix des logements correspond à un intervalle d'équivalent taxe carbone allant de 20 euro par tonne à 76 euro par tonne. En fonction de l'ambition de l'objectif de réduction de la demande de carburant, les niveaux de régulation du prix des logements sont naturellement de plus en plus élevés mais le graphique révèle que l'équivalent taxe carbone d'une hausse marginale du prix des logements est également de plus en plus élevé : de 17 à 23 euro pour un objectif de maîtrise de la demande énergétique de 10 %, de 23 à 36 euro pour un objectif de 25 % et de 50 à 76 euro pour un objectif de 50 %.

Ces exercices de simulation reposent sur l'hypothèse que les élasticités estimées dans la section IV restent constantes. Notamment, la possibilité de changements structurels et de modification des infrastructures et des technologies de transport impliquant une modification du comportement des ménages n'est pas prise en compte. Toutefois, nos scénarios de signaux-prix pour l'énergie restent relativement modérés puisque les valeurs hautes de taxe carbone que nous explorons conduisent au maximum à une multiplication par deux du prix du carburant. Ceci couplé à l'inertie du secteur des transports permet de défendre l'hypothèse initiale d'élasticité-prix constante à moyen terme et assure la robustesse de nos résultats. Ainsi plus les objectifs de réduction de la consommation de carburant sont ambitieux, plus le recours à un contrôle de l'organisation spatiale via le prix des logements s'avère critique pour la maîtrise de la demande énergétique.

Les forts niveaux de régulation du prix des logements nécessaires pour atteindre les objectifs de réduction de consommation de carburant, de l'ordre de 60 % pour une division par deux de la demande d'énergie, soulève la question de la faisabilité d'une telle diminution. Or, centrée sur les prix de vente, une analyse comparative entre l'évolution des prix des logements en France et en Allemagne met en évidence des variations du même ordre de grandeur entre les deux pays ce qui laisse envisager l'existence de puissants déterminants derrière la formation du marché immobilier sur lesquels agir pour moduler les prix des logements. La FIGURE 7 présente ainsi les trajectoires des prix des logements dans ces deux pays sur la période 1999 à 2010.

FIGURE 7 – Evolutions comparées des prix des logements en France et en Allemagne de 1999 à 2010



Sources: (Bank for International Settlements 2011; Global Property Guide 2011); calculs de l'auteur.

Les prix des logements en France ont plus que doublé depuis 2001 où ils étaient alors équivalents dans les deux pays alors qu'ils sont restés stables en Allemagne. Les facteurs démographiques et économiques, relativement similaires pour ces deux territoires, ne peuvent expliquer à eux seuls une telle différence de trajectoire. Le ratio population sur surface artificialisée étant plus fort en Allemagne qu'en France (2 825 habitants par kilomètre carré contre 2 636 habitants par kilomètre carré selon Eurostat (2009) et des calculs de l'auteur), la pression foncière n'explique pas non plus ces variations. Le contexte institutionnel est donc probablement à l'origine de telles différences entre les prix de vente de logements des deux pays, et offrirait potentiellement la marge d'action pour moduler significativement ces prix.

Ainsi, si la question de la mise en place effective de mesures de contrôle du prix des logements reste critique tant par rapport aux forts niveaux de régulation envisagés que par rapport à la

réalisation même d'une telle régulation, notre analyse : i) a permis de mettre en évidence le rôle clé que peut jouer ce signal dans la maîtrise de la demande de carburant ; et ii) souligne la pertinence d'explorer les mécanismes derrière le contexte institutionnel pour savoir si et comment ils influencent le marché de l'immobilier afin de préciser la faisabilité, l'efficacité et l'impact social d'une politique sur le prix des logements.

VI. CONCLUSION

Ce chapitre étudie le rôle de l'organisation spatiale dans la formation de la demande de transport à travers les trajectoires du prix des logements. En affectant les choix de localisation des ménages, le marché de l'immobilier modifie les distances parcourues et l'accessibilité aux différents modes de transport et impacte la consommation d'énergie liée aux déplacements des agents.

Ce mécanisme est mis en évidence dans un modèle urbain mono-centrique stylisé puis testé économétriquement sur des séries temporelles françaises couvrant la période 1960-2009. Deux modèles à équation simple sont testés pour estimer la demande de carburant. Le premier modèle considère la consommation énergétique per capita comme une fonction du revenu per capita et du prix du carburant alors que le deuxième modèle intègre en plus le prix des logements comme troisième variable explicative. Les modèles présentent tous deux des variables co-intégrées mais seul le deuxième modèle se révèle économétriquement stable ce qui confirme le rôle du coût des logements dans la formation de la demande de carburant.

Nulle sur le court terme, l'élasticité du prix des logements sur le long-terme est estimée à +0,54 contre une élasticité du prix du carburant de -0,20. Comparativement au premier modèle, le deuxième modèle donne une valeur de l'élasticité-revenu plus faible, à savoir 1,00 contre 1,20.

Afin d'évaluer le rôle indirect de l'organisation du territoire dans la formation de la demande de carburant à travers le levier prix des logements, et d'estimer le potentiel de ce mécanisme en termes d'implication politique, des exercices de simulations ont été réalisés en utilisant la régulation du prix des logements comme proxy de politiques de planification urbaine. Les résultats indiquent que ce deuxième mécanisme-prix mis en évidence est du même ordre de grandeur que le mécanisme-prix de l'énergie : une taxe carbone de 500 euro la tonne de CO₂ induirait une réduction de 13 % de la demande de carburant contre 11 % pour une régulation de 20 % du prix des logements. Les simulations montrent que combiner des politiques de prix sur des déterminants à la fois énergétiques et spatiaux permet de réduire considérablement la consommation énergétique liée aux transports, ce qui est indispensable pour pouvoir répondre à d'ambitieux objectifs de maîtrise de la demande d'énergie tout en contrôlant les niveaux de taxe carbone requis.

En testant le potentiel d'une mesure stylisée reposant sur la régulation du prix des logements, ce chapitre conclut ainsi au rôle déterminant de l'organisation spatiale et du secteur logement sur la formation de la demande de carburant. Reposant sur des résultats quantitatifs, notre étude souligne la

pertinence d'explorer les synergies entre options de taxation de l'énergie, politiques spatiales et politiques du logement dans le but d'élaborer des politiques énergétiques et climatiques efficaces pour servir les stratégies ambitieuses de sécurité énergétique et d'atténuation.

Le rôle endogène de l'espace dans la formation de la demande de carburant des ménages est mis en évidence à travers le prix des logements, ce qui offre un levier d'action publique permettant de dépasser la question d'une intervention exogène sur l'organisation spatiale et le débat afférent. On se propose d'explorer cette piste dans le dernier chapitre où ces politiques de taxe et régulation sont modélisées et simulées dans un cadre d'analyse macro-économique à équilibre général. Le bouclage de l'économie permet la prise en compte de rétroactions complexes et permet ainsi de fournir une évaluation robuste de l'impact de ces politiques sur l'ensemble de l'économie, et notamment du rôle de l'espace comme levier indirect de réduction des consommations énergétiques et impacts climatiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Akinboade, O.A., Ziramba, E. & Kumo, W.L., 2008. The demand for gasoline in South Africa: An empirical analysis using co-integration techniques. *Energy Economics*, 30(6), p.3222–3229.
- Alonso, W., 1964. *Location and land use: Toward a general theory of land rent*, Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Bank for International Settlements, 2011. Property Price Statistics. Available at: <http://www.bis.org/statistics/pp.htm>.
- Bento, A.M. et al., 2005. Distributional and Efficiency Impacts of Gasoline Taxes: An Econometrically Based Multi-Market Study. *The American Economic Review*, 95(2), p.282–287.
- Brueckner, J.K. & Fansler, D.A., 1983. The Economics of Urban Sprawl: Theory and Evidence on the Spatial Sizes of Cities. *The Review of Economics and Statistics*, 65(3), p.479–482.
- Capozza, D.R. et al., 2002. Determinants of Real House Price Dynamics. *SSRN eLibrary*. Available at: http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=338869 [Consulté février 11, 2011].
- CCFA, 2011. Parc détenu ou mis à disposition des ménages. Available at: <http://www.ccfa.fr/spip.php?rubrique30>.
- Engle, R.F. & Granger, C.W.J., 1987. Co-Integration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing. *Econometrica*, 55(2), p.251–276.
- Ericsson, N.R. & MacKinnon, J.G., 2002. Distributions of error correction tests for cointegration. *The Econometrics Journal*, 5(2), p.285–318.
- Espey, M., 1998. Gasoline demand revisited: an international meta-analysis of elasticities. *Energy Economics*, 20(3), p.273–295.
- Eurostat, 2009. Land Use and Land Cover Database. Available at: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/lucas/data/database>.
- Girault, M., Fosse, M. & Jéger, F., 2000. Circulation et Consommation de Carburant en France - Estimation détaillée par type de véhicules. Available at: http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/NS131-15-22_cle6caeec.pdf.
- Glaeser, E.L. & Kahn, M.E., 2010. The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of Urban Economics*, 67(3), p.404–418.
- Glaeser, E.L., Kahn, M.E. & Rappaport, J., 2008. Why do the poor live in cities The role of public transportation. *Journal of Urban Economics*, 63(1), p.1–24.
- Global Property Guide, 2011. Available at: <http://www.globalpropertyguide.com/Latin-America/Germany/square-meter-prices>.
- Goodwin, P., Dargay, J. & Hanly, M., 2004. Elasticities of Road Traffic and Fuel Consumption with Respect to Price and Income: A Review. *Transport Reviews*, 24(3), p.275–292.
- Harvey, A.C. & Collier, P., 1977. Testing for functional misspecification in regression analysis. *Journal of Econometrics*, 6(1), p.103–119.
- Hilbers, P. et al., 2008. House Price Developments in Europe: A Comparison. *IMF Working Paper*, 08(211).
- Hughes, J.E., Knittel, C.R. & Sperling, D., 2008. Evidence of a Shift in the Short-Run Price Elasticity of Gasoline Demand. *The Energy Journal*, 29(1), p.113–134.
- IEA, 2007. Energy Use in the New Millennium.
- IEA, 2009. Transport, Energy and CO2: Moving Towrd Sustainability.

- Ingram, G.K., 1998. Patterns of Metropolitan Development: What Have We Learned? *Urban Studies*, 35(7), p.1019–1035.
- INSEE, 2011. Comptes Nationaux - Consommation des ménages.
- Krugman, P.R., 1991. *Geography and trade*, MIT Press.
- Malpezzi, S., Chun, G.H. & Green, R.K., 1998. New Place-to-Place Housing price indexes for U.S. Metropolitan Areas, and Their Determinants. *Real Estate Economics*, 26(2), p.223–274.
- Meot, T., 2009. L'industrie automobile en France depuis 1950 : des mutations à la chaîne. *L'économie française, édition 2009*. Available at: http://www.insee.fr/fr/ffc/docs_ffc/ref/ECOFRA09e.PDF.
- Phillips, A.W., 1957. Stabilisation Policy and the Time-Forms of Lagged Responses. *The Economic Journal*, 67(266), p.265–277.
- Phillips, A.W., 1954. Stabilisation Policy in a Closed Economy. *The Economic Journal*, 64(254), p.290–323.
- Quigley, J.M. & Raphael, S., 2005. Regulation and the High Cost of Housing in California. *The American Economic Review*, 95(2), p.323–328.
- SOES, 2010. La consommation d'énergie et les émissions polluantes liées aux déplacements des ménages. Available at: <http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/donnees-essentielles/societe/menages/la-consommation-denergie-et-les-emissions-polluantes-liees-aux-deplacements.html>.
- Vermeulen, W. & van Ommeren, J., 2009. Does land use planning shape regional economies? A simultaneous analysis of housing supply, internal migration and local employment growth in the Netherlands. *Journal of Housing Economics*, (18), p.294–310.

Chapitre 5 :

Endogénéisation des liens espace - énergie et effets d'équilibre général des politiques climatiques

I. INTRODUCTION

Les chapitres précédents ont permis de mettre en évidence le rôle des choix de localisation dans la formation de la demande énergétique des ménages et de le quantifier (chapitres 1, 2 et 3), et d'identifier les mécanismes sous-jacents à ces choix (chapitre 4). L'objectif de ce dernier chapitre est d'exploiter ces résultats pour réaliser une analyse du rôle effectif de la dimension spatiale dans la stratégie de réduction des consommations énergétiques et de l'impact climatique, ainsi qu'une évaluation économique de l'introduction de cette dimension spatiale. Celle-ci ne sera pas la solution unique à la question énergie-climat mais elle constitue un levier de même ordre de grandeur, on l'a vu dans le chapitre 4, que les autres leviers envisagés traditionnellement, tel que la taxe carbone. Mais cette connexion ré-établie entre les politiques énergétiques et les politiques d'aménagement de l'espace ne fait que renforcer la nécessité d'une analyse en équilibre général. Ce ne sont plus que les prix de l'énergie qui sont en jeu, mais également les prix des logements, soient deux postes cruciaux pour le pouvoir d'achat des ménages. S'il s'agit de jouer à la fois sur une taxe carbone et une maîtrise des prix logements et de la densité urbaine, alors on ne peut éviter de s'interroger sur la façon dont ceci modifie les débats sur le double-dividende des politiques climatiques et la façon dont celles-ci peuvent être utilisées pour accompagner un changement structurel vers des secteurs peu intensifs en énergie mais intensifs en emplois.

Nous ne rentrerons pas ici dans le cœur du débat sur le double dividende parce qu'il n'est pas central pour notre thèse. Nous rappellerons seulement la signification de la distinction entre double dividende au sens fort et au sens faible introduite par Goulder (1995) et les controverses qui emmène un Bovenberg à titrer 'the double-dividend is dead' une introduction d'un ouvrage qui montre les conditions d'un tel double dividende. Cette distinction permet d'énoncer les trois propositions suivantes qui font en fait consensus⁴⁹ :

- un double-dividende au sens faible, c'est-à-dire qui minimise les coûts en bien-être des taxes carbone, est toujours possible en utilisant les revenus de ces taxes pour réduire des fiscalités particulièrement distorsives ; en Europe, c'est principalement par le recyclage avec baisse des charges sociales qu'un tel double dividende est obtenu⁵⁰ ;

- un double dividende au sens fort, c'est-à-dire qui permette une hausse de la consommation et de l'emploi, est en général impossible dans un monde de premier rang et en

⁴⁹ Sur l'expression, en fait précoce, d'un tel consensus, on se reportera au chapitre 8 du deuxième rapport du GIEC (Hourcade and al., 2001).

⁵⁰ Voir le troisième rapport du GIEC pour une synthèse (Hourcade & al., 2001).

économie fermée, sauf si la courbe d'offre de travail est 'backward oriented', c'est-à-dire si l'offre de travail augmente quand le salaire réel baisse (par exemple une augmentation de l'offre de travail féminin pour pallier cette baisse) ;

- un double dividende au sens fort est certes possible dans un monde de deuxième rang (avec rigidité des salaires par exemple) et en économie ouverte mais on ne peut établir de règles générales et la démonstration est forcément empirique. Par ailleurs, puisqu'il s'agit de correction de distorsions préexistantes, la question reste posée de savoir si la suppression de ces distorsions pourrait ou non être effectuée indépendamment de la levée d'une taxe carbone (Guesnerie and Roberts, 1984).

C'est dans cette dernière perspective que se situe l'essai effectué dans ce cinquième chapitre. Le cadre de modélisation macro-économique utilisé permet en effet de croiser les effets de quatre grands paramètres qui laissent à penser que l'économie française peut difficilement être décrite comme une économie fermée et de premier rang : son ouverture au commerce international et aux flux de capitaux, la fiscalité, les imperfections du marché du travail et du marché de l'immobilier. L'espace y est endogénéisé à l'aide des résultats du chapitre 4 et les interactions entre demande énergétique des ménages et organisation spatiale y sont modélisées et calibrées en fonction des conclusions des chapitres 2 et 3. Différentes politiques énergétiques et climatiques mobilisant des mécanismes de prix de l'énergie et des logements sont ensuite simulées.

Cadre d'analyse macro-économique et hypothèses de modélisation des politiques énergétiques et climatiques et de l'endogénéisation de l'espace sont décrits dans la section II. Dans la troisième section sont présentés les résultats des simulations visant à quantifier l'impact d'une régulation du prix des logements tandis que l'articulation entre régulation du prix des logements et taxe carbone est analysée dans la section IV. Interprétations et éléments de conclusion clôturent le chapitre.

II. DESCRIPTION DU CADRE D'ANALYSE MACRO-ECONOMIQUE ET DES HYPOTHESES DE MODELISATION

a. Outil de modélisation IMACLIM-S : rappel de ses principes de base

Le cadre de modélisation utilisé est le modèle IMACLIM-S, développé au CIRED (Combet, 2013; Gherzi and Hourcade, 2006; Gherzi et al., 2011). Nous avons repris ce modèle pour y endogénéiser la dimension spatiale et intégrer les résultats des modèles des chapitres précédents. Combet et al. (2010) décrit ainsi brièvement la philosophie de base du modèle :

« Le modèle IMACLIM-S (Gherzi and Hourcade, 2006 ; Gherzi, 2003 ; Gherzi et al., 2009) est un modèle d'équilibre général calculable conçu pour des exercices de statique comparative (Samuelson, 1947). [...] IMACLIM-S est un *modèle hybride*

(Hourcade et al., 2006) en ce sens que les volumes d'énergie échangés ne sont pas déduits des transactions monétaires, mais résultent d'un effort d'harmonisation des bilans énergétiques et des données de la comptabilité nationale à l'année de référence [...]. »

Une description complète du modèle dont nous sommes partis, modèle calibré sur les données de 2004 (IEA, 2007; INSEE, 2004), est disponible sur le lien suivant :

http://www.imaclim.centre-cired.fr/IMG/pdf/IMACLIM-S_27jan11.pdf

Nous en rappellerons simplement ici les principaux éléments. IMACLIM-S détaille quatre secteurs de production, pétrole brut, carburant, autres énergies et bien composite, un ménage représentatif, un gouvernement, un secteur de l'investissement et un agent étranger qui produit les importations et achète les exportations nationales. Les quatre secteurs de production nationale conjuguent énergie et bien composite, avec le capital et le travail pour produire chacun un bien unique. Le ménage représentatif épargne une proportion fixe de son revenu et arbitre entre consommation de bien composite, de carburant et d'énergie pour son logement.

p_{Yi} le prix à la production domestique du bien i est calculé à partir de la structure de coût pour la production du bien i , définie comme la somme des consommations intermédiaires, du coût du travail, du coût du capital, d'un impôt sur la production, et d'un taux de marge constant calibré à l'année de référence (excédent net d'exploitation) :

$$p_{Yi} = \sum_{j=1}^n p_{Cjji} \cdot \alpha_{ji} + p_{Li} \cdot l_i + p_K \cdot k_i + \tau_{Yi} \cdot p_{Yi} + \tau_i \cdot p_{Yi} \quad (4.18)$$

Pour tenir compte de la non constance des élasticités de substitution sur l'espace de simulation, les arbitrages de la production se font sous l'hypothèse que des asymptotes techniques contraignent les consommations unitaires de facteurs au-dessus de valeurs planchers calibrées sur les données de la comptabilité nationale de 2004. Les parts variables des consommations des facteurs intermédiaires (incluant le travail et capital) sont déterminées par une fonction CES (« *Constant Elasticity of Substitution* ») dont les arguments sont les consommations et prix des biens intermédiaires des différents secteurs nécessaires à la production. La minimisation des coûts unitaires de production débouche sur une formulation des consommations unitaires de facteurs secondaires α_{ji} , de travail l_i et de capital k_i qui s'écrit comme la somme de la valeur plancher, et d'une consommation au-delà de cette valeur, où l'on retrouve l'expression connue des demandes conditionnelles de facteurs

d'une fonction de production CES d'élasticité σ (dont les coefficients sont calibrés à l'équilibre de référence).

$$\alpha_{ji} = \frac{\Theta_i}{\Phi_i} \cdot \left[\beta_{ji} \cdot \alpha_{ji0} + \left(\frac{\lambda_{ji}}{P_{Cjji}} \right)^\sigma \cdot \left(\sum_{j=1}^n \lambda_{ji}^\sigma \cdot P_{Cjji}^{1-\sigma} + \lambda_{Li}^\sigma \cdot P_{Li}^{1-\sigma} + \lambda_{Ki}^\sigma \cdot P_{Ki}^{1-\sigma} \right)^{\frac{1}{\rho}} \right] \quad (4.19)$$

$$l_i = \frac{\Theta_i}{\Phi_i} \cdot \left[\beta_{Li} \cdot l_{i0} + \left(\frac{\lambda_{Li}}{P_{Li}} \right)^\sigma \cdot \left(\sum_{j=1}^n \lambda_{ji}^\sigma \cdot P_{Cjji}^{1-\sigma} + \lambda_{Li}^\sigma \cdot P_{Li}^{1-\sigma} + \lambda_{Ki}^\sigma \cdot P_{Ki}^{1-\sigma} \right)^{\frac{1}{\rho}} \right] \quad (4.20)$$

$$k_i = \frac{\Theta_i}{\Phi_i} \cdot \left[\beta_{Ki} \cdot k_{i0} + \left(\frac{\lambda_{Ki}}{P_{Ki}} \right)^\sigma \cdot \left(\sum_{j=1}^n \lambda_{ji}^\sigma \cdot P_{Cjji}^{1-\sigma} + \lambda_{Li}^\sigma \cdot P_{Li}^{1-\sigma} + \lambda_{Ki}^\sigma \cdot P_{Ki}^{1-\sigma} \right)^{\frac{1}{\rho}} \right] \quad (4.21)$$

avec par commodité d'écriture $\rho=(1-\sigma)/\sigma$.

Cette somme est toutefois modifiée de la prise en compte conjuguée de coefficients de rendements décroissants statiques Θ_i et de progrès technique endogène Φ_i . Les rendements décroissants statiques Θ_i sont supposés s'ajuster aux volumes produits selon des élasticités définies de manière à tenir l'hypothèse d'une tarification au coût marginal. Le coefficient Φ_i traduit l'hypothèse d'un progrès technique endogène neutre au sens de Hicks ; il est élastique à la variation du volume de consommation de capital fixe retenue comme une approximation de celle de l'investissement cumulé. Φ_i est neutralisé (identique à 1) pour les productions énergétiques.

p_{Cij} le prix du bien i consommé par la production de bien j est égal au prix de la production en bien i augmenté des marges commerciales, des marges de transport, des marges spécifiques, de la Taxe Intérieure sur les Produits Pétroliers (TIPP), des autres impôts sur produits et enfin de la taxe sur les émissions de carbone.

$$p_{Cij} = p_i \cdot (1 + \tau_{MCi} + \tau_{MTi} + \tau_{MSCij}) + t_{TIPPCh} + t_{AIPi} + t_{CI} \cdot \gamma_{Cij} \quad (4.22)$$

Les prix à la consommation du bien i pour les ménages (p_{Ci}), les administrations publiques (p_{Gi}) et l'investissement (p_{Ii}), ainsi que les prix à l'exportation (p_{Xi}), sont construits de manière similaire et ne diffèrent que selon s'ils supportent la TVA (un taux moyen identique est appliqué à toutes les consommations d'un même bien) et la fiscalité carbone.

$$p_{Ci} = [p_i \cdot (1 + \tau_{MCi} + \tau_{MTi} + \tau_{MSCi}) + t_{TIPCFi} + t_{AIPi} + t_{CF} \cdot \gamma_{CFi}] \cdot (1 + \tau_{TVAi}) \quad (4.23)$$

$$p_{Gi} = [p_i \cdot (1 + \tau_{MCi} + \tau_{MTi} + \tau_{MSGi}) + t_{TIPPCFi} + t_{AIPi}] \cdot (1 + \tau_{TVAi}) \quad (4.24)$$

$$p_{Hi} = [p_i \cdot (1 + \tau_{MCi} + \tau_{MTi} + \tau_{MSHi}) + t_{TIPPCFi} + t_{AIPi}] \cdot (1 + \tau_{TVAi}) \quad (4.25)$$

$$p_{Xi} = [p_i \cdot (1 + \tau_{MCi} + \tau_{MTi} + \tau_{MSXi}) + t_{TIPPCFi} + t_{AIPi}] \quad (4.26)$$

Le coût du travail facteur de production est égal aux salaires nets w_i augmentés des cotisations sociales salariales et patronales selon un taux unique τ_{CS} (non différencié par production) :

$$p_{Li} = (1 + \tau_{CS}) \cdot w_i \quad (4.27)$$

Les variations de τ_{CS} sont dictées par le produit fiscal de la taxe carbone (recyclage euro pour euro), ou par la contrainte budgétaire publique tandis que celles de w_i sont posées identiques à celles du salaire moyen w , variant selon les conditions du marché de l'emploi. Le coût du capital facteur de production est entendu comme le coût du capital « machine » et est obtenu par la moyenne du prix des biens destinés à l'investissement.

R_{DBAI} le revenu primaire brut des ménages est défini comme l'addition et la soustraction des termes suivants :

- la somme des revenus salariaux nets $w_i l_i Y_i$ (produit des salaires, masse salariale par unité de production et production) ;
- une part ω_K des « revenus du capital » (de l'Excédent Brut d'Exploitation comptable) revenant aux ménages ;
- des transferts sociaux, en trois agrégats (pensions de retraite, allocations chômage, autres transferts sociaux) ;
- des transferts résiduels ;
- un « service de la dette » qui correspond à des revenus de la propriété, revenus fonciers *etc.*). Ce service est le produit de la dette nette D et d'un taux d'intérêt effectif i endogène.

$$R_{DBAI} = w_L \cdot \sum_{i=1}^n w_i \cdot l_i \cdot Y_i + w_K \cdot EBE + \rho_P \cdot N_P + \rho_U \cdot N_U + \rho_A \cdot N + w_{AT} \cdot A_T - i \cdot D \quad (4.28)$$

R_{DB} le revenu disponible brut est obtenu en soustrayant de R_{DBAI} l'impôt sur le revenu T_{IR} dont le taux est supposé constant, et les autres impôts directs acquittés T . R le revenu consommé se déduit alors du revenu disponible brut par soustraction de l'épargne. Le taux d'épargne τ_s est exogène.

Les ménages ne consommant pas de pétrole brut, l'arbitrage de leur demande se résume à une consommation de carburants automobiles, une consommation d'autres énergies qui correspond à une

consommation d'énergie résidentielle, et une consommation de composite. Les demandes des ménages sont composées d'une part fixe représentant le besoin essentiel des ménages et correspondant à 40 % des demandes observées en 2004 et d'une part flexible proportionnelle à 60 % de la demande de référence et déterminée par des fonctions dépendant du revenu des ménages R et des différents prix p_{Ci} des biens.

L'équilibre sur le marché des biens est un simple équilibre comptable entre ressources (production et importations) et emplois (consommation des ménages et des administrations publiques, investissement, exportations).

Le revenu disponible brut des administrations publiques est composé de la somme des prélèvements obligatoires T et de parts exogènes ω_{KG} de l'EBE et ω_{ATG} des 'autres transferts' A_T , à quoi on soustrait les dépenses publiques $p_G G$, un ensemble de transferts sociaux R_U , R_P et R_A (allocations chômage, pensions de retraite et autres allocations) ainsi que le service de la dette $i_G D_G$ (équation (4.29)) :

$$R_{DBG} = T + \omega_{KG} \cdot EBE + \omega_{ATG} \cdot A_T - \sum_{i=1}^n p_{Gi} \cdot G_i - R_P - R_U - R_A - i_G \cdot D_G \quad (4.29)$$

avec T la somme des cotisations sociales, de l'impôt à la production, de la taxe intérieure sur les produits pétroliers, des autres impôts sur produits, de la taxe sur la valeur ajoutée, de l'impôt sur les sociétés, de l'impôt sur le revenu, des autres impôts directs et de la taxe carbone.

La clôture du modèle se fait sur l'offre d'investissement des agents, qui s'adapte mécaniquement à la demande d'investissement des productions. Par la variation des taux d'intérêt elle induit des variations de flux financiers entre agents créditeurs et débiteurs, qui se traduisent ultimement dans l'évolution de leurs positions financières nettes. Dès lors que l'option budgétaire retenue pour le comportement des administrations publiques suppose un quelconque contrôle de l'endettement, un effet en retour est obtenu par l'ajustement des fiscalités qui sont désignées comme les variables de ce contrôle.

b. Modélisation du secteur Logement

Comme décrit ci-dessus, le modèle dont nous sommes partis comprenait quatre secteurs *bien composite*, *pétrole*, *carburants* et *autres énergies*. Le premier travail a consisté à désagréger le secteur *bien composite* de sorte à isoler les secteurs *bâtiment* et *immobilier* en exploitant le travail de Froment (2010). Nous sommes donc passés à un modèle à six secteurs : *bien composite*, *pétrole*, *carburants*, *autres énergies*, *bâtiment* et *immobilier*, cette nouvelle structure ayant pour objectif entre

autres de faire apparaître la variable *prix de l'immobilier* dans le modèle, correspondant au *prix des logements* pour les ménages.

Le secteur *immobilier* inclut uniquement les flux et transactions concernant les locations et ne prend pas en compte les « loyers fictifs » ou « loyers imputés » des propriétaires. La demande en immobilier des ménages correspond à leur consommation de logement. Les fonctions de demande de carburant E_t , énergie résidentielle E_l , et logement L , dépendant du revenu des ménages R et des différents prix p des biens, sont détaillées équations (4.30), (4.31) et (4.32) ; la demande de bien composite correspond au résiduel du revenu après soustraction de l'épargne et des demandes des autres biens. L'exposant 2004 fait référence aux valeurs des variables observées dans la comptabilité nationale de 2004, IPC représente l'indice des prix à la consommation et les exposants correspondent aux élasticités de la demande variable de bien.

$$E_t = 0,4 \cdot E_t^{2004} + (1-0,4) \cdot E_t^{2004} \cdot \left[\left(\frac{R}{IPC} \cdot \frac{1}{R^{2004}} \right)^{a_{E_t}} \cdot \left(\frac{P_{E_t}}{IPC} \cdot \frac{1}{P_{E_t}^{2004}} \right)^{b_{E_t}} \right] \quad (4.30)$$

$$E_l = 0,4 \cdot E_l^{2004} + (1-0,4) \cdot E_l^{2004} \cdot \left[\left(\frac{R}{IPC} \cdot \frac{1}{R^{2004}} \right)^{a_{E_l}} \cdot \left(\frac{P_{E_l}}{IPC} \cdot \frac{1}{P_{E_l}^{2004}} \right)^{b_{E_l}} \right] \quad (4.31)$$

$$L = 0,4 \cdot L^{2004} + (1-0,4) \cdot L^{2004} \cdot \left[\left(\frac{R}{IPC} \cdot \frac{1}{R^{2004}} \right)^{a_L} \cdot \left(\frac{P_L}{IPC} \cdot \frac{1}{P_L^{2004}} \right)^{b_L} \right] \quad (4.32)$$

Les secteurs du bâtiment et de l'immobilier sont liés non seulement par les consommations de biens intermédiaires mais aussi par le taux d'occupation du stock de bâtiments dont dépend le profit du secteur immobilier et donc le prix de l'immobilier. Le stock de bâtiment St_{Bat} correspond à la somme des investissements annuels de capital effectués dans le secteur du bâtiment I_{Bat} sur la période de référence T_{Ref} comme défini dans l'équation (4.33).

$$St_{Bat} = \frac{T_{Ref}}{2} \cdot I_{Bat} \quad (4.33)$$

Le taux d'occupation τ du stock de bâtiments est défini comme le ratio de la surface de logement consommée sur la surface totale existante. Le profil σ du secteur logement, décrit dans l'équation (4.34), est d'autant plus élevé que le taux d'occupation est élevé. On fait l'hypothèse que le profil du secteur de l'immobilier, soit logement et locaux commerciaux, suit le profil du secteur logement. Calibré sur l'année de référence, Ω est un paramètre permettant d'ajuster la relation entre le taux d'occupation τ et le profit σ du secteur qui intervient dans la formation du prix de l'immobilier.

$$\sigma = \Omega \cdot \frac{\tau}{1-\tau} \quad (4.34)$$

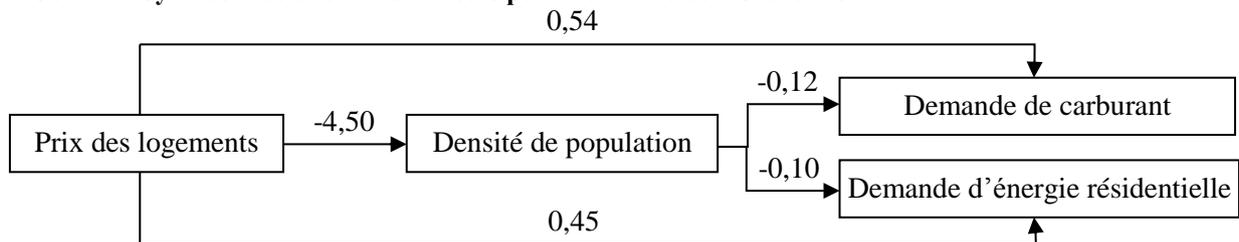
Dans la suite de ce chapitre, le secteur *immobilier* sera appelé secteur *logement* lorsque l'on se référera en particulier aux ménages.

c. Endogénéisation de la dimension spatiale

La différence de consommation entre deux ménages français moyens identiques résidant dans des lieux densité différente atteint au maximum 11,2 % (calcul, détaillé en annexe, effectué à partir des résultats des chapitres 2 et 3). On cherche maintenant à analyser le rôle de l'espace comme dimension endogène de l'économie liée au marché de l'immobilier. Le prix des logements est utilisé comme proxy de l'organisation spatiale et de la densité de population. La relation entre les deux variables est construite et calibrée en utilisant les résultats des chapitre 1 et 4 : l'élasticité de la demande de transport par rapport à la densité est supposée constante et égale à -0,12 (cf. chapitre 1⁵¹) ; de même l'élasticité de la demande de transport par rapport aux prix des logements est supposée constante et égale à 0,54 (résultat du chapitre 4). Ces hypothèses conduisent à une élasticité constante de la densité par rapport aux prix des logements égale à -4,50⁵², élasticité qui va nous permettre d'endogénéiser la dimension spatiale.

Afin de modéliser l'impact d'une politique du prix des logements sur la demande énergétique globale (transport+logement) des ménages, on utilise la relation entre consommation d'énergie et densité de population d'une part (élasticité de -0,12 pour les carburants et -0,10 d'après le chapitre 3 pour l'énergie résidentielle), et prix des logements et densité d'autre part. Cela permet de déterminer l'élasticité des demandes énergétiques par rapport au prix des logements qui sont utilisées dans l'exercice de modélisation. Les différentes valeurs d'élasticité sont présentées sur la FIGURE 1.

FIGURE 1 – Synthèse des élasticités utilisées pour l'exercice de modélisation



⁵¹ On cherche à calibrer l'élasticité de la demande de carburant par rapport à la densité de population. Or les résultats du chapitre 2 concernent l'ensemble des modes de transport, et présentent par ailleurs une surestimation de l'effet de la densité dans le modèle à équation unique. On utilise donc les résultats du chapitre 1 qui correspondent à une moyenne sur un ensemble d'études s'intéressant soit aux véhicules particuliers uniquement, soit à tous les modes de transport.

⁵² Dans notre modèle, l'élasticité de la densité résidentielle par rapport aux prix des logements représente les dynamiques d'ajustement face à un changement des prix de l'immobilier. Le signe négatif indique que lorsque les prix des logements augmentent, les ménages réagissent en s'éloignant du centre ville, où l'espace est disponible. Ce processus de long terme conduit à une diminution de la densité (phénomène d'étalement urbain), en particulier lorsque les coûts de transport restent faibles par rapport aux coûts de logement.

Les nouvelles fonctions de demande de carburant E_t , énergie résidentielle E_l , et logement L sont détaillées dans les équations ci-dessous. La dépendance de la demande de transport aux prix des logements est directement prise en compte et la dépendance de la demande d'énergie résidentielle à la densité de population est modélisée par l'intermédiaire du prix des logements.

$$E_t = 0,4 \cdot E_t^{2004} + (1-0,4) \cdot E_t^{2004} \cdot \left[\left(\frac{R}{IPC} \cdot \frac{1}{R^{2004}} \right)^{a_{E_t}} \cdot \left(\frac{P_{E_t}}{IPC} \cdot \frac{1}{P_{E_t}^{2004}} \right)^{b_{E_t}} \cdot \left(\frac{P_L}{IPC} \cdot \frac{1}{P_L^{2004}} \right)^{c_{E_t}} \right] \quad (4.35)$$

$$E_l = 0,4 \cdot E_l^{2004} + (1-0,4) \cdot E_l^{2004} \cdot \left[\left(\frac{R}{IPC} \cdot \frac{1}{R^{2004}} \right)^{a_{E_l}} \cdot \left(\frac{P_{E_l}}{IPC} \cdot \frac{1}{P_{E_l}^{2004}} \right)^{b_{E_l}} \cdot \left(\frac{P_L}{IPC} \cdot \frac{1}{P_L^{2004}} \right)^{c_{E_l}} \right] \quad (4.36)$$

$$L = 0,4 \cdot L^{2004} + (1-0,4) \cdot L^{2004} \cdot \left[\left(\frac{R}{IPC} \cdot \frac{1}{R^{2004}} \right)^{a_L} \cdot \left(\frac{P_L}{IPC} \cdot \frac{1}{P_L^{2004}} \right)^{b_L} \right] \quad (4.37)$$

c_{E_t} et c_{E_l} sont calibrées sur les valeurs décrites FIGURE 1 à savoir respectivement 0,54 et 0,45. Le détail des autres élasticités est donné en annexe.

Trois hypothèses de base sont retenues pour les exercices de simulation qui suivent :

- i) Fiscalité constante en pourcentage : les taux d'imposition autres que le carbone et les charges sociales restent constants et ne change pas entre la situation de référence et les scénarios simulés ;
- ii) Dépenses publiques constantes en nominal : les dépenses publiques sont stables en valeur nominale par rapport à l'année de référence 2004 ;
- iii) Redistribution de la taxe pour diminuer les cotisations salariales.

III. EFFETS D'EQUILIBRE GENERAL D'UNE REGULATION DU PRIX DES LOGEMENTS

Le premier exercice a pour objectif de simuler la mise en place d'une politique de régulation du prix des logements, d'en analyser l'impact sur l'ensemble de l'économie et le pouvoir d'achat des ménages et, bien sûr, les conséquences en termes de réduction des consommations énergétiques et des émissions associées de gaz à effet de serre. Cette politique se fait par voie réglementaire : l'Etat fixe le prix des logements par rapport au niveau de référence (2004) en déterminant le niveau de réduction requis. Dans le modèle, le profit du secteur *immobilier* s'ajuste proportionnellement (cf. fonction de profit dans l'équation (4.34)) afin de permettre l'obtention du prix des logements désiré. Les scénarios ont été réalisés pour des réductions de 5, 10, 15 et 20 % des prix des logements par rapport à leur niveau de référence de 2004.

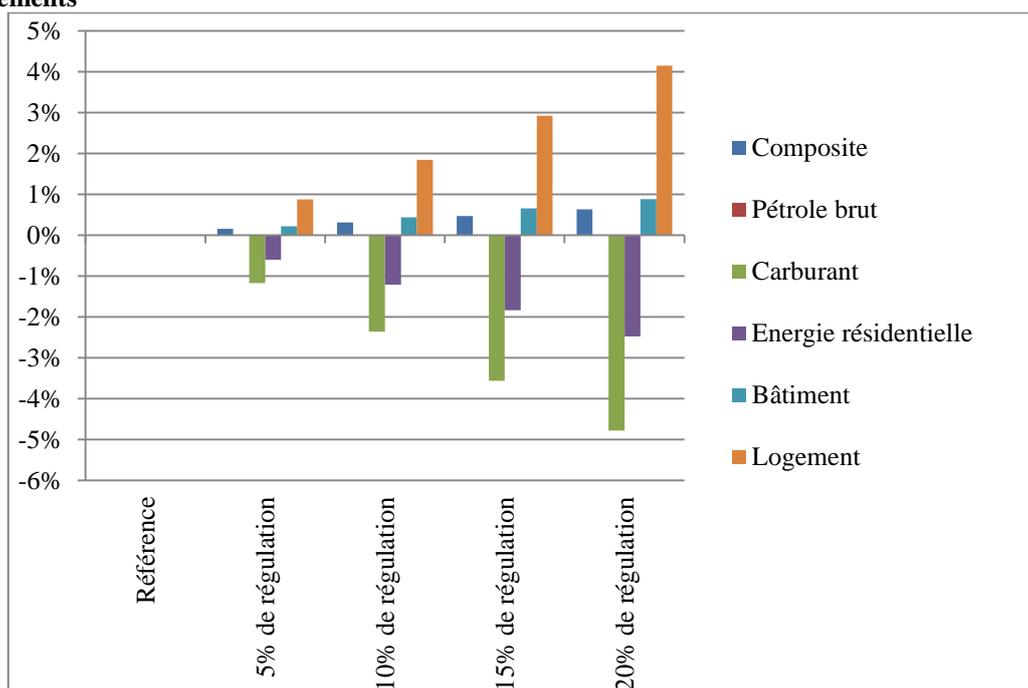
Le mécanisme déclenché par cette baisse est une augmentation de demande de logement des ménages et une hausse de la production du secteur en quantité (TABLEAU 1). De plus, on note une baisse légère de l'ensemble des prix, directement due à la régulation pour le secteur de l'immobilier, et indirectement pour le bien composite qui profite d'une baisse des coûts des biens intermédiaires immobiliers. Face à cette baisse généralisée, le commerce extérieur croît très légèrement et la hausse de la demande domestique se traduit par une augmentation de l'ensemble des productions en quantité, hormis pour l'énergie (carburant et énergie résidentielle) dont les demandes sont directement liées au prix des logements (FIGURE 2). Ces augmentations ne se répercutent néanmoins pas toujours en valeur étant donné la baisse des prix : seul le composite voit sa production en valeur augmenter avec le niveau de régulation du prix des logements, la hausse de la production en quantité l'emportant sur la baisse des prix.

TABLEAU 1 – Evolution de la production et de la consommation des ménages en cas de régulation du prix des logements

	Référence	5% de régulation	10% de régulation	15% de régulation	20% de régulation	V ^c	
Composite	Production (q ^a)	2,927	2,932	2,936	2,941	2,946	+
	Production (v ^b)	2,652,246	2,654,440	2,656,689	2,658,990	2,661,339	+
	Demande des ménages (q)	793	795	797	799	802	+
	Demande des ménages (v)	815,896	817,618	819,385	821,197	823,054	+
Pétrole brut	Production (q)	1	1	1	1	1	
	Production (v)	305	305	305	305	305	
	Demande des ménages (q)	-	-	-	-	-	
	Demande des ménages (v)	-	-	-	-	-	
Carburant	Production (q)	46	46	45	45	44	-
	Production (v)	18,502	18,271	18,037	17,800	17,560	-
	Demande des ménages (q)	30	29	28	27	27	-
	Demande des ménages (v)	33,958	33,037	32,109	31,174	30,231	-
Energie résidentielle	Production (q)	83.72	83.21	82.70	82.18	81.64	-
	Production (v)	42,654	42,362	42,065	41,763	41,455	-
	Demande des ménages (q)	38.240	37.430	36.604	35.761	34.902	-
	Demande des ménages (v)	30,610	29,939	29,256	28,561	27,853	-
Bâtiment	Production (q)	117.34	117.60	117.85	118.12	118.38	+
	Production (v)	180,017	180,410	180,809	181,213	181,624	+
	Demande des ménages (q)	-	-	-	-	-	
	Demande des ménages (v)	-	-	-	-	-	
Logement	Production (q)	1,506.81	1,519.95	1,534.56	1,550.90	1,569.33	+
	Production (v)	94,893	90,904	86,914	82,925	78,937	-
	Demande des ménages (q)	787.000	787.410	787.843	788.302	788.791	+
	Demande des ménages (v)	50,053	47,575	45,096	42,615	40,134	-
Indice des prix	100.0%	99.7%	99.3%	99.0%	98.7%	-	
Variation du prix de production composite par rapport à la référence		-0,07 %	-0,14%	-0,22%	-0,29%		
Revenu disponible brut des Ménages	1,094,930	1,092,168	1,089,434	1,086,729	1,084,051	-	
PIB nominal	1,757,149	1,754,666	1,752,219	1,749,806	1,747,427	-	
PIB réel	1,757,149	1,760,543	1,764,000	1,767,524	1,771,119	+	

^a (q) : en quantité ; ^b (v) : en valeur ; ^c V : sens de variation.

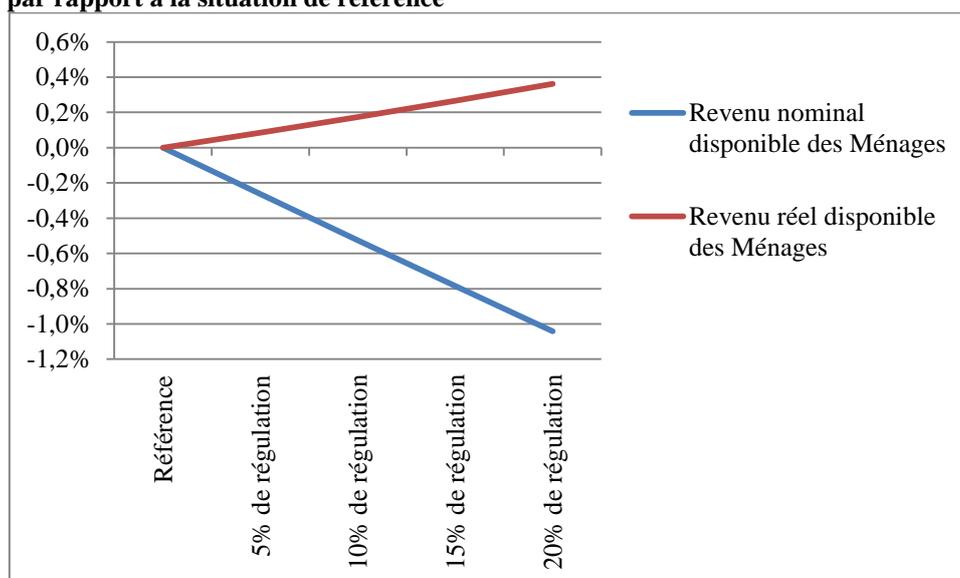
FIGURE 2 – Variation des productions sectorielles en quantité en fonction du niveau de régulation du prix des logements



Le mécanisme positif d'augmentation des consommations et du commerce extérieur est contrebalancé par le fait que la baisse du prix des logements conduit à une diminution du profit du secteur *immobilier*. Or ce profit est redistribué à hauteur de 30 % aux ménages et la maîtrise du prix des logements influence négativement le revenu agrégé des ménages (bien sûr l'impact est de signe différent selon qu'on est propriétaire ou locataire). Cette réduction directe entraîne une baisse de la capacité d'épargne des ménages, et donc une diminution de la capacité de financement des ménages. Les investissements diminuent en valeur mais pas en quantité en raison de la baisse du prix du bien composite. La dette représentant la somme sur la période de référence des capacités de financement des ménages, ces derniers sont moins créditeurs lorsque l'Etat régule le prix des logements que sans régulation et les ménages subissent une deuxième baisse du revenu de la baisse des intérêts qu'ils perçoivent pour leurs créances.

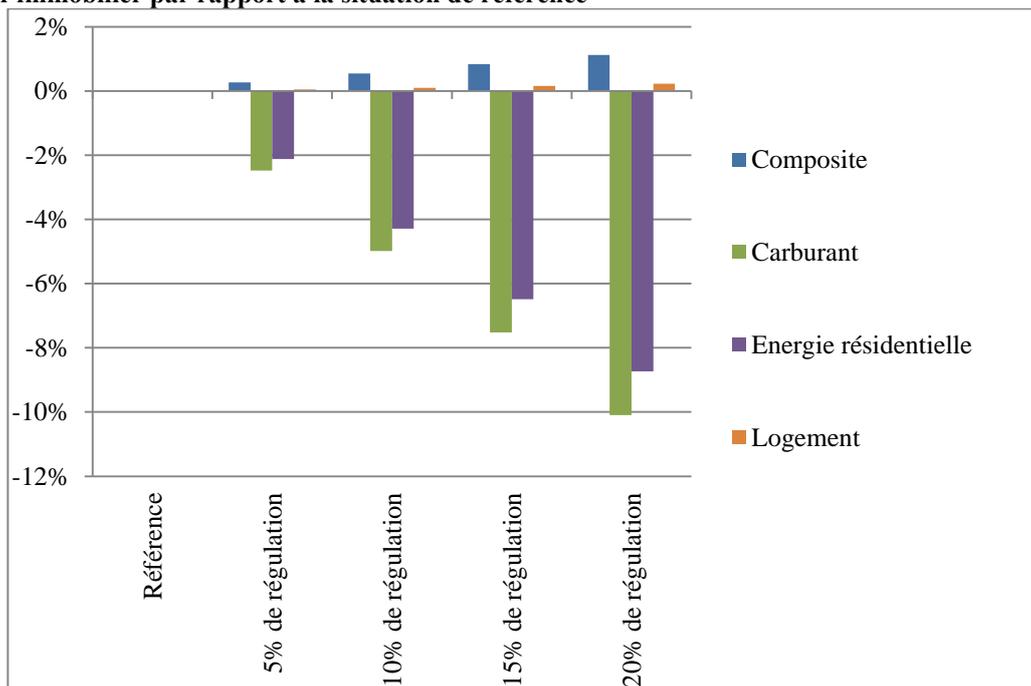
L'impact final pour le revenu agrégé des ménages reste toutefois positif : la hausse de la production dans l'ensemble des secteurs (hors carburant et énergies résidentielles) et notamment pour le bien composite entraîne une hausse des besoins de travail et une diminution du chômage (de 9,58 % à 9,16 % dans le cas d'une régulation du prix des logements de 20 %). Avec l'élasticité du salaire au taux de chômage calibrée à 10 %, cette baisse du chômage est associée à une hausse légère des salaires. La FIGURE 3 représente l'évolution nette des revenus nominaux et réels des ménages.

FIGURE 3 – Evolution nette du revenu des ménages en fonction du niveau de régulation du prix des logements par rapport à la situation de référence



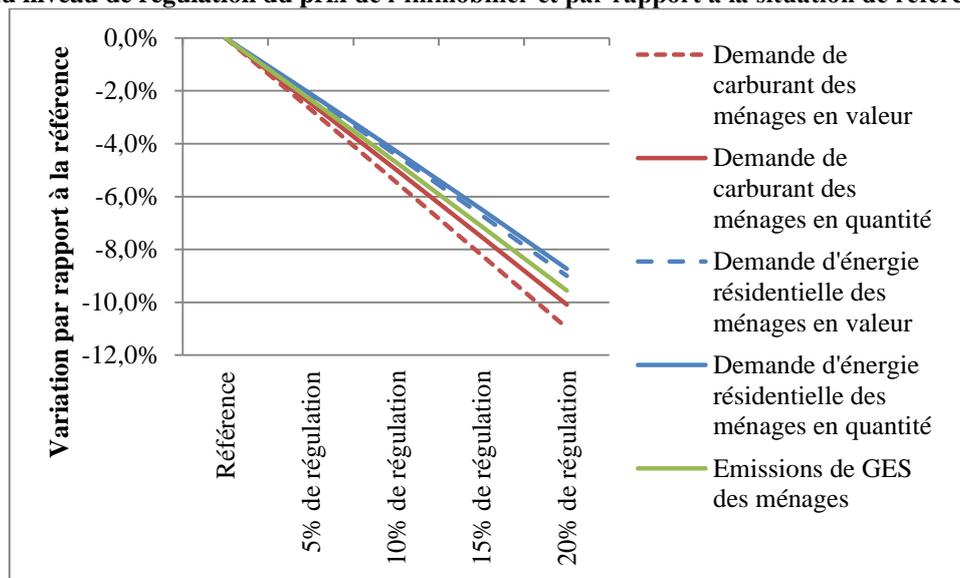
Au total, la réduction des prix du secteur immobilier déclenche ainsi deux mécanismes qui ont deux effets contraires sur les demandes sectorielles des ménages : i) une diminution des prix ; et ii) une diminution du revenu des ménages. Au vu des élasticités-prix retenues pour la part flexible de la demande des ménages, l'effet agrégé est positif pour le secteur immobilier (la demande en surface augmente) et négative en quantité et (de façon plus importante) en valeur pour les demandes énergétiques résidentielle et de transport. Enfin, le résiduel de revenu non consommé, consacré au bien composite, augmente de même que la consommation de bien composite (FIGURE 4) en raison de la baisse des prix de l'immobilier et des consommations plus faibles d'énergie entraînées par un habitat plus dense.

Figure 4 – Evolution en quantité des consommations des ménages en fonction du niveau de régulation du prix de l'immobilier par rapport à la situation de référence



Comme l'illustre la FIGURE 4, la consommation d'énergie des ménages diminue considérablement en fonction du niveau de régulation du prix des logements. C'est le résultat de la modélisation du lien entre prix des logements et demandes de carburant et d'énergie résidentielle dans un cadre intégré. La FIGURE 5 détaille les variations en quantité et en valeur de la consommation d'énergie des ménages, ainsi que l'évolution des émissions de gaz à effet de serre des ménages. Leur demande de carburant diminue de 0 à 10 % en fonction du niveau de maîtrise du prix de l'immobilier alors que la consommation d'énergie pour le logement baisse quant à elle de 0 à 9 %. Dépendantes du contenu carbone de l'une et l'autre des consommations, les variations des émissions de gaz à effet de serre varient de 0 à 9,6 %.

FIGURE 5 – Evolution de la demande de carburant et des émissions de gaz à effet de serre des ménages en fonction du niveau de régulation du prix de l’immobilier et par rapport à la situation de référence



Ces résultats confirment le poids des interactions entre immobilier et consommation énergétique dans un cadre multisectoriel et bouclé macro-économiquement. Tout d’abord, on retrouve l’impact attendu à savoir la réduction de la demande d’énergie (carburant et énergie résidentielle) des ménages en réaction à la diminution du prix de l’immobilier : cet impact reste du premier ordre une fois incluses les interactions intersectorielles. Se dessine alors le potentiel d’une réflexion intégrée où les politiques de sécurité énergétique et d’atténuation du changement climatique pourraient jouer des effets positifs d’une maîtrise du prix de l’immobilier : hausse de l’activité des secteurs non énergétiques, hausse des besoins de main-d’œuvre, diminution du chômage, allègement du budget logement et énergie qui permet aux ménages de libérer du pouvoir d’achat au profit de leur consommation de bien composite.

IV. MAITRISE DU PRIX DES LOGEMENTS ET TAXE CARBONE : ROLE CLE DE L’ESPACE DANS LA REDUCTION DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES ET DES EMISSIONS ASSOCIEES

Dans cette section, nous cherchons à explorer le potentiel de cette mesure comme politique complémentaire à la mise en place d’une taxe carbone. Pour ce faire, nous commencerons par examiner les effets d’équilibre général d’une taxe carbone recyclée en baisse des charges sociales prise en dehors de toute mesure de régulation des prix de l’immobilier, avant d’analyser l’effet combiné des deux politiques. Bien sûr, les résultats obtenus sont contingents au calibrage numérique d’IMACLIM-S, mais le point important dans cet exercice comparatif est d’examiner comment les mécanismes mis en évidence dans la section précédente modifient le bilan global d’une politique climatique.

a. Effets d'équilibre général d'une taxe carbone

La taxe carbone mise en place concerne l'ensemble des acteurs de l'économie, ménages et entreprises. Elle a un impact sur les consommations des ménages via les prix de l'énergie. Cet impact est proportionnel au contenu carbone de chaque secteur par unité produite, contenu calibré sur l'année de référence 2004. Pour les consommations de biens, l'impact des prix est directement reporté sur les demandes finales par l'intermédiaire des élasticités-prix. En ce qui concerne les entreprises, la variation des prix des biens intermédiaires induite par la taxe déclenche une modification de l'appareil productif en défaveur de l'énergie carbonée et en faveur des autres facteurs de production. Les scénarios réalisés reposent sur l'hypothèse d'une redistribution de la taxe carbone sous forme de baisse des cotisations salariales. L'objectif sous-jacent est multiple : utiliser les recettes de la taxe pour favoriser le facteur travail par rapport aux autres facteurs de production, augmenter la compétitivité des entreprises françaises par rapport à l'international et *in fine* stimuler l'emploi.

Le TABLEAU 2 montre l'évolution des principaux paramètres qui caractérisent l'économie entre un scénario de référence hors-taxes et une taxe carbone de 200 €/tonne_{CO2}. Ce niveau a été choisi parce que, dans l'ensemble des travaux conduits au CIRED à partir du modèle IMACLIM-S (Combet, 2013 ; Combet et al., 2010 ; Rocard and al., 2009), 200 €/tonne_{CO2} est le niveau au-delà duquel le « second dividende » d'une taxe carbone atteint un plateau, voire décroît, parce que l'on s'approche d'asymptotes technologiques induisant des rendements décroissants de la taxe, où les effets positifs du recyclage ne peuvent plus compenser les effets négatifs de la hausse des coûts de production entraînée par le renchérissement des prix de l'énergie.

TABLEAU 2 – Variations de variables clé en cas d'une taxe carbone de 200 €/tonne_{CO2}

	Référence	Taxe de 200	Variations
	2927	2960	1,10 %
	1	1	0,00 %
Production (en quantité)	46	37	-23,40 %
	84	73	-14,09 %
	117	118	0,88 %
	1507	1513	0,43 %
		7,80	7,87
Prix de production du bien composite	906	897	-1,00%
Exportation du bien composite	421	423	0,54 %
	815 896	811 542	-0,54 %
Demande de ménages (en valeur, million d'euro)	33 958	52 714	35,58 %
	30 610	51 061	40,05 %
	50 053	49 588	-0,94 %
		793	795
Demande de ménages (en quantité)	30	26	-14,99 %
	38	37	-4,08 %
	787	787	0,02 %

L'activité de l'ensemble des secteurs, hormis les secteurs énergétiques (2 % du PIB) progresse. On note que l'objectif qui justifie la redistribution de la taxe sous forme de réduction des charges salariales a été doublement atteint : l'intensité en emploi du secteur du bien composite a augmenté de

près de 1 %, et les exportations dans ce même secteur ont également augmenté, d'un demi-point. Soit deux effets positifs pour un secteur pesant pour 89 % du PIB dans l'économie de référence.

Le point crucial ici est la baisse du prix de production du bien composite déclenché principalement par le fait que, si une partie de la taxe carbone retombe *in fine* sur les coûts de production (hausse des salaires pour rattraper la perte de pouvoir d'achat causée par une énergie plus chère), une autre partie retombe sur les revenus non salariaux, revenus de rentes (parmi lesquels les rentes immobilières) et touche la partie de l'épargne qui s'investit sur des placements à l'étranger. Un deuxième facteur important de double dividende est bien sûr la baisse des importations d'hydrocarbures qui est ici de 13 %.

On retrouve ainsi le double dividende de la taxe carbone décrit par Gherzi et Hourcade (2000) et Combet (2013). Si la consommation de bien composite des ménages reste contrainte en valeur par l'augmentation du budget énergie, la baisse des prix de production dans ce secteur permet une augmentation de cette même consommation en quantité. La baisse des prix de production du bien composite permet également d'augmenter l'emploi via une meilleure compétitivité des productions nationales sur le marché domestique et sur les marchés internationaux. La baisse des coûts du travail favorise par ailleurs une augmentation de l'intensité en main-d'œuvre de la production globale (mélanges à ce niveau d'agrégation d'effets techniques de recours à des technologies plus 'travaillistiques' et d'effets de structure où les activités intensives en main-d'œuvre voient leur part augmenter dans le produit national). Cette baisse du chômage se traduit par une hausse du salaire net réel en raison d'un renforcement du pouvoir négociation des salariés et cette hausse renforce le mécanisme vertueux du système.

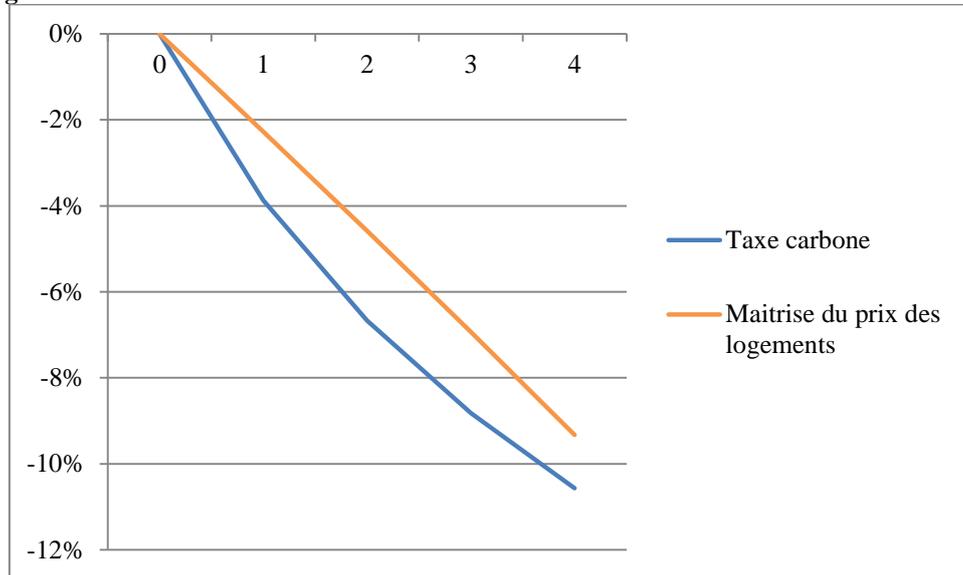
Dans un modèle qui traite de façon explicite la dimension spatiale, ce mécanisme enclenché par une taxe carbone est renforcé par la baisse du prix des logements et une moindre hausse de la facture énergétique permise par la hausse de la densité spatiale. Ces deux paramètres permettent de libérer une part plus importante du budget des ménages pour la consommation de bien composite.

b. Maitrise du prix de l'immobilier et taxe carbone : deux leviers et deux outils complémentaires

Dans cette section, les mécanismes en jeu ayant été explicités, on teste plusieurs scénarios de politiques énergétiques en combinant intervention réglementaire de l'Etat sur le secteur immobilier et incitation économique directe via la mise en place d'une taxe carbone pour les ménages. Les niveaux de régulation simulés s'échelonnent de 0 à 20 % alors que les valeurs retenues pour la taxe carbone atteignent 400 €/t_{CO2} dans un premier temps pour saisir l'évolution de déplacement des résultats environnementaux sur un spectre large de valeur numérique des variables d'action. La FIGURE 6 présente les résultats en termes de réduction de la demande d'énergie des ménages face à la mise en place d'une taxe carbone et à la régulation du prix des logements. Les niveaux de 0 à 4 correspondent

respectivement aux niveaux 0, 100, 200, 300 et 400 €/t_{CO2} et 0, 5, 10, 15 et 20 % de régulation du prix des logements.

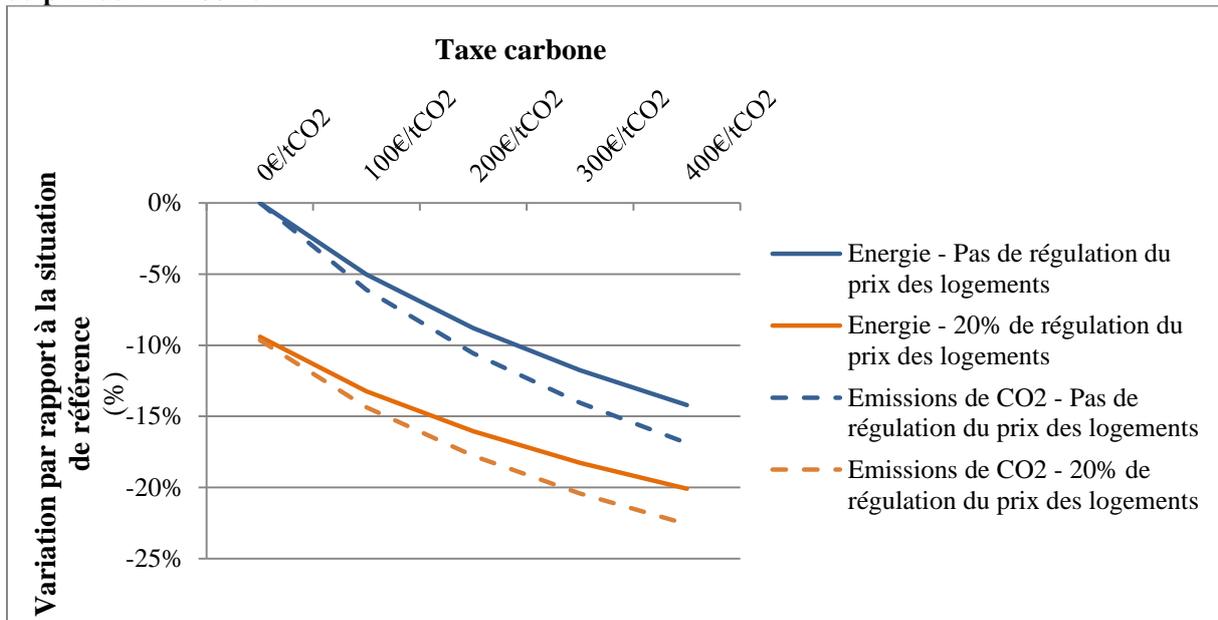
FIGURE 6 - Variation de la demande d'énergie des ménages face à une taxe carbone et à une régulation du prix des logements



A travers son effet sur les prix, la taxe carbone permet d'atteindre une réduction de plus de 10 % de la demande énergétique totale des ménages. En ce qui concerne la modification des choix de localisation par l'intermédiaire d'une intervention sur le prix des logements, une régulation de 20 % correspond à une baisse de 9 % de la consommation d'énergie. Ainsi, en termes de maîtrise de la demande, l'action potentielle de l'Etat sur le marché de l'immobilier est du même ordre de grandeur que l'effet d'une taxe carbone.

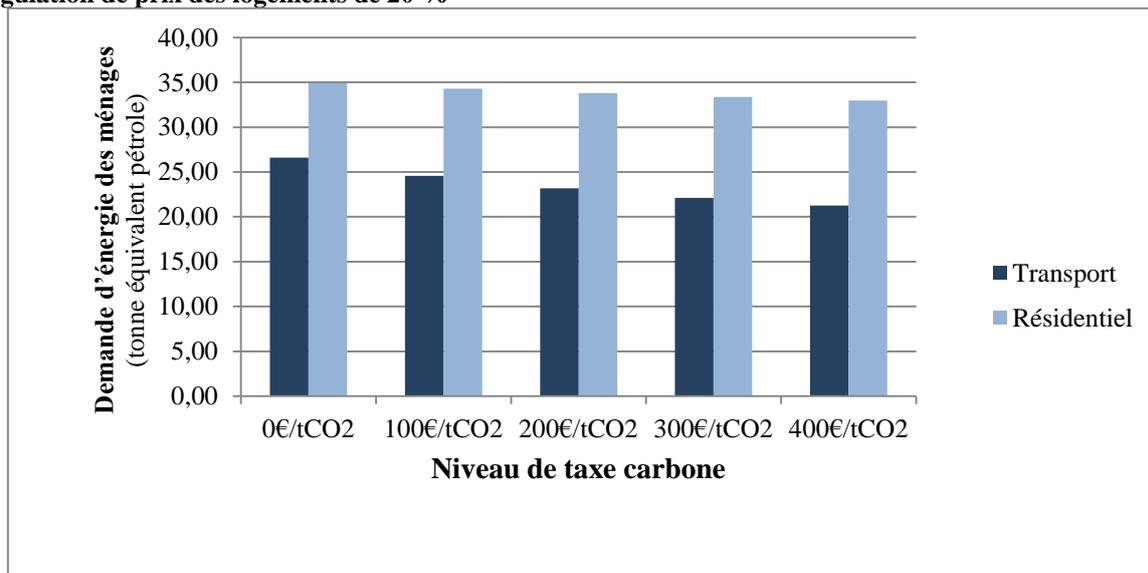
Explorons maintenant le rôle de la dimension spatiale dans la conception d'une stratégie nationale de maîtrise de l'énergie. La FIGURE 7 révèle l'impact des choix de localisation sur les consommations pour différentes valeurs de taxe carbone.

FIGURE 7 - Comparaison de l'impact énergétique et climatique d'une taxe carbone sans et avec régulation du prix de l'immobilier



Comme illustré sur la FIGURE 7, introduire le levier spatial dans l'effort de maîtrise de l'énergie permet d'effectuer de 6 à 9 % d'économies d'énergie supplémentaires et de 6 à 10 % pour les émissions de CO₂. Les réductions atteintes en termes d'émissions sont supérieures aux réductions de demandes énergétiques du fait de la décarbonation de l'appareil productif induite par la taxe carbone. L'impact des politiques de maîtrise des prix des logements et de taxe carbone des deux secteurs clé, à savoir Transport et Logement, est détaillé sur la FIGURE 8.

FIGURE 8 – Demande d'énergie sectorielle des ménages en fonction du niveau de taxe carbone en cas de régulation de prix des logements de 20 %



L'analyse des effets d'équilibre général sera conduite, elle, en prenant comme base de référence une taxe carbone de 200 €/tonne_{CO2} à laquelle on rajoute une régulation du prix de l'immobilier de 10 % qui, on l'a vu, conduit à un résultat du même ordre de grandeur du point de vue des consommations d'énergie (et de la baisse des émissions de CO₂, fonction du contenu carbone de l'énergie dans le cas de la régulation des prix alors qu'elle est directement activée avec une taxe carbone). Au-delà des gains en termes d'économie d'énergie et de réduction d'émissions de gaz à effet de serre, on s'intéresse maintenant à l'évolution de l'ensemble des secteurs et notamment à la consommation de bien composite par les ménages et à l'emploi. Le TABLEAU 3 détaille l'évolution de paramètres clé lors de la simulation.

TABLEAU 3 – Variations de variables clé en cas d'une taxe carbone de 200 €/tonne_{CO2} et d'une régulation du prix de l'immobilier de 10 %

		Réf.	200€/t _{CO2}	V _{Ref} *	200€/t _{CO2} et 10 % de régulation	V _{Ref} *
Production (en quantité)	Composite	2 927	2 960	1,11 %	2 966	1,34 %
	Pétrole brut	1	1	0,00 %	1	0,00 %
	Carburant	46	37	-18,96 %	37	-20,59 %
	Energie résidentielle	84	73	-12,35 %	73	-13,36 %
	Bâtiment	117	118	0,88 %	119	1,23 %
	Logement	1 507	1 513	0,43 %	1 538	2,09 %
Intensité en travail du bien composite		7.80	7.87	0,97%	7,79	0,86%
Prix de production du bien composite		906	897	-0,99%	897	-1,03%
Exportation du bien composite		421	423	0,55%	423	0,57%
Demande de ménages (en valeur, million d'euro)	Composite	815 896	811 542	-0,53 %	815 268	-0,08 %
	Carburant	33 958	52 714	55,23 %	50 386	48,38 %
	Energie résidentielle	30 610	51 061	66,81 %	49 089	60,37 %
	Logement	50 053	49 588	-0,93 %	45 101	-9,89 %
Demande de ménages (en quantité)	Composite	793	795	0,33 %	799	0,83 %
	Carburant	30	26	-13,04 %	25	-16,66 %
	Energie résidentielle	38	37	-3,92 %	35	-7,57 %
	Logement	787	787	0,02 %	788	0,12 %

*V_{Ref} : Variation par rapport à la situation de référence

Sans surprise, au vu des simulations précédentes, la combinaison des deux mesures (taxes carbone et baisse des prix de l'immobilier) permet une hausse de la production de l'ensemble des secteurs, secteurs énergétiques exceptés qui rappelons-le représentent 2 % du PIB à la situation de référence. Si on compare les résultats à une situation de taxe carbone seule, on note une augmentation additionnelle de l'activité des secteurs du bâtiment et du logement en réaction à la baisse des prix des logements, mais également une augmentation additionnelle du secteur du bien composite. La demande de composite des ménages augmente de près d'un point lorsque l'on combine taxe carbone et maîtrise du prix de l'immobilier contre un tiers de point sinon. On retrouve ici les mécanismes mis en évidence dans la section précédente : le budget des ménages est moins contraint par la hausse de la facture énergétique, en raison de la régulation des prix des logements et de choix de localisation vers une organisation spatiale plus dense contribuant à des besoins énergétiques moindres. Le pouvoir d'achat ainsi libéré favorise davantage la consommation de bien composite des ménages. Comme le prix du bien composite est réduit par le recyclage de la taxe carbone, cette hausse de la demande intérieure

s'adresse aux productions nationales qui par ailleurs recouvrent une productivité supérieure sur les marchés internationaux et permet ainsi une augmentation du commerce extérieur. La balance commerciale s'améliore d'autant plus que les importations d'hydrocarbures diminuent de 15 %.

V. CONCLUSION

En utilisant un cadre macro-économique bouclé, les exercices conduits dans ce dernier chapitre ont permis de montrer les synergies et potentiels de complémentarité de politiques sectorielles (telle que la politique de l'immobilier) et politiques énergétiques et climatiques à travers la dimension spatiale et les choix de localisation. Ils ne constituent qu'un travail exploratoire, dans le prolongement des travaux exposés dans le chapitre précédent, pour fournir un premier cadre d'analyse des combinaisons entre politiques énergétiques et politiques spatiales et d'identifier les effets principaux et les mécanismes en jeu.

Le fait qu'on retrouve dans un cadre intégré les résultats du chapitre précédent sur l'intérêt énergétique et environnemental de jouer à la fois sur les prix du carbone et les prix de l'immobilier ne constitue pas une surprise. Une analyse intégrée permet simplement de vérifier que le maniement conjoint de ces deux variables d'action n'engendre pas d'effets pervers qui amoindrieraient leur efficacité respective par rapport à leur maniement solitaire. Bien au contraire, le fait qu'une régulation de 20 % du prix des logements induise 9 % d'économies supplémentaires à celles réalisées sous une taxe de 400 €/t_{CO2} prise isolément montre qu'il est possible de réduire le niveau de taxe carbone nécessaire pour un objectif environnemental, et d'éviter ainsi de rentrer dans les zones où la taxe carbone a un rendement fortement décroissant, voire négatif du point de vue macro-économique.

C'est sur les mécanismes d'équilibre général que les résultats enregistrés sont les plus importants. L'articulation des mesures simulées induit des effets positifs additionnels comme notamment une activité accrue du secteur du bien composite dont la demande des ménages est plus forte. Par ailleurs, la combinaison de la maîtrise du prix de l'immobilier à la taxe carbone a pour effet de soulager les contraintes pesant sur le budget des ménages et renforce le cercle vertueux qui, *via* une baisse des prix du bien composite, renforce la compétitivité de l'économie et favorise sa réorientation vers un « bien composite » plus intensif en emploi.

Ce surplus additionnel apparaît modeste en valeur absolue (0,22 % du PIB) mais cette valeur agrégée ne capture pas son importance. On sait, c'est la force de l'argument théorique développé en économie de premier rang, que le double dividende au sens fort ne peut être important. En tant que tel, l'attention qui lui est accordée ne paraît pas justifiée. En revanche, comme on le voit bien dans l'étude de Combet et al. (2010), toute taxe carbone (et en fait toute politique de réduction des émissions de CO₂ conduisant à une augmentation du coût de l'énergie) se traduit par des effets très différenciés selon les secteurs et catégories de population. Il convient donc de mettre en place des mesures d'exemptions ou de compensation pour atténuer les effets redistributifs négatifs des politiques

climatiques et celles-ci sont d'autant plus faciles à financer que ces politiques sont fondées sur un paquet de mesures favorables à l'emploi, à la consommation et à la croissance. On a en effet alors à la fois une compensation entre effets positifs et négatifs du point de vue de distribution des revenus (hausse de la facture énergétique et mais baisse des coûts des loyers) et une marge de manœuvre additionnelle pour des modulations complémentaires. Celles-ci certes réduiraient le 'double dividende' au niveau agrégé, mais permettraient de faire passer des mesures qui sans cela ne seraient pas acceptées.

En d'autres termes, la palette du décideur public s'agrandit de même que la plage de négociation pour un compromis social global autour des politiques environnementales. Ce chapitre, qui s'en tient à fournir un premier exercice intégrant les résultats de la thèse à un niveau agrégé, ne pouvait viser à apporter des réponses à ces questions. Mais, en montrant que l'effet d'équilibre général d'une combinaison de mesures est supérieur à celui obtenu par la taxe carbone seule, il esquisse des pistes à creuser dans des travaux ultérieurs. L'outil de simulation constitué, permettant le dialogue entre choix de localisation, prix des logements et dynamiques macro-économiques, ouvre la porte à de futures analyses tant dans le prolongement des questions posées que sur d'autres problématiques telles que par exemple le découplage entre valeur foncière et valeur immobilière pour faire apparaître la valeur de l'efficacité énergétique.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME, 2007. Les chiffres clés du bâtiment.
- ANAH, 2008. Modélisation des performances énergétiques du parc de logements – Etat du parc en 2008.
- Burney, N.A., 1995. Socioeconomic development and electricity consumption A cross-country analysis using the random coefficient method. *Energy Economics* 17, 185–195.
- Combet, E., 2013. Fiscalité carbone et progrès social. Application au cas français.
- Combet, E., Gherzi, F., Hourcade, J.-C., Thubin, C., 2010. La fiscalité carbone au risque des enjeux d'équité.
- Froment, O., 2010. Modelling Energy Efficiency in Residential Buildings with Closed Housing Markets: A Static CGE Approach.
- Gherzi, F., 2003. Changement technique et double dividende d'écotaxes : Un essai sur la confluence des prospectives énergétique et macro-économique.
- Gherzi, F., Hourcade, J.-C., 2000. Le rôle du changement technique dans le double dividende d'écotaxes. *Économie & prévision* 143, 47–68.
- Gherzi, F., Hourcade, J.-C., 2006. Macroeconomic consistency issues in E3 modelling: the continued fable of the elephant and the rabbit. *The Energy Journal Special issue n.2*, 27–49.
- Gherzi, F., Thubin, C., Combet, E., 2011. Le Modèle IMACLIM-S - Version 2.3.
- Goulder, L.H., 1995. Environmental taxation and the double dividend: A reader's guide. *Int Tax Public Finan* 2, 157–183.
- Guesnerie, R., Roberts, K., 1984. Effective Policy Tools and Quantity Controls. *Econometrica* 52, 59.
- Hourcade, J.-C., al., 2001. Estimating the Costs of Mitigating Greenhouse Gases, in: *Climate Change 2001: Mitigation: Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press.
- Hourcade, J.-C., Jaccard, M., Bataille, C., Gherzi, F., 2006. Hybrid Modeling: New Answers to Old Challenges. *The Energy Journal Special issue n.2*, 1–11.
- IEA, 2007. Bilan énergétique de la France en 2004, in: *Bilans Énergétiques Des Pays De l'OCDE*. International Energy Agency, p. II.62.
- INSEE, 2004. Tableau entrée-sortie (TES) & tableau économique d'ensemble (TEE). Les comptes de la Nation en 2004 - Base 2000.
- INSEE, 2008. Recensement de la population 2008.
- INSEE, 2010. Fiche thématique - Revenus.
- Jones, D.W., 1986. Urbanization and energy use in economic development. *Energy* 10, 29–44.
- Lenzen, M., Wier, M., Cohen, C., Hayami, H., Pachauri, S., Schaeffer, R., 2006. A comparative multivariate analysis of household energy requirements in Australia, Brazil, Denmark, India and Japan. *Energy* 31, 181–207.
- MEEDDM, 2008. Baisse des consommations d'énergies de chauffage dans les logements depuis 2001. Notes de synthèse du SESP N° 170 29–34.

Parikh, J., Shukla, V., 1995. Urbanization, energy use and greenhouse effects in economic development: Results from a cross-national study of developing countries. *Global Environmental Change* 5, 87–103.

Rocard, M., al., 2009. Rapport de la conférence des experts et de la table ronde sur la contribution Climat et Énergie.

ANNEXES

a. Densité résidentielle et demande énergétique globale

1) Synthèse de la littérature empirique

Lorsque l'on s'intéresse au lien entre densité résidentielle et demande énergétique multisectorielle, que peu d'études proposent des évaluations empiriques. Ces analyses sont principalement réalisées à l'échelle du pays sur des données soit cross-section soit de panels. Les résultats quant au rôle de la densité sont mitigés. Utilisant différentes techniques d'estimation, Jones (1986) et Burney (1995) exploitèrent des données cross-section incluant pays développés et en voie de développement et ne trouvèrent pas d'effet significatif de la densité sur la formation de la demande énergétique des pays. Parikh & Shukla (1995) tirèrent des conclusions similaires à partir de tests empiriques réalisés sur un panel de pays développés et en développement. En revanche, des analyses longitudinales ont permis à Lenzen et al. (2006) de mettre en évidence un effet significatif de la densité dans la formation de la demande énergétique de cinq pays. Leurs travaux reportent ainsi une élasticité-densité de la consommation d'énergie négative s'échelonnant de -0,01 à -0,08 pour quatre des pays étudiés et une élasticité positive égale à 0,07 pour le cas de l'Inde. Une synthèse des méthodes d'estimation, caractéristiques des données et résultats des études mentionnées ci-dessus est présentée dans le TABLEAU 4.

TABLEAU 4—Estimations empiriques de l'effet de la densité résidentielle sur la demande énergétique multisectorielle

Auteurs	Méthode d'estimation	Période	Pays	Effet de la densité sur la demande d'énergie	Elasticité
(Jones, 1986)	Régression multivariée	1980	59 pays développés	+ ou 0	
(Burney, 1995)	Estimation de coefficients aléatoires	1990	93 pays développés et en développement	0	
(Parikh & Shukla, 1995)	Régression logarithmique double	1965–1987	78 pays développés et en développement	0	
(Lenzen et al. ,	Régression multivariée	1993–1999	Australie	-	-0,01
			Brésil	-	-0,08
			Danemark	-	-0,11
			Inde	+	0,07
			Japon	-	-0,04

Comme le montre le TABLEAU 4, l'analyse comparative des différents travaux proposant une estimation empirique de la densité résidentielle sur la demande énergétique multisectorielle ne permet pas de tirer de conclusions quant à la significativité d'une part, et au signe et à l'amplitude éventuels d'autre part, de cette relation. Nous nous proposons ici d'apporter des éléments de réponse quant à

l'effet de la densité de population sur la demande énergétique bi-sectorielle (transport+logement) des ménages.

2) Evaluation empiriques intégrée du rôle des déterminants spatiaux dans la demande énergétique des ménages

Définition du ménage français moyen

Les travaux des chapitres 2 et 3 ont permis de déterminer la demande énergétique des ménages français respectivement pour leurs déplacements et pour leur logement comme une fonction de leurs caractéristiques socio-économiques et de la densité de population de leur commune de résidence. Or le rôle de l'organisation spatiale dans la formation de ces demandes s'est avéré dans les deux cas nettement significatif et négatif. Notamment, une différence d'un facteur 2 de la densité est estimée correspondre en moyenne à une différence de 10 à 12,4 % de la consommation d'énergie d'un ménage pour ses déplacements, et à une différence de 6,4 à 8 % de sa consommation d'énergie résidentielle. Toutefois, chacun de ces résultats sectoriels provient d'estimations calculées pour les caractéristiques moyennes de deux bases de données différentes, l'Enquête Nationale Transports et Déplacements 2007-2008 et l'Enquête Nationale Logement 2006. Il a été envisagé de fusionner les deux bases en une seule, en créant des classes de ménages pour construire une correspondance entre enquêtes, mais cette solution a été abandonnée en raison de son manque de robustesse supplémentaire malgré les efforts à déployer par rapport à la méthode finalement retenue et décrite ci-dessous.

Afin d'harmoniser les estimations et de pouvoir conclure sur l'impact intégré de l'organisation spatiale sur la demande énergétique globale des ménages, cette section prend comme référence les caractéristiques socio-économiques moyennes d'un ménage français en 2008, dont le détail est donné dans le TABLEAU 5.

TABLEAU 5 – Données utilisées comme caractéristiques du ménage français moyen en 2008

Caractéristiques socio-économiques	
Revenu annuel (€)	34 450
Nombre d'unité de consommation ⁵³	1, 56
Age de la personne de référence	
< 30 ans	11, 8 %
de 30 à 39 ans	17, 1 %
de 40 à 49	19, 0 %
de 50 à 64	26, 3 %
> 65 ans	25, 7 %
Niveau d'éducation de la personne de référence ⁵⁴	
Aucun diplôme	18, 7 %

⁵³ La variable d'unité de consommation est définie selon les standards de l'OCDE. Le nombre moyen d'unité de consommation en 2008 en France a été calculé en utilisant le revenu disponible annuel moyen par ménage (34 450 €₂₀₀₈) et le niveau de vie moyen (22 110 €₂₀₀₈) fournis par l'INSEE (INSEE, 2010).

⁵⁴ A défaut de disposer de la ventilation des ménages par niveau d'éducation de la personne de référence, on utilise la ventilation de l'ensemble de la population française en 2008 (INSEE, 2008).

<i>Certificat d'études primaires (CEP)</i>	11,5 %
<i>Brevet d'études du 1er cycle (BEPC) ou BE, ou brevet des collèges</i>	6,4 %
<i>CAP, BEP ou autre diplôme de ce niveau</i>	24,0 %
<i>Baccalauréat professionnel</i>	3,8 %
<i>Baccalauréat technique ou technologique</i>	3,8 %
<i>Baccalauréat général</i>	8,0 %
<i>Niveau Bac+2</i>	11,5 %
<i>Niveau supérieur à Bac+2</i>	12,4 %
Nationalité de la personne de référence ⁵⁵	
<i>Français de naissance, y compris par réintégration</i>	87,6 %
<i>Français par acquisition</i>	5,7 %
<i>De nationalité de l'Union européenne des 15 (hors France)</i>	1,9 %
<i>De nationalité des pays entrés en 2004 dans l'Union européenne</i>	0,9 %
<i>De nationalité algérienne, marocaine ou tunisienne</i>	2,0 %
<i>De nationalité d'Afrique (hors Maghreb)</i>	0,7 %
<i>De nationalités autres ou apatride</i>	1,2 %
Présence d'enfant	33,3 %

Sources : (INSEE, 2010, 2008) ; calculs de l'auteur.

De plus, les variables de contrôle présentes dans la fonction de demande énergétique associée au logement (définie au chapitre 3) sont également calibrées :

- le nombre de Degré Jour Unifié en France est fixé à 2250, soit la moyenne observée en France sur la période 1984-2006 (ADEME, 2007; MEEDDM, 2008) ;
- la part du parc de logements construits après 1975 est estimé en 2008 à 41,4 % (ANAH, 2008).

3) Demande énergétique par ménage

Soit E_T la demande énergétique du ménage moyen M utilisée pour ses besoins de mobilité et E_L la consommation d'énergie de son logement. En conservant les notations des chapitres précédents, à savoir CES comme liste des caractéristiques socio-économiques du ménage, d la densité de population de la commune de résidence du ménage et CV la liste des deux variables de climat et d'année de construction du logement, on a avec t et l deux fonctions déterminées par les résultats des chapitre 2 et 3 :

$$E_T = t(CES, d) \quad (4.38)$$

$$E_L = l(CES, d, CV) \quad (4.39)$$

De ces deux équations et des données détaillées ci-dessus concernant les caractéristiques socio-économiques du ménage français moyen en 2008 et des valeurs des deux variables de contrôle,

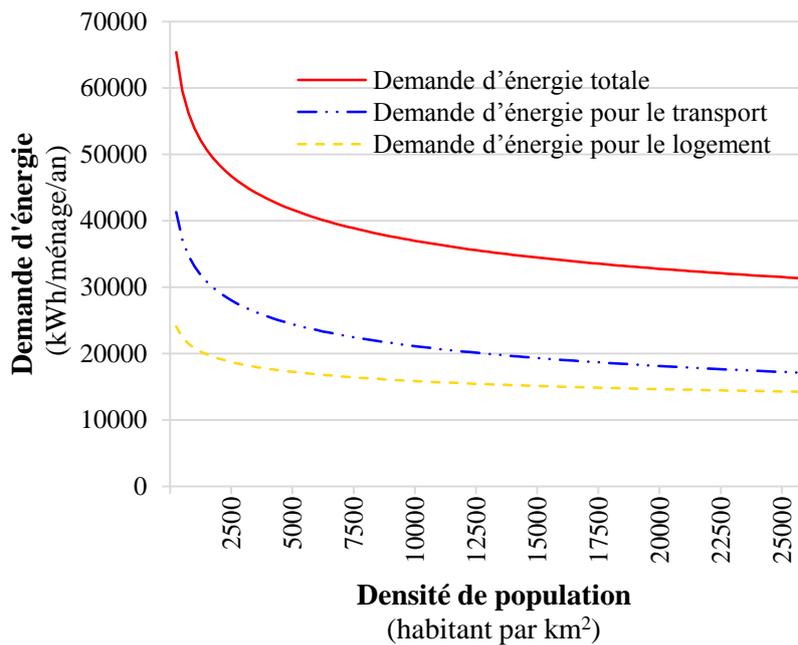
⁵⁵ A défaut de disposer de la ventilation des ménages par nationalité de la personne de référence, on utilise la ventilation des familles par nationalité de la personne de référence fournie par le recensement 2008 (INSEE, 2008).

on détermine alors la demande énergétique globale E comme la somme des consommations liées à la mobilité et au logement :

$$E = E(d) = E_T(CES_M, d) + E_L(CES_M, d, CV_M) = t(CES_M, d) + l(CES_M, d, CV_M) \quad (4.40)$$

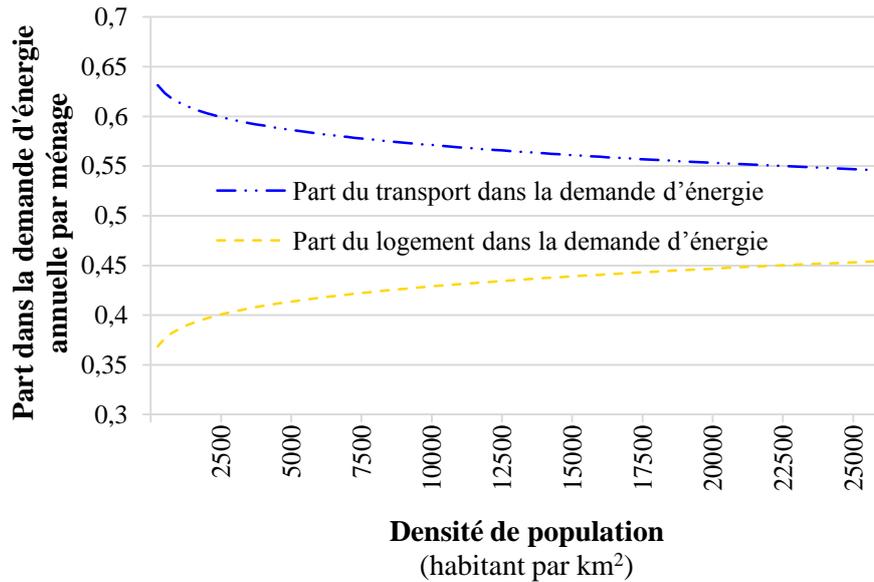
La FIGURE 9 représente les variations de la demande énergétique globale du ménage en fonction de la densité de population, et la décompose comme la somme des consommations énergétiques liées au logement et aux transports.

FIGURE 9 – Demande d'énergie totale du ménage, demande d'énergie pour le logement et demande d'énergie pour le transport en fonction de la densité de population



Somme de deux fonctions décroissantes avec la densité de la commune de résidence, la demande énergétique globale du ménage est également plus faible dans les zones denses que dans les zones moins denses. La FIGURE 10 représente la part de chaque secteur dans la formation de la consommation globale.

FIGURE 10 – Part respective des secteurs Transports et Logement dans la demande énergétique du ménage



Le secteur des transports, représentant environ 55 à 65 % de la demande énergétique globale du ménage comme illustré sur la FIGURE 10, a un poids légèrement plus important que le secteur du logement. Cette différence s’amenuise toutefois avec la densité et plus la densité de population est élevée, plus la part du logement dans la consommation d’énergie totale du ménage est importante. Or si la densité a un impact significatif et négatif sur la demande énergétique de chacun des secteurs, le poids relatif de chaque secteur est un des facteurs intervenant sur l’évaluation intégrée de cet impact sur la demande énergétique cumulée. L’équation (5.12) rappelle la définition du taux de variation utilisé aux chapitres 2 et 3 pour comparer les consommations de deux ménages identiques résidant à une densité d et une densité $(1+\alpha)d$ et les figures 11, 12 et 13 représentent ces taux de variation 2 à 2 pour les demandes d’énergie des transports, du logement et totale.

$$TV(a, d) = \frac{E_n((1+a) \times d) - E_n(d)}{E_n(d)} \quad (4.41)$$

FIGURE 11 – Taux de variation des demandes sectorielles en fonction de α et de la densité

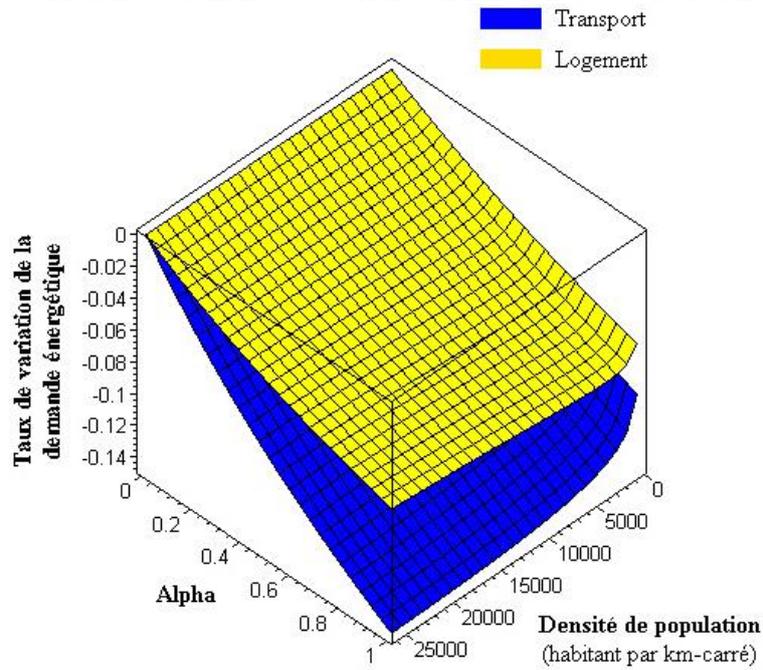


FIGURE 12 – Taux de variation des demandes de logement et totale en fonction de α et de la densité

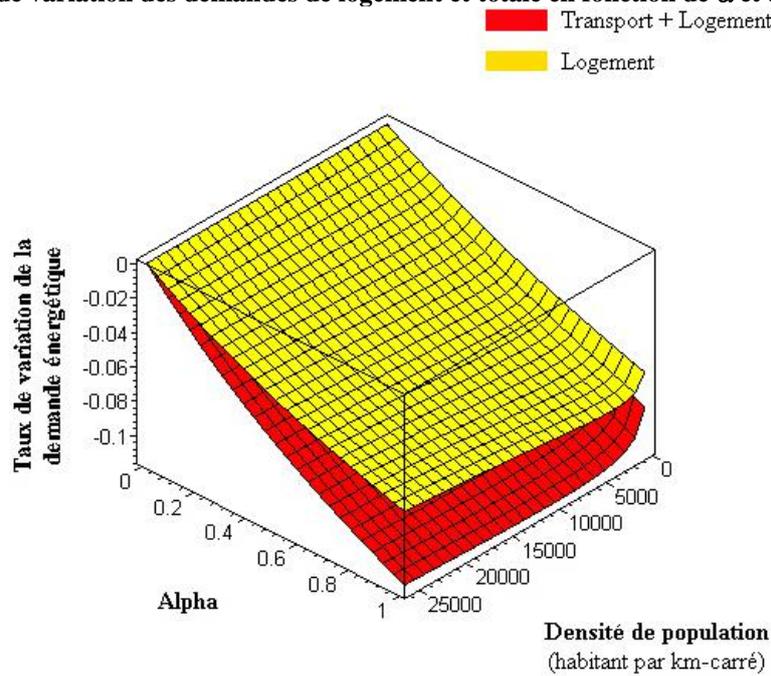
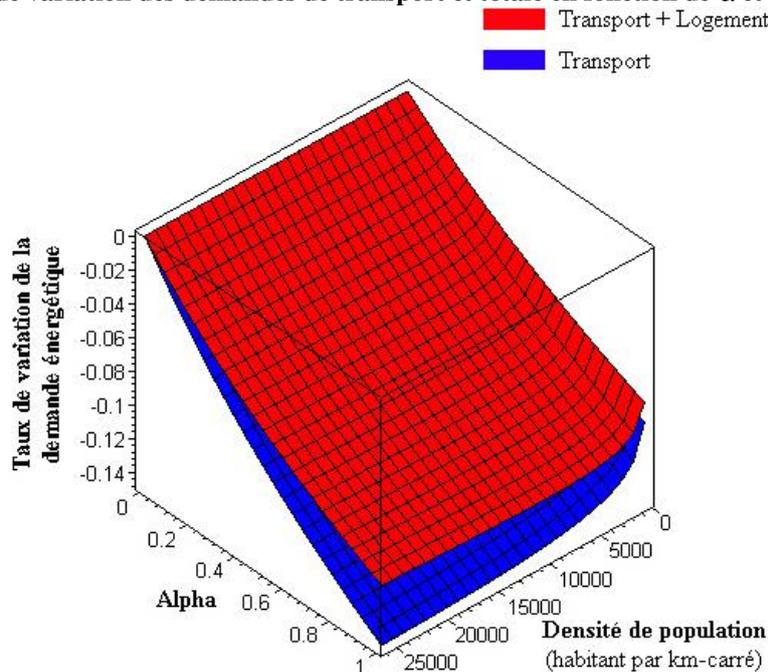


FIGURE 13 – Taux de variation des demandes de transport et totale en fonction de α et de la densité



Avec les caractéristiques socio-économiques retenues, correspondant à celles d'un ménage moyen en France en 2006, le taux de variation de la demande énergétique transport s'échelonne de 0 à -14,7 % pour une augmentation de la densité jusqu'à 100% et des valeurs de densité atteignant 26 000 habitants par km². Comme le montre la FIGURE 11, il est plus important que le taux de variation de la demande énergétique logement qui lui s'échelonne de 0 à -6,9 %. L'impact intégré de la densité sur la demande énergétique totale est intermédiaire, moins élevé que l'impact relatif au secteur des transports (FIGURE 13) mais plus élevé que celui relatif au secteur du logement (FIGURE 12). Ainsi, si l'on compare deux ménages identiques résidant à deux densités différentes, d et $(1+\alpha)d$, la différence de consommation entre ces deux ménages s'échelonne de 0 à -11,2 %. Cette différence varie fortement en fonction de la valeur de α considérée, comme le révèlent les FIGURE 14, Figure 15, FIGURE 16 et FIGURE 17 représentant le taux de variation des trois demandes énergétiques pour des différences de densité respectivement de 10 %, 25 %, 50 % et 100 %.

FIGURE 14 – Taux de variation des demandes énergétiques logement, transport et totale pour $\alpha=0,1$

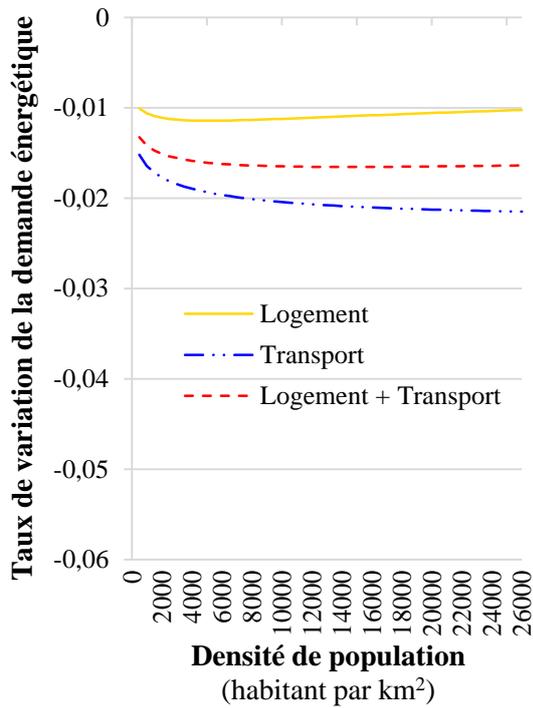


FIGURE 15 - Taux de variation des demandes énergétiques logement, transport et totale pour $\alpha=0,25$

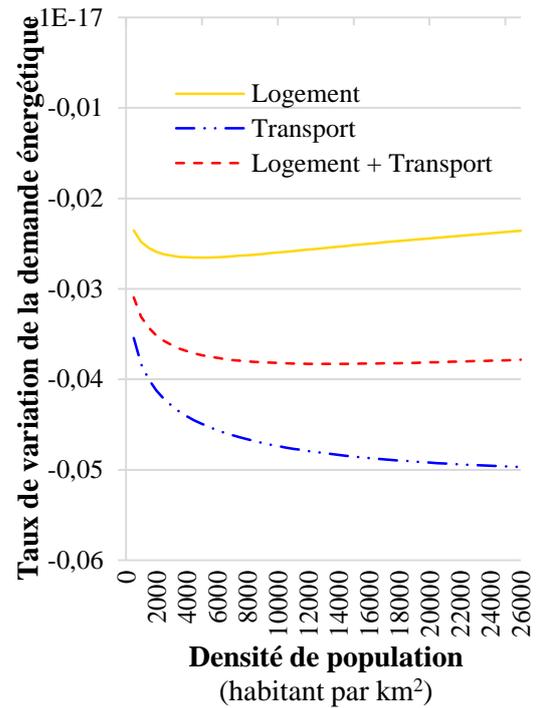


FIGURE 16 - Taux de variation des demandes énergétiques logement, transport et totale pour $\alpha=0,50$

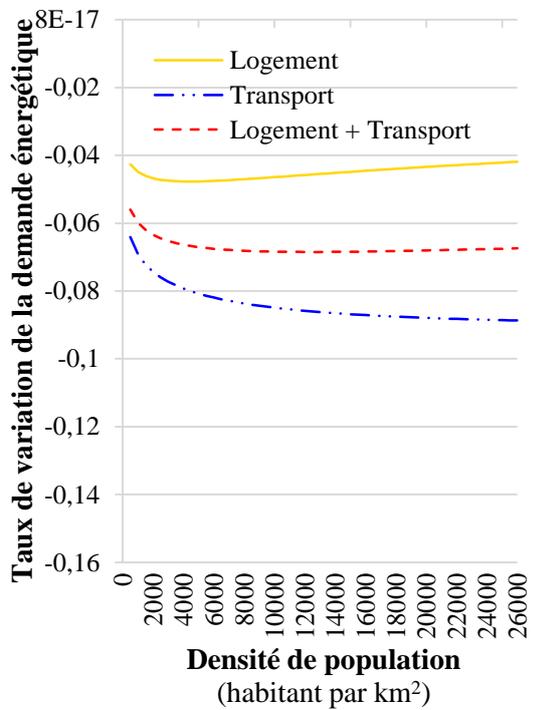
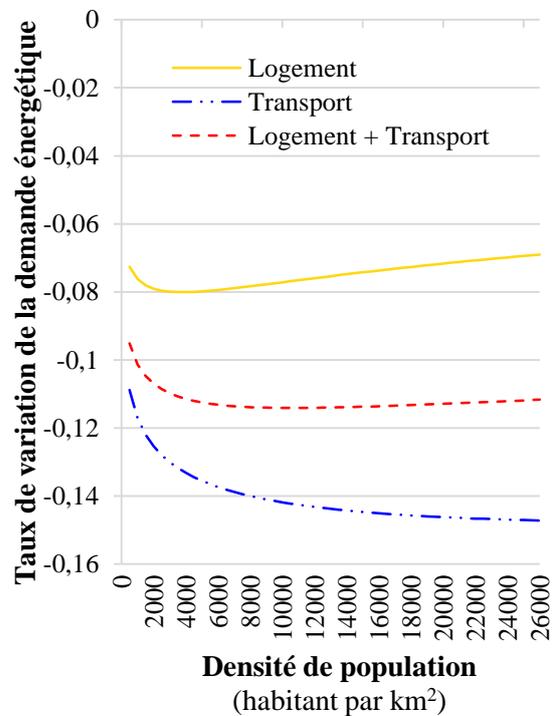


FIGURE 17 - Taux de variation des demandes énergétiques logement, transport et totale pour $\alpha=1$

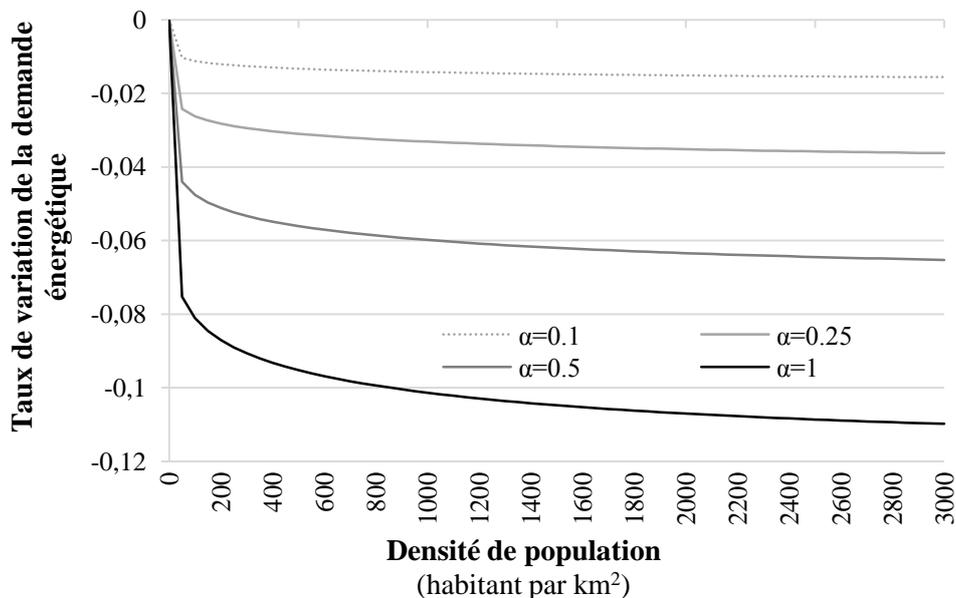


Les Figures présentées ci-dessus révèlent que :

- une différence de densité de 10 % induit un différentiel de consommation énergétique de l'ordre de 1 à 2 % ;
- un ménage localisé dans une zone 25 % plus dense consomme en moyenne 3 à 4 % d'énergie en moins qu'un même ménage localisé dans la zone moins dense ;
- 6 à 7 % d'économie d'énergie sont réalisées pour un différentiel de densité de 50 % ;
- enfin, une densité deux fois plus élevée correspond à une économie d'énergie totale de l'ordre de 10 à 11 %.

Un peu plus faible pour les densités moins élevées, le taux de variation est relativement stable pour les hautes densités. Or, si la France compte des communes à très fortes densités atteignant les 26 000 habitants/km², la majorité de la population française est localisée dans des communes à densité de population inférieure à 3 000 habitants/km². Plus précisément en 2006, 25 % de la population vivait dans des zones à densité résidentielle inférieure ou égale à 117 habitants/km² et 25 % dans des zones à densité résidentielle comprise entre 117 et 598 habitants/km². Le troisième quart de la population résidait dans des zones à densité résidentielle incluse entre 598 et 3 057 habitants/km² et le dernier quart dans des zones à densité supérieure. Au vu de cette répartition de la population, la FIGURE 18 détaille le taux de variation de la demande énergétique totale des ménages pour des densités de 0 à 3 000 habitants/km².

FIGURE 18—Taux de variation de la demande énergétique totale pour des densités résidentielles de référence de 0 à 3 000 habitants/km² et des différences de densité de 10 %, 25 %, 50 % et 100 %



Que la densité résidentielle de référence soit faible ou élevée n'impacte que faiblement le taux de variation pour des valeurs de α réduites. En revanche, on note sur la FIGURE 18 que le taux de

variation est respectivement de l'ordre de -5 à -6 % et -8 à -11 % pour $\alpha=0,5$ et $\alpha=1$. En cas d'importantes différences de densité, l'impact sur la demande énergétique totale des ménages est ainsi plus faible dans les zones à faible densité que dans les zones à plus haute densité, phénomène plus atténué dans le cas de différences réduites de densité.

Les résultats permettent de conclure au rôle significatif et négatif de la densité de population sur la consommation d'énergie à travers d'une part l'impact des choix de localisation sur les dépenses énergétiques liées aux déplacements et d'autre part l'influence de ces mêmes choix de localisation sur les besoins énergétiques du logement des ménages. De même ordre de grandeur, ces mécanismes vont dans le même sens, à savoir qu'à une plus forte densité correspond une consommation d'énergie plus réduite à la fois pour le secteur des transports et pour celui du logement. En revanche, le rôle relatif de l'organisation spatiale sur les consommations sectorielles est plus important pour les déplacements que pour le logement : une différence d'un facteur 2 dans la densité de population correspond à une différence de 7 à 8 % de la demande énergétique logement et 11 à 15 % de la demande énergétique transport. L'évaluation intégrée de l'impact des choix de localisation sur la demande énergétique totale conduit à des valeurs intermédiaires, de l'ordre de 10 à 11 % pour une même différence d'un facteur 2 de densité.

b. Détail des hypothèses utilisées pour le calibrage d'IMACLIM-S

TABLEAU 6 – Calibrage des élasticités utilisées pour les simulations sous IMACLIM-S

	Carburants	Energie résidentielle	Logement
Revenu	0,21 <i>Source : chapitre 4</i>	0,10 <i>Source : Guersi et al. (2011)</i>	0,05 <i>Source : Froment (2010)</i>
Prix des carburants	-1,00 <i>Source : chapitre 4</i>	0	0
Prix de l'énergie résidentielle	0	0,03 <i>Source : Guersi et al. (2011)</i>	0
Prix des logements	0,54 <i>Source : chapitre 4</i>	0,45 <i>Source : Chapitres 2, 3 et 4</i>	0,01 <i>Source : Froment (2010)</i>

Conclusion

Cette thèse a fourni une contribution au débat sur le rôle de l'organisation spatiale des activités économiques dans la réduction des consommations énergétiques et émissions associées. Agir localement sur les choix de localisation pour accroître la sécurité énergétique est une idée qui apparaît dès les années 1970, principalement en mettant l'accent sur la question du rôle de l'espace en général et des villes en particulier, comme dimensions clé de l'action publique en termes de maîtrise de l'énergie. En effet, les villes constituent, par leurs compétences allant des décisions d'investissement pour les infrastructures à la planification urbaine, le niveau de décision et d'action privilégié pour intervenir sur les choix de localisation qui déterminent les besoins de mobilité des personnes. Par ailleurs, lieux de concentration d'activités économiques, les villes représentent le contexte physique où ont lieu les externalités environnementales négatives liées à l'utilisation de l'énergie nécessaire à ces activités.

Etudier l'effet de la dimension spatiale de l'économie dans la consommation énergétique des ménages implique avant toute chose d'analyser l'effet de l'organisation spatiale sur les deux secteurs majeurs en termes de demande énergétique, à savoir les transports et les bâtiments. En particulier, l'enjeu est d'explorer le rôle des choix de localisation, dont résulte l'organisation spatiale, dans la formation des demandes d'énergie liées à ces deux secteurs.

Or malgré l'intérêt porté à l'organisation du territoire, les réflexions se sont paradoxalement développées en l'absence d'une évaluation intégrée de l'impact effectif des choix de localisation des ménages sur la demande énergétique et du potentiel de l'organisation spatiale comme levier de l'action publique visant une maîtrise des consommations d'énergie. Ce vide analytique est particulièrement marqué en Europe et en France. C'est ce déficit que cette thèse a cherché à pallier.

A travers une méta-analyse de l'effet de la forme urbaine sur les déplacements, le premier Chapitre a exploré la littérature riche et variée sur le lien entre mobilité et organisation de l'espace. La compilation et l'exploitation statistique des résultats existants ont permis de tirer des enseignements méthodologiques et politiques sur l'évaluation du rôle de l'organisation spatiale sur la demande de transport. Notamment, les résultats obtenus confirment la causalité entre organisation spatiale du territoire, demande de transport et consommation d'énergie associée. L'élasticité moyenne de la consommation énergétique liée aux transports à la densité est estimée à $-0,12$, et l'analyse révèle que les données désagrégées, pour la mesure des déplacements et de la densité résidentielle, sont plus à même de capter les mécanismes en jeu entre déterminants spatiaux et mobilité. L'importance des spécificités territoriales dans la quantification du lien entre espace et demande de transports est également mise en évidence.

En ligne avec les conclusions du premier chapitre, le Chapitre 2 a proposé des éléments quantitatifs visant à évaluer le potentiel des interventions locales en termes de réduction des

consommations d'énergie du secteur des transports, et le Chapitre 3 a élargi l'étude au secteur des logements afin de permettre une analyse intégrée du rôle de l'espace au-delà des seuls besoins de mobilité. Reposant tous deux sur des estimations économétriques à partir des enquêtes des ménages, ces deux chapitres ont permis, avec les résultats du Chapitre 1, de mettre en évidence la relation de causalité entre choix de localisation des ménages et demande énergétique et ont fourni une estimation du lien entre espace et consommation sectorielle dans le cas de la France. Plus la densité est élevée et plus la consommation énergétique est faible : pour un ménage moyen en France, une différence d'un facteur 2 de la densité de population correspond à une différence de 12,4 % de la demande énergétique liée aux transports et à une différence de l'ordre de 7 % de la consommation d'énergie liée au logement. Les choix de localisation constituent donc bien un déterminant de la demande énergétique des ménages, et ce à la fois pour le secteur des transports et pour le secteur résidentiel. Les deux effets sectoriels sont d'un ordre de grandeur similaire et vont dans le même sens. L'effet global d'une différence de densité de population d'un facteur 2 est estimé être de l'ordre de 10 %.

L'interprétation de ce résultat prête légitimement à discussion. D'un côté en effet, on peut considérer que le facteur spatial a un impact significatif sur la demande d'énergie, de l'autre on peut retenir, du point de vue politique, que les mutations en jeu pour densifier d'un facteur 2 sont telles qu'elles se heurteraient à des résistances supérieures aux gains espérés en termes de sécurité énergétique et de protection de l'environnement. La question reste donc ouverte de savoir si les politiques jouant sur la dimension spatiale peuvent être utilisées comme levier de maîtrise des consommations d'énergie sans que le prix en soit l'arbitrage entre bien-être individuel (choix de vie à travers les choix de localisation) et bien commun (épuiement des ressources). On fera ici simplement remarquer que malgré les invocations répétées de cornes d'abondance du côté de l'offre (nucléaire, solaire, gaz de schiste), les modifications des bilans énergétiques et de la demande d'énergie ne sont affaire que de petits pourcentages sur des échéances de vingt à trente ans. De ce point de vue, un écart de l'ordre de 10 % des consommations énergétiques à long terme est loin d'être négligeable et ce d'autant plus que la densification favorise l'innovation technologique sur des moyens de transport « bas carbone » (transports en commun, véhicule électrique), comme il a été montré dans des études récentes.⁵⁶

C'est pour cerner le rôle réel de la dimension spatiale comme levier de réduction de la demande énergétique que l'on a conduit dans le quatrième chapitre une étude rétrospective faisant apparaître le rôle des prix de l'énergie et des logements sur la demande de carburant en France depuis 1960. On considère ici l'espace non pas comme une donnée mais comme une résultante de mécanismes économiques. La conclusion centrale de ce travail est que les prix des logements sont tout autant importants en ordre de grandeur que les prix de l'énergie dans la formation de la demande

⁵⁶ Viguié, V., 2012. Modélisation des dynamiques urbaines, application à l'analyse économique du changement climatique.

énergétique. En termes de politique publique, les résultats à retenir sont une élasticité nulle sur le court terme des prix du logement sur la consommation de carburant, mais en revanche une élasticité de long terme significative, positive et plus importante que celle des prix de l'énergie : +0,54 contre une élasticité au prix du carburant de -0,20. Face à une hausse du prix des logements, la demande de carburant des ménages augmente sur le long terme du fait de l'effet des prix des logements sur les choix de localisation des ménages.

L'espace est identifié comme un déterminant endogène de la demande d'énergie et comme un levier indirect de la réduction des consommations à travers une maîtrise des prix de l'immobilier. On a en particulier pu identifier des courbes d'indifférence entre politiques sur le prix des logements et sur le prix de l'énergie. En d'autres termes, ce chapitre répond à la question posée à l'issue des précédents chapitres, à savoir que la combinaison d'actions sur les prix de l'immobilier et sur le secteur énergétique (soutenue par des mesures sur les infrastructures non prises en compte ici) permet une meilleure maîtrise des consommations d'énergie. Un point important est que jouer sur les prix des logements permet de ne pas avoir recours à des niveaux extrêmes de taxation de l'énergie pour conduire des politiques climatiques ambitieuses (du type facteur 4).

Enfin, le dernier Chapitre a exploité les résultats des chapitres précédents pour examiner en quoi introduire des politiques spatiales dans la stratégie de réduction des consommations énergétiques change les coûts économiques et sociaux des politiques climatiques dans une approche macroéconomique d'équilibre général. A cette fin, un secteur « logement » a été développé, qui inclut de façon endogène les déterminants spatiaux de la demande d'énergie identifiés dans les étapes économétriques des chapitres précédents. Ce secteur est ensuite intégré dans le cadre du modèle d'équilibre général calculable IMACLIM-S pour l'évaluation de coûts et efficacité des actions publiques. Différentes stratégies d'intervention énergétique et climatique reposant sur les mécanismes de prix de l'énergie et des logements sont alors simulées. Les résultats mettent en évidence les gains en termes de réduction des consommations énergétiques que la prise en compte de la dimension spatiale peut permettre en complément d'une taxe carbone : une régulation de 20 % du prix des logements est estimée induire 9 % d'économies supplémentaires à celles réalisées sous une taxe de 400 €/tCO₂ uniquement. Au-delà de l'aspect purement énergétique, l'articulation des mesures simulées induit des effets positifs additionnels sur l'économie comme notamment une activité accrue du secteur du bien composite dont la demande des ménages est plus forte. Par ailleurs, la combinaison de la maîtrise du prix de l'immobilier à la taxe carbone recyclée en baisse des charges sociales a pour effet de soulager les contraintes pesant sur le budget des ménages et renforce le cercle vertueux qui, *via* une baisse des prix du bien composite, renforce la compétitivité de l'économie et favorise sa réorientation vers un « bien composite » plus intensif en emploi. Ce « double-dividende » additionnel par rapport à celui obtenu en cas de taxe carbone seule apparaît modeste en valeur absolue (0,22 % du PIB) mais est important.

En effet, un des problèmes d'acceptabilité des politiques climatiques réside dans leurs effets redistributifs négatifs. Une partie de ces effets est compensée par l'effet emploi de la baisse du coût du travail mais il faut aussi des modulations complémentaires (abattements à la base, aides à l'efficacité énergétique des bâtiments) pour compenser le solde net de la facture énergétique et de la baisse des coûts des loyers pour certaines populations (généralement excentrées). L'existence d'une marge de manœuvre supplémentaire de 0,22 % du PIB n'est alors pas négligeable pour faire passer des mesures qui sans cela ne seraient pas acceptées. La palette du décideur public s'agrandit donc au bénéfice d'une synergie et complémentarité des actions menées à travers la dimension liante que constitue l'organisation du territoire. Ces résultats permettent d'éclairer la question de l'intervention effective sur les choix de localisation tout en dépassant les enjeux d'acceptabilité et d'arbitrage direct entre bien-être individuel et choix de vie d'une part, et bien commun d'autre part.

A fort caractère empirique, cette thèse a été élaborée avec la volonté d'apporter des informations robustes à la question du rôle de la dimension spatiale dans le débat énergétique et climatique et ceci en particulier dans le contexte géographique de la France, sur lequel peu de travaux se sont penchés malgré l'enjeu. Intégrant les secteurs des transports et du bâtiment, l'analyse est ciblée sur la demande énergétique des ménages. Point central du travail, la dimension spatiale est identifiée, évaluée et modélisée à des fins de politiques publiques.

L'ensemble des leçons résultant de cette thèse ont un aspect agrégé afin de proposer une évaluation intégrée du rôle de l'espace. Mais tout le matériel accumulé amène à montrer l'intérêt de poursuivre l'analyse à des échelles plus fines. D'un côté, c'est à ces échelles que peut se révéler l'importance d'actions publiques sectorielles par exemple sur le phénomène d'ilot de chaleur dans le cas du résidentiel ou sur les modes de transport dans le cas des transports. De l'autre, l'importance de la dimension spatiale peut s'avérer beaucoup plus importante si on regarde encore plus dans le détail. Une réflexion a ainsi été amorcée concernant le poids de caractéristiques socio-économiques des ménages dans les résultats présentés, dessinant ainsi deux volets méritant d'être explorés dans des recherches ultérieures. Le premier concerne l'hétérogénéité potentielle de l'impact d'une politique spatiale sur les ménages, et par conséquent les enjeux d'équité notamment par rapport aux questions de financement de politique. Et le deuxième volet, qui se dégage plus largement de façon transverse dans l'ensemble de cette thèse, est celui du lien entre les choix de localisation et la précarité énergétique, constituant un des enjeux du débat actuel sur la transition énergétique. Demande énergétique, prix de l'énergie, prix des logements, choix de localisation font partie d'un système complexe conduisant à la vulnérabilité énergétique de certains ménages et l'analyse mérite d'être poursuivie. Enfin, l'ensemble des résultats et notamment ceux du dernier chapitre, ouvrent la voie à des travaux de modélisation ultérieurs visant à continuer dans l'exploration de l'endogénéisation de l'espace dans l'analyse macroéconomique et l'évaluation de politiques énergie et climat ciblant la dimension spatiale.

