



HAL
open science

Modélisation des impacts énergie/carbone de changements de modes de vie. Une prospective macro-micro fondée sur les emplois du temps.

Simona de Lauretis

► To cite this version:

Simona de Lauretis. Modélisation des impacts énergie/carbone de changements de modes de vie. Une prospective macro-micro fondée sur les emplois du temps.. Economies et finances. Université Paris Saclay (COMUE), 2017. Français. NNT: 2017SACLA022 . tel-01746139

HAL Id: tel-01746139

<https://theses.hal.science/tel-01746139>

Submitted on 29 Mar 2018

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.

NNT : 2017SACLA022

THÈSE DE DOCTORAT
DE
L'UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY
PRÉPARÉE À
L'INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE
L'ENVIRONNEMENT (AGROPARISTECH)

ECOLE DOCTORALE N° 581
Agriculture, alimentation, biologie, environnement et santé (ABIES)

Spécialité de doctorat : sciences économiques

Par

Simona DE LAURETIS

**Modélisation des impacts énergie/carbone de changements de modes de vie.
Une prospective macro-micro fondée sur les emplois du temps**

Thèse présentée et soutenue à Paris, le 6 juillet 2017 :

Composition du Jury :

M. Jean-Christophe BUREAU	Professeur, AgroParisTech	Président du jury
M. Patrick CRIQUI	Directeur de recherche émérite, CNRS	Rapporteur
M. Massimo TAVONI	Professeur associé, Politecnico di Milano	Rapporteur
M. Jean-Michel CAYLA	Chef de projet de recherche, EDF R&D	Examinateur
Mme Nadia MAÏZI	Professeur, Mines ParisTech	Examinatrice
M. Frédéric GHERSI	Chargé de recherche, CNRS	Co-encadrant de thèse
M. Franck LECOCQ	Ingénieur en Chef des Ponts, des Eaux et des Forêts	Directeur de thèse

Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements aux rapporteurs Patrick Criqui et Massimo Tavoni, ainsi qu'à Jean-Christophe Bureau et Nadia Maïzi, pour leur lecture approfondie de la thèse et pour leurs remarques pertinentes.

Je remercie également Laura Cozzi pour l'intérêt qu'elle a porté à mes travaux, malgré l'impossibilité d'être présente le jour de la soutenance.

Je suis reconnaissante envers mon directeur de thèse, Franck Lecocq, mon co-encadrant académique, Frédéric Gherzi, et mon encadrant au sein d'EDF R&D, Jean-Michel Cayla, pour leur implication au cours des trois dernières années, leurs conseils, la confiance qu'ils m'ont accordée et les discussions enrichissantes que nous avons eues.

Les travaux ici présentés ont été réalisés au sein de deux équipes de recherche, dans lesquelles j'ai bénéficié de moments de partage très instructifs et d'environnements de travail agréables et stimulants. Je remercie l'ensemble des membres du CIRED, trop nombreux pour être cités un par un : les doctorants, les permanents et le personnel administratif. En particulier, je remercie Franck Nadaud pour ses conseils concernant le travail d'économétrie réalisé en première partie de la thèse. Je remercie également l'équipe « Prospective énergétique et appui stratégique » d'EDF R&D qui m'a accueillie : Pierre Boulin, François Cattier, Gwennaël Lamy, Donia Peerhossaini, Prabodh Pourouchottamin, Jean-Luc Sellier, Jérôme Wirth ainsi que Christophe Crocombette et Christophe Marchand.

Un grand merci à Daniel Moërs pour sa relecture attentive du manuscrit.

Enfin, le soutien de ma famille et de mes amis a été précieux au cours de ces années : merci aux bellifontains pour tant de bons moments, et merci à ceux qui ont toujours été présents, même à distance.

Table des matières

Introduction	5
1 Modes de vie, énergie et emplois du temps	9
1.1 Modes de vie et énergie	9
1.1.1 L'analyse entrées-sorties appliquée à l'énergie et aux émissions	10
1.1.2 Les déterminants des consommations d'énergie des ménages	13
1.1.3 La segmentation des ménages	16
1.1.4 Scénarios de prospective	19
1.2 Énergie et emplois du temps	22
1.2.1 L'effet rebond et le temps	24
1.2.2 L'intensité énergétique du temps	26
2 Création d'une base de données micro des ménages français	29
2.1 Les enquêtes	30
2.2 Définition des activités	32
2.3 Choix de la méthodologie d'appariement	34
2.4 Variables explicatives	36
2.5 Résultats des régressions	38
2.6 Allocation des dépenses aux activités	39
2.7 Ventilation des dépenses d'énergie résidentielle	40
2.8 Ventilation des temps et des dépenses de transport	43
2.9 Calcul des consommations d'énergie à partir des dépenses d'énergie	44
2.10 Calcul des intensités en énergie et en dépenses pour chaque activité	47
3 Temps, dépenses et consommations d'énergie par activité de la vie quotidienne des ménages français	49
3.1 Valeurs moyennes sur la population de la France entière	49
3.2 Analyse par revenu	53
3.3 Analyse par composition du ménage	61
3.4 Analyse par type de logement	66
3.5 Conclusion	69

4	Modélisation macroéconomique des effets des changements de modes de vie	73
4.1	Le Modèle IMACLIM	73
4.1.1	Vue d'ensemble et traits saillants	73
4.1.2	Spécifications comportementales	75
4.1.3	Calibrage : tableau entrées-sorties hybride de l'économie française et tableau économique d'ensemble	76
4.2	Projection de référence	82
4.2.1	Hypothèses	82
4.2.2	Résultats	83
4.3	Articulation macro-micro	84
4.3.1	Mise à l'échelle de l'horizon d'analyse de la base de données temps/dépenses	85
4.3.2	Repondération dans le scénario de référence	86
4.3.3	Processus d'itération pour l'évaluation de scénarios de changements de modes de vie	88
5	Analyse de scénarios de changement de mode de vie	95
5.1	Scénario ALIMENTATION : augmentation du temps dédié à la préparation de repas	95
5.1.1	Contexte et hypothèses	95
5.1.2	Résultats	97
5.2	Scénario E-COMMERCE : généralisation des achats en ligne	101
5.2.1	Contexte et hypothèses	101
5.2.2	Résultats	104
5.3	Scénario MOBILITÉ : diffusion du covoiturage et de l'autopartage	109
5.3.1	Contexte et hypothèses	109
5.3.2	Résultats	114
5.4	Conclusion	118
	Conclusion	121
	Annexe A : construction de la base micro	125
	Annexe B : modèle	135
	Bibliographie	157

Introduction

Depuis le sommet de la Terre de Rio 1992 (Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement), qui a adopté la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, le développement durable et la réduction des émissions de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement climatique sont au centre de l'attention des décideurs, des associations non-gouvernementales et de la société civile. Le dernier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, 2014) souligne l'urgence d'actions de réduction des émissions, en affirmant que « Si elles se poursuivent, les émissions de gaz à effet de serre provoqueront un réchauffement supplémentaire et une modification durable de toutes les composantes du système climatique, ce qui augmentera la probabilité de conséquences graves, généralisées et irréversibles pour les populations et les écosystèmes. Pour limiter l'ampleur des changements climatiques, il faudrait réduire fortement et durablement les émissions de gaz à effet de serre, ce qui, avec l'adaptation, est susceptible de limiter les risques liés à ces changements. ».

Les ménages revêtent un rôle central dans la détermination des consommations d'énergie et des émissions, puisque en plus des consommations d'énergie finales qui leur sont propres (énergie résidentielle et carburants), ils influencent les consommations d'énergie et les émissions des secteurs productifs à travers leurs choix de consommations de biens et services. Plusieurs organismes et associations partagent l'intuition que le changement des modes de consommation est essentiel pour le développement durable et pour atteindre les objectifs climatiques. Par exemple, le plan de mise en œuvre du sommet mondial sur le développement durable des Nations Unies souligne que « Des changements fondamentaux dans la façon dont les sociétés produisent et consomment sont indispensables pour réaliser un développement durable à l'échelle mondiale » (Nations Unies, 2002, page 14). Le changement des modes de consommation fait partie également des recommandations de l'Agenda 21 (Nations Unies, 1992), et il est mentionné par le GIEC en tant que levier nécessaire à mobiliser pour aboutir à des réductions importantes des émissions de gaz à effet de serre (Victor et al., 2014). Dans la littérature scientifique, en particulier celle appartenant au courant de l'économie écologique, on trouve l'idée que le changement technologique seul n'arrivera pas à faire face aux défis environnementaux auxquels nous sommes confrontés, et qu'une modifications des modes de vie sera nécessaire (Biesiot et Noorman, 1999; Jackson, 2009; Moriarty et Honnery, 2010).

Il est donc primordial que les analyses de prospective énergétique prennent en compte de possibles évolutions des modes de vie. Cependant, du fait de l'attention historiquement portée à une description réaliste des technologies d'offre énergétique, les modèles d'équilibre général énergie/économie les plus en vue, tels DART (Klepper et al., 2003), EPPA (Paltsev et al., 2005), PACE (Böhringer, 2002) ou PHOENIX (Wing et al., 2011), ont consacré peu d'efforts méthodologiques à la représentation des comportements des ménages. Leurs spécifications standard présentent ainsi deux inconvénients majeurs. D'une part ils ne considèrent qu'un « ménage représentatif » agrégeant les sources de revenu et les consommations de la population entière, négligeant ainsi l'hétérogénéité des caractéristiques des ménages (localisation, composition etc.) pourtant déterminantes pour les modes de vie (Jaccard et Dennis, 2006; Cayla et Maïzi, 2015). Même quand une certaine hétérogénéité est prise en compte, elle se fonde le plus souvent sur les niveaux de revenu. Or le mode de vie est un concept complexe, qui considère le comportement des ménages dans le contexte social, matériel et normatif qui en oriente les choix (Maresca et Dujin, 2014). Les consommations sont donc influencées par un ensemble de facteurs (habitudes, émotions, influences de la société...) et prendre en compte uniquement le revenu porte à négliger d'autres déterminants importants, en particulier pour l'analyse des consommations d'énergie. D'autre part ces modèles schématisent la consommation du ménage représentatif ou d'éventuelles classes de revenu à l'aide de fonctions CES imbriquées inspirées par la théorie microéconomique. Généralement, l'arbre de décision sous-jacent isole les consommations énergétiques pour représenter leur combinaison par une fonction CES spécifique, dont l'agrégat est ensuite arbitré avec un panier des autres consommations. Ceci a pour effet de niveler les possibilités de substitution pour le premier arbitrage (entre biens énergétiques) comme pour le second (entre agrégat d'énergie et autres biens), en négligeant les réalités bien plus complexes des comportements et des systèmes techniques gouvernant les consommations d'énergie des ménages. Une telle simplification peut être recevable pour de petites variations des prix relatifs sur le court terme, en particulier si elle s'inscrit dans des travaux s'intéressant en premier lieu à l'évolution des systèmes productifs. Elle est beaucoup plus criticable si on l'applique à l'évaluation de transformations radicales des systèmes de prix et sur un long terme, comme le réclame l'analyse d'une véritable transition énergétique, et ce d'autant plus quand les ménages sont l'objet d'étude.

Des alternatives à cette application trop fruste de la théorie microéconomique sont pourtant disponibles de longue date. Dès les années 1960 Becker (1965) développe une fonction de production du ménage, qui théorise que les ménages n'obtiennent pas directement de l'utilité de l'achat de biens et services, mais utilisent ces biens et services pour produire des « commodités » (*commodities* dans le texte original) qui sont, elles, source d'utilité. Des intrants non marchands peuvent aussi être requis, comme le temps ou les compétences. Ainsi, la lecture d'un livre, source d'utilité, nécessite un livre, du temps de lecture, un fauteuil et des consommations d'énergie de chauffage et d'éclairage. Cette vision de l'énergie en tant qu'input dans une activité est partagée par Lutzenhiser (1992, 1993) et notamment par Røpke (2009), qui situe l'analyse des impacts environ-

nementaux des modes de consommation des ménages dans le contexte de la théorie des pratiques. La consommation de biens ou services est une conséquence du désir de réaliser au mieux les pratiques (des ensembles d'actions qui nécessitent des inputs matériels, des compétences et qui ont une signification pour la personne qui les réalise), dans le cadre des contraintes spatiales et temporelles propres à la vie de tous les jours. La consommation n'est donc pas une fin en soi, et le budget disponible n'est que l'une de ses nombreuses contraintes et déterminants. En particulier, la dimension temporelle revêt une importance fondamentale dans les choix de consommation. En effet, le temps à disposition représente une contrainte absolue qui, surtout dans un scénario futur, pourrait limiter les possibilités de consommer bien plus que le budget monétaire à disposition. L'importance du temps dans les choix des ménages est reconnue dans certains domaines d'analyse, notamment les transports, et plusieurs études montrent que des informations sur les emplois du temps peuvent enrichir substantiellement l'analyse des consommations d'énergie des ménages (Schipper et al., 1989; Druckman et al., 2012; Jalas et Juntunen, 2015).

L'ambition de notre recherche a été de faire le lien entre ces deux champs d'investigation, prospective énergie/économie en équilibre général d'une part, et prospective microéconomique désagrégée de la demande des ménages d'autre part, avec une attention particulière aux usages du temps. Une première phase de nos travaux s'est ainsi concentrée sur une revue de littérature des études existantes concernant les modes de vie et leurs liens avec les consommations d'énergie, ainsi que le rôle du temps dans les analyses énergétiques des modes de vie. Cette revue constitue notre chapitre 1. Puis nous avons entrepris la construction d'une base de données originale détaillant emplois du temps, dépenses et consommations d'énergie pour environ 15 000 ménages français, par le croisement de bases existantes, selon un enchaînement d'analyses économétriques et de traitements statistiques décrits au chapitre 2. Nous proposons une analyse de cette base selon plusieurs axes de désagrégation des ménages chapitre 3. Dans un troisième temps nous avons développé une méthodologie prospective, qui consiste à projeter notre base à un horizon d'étude futur par repondération des ménages qui la constituent, une fois leurs caractéristiques économiques mises à l'échelle de cet horizon, puis à l'articuler à un modèle de prospective économique énergie-émissions par l'itération d'un échange de variables communes jusqu'à convergence des deux systèmes numériques. Le chapitre 4 décrit cette méthodologie. Enfin, une ultime phase de nos travaux a porté sur une illustration de l'outil construit à travers l'analyse de trois scénarios, centrés respectivement sur la diffusion de nouvelles formes de mobilité (covoiturage et auto-partage), la généralisation des achats en ligne et sur un retour vers le « faire soi-même » en matière d'alimentation. Notre chapitre 5 présente les hypothèses relatives aux trois scénarios étudiés et les résultats de notre modélisation.

Chapitre 1

Modes de vie, énergie et emplois du temps

1.1 Modes de vie et énergie

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, le lien entre modes de vie et consommations d'énergie a reçu une attention grandissante ces vingt dernières années. En effet, la consommation des ménages représente une part importante de la demande d'énergie finale dans de nombreux pays. De plus, intégrer dans les modèles énergétiques une représentation détaillée des choix de consommation des ménages permet d'estimer les impacts de facteurs autres que les facteurs économiques sur les consommations d'énergie.

Traditionnellement, l'analyse des consommations énergétiques a été centrée sur les consommations d'énergie directe des différents secteurs (résidentiel, industrie, transport, tertiaire...). Cependant, un élément important de l'estimation de l'impact énergétique et environnemental de la consommation des ménages est la prise en compte des consommations d'énergie et des émissions indirectes, c'est-à-dire celles générées par la production et la distribution de biens et services (on parle aussi d'« énergie grise » en français). Prendre en compte l'énergie grise permet de lier une partie des consommations de chaque secteur à la consommation finale des ménages et de représenter de façon plus globale ses impacts ; cette approche tient compte de l'énergie « contenue » dans les produits importés et utilisée dans les Pays producteurs, ce qui peut être un argument à considérer dans les négociations internationales sur le climat. L'estimation de l'énergie indirecte est en général réalisée grâce à l'analyse entrées-sorties (Input-Output), qui représente les échanges entre les différents secteurs de l'économie ; les premières applications de l'analyse entrées-sorties à l'énergie se sont développées dans les années 1970 (Wright, 1974; Bullard et Herendeen, 1975). L'analyse entrées-sorties peut être combinée avec une analyse de cycle de vie pour les produits. Cette dernière nécessite une énorme quantité de données vu le nombre de produits consommés par les ménages,

ce qui rend difficile son application dans un modèle d'équilibre général représentant la totalité des marchés de biens et services à l'échelle nationale. De nombreuses analyses de la consommation énergétique et de l'impact environnemental des ménages tiennent compte de la consommation d'énergie indirecte aussi bien que de l'énergie directe.

1.1.1 L'analyse entrées-sorties appliquée à l'énergie et aux émissions

Les études qui utilisent l'approche entrées-sorties pour estimer les consommations d'énergie et les émissions montrent que les consommations indirectes ont le même ordre de grandeur que les consommations directes, même s'il existe des grandes variations d'un pays à l'autre, surtout si l'on considère des pays ayant différents niveaux de développement. Biesiot et Noorman (1999) observent qu'aux Pays Bas en 1990 la consommation d'énergie indirecte était 1,1 fois la consommation d'énergie directe ; Reinders et al. (2003) analysent les consommations directes et indirectes en 1994 dans onze pays européens, en trouvant des consommations indirectes qui vont de 0,6 fois les consommations directes (Finlande, Suède) à 1,9 (Portugal). Bin et Dowlatabadi (2005) estiment qu'aux États-Unis, en 1997, les consommations indirectes d'énergie étaient deux fois plus élevées que les consommations directes. Pour Cohen et al. (2005), l'énergie indirecte consommée par les ménages brésiliens en 1995-1996 était 1,6 fois l'énergie directe. Wei et al. (2007) estiment qu'en Chine en 2002 les consommations d'énergie indirecte des résidents en tissu urbain étaient 2,44 fois plus élevées que les consommations directes, alors qu'elles étaient la moitié des consommations directes pour les résidents des zones rurales.

En sommant les consommations d'énergie directe et indirecte (qui dépendent du mode de vie et des choix du consommateur), on obtient des fractions considérables de la demande totale d'énergie au niveau d'un pays : 60% aux Pays Bas pour Biesiot et Noorman (1999), 85% aux États-Unis pour Bin et Dowlatabadi (2005), entre 40% et 50% dans différents pays européens pour Moll et al. (2005), 26% en Chine pour Wei et al. (2007). La somme des consommations d'énergie directe et indirecte des ménages ne correspond pas aux consommations totales d'un pays pour deux raisons principales. La première est qu'il y a des dépenses publiques qui ne figurent pas dans les budgets des ménages et qui ne leur sont pas re-allouées (santé, éducation, défense...). La deuxième réside dans les consommations d'énergie nécessaires à la production de produits exportés. Aux États-Unis, les dépenses des consommateurs expliquent une plus grande partie des consommations d'énergie qu'aux Pays-Bas, probablement parce qu'une plus grande partie des dépenses de santé et d'éducation est payée directement par les ménages, en apparaissant dans les enquêtes « budget des familles ». En revanche, la valeur assez basse obtenue pour la Chine (26%) reflète le taux important d'exportation de la production chinoise. Les grands écarts dans les résultats d'un pays à l'autre s'expliquent par les différences dans les modes de consommation, mais aussi par le fait que, en général, dans les études qui analysent une seule région, les intensités énergétiques des biens importés

sont considérées égales aux intensités calculées pour la région de référence, ce qui crée un biais dans l'analyse si les mix énergétiques et les systèmes productifs des pays producteurs sont très différents de ceux du pays considéré. Pour tenir compte du véritable impact énergétique et environnemental des produits importés il est nécessaire d'utiliser des modèles multi-régionaux qui représentent le commerce international (Wiedmann, 2009; Vringer et al., 2010). En tout cas, ces ordres de grandeur confirment l'intérêt d'étudier les modes de consommation dans les analyses de prospective énergétique.

La plupart des travaux de recherche réalisent une analyse statique des consommations d'énergie et des émissions, sans analyser l'impact de possibles changements dans les modes de consommation. Selon Kok et al. (2006), qui présentent une revue d'un certain nombre de travaux de recherche de ce type menés entre le début des années 1990 et 2005, trois méthodes peuvent être utilisées pour calculer les émissions de CO₂ ou les consommations d'énergie liées à la consommation des ménages. Les trois sont fondées sur l'analyse entrées sorties :

- analyse entrées sorties, basée sur les comptes nationaux uniquement ;
- analyse entrées sorties combinée avec les données sur les dépenses des ménages ;
- analyse hybride : analyse entrées-sorties combinée avec une analyse de cycle de vie.

Dans la première méthode, les données monétaires sont obtenues uniquement des comptes nationaux. Les transactions monétaires sont supposées être proportionnelles aux flux physiques (sauf l'énergie, qui est souvent exprimée directement en unités physiques grâce à d'autres sources de données). Les tableaux entrées-sorties fournissent des informations concernant la demande finale des ménages et permettent de calculer les consommations d'énergie indirecte correspondantes. En les additionnant aux consommations directes, on trouve la consommation totale des ménages.

La deuxième méthode part également des intensités énergétiques des secteurs productifs, qui sont calculées de la même façon que dans la première méthode. Cette fois-ci, en revanche, les données sur la consommation des ménages sont tirées des enquêtes « budget des familles » et non de la comptabilité nationale : le niveau de détail est supérieur, puisque les consommations d'énergie peuvent être calculées pour des catégories de biens ou services similaires alors que dans la première méthode elles étaient calculées par secteur. Chaque catégorie de consommation est allouée à un secteur de la comptabilité nationale pour en calculer le contenu en énergie indirecte. Comme dans le cas précédent, les consommations d'énergie directe sont calculées séparément au niveau du ménage. Cette méthode permet d'analyser différents types de ménages.

Enfin, l'analyse « hybride » est une combinaison d'une analyse entrées-sorties et d'une analyse de cycle de vie. Cette dernière permet de calculer l'intensité énergétique des biens et services sur la base de données physiques et énergétiques (par exemple l'énergie utilisée par unité de matériau). Cette approche fournit donc des résultats plus précis parce qu'elle permet de calculer l'énergie utilisée pour la production de chaque

bien et non d'une typologie de biens comme dans le cas précédent. En revanche, elle nécessite beaucoup plus de données et de temps d'analyse, ce qui limite l'étendue de son application.

Pour Kok et al. (2006), les trois méthodes donnent des résultats comparables à l'échelle agrégée (avec des différences inférieures à 4% pour les consommations directes, indirectes et totales des ménages) mais des grandes différences apparaissent dans les résultats par secteur, à cause des différences dans la construction des analyses. En effet, les comptes nationaux reportent toutes les transactions de l'économie, y compris celles du secteur public ; dans de nombreux pays, le système des comptes nationaux inclut dans la consommation des ménages une partie des dépenses publiques qui sont individualisables (par exemple les dépenses de santé). Ces dépenses n'apparaissent pas dans leur intégralité dans les enquêtes « budget des familles », parce que seulement une partie est à la charge des ménages. La différence est plus grande dans les pays ayant des programmes extensifs d'assistance publique et d'aides sociales, tels que la plupart des pays européens. D'autres différences méthodologiques existent entre le système des comptes nationaux et les enquêtes « budget des familles » en ce qui concerne l'allocation des marges de transport et de certaines catégories de dépenses telles que les agences de voyage et les loyers. De plus, les comptes nationaux incluent les consommations des personnes vivant dans des structures collectives (prisons, maisons de retraite etc.), alors que ces personnes ne sont pas incluses dans les enquêtes sur les budgets des ménages. L'analyse de cycle de vie tient compte des consommations liées au recyclage ou au traitement en tant que déchet des produits en fin de vie, qui en revanche ne sont pas prises en compte dans les autres approches, ce qui amplifie les écarts avec les autres méthodes.

En conclusion, l'analyse entrées sorties fondée sur les comptes nationaux est adaptée à une analyse de la consommation au niveau national, considérant des aspects technologiques et comportementaux de manière agrégée ; l'analyse entrées-sorties couplée aux enquêtes budgétaires est adaptée à une analyse plus fine des consommations, pour différents types de ménages ; l'analyse hybride entrées-sorties/cycle de vie fournit un niveau de détail encore plus élevé, mais elle est plus difficile à mettre en œuvre à cause de la grande quantité de données requises (Kok et al., 2006).

De nombreuses autres études utilisent l'analyse entrées-sorties pour estimer les consommations d'énergie des ménages dans différents pays : Cohen et al. (2005) (Brésil), Rätty et Carlsson-Kanyama (2010) (consommation d'énergie par genre en Allemagne, Norvège, Grèce et Suède), Feng et al. (2011) (Chine), Ferguson et MacLean (2011) (Canada et États-Unis en utilisant un modèle bi-national). Si la plupart des analyses considèrent consommations d'énergie et émissions de CO₂, quelques analyses prennent en compte les émissions d'autres gaz à effet de serre et de substances polluantes (Kerkhof et al., 2009; Benders et al., 2012).

1.1.2 Les déterminants des consommations d'énergie des ménages

Le revenu du ménage et/ou le niveau des dépenses sont les variables qui expliquent le mieux la quantité d'énergie consommée par les ménages et ce sont également les variables les plus souvent étudiées parmi les déterminants des consommations d'énergie directe et indirecte. Une des premières études qui ait estimé les impacts énergétiques de la consommation des ménages en combinant l'analyse entrées-sorties avec une enquête sur les budgets des ménages est celle de Herendeen et Tanaka (1976), qui montre un lien évident entre le revenu des ménages des États-Unis en 1960-1961 et leurs consommations d'énergie directe et indirecte. Les auteurs observent un effet de saturation concernant les consommations directes des ménages à haut revenu, dû au fait que les besoins énergétiques concernant le chauffage ou l'éclairage sont complètement satisfaits au-delà d'un certain seuil de revenu et leur utilité marginale devient très faible. Il est également possible, cependant, que les ménages les plus aisés externalisent des services (tels que blanchisserie ou coiffure), en évitant ainsi les consommations d'énergie correspondantes. Cet effet de saturation est bien plus atténué quand on regarde l'énergie totale (directe et indirecte), signe que les consommations de produits et services continuent de croître avec le revenu. Plusieurs études plus récentes trouvent des résultats similaires pour différents pays. Pour Nässén (2014), le niveau des dépenses des ménages en Suède explique 55% de leurs consommations d'énergie totales (directe et indirecte) par UC, avec une élasticité de la consommation d'énergie totale par rapport aux dépenses de 0,77 (c'est-à-dire qu'une augmentation de 1% des dépenses comporte une augmentation de 0,77% des consommations d'énergie). Pachauri (2004) trouve que le niveau de dépenses explique 61% des variations des consommations d'énergie totales par personne des ménages indiens, avec une élasticité par rapport aux dépenses de 0,67. Vringer et Blok (1995) estiment une élasticité de 0,83 entre les consommations d'énergie totales des ménages néerlandais et leurs dépenses. Dans leur analyse sur cinq pays, Lenzen et al. (2006) trouvent des élasticités de la consommation d'énergie totale par rapport aux dépenses égales à 0,78 pour l'Australie, 1,00 pour le Brésil, 0,86 pour le Danemark, 0,86 pour l'Inde et 0,64 pour le Japon.

De nombreuses études utilisent le niveau des dépenses comme proxy du revenu, parce que les données sur ce dernier sont souvent indisponibles ou difficiles à reconstruire. Cependant, le niveau d'épargne des ménages n'est pas uniforme en fonction du revenu (Duarte et al., 2010), donc la relation entre dépenses et consommations totales d'énergie n'est pas tout-à-fait la même que celle entre revenu et consommations d'énergie. Par exemple, Vringer et Blok (1995) trouvent une élasticité des consommations d'énergie totale par rapport au revenu de 0,63, qui est inférieure à celle entre les consommations d'énergie et les dépenses (0,83) à cause du niveau d'épargne qui augmente avec le revenu.

La corrélation des consommations d'énergie indirecte avec le revenu ou avec les dépenses présente en outre un biais dû à l'hétérogénéité des prix payés par les ménages interrogés dans le cadre des enquêtes sur les dépenses des ménages. En effet, pour le cal-

cul des consommations d'énergie indirecte à partir des dépenses, on considère en général un bien « moyen », ayant un certain prix et un certain contenu énergétique par unité de dépenses, à partir duquel on déduit le nombre de biens consommés par le ménage analysé. Donc un produit deux fois plus cher est associé à des consommations et des émissions doubles, même si dans la réalité ce n'est que rarement le cas. Ce problème méthodologique a déjà été mis en avant par Vringer et Blok (1995), qui observent que les ménages aisés achètent en général des produits ayant un prix par unité physique plus élevé, donc les élasticités des consommations d'énergie par rapport au revenu (ou au niveau de dépenses) calculées dans les études qui utilisent des intensités énergétiques moyennes sont probablement surestimées. Pour une meilleure représentation de la relation entre revenu et consommations d'énergie indirecte, il faudrait partir des quantités physiques consommées pour chaque catégorie de biens, mais cette information n'est pas toujours disponibles dans les bases de données. Girod et de Haan (2010) réalisent une étude bottom-up des émissions de gaz à effet de serre des ménages suisses en comparant l'approche « dépenses » avec l'approche « unités fonctionnelles » sur la base de l'enquête « budget des familles » suisse de 2005 : celle-ci inclut les quantités physiques (en poids) pour quelques produits, notamment les produits alimentaires ; pour d'autres produits les auteurs ont dû recourir à des hypothèses concernant le poids ou le volume des produits achetés. Les résultats de cette étude montrent que, pour la plupart des catégories de consommation analysées, les ménages les plus aisés (revenus supérieurs à la médiane) payent des prix par unité significativement plus élevés de ceux payés par les ménages ayant des revenus inférieurs (l'écart de prix le plus élevé, 149%, est observé pour les vélos). En conséquence, les élasticités des consommations d'énergie et des émissions calculées à partir des dépenses sont surestimées par rapport aux élasticités calculées en utilisant les unités fonctionnelles.

Même en tenant compte des différences dans les prix des produits achetés, les émissions des ménages restent fortement corrélées au niveau de dépenses total (Girod et de Haan, 2010). Cependant, les consommations d'énergie totales peuvent varier considérablement d'un ménage à l'autre à parité de revenu (Vringer et Blok, 1995; Cohen et al., 2005; Nässén, 2014). Par exemple, Vringer et Blok (1995) observent des consommations d'énergie qui atteignent des valeurs 25% supérieures ou inférieures à la moyenne, pour un groupe de ménages ayant le même niveau de revenu. C'est pourquoi de nombreux travaux de recherche ont analysé d'autres déterminants des consommations d'énergie des ménages, en se concentrant en particulier sur des caractéristiques socio-démographiques telles que la taille du ménage et sa composition, le type de tissu urbain (urbain, périurbain, rural...), le niveau d'études de la personne de référence du ménage, l'âge de la personne de référence du ménage ou le type de logement (par exemple, collectif ou individuel).

La taille du ménage influence, évidemment, les consommations totales d'énergie du ménage. Il est intéressant d'observer, cependant, que les consommations d'énergie augmentent nettement plus en passant d'un ménage d'une personne à un ménage de deux personnes qu'avec les augmentations de taille suivantes, grâce aux économies d'échelle,

par exemple dans le chauffage du logement (Herendeen et Tanaka, 1976; Vringer et Blok, 1995; Pachauri, 2004). Même à parité de taille, les consommations d'énergie varient selon la composition du ménage. Moll et al. (2005) montrent que l'intensité en énergie des dépenses, en MJ/€, pour un ménage du Royaume-Uni composé de deux retraités est 19% plus élevée de celle d'un ménage composé de deux adultes actifs. Un ménage composé d'un adulte et d'un enfant est caractérisé par une intensité en énergie indirecte des dépenses 17% plus élevée que celle d'un ménage de deux adultes actifs. Weber et Perrels (2000) observent, pour l'Allemagne de l'Ouest en 1990, que les émissions de CO₂ totales (directes et indirectes) d'un jeune couple sont environ 20% plus faibles de celles d'un couple d'âge intermédiaire, et d'environ 10% plus élevées que celles d'un couple âgé. Pour Biesiot et Noorman (1999), l'intensité énergétique des dépenses d'un jeune couple néerlandais est de 8% plus faible que celle d'un couple plus âgé. Il est nécessaire de considérer, quand on observe des distinctions sur la base de l'âge, que souvent les jeunes ont des revenus faibles, donc une partie des écarts observés entre les jeunes couples et les autres couples pourrait être expliquée par des prix moyens plus élevés payés en réalité par les ménages plus âgés, ce qui avec l'hypothèse de prix uniformes porte à surestimer les consommations en biens des ménages plus aisés, comme observé dans la section précédente.

Le tissu urbain de résidence a également une influence significative, sur les consommations d'énergie directe et indirecte. Herendeen et Tanaka (1976) observent que l'intensité énergétique totale des dépenses pour les ménages urbains des États-Unis est de 15% plus faible que celle des ménages ruraux (toutes classes de revenus confondues). Pachauri (2004), au contraire, observe pour les ménages indiens, à parité de classe de revenus, des consommations d'énergie totale (directe et indirecte) plus élevées pour les ménages urbains que pour les ménages ruraux. Wei et al. (2007) observent, pour la Chine, des consommations d'énergie directe et indirecte nettement plus élevées pour les ménages urbains que pour les ménages ruraux. Dans des régressions multiples qui permettent d'observer l'effet du tissu urbain « toutes choses égales par ailleurs », Pachauri (2004), Lenzen et al. (2006) et Nässén (2014) trouvent que la distinction entre tissu rural et tissu urbain est significative pour expliquer les consommations d'énergie directe et indirecte des ménages. Le signe des coefficients indique dans tous les cas que les consommations d'énergie des ménages vivant en tissu rural sont plus élevées que celles des ménages résidant en tissu urbain. La seule exception est le résultat obtenu par Lenzen et al. (2006) pour l'Inde (alors que les résultats qu'ils obtiennent pour l'Australie, le Brésil, le Danemark et le Japon sont cohérents avec le commentaire précédent). L'explication de cette incohérence apparente dans Lenzen et al. (2006) est que, pour l'Inde, la distinction dans la régression n'est pas entre tissu rural et urbain, mais entre grandes villes et reste du pays (c'est-à-dire tissu rural et villes petites ou moyennes).

L'âge (âge de la personne de référence du ménage ou âge moyen des membres du ménage) est également significatif dans l'explication des consommations d'énergie directe et indirecte. Lenzen et al. (2006) trouvent des coefficients positifs concernant l'âge de la personne de référence du ménage dans les régressions expliquant les consom-

tions d'énergie pour les 5 pays analysés (Australie, Brésil, Danemark, Inde, Japon) : les consommations d'énergie augmentent, donc, avec l'âge de la personne de référence. Les résultats de Pachauri (2004) vont dans le même sens, puisque les coefficients des variables binaires indiquant l'appartenance de la personne de référence à différents groupes d'âge sont croissants avec l'âge. De même pour l'analyse de régression réalisée par Nässén (2014).

Le niveau d'études n'est pas significatif dans l'explication des consommations d'énergie en Suède pour Nässén (2014). Lenzen et al. (2006) trouvent que le niveau d'études est significatif dans les régressions pour 3 des 5 pays analysés (Australie, Brésil et Inde). En revanche, les coefficients n'ont pas le même signe dans les trois pays : en Australie, un niveau d'études plus élevé est associé à une baisse dans les consommations d'énergie, alors qu'en Inde et au Brésil il est associé à une hausse des consommations d'énergie. Pour Pachauri (2004), le fait que la personne de référence du ménage soit analphabète est associé à des consommations d'énergie plus élevées que dans le cas contraire.

Le type de logement, en particulier la distinction entre appartements et maisons individuelles ou assimilées, est en général un déterminant fondamental des consommations d'énergie des ménages, vu son impact sur les consommations d'énergie directe (chauffage en particulier). Pour Nässén (2014) et Pachauri (2004), les ménages résidant en maison individuelle consomment nettement plus d'énergie, à parité d'autres facteurs, que les ménages en appartement. Dans l'analyse de Lenzen et al. (2006), les consommations d'énergie augmentent avec le nombre de pièces du logement au Brésil, avec la surface du logement en Inde et elles sont significativement plus élevées dans les maisons individuelles que dans les logements collectifs au Danemark. Cependant, pour Australie et Japon, le type de logement n'est pas une variable significative dans les régressions.

Il ressort de l'éventail de résultats présentés ici que pour étudier en prospective les consommations d'énergie des ménages il faut tenir compte de leur hétérogénéité. En effet, comme l'observent Moll et al. (2005) ou Cayla et Maïzi (2015), une analyse différenciée par type de ménage permet une meilleure évaluation des potentiels d'action concernant les réductions des consommations d'énergie qu'une analyse qui repose sur un ménage « moyen ».

1.1.3 La segmentation des ménages

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, les variables socio-démographiques traditionnelles (revenu, âge, éducation etc.) jouent un rôle important dans la détermination des consommations d'énergie directe et indirecte des ménages. Cependant, ces variables peuvent être complétées par d'autres qui prennent en compte de façon plus détaillée le mode de vie des ménages considérés, de façon à mieux étudier les leviers qui influencent les consommations d'énergie et les émissions. Un certain nombre de travaux de recherche ont appliqué une segmentation plus fine des ménages pour identifier leur particularités. Duchin (2003) explore différentes possibilités de classification des

ménages qui pourraient être adaptées à l'estimation de l'impact environnemental de différents modes de vie. Les principaux types de classification existants sont :

- une classification par classe sociale, qui considère essentiellement le type d'occupation de la personne de référence du ménage ;
- une classification par revenu ;
- une classification sur d'autres variables (géographiques, nombre d'adultes et d'enfants dans le ménage, âge, éducation, ethnique...) ;
- une classification d'approche « marketing » qui organise les ménages en cellules décrites par différents variables, grâce à des techniques statistiques comme l'analyse factorielle.

Pour l'auteur, la classification sur la base du revenu ou de la classe sociale n'est pas suffisante pour l'identification du mode de vie ; la classification sur la base de variables géographiques ou socio-démographiques a les défauts que les catégories sont choisies *a priori* et qu'il est impossible de lier une variable à l'autre ; l'approche marketing est la plus prometteuse.

Druckman et Jackson (2008), dans une étude concernant les consommations d'énergie directe, segmentent les ménages britanniques en 45 catégories sur la base du type de logement, du statut d'occupation du logement, de l'âge de la personne de référence du ménage et de la situation professionnelle de la personne de référence du ménage, en estimant les consommations d'énergie et les émissions de chaque catégorie. Ils estiment ensuite la distribution géographique des ménages appartenant aux différentes catégories, ce qui permet d'analyser les résultats par zone géographique. Par exemple, les auteurs montrent que les consommations d'énergie et les émissions associées à une zone géographique d'extrême privation sont un peu plus de la moitié de celles calculées pour une zone géographique d'extrême aisance. Cette différence est inférieure à celle qui existe entre le décile de revenu le plus haut et le décile le plus bas au niveau national, à cause de la grande variabilité des consommations d'énergie au sein d'un décile et aussi à cause du fait que la segmentation en catégories des ménages dans cette étude se base sur d'autres variables que le revenu. La même approche est utilisée dans un autre travail des mêmes auteurs (Druckman et Jackson, 2009), où l'énergie indirecte est également prise en compte.

Baiocchi et al. (2010) analysent les émissions de CO₂ directes et indirectes des ménages du Royaume-Uni. Ils utilisent une segmentation géo-démographique commerciale (développée à des fins de marketing), qui regroupe les ménages en 17 catégories de mode de vie. Dans une analyse de régression, ils trouvent que la variable « mode de vie » est significative dans l'explication des émissions de CO₂, même en contrôlant pour d'autres variables socio-démographiques telles que le revenu, la taille du logement, la taille du ménage, le type de ménage et le niveau d'études.

Vringer et al. (2007) étudient l'effet des valeurs propres à chaque ménage sur leurs consommations d'énergie directe et indirecte aux Pays Bas. Après avoir identifié six

groupes ayant des valeurs similaires (l'enquête est basée sur les valeurs définies par Roach (1973)), ils comparent les consommations énergétiques de chaque groupe avec les consommations moyennes des ménages ayant les mêmes caractéristiques socio-démographiques que le groupe considéré. Les auteurs modélisent la structure des dépenses standard de chaque groupe sur la base de ses caractéristiques socio-démographiques, en utilisant l'enquête sur les budgets des familles pour l'année 2000 ; la structure de dépenses effective est déterminée sur la base des réponses à l'enquête, qui inclut des questions concernant les déplacements, les vacances, les consommations d'énergie directe, le logement et les habitudes alimentaires. Les différences entre la consommation énergétique standard et la consommation réelle ne sont pas significatives : elles sont comprises entre 0% et 2% pour tous les groupes, et l'hypothèse nulle (que la différence est la même pour tous les groupes) ne peut pas être statistiquement rejetée. Les résultats montrent tout de même un effet significatif de la motivation à réduire ses consommations énergétiques. Les ménages les moins motivés consomment significativement plus d'énergie (environ 4% de la consommation totale) que les ménages ayant une motivation moyenne ou élevée. Il faut noter que l'étude de Vringer et al. (2007) ne fournit pas d'informations concernant le lien entre modes de vie et consommations d'énergie. La classification des ménages a lieu sur la base de valeurs déclarées, qui peuvent ne pas correspondre aux comportements réels des personnes, du fait de contraintes pratiques (par exemple, volonté de trier les déchets mais manque d'un dispositif de triage dans l'agglomération) ou en raison d'une dissonance cognitive entre déclarations et comportement.

Thomas (2012), dans une étude pour EDF R&D, identifie trois groupes de ménages français sur la base des valeurs de Schwarz et des activités de la vie quotidienne¹. Ces groupes, ayant des valeurs et des modes de vie similaires, sont nommés « traditionnels », « bourgeois » et « post-matérialistes ». Il est intéressant de noter qu'à l'intérieur de chaque groupe les variables socio-démographiques sont loin d'être uniformes, ce qui confirme l'intérêt de différencier les ménages selon des variables autres que les revenus ou le type d'habitation. L'étude montre que le mode de vie est corrélé aux consommations énergétiques. En particulier, les différences entre groupes sont significatives en ce qui concerne les modes de transport et les distances parcourues. Concernant les consommations domestiques, les ménages traditionnels sont caractérisés par des consommations légèrement supérieures à la moyenne. Cependant, le groupe d'appartenance n'est pas significatif dans une analyse de régression pour expliquer les consommations d'énergie (directe), si dans le modèle sont inclus la surface du logement ou le revenu. Ceci s'explique en partie par le fait que le mode de vie a un rôle plus important en amont du choix du type de logement et de la localisation qu'en aval. Une autre explication est liée à la définition de mode de vie dans cette étude, qui se base principalement sur les activités réalisées hors domicile (la seule activité au domicile renseignée dans l'enquête est « regarder la télévision »), donc les groupes identifiés pourraient ne pas représenter correctement les comportements au domicile.

1. essentiellement hors domicile

En conclusion, une combinaison bien choisie de variables semble la meilleure façon d'identifier des catégories de ménages pertinentes pour des études prospectives des consommations d'énergie, parce que chaque classification fondée sur un seul critère est forcément simpliste et ne permet pas d'identifier des ménages ayant des modes de consommation similaires.

1.1.4 Scénarios de prospective

Parmi les nombreuses études existantes qui font le lien entre modes de consommation et énergie ou émissions, très rares sont celles qui vont jusqu'à l'analyse de scénarios de prospective pour estimer les impacts de possibles évolutions dans les modes de vie.

Biesiot et Noorman (1999) présentent deux scénarios prospectifs pour les Pays Bas à l'horizon 2015, pour lesquels 1990 est l'année de référence. Dans le premier, ils supposent une croissance élevée et la mise en œuvre massive de mesures d'efficacité énergétique, qui permettent de stabiliser les consommations totales d'énergie (directe et indirecte) sur la période ; dans le deuxième, les mêmes mesures d'efficacité énergétique sont mises en place et en plus le niveau de consommation par ménage est supposé constant au niveau de 1990 : le résultat est une diminution de 50 % de la consommation d'énergie par tête. Les auteurs présentent également une étude de l'impact de changements dans la structure des dépenses. Pour différents types de changements, ils obtiennent des variations des consommations d'énergie totales qui vont d'environ -10% à +10% (la réduction la plus élevée concerne l'hypothèse où les ménages renoncent à la possession de voitures).

Weber et Perrels (2000) analysent quatre scénarios qui partent de 1990 comme année de référence et font des projections jusqu'en 2010 pour les Pays Bas, la France et l'Allemagne de l'ouest. Un des scénarios est censé représenter des modes de consommations soutenables, mais les paramètres qui le définissent sont essentiellement macroéconomiques : une faible croissance du PIB et de la productivité du travail et une réduction du temps de travail.

Kletzan et al. (2006) analysent l'impact de changements de comportement concernant les transports et le chauffage résidentiel en Autriche. Ils estiment un système de demande qui exprime les consommations d'énergie en tant qu'intrant dans la production d'un service énergétique, en combinaison avec les investissements en capital, permettant d'évaluer les effets d'une substitution de l'énergie par le capital (par exemple, rénovation thermique des bâtiments ou amélioration de l'efficacité énergétique des transports). Les auteurs identifient deux groupes de ménages dans l'enquête sur les dépenses des ménages autrichiens, sur la base des dépenses énergétiques (inférieures ou supérieures à la médiane). Ensuite, ils étudient deux scénarios de changements dans les consommations des ménages en supposant que la part de ménages ayant des modes de consommation « durables » (les ménages qui ont des dépenses énergétiques inférieures à la médiane) augmente. Les scénarios sont des analyses ex-post qui fixent un niveau d'émissions

réduit en 1998 et calculent le changement dans les consommations des ménages par rapport à 1990 (l'année de référence) nécessaire pour l'atteindre. L'objectif d'émissions en 1998 pour les deux scénarios est une réduction de 13% des émissions de CO₂ directes des ménages, respectivement pour les transports et le chauffage (en conformité aux objectifs de Kyoto pour l'Autriche). Dans le premier cas, la part des ménages ayant des consommations « durables » devrait passer à 64% pour atteindre l'objectif (donc, une augmentation de 14%). Dans le deuxième cas, elle devrait passer à 62%.

La seule étude publiée, à notre connaissance, qui décrit une analyse en équilibre général des conséquences environnementales de variations dans les modes de consommations est celle de Duarte et al. (2016), concernant l'Espagne. Il ne s'agit pas d'une étude prospective, mais d'une comparaison statique entre la situation de calibrage en 2008 et plusieurs scénarios alternatifs, toujours en 2008. En particulier, les auteurs analysent l'effet d'un report modal de la voiture vers les transports publics jusqu'à atteindre le niveau observé à Madrid (40,1% des déplacements). Cette hypothèse se traduit par l'imposition dans le modèle d'une réduction des dépenses des ménages en carburants et d'une augmentation des dépenses en transports en commun. L'effet global est une réduction de 2,2% des émissions totales (directes et indirectes) de gaz à effet de serre imputées à la consommation des ménages espagnols, par rapport à la référence. L'effet sur l'économie est positif, avec une réduction du chômage (-5,6%) et une augmentation de la production (+0,8%). Un autre scénario concerne l'adoption de régimes alimentaires plus sains (moins de viande, plus de fruits et légumes). Les émissions totales augmentent légèrement dans ce scénario (+0,1%), à cause de l'augmentation des consommations totales des ménages. L'effet sur l'économie est légèrement négatif, avec une hausse du chômage (+0,1%) et une baisse de la production (-0,1%).

En ce qui concerne la France, la relation entre modes de vie, consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre est au centre de plusieurs études prospectives publiées ces dernières années, notamment l'étude PROMOV du CLIP (2012), les scénarios négaWatt 2011 (Association négaWatt, 2013) et négaWatt 2017-2050 (Association négaWatt, 2017) et le scénario « Empreinte environnementale allégée » de l'ADEME (2014).

Dans l'étude du CLIP (2012), les auteurs élaborent cinq scénarios d'évolutions possibles des modes de vie à horizon 2050. Ils estiment les consommations d'énergie directe et indirecte de différents types de ménages français, en combinant plusieurs sources de données (essentiellement des bases de données INSEE, des modèles de consommations d'énergie directe et le *Bilan carbone personnel* de l'ADEME). Chaque scénario 2050 est illustré par le calcul des émissions associées à trois types de ménages qui sont emblématiques du scénario. Il ne s'agit donc pas d'une analyse exhaustive des consommations d'énergie et des émissions, mais plutôt d'une évaluation du potentiel associé aux changements de modes de vie. Les hypothèses concernent six grands postes de consommation (logement, mobilité quotidienne, mobilité exceptionnelle, alimentation, achats de biens, achats de services). Dans 3 des 5 scénarios, les résultats montrent des réductions possibles uniquement grâce aux changements dans les modes de consumma-

tion. La réduction des émissions la plus élevée, de 60%, est associée au type de ménage « adultes avec enfants, en zone urbaine, à revenu faible » dans le scénario « Société duale et sobriété plurielle ». Dans ce scénario, environ 40% de la population adopte un mode de vie alternatif à la société consumériste, avec la mutualisation de biens et services, une réduction du temps de travail total, la réduction de la mobilité longue distance et la diminution des consommations de biens neufs.

Dans le scénario négaWatt 2011 (Association négaWatt, 2013), la sobriété des consommations est un des trois leviers d'action majeurs considérés, avec l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables, pour atteindre à horizon 2050 une réduction de la demande en énergie primaire de 66% par rapport à la demande en 2010 (estimée grâce à une analyse bottom-up). Les hypothèses de sobriété prises en compte dans ce scénario couvrent différents secteurs. Concernant le logement, le scénario suppose l'arrêt de la tendance de dé-cohabitation observée ces dernières années (la taille moyenne des ménages reste stable à 2,2 personnes en moyenne), le développement des logements collectifs, la stabilisation de la surface moyenne des nouveaux logements et le ralentissement de la croissance des surfaces dans le tertiaire. Pour la sobriété dans les transports, en plus d'interventions au niveau de l'urbanisme, on trouve le développement du commerce en ligne et du télétravail, le recours à l'auto-partage de véhicules électriques et de taxi collectifs (dans le scénario, les kilomètres parcourus par personne et par an diminuent en moyenne de 25%) et une augmentation du taux de remplissage des véhicules grâce au covoiturage. Des changements dans le régime alimentaire sont également prévus, avec une réduction des consommations de protéines animales. Le scénario négaWatt 2017-2050 (Association négaWatt, 2017), dont les détails méthodologiques ne sont pas encore publiés, repose sur les mêmes types de changements de modes de consommation que son homologue de 2011.

Le scénario ADEME (2014) analyse le potentiel de réduction de l'impact environnemental des ménages français à horizon 2030 grâce à une analyse entrées-sorties. Les hypothèses de transformation des modes de consommations concernent plusieurs secteurs : mobilité, logement, alimentation, loisirs... Pour la mobilité, le scénario suppose une augmentation de la part de déplacements en transports en commun (de 21% à 28%, à parité de mobilité individuelle en km/an) et une augmentation du recours aux nouvelles formes de mobilité, en particulier les formes de mobilité partagée (covoiturage, autopartage, véhicule avec chauffeur) qui représentent en 2030 30% des flux urbains (cette hypothèse est représentée par une diminution du nombre d'immatriculations de véhicules particuliers neufs accompagnée par une diminution des consommations d'énergie finale). L'hypothèse principale concernant l'alimentation est une réduction du gaspillage de 60% par rapport à 2007 (et de 56% par rapport au scénario de référence en 2030). Les repas hors domicile augmentent par rapport à 2007 mais ils évoluent de la même manière dans le scénario de référence et dans le scénario « empreinte environnementale allégée ». Pour le logement, l'hypothèse principale concernant le comportement est une diminution des surfaces, grâce notamment à la mise en commun d'espaces entre voisins (en plus de l'effet dû à la réduction de la taille du ménage). D'autres hypothèses

du scénario concernent l'évolution des technologies de production et de l'efficacité énergétique dans les usages. Les résultats montrent que les émissions de CO₂ du scénario « empreinte environnementale allégée » sont d'environ 17% inférieures en 2030 à celles du scénario de référence (qui est caractérisé par des émissions presque inchangées par rapport à 2007). Cependant, cette réduction ne tient pas compte de possibles effets rebond.² Ces scénarios ADEME supposent que la structure de consommation des ménages n'évolue pas dans le temps : toutes les économies réalisées par les ménages sont réinvesties dans la consommation au prorata de leur dépenses de 2007. Un changement de la structure de dépenses vers des consommations plus intensives en énergie et émissions pourrait dégrader fortement les impacts environnementaux. Notamment, si toutes les économies étaient dépensées en voyages en avion, les émissions augmenteraient de 6,6% par rapport au scénario « allégé » (ADEME, 2014).

D'autres études prospectives pour la France qui incluent des hypothèses d'évolution de modes de vie sont analysées dans la revue de Le Gallic et al. (2014). Les auteurs attribuent un indice d'évolution des modes de vie à chaque exercice de prospective, en montrant que ces dernières années le nombre d'études prenant en compte plusieurs changements de mode de vie s'est multiplié.

1.2 Énergie et emplois du temps

Nous avons vu dans la section précédente que la plupart des études qui analysent la relation entre modes de vie et consommations d'énergie abordent la notion de mode de vie sous l'angle des dépenses des ménages. Mais comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, le temps revêt une importance fondamentale dans les modes de consommation des ménages, et plusieurs études montrent l'intérêt d'en tenir compte dans l'analyse des modes de vie et des consommations d'énergie (directe et indirecte) des ménages.

Par exemple, Schipper et al. (1989), dans un travail de recherche pionnier, étudient l'impact du mode de vie sur les consommations d'énergie directe aux États-Unis dans les années 1983-1986 en utilisant une approche empirique basée sur des statistiques descriptives ; le mode de vie est défini sur la base de l'allocation du temps et des dépenses des ménages. Quatre grandes catégories d'usage du temps sont considérées : travail, travail domestique, soins/temps physiologiques et temps libre. Des hypothèses concernant les lieux associés aux activités rapportées permettent d'étudier les consommations d'énergie par lieu, essentiellement en faisant la distinction entre consommations au domicile et hors domicile. Les auteurs mettent en évidence que les consommations d'énergie sont une conséquence des décisions en matière d'allocation du temps et qu'une meilleure compréhension des déterminants des usages du temps permet d'étudier de façon plus pertinente les scénarios d'évolution des consommations d'énergie, même dans

2. Voir section 1.2.1 pour une définition.

des contextes où les prix de l'énergie et les revenus des ménages ne changeraient pas. Des facteurs clé pour les consommations d'énergie futures dans les secteurs résidentiel et tertiaire pourraient être, selon les auteurs, les achats à distance (par voie électronique ou autre), le télétravail, la substitution de biens marchands avec des produits fait-maison, la nécessité de plus de structures de soins pour les personnes âgées et d'espaces pour le temps libre. La conclusion de cette étude est encore d'actualité aujourd'hui et elle constitue un important précurseur de notre analyse : « [...] Pour la plupart des pays industrialisés, l'augmentation du taux de possession ou de la disponibilité d'équipements et infrastructures ne produira plus de changements significatifs dans les consommations d'énergie. En revanche, des changements dans les usages de ces équipements seront la principale cause de changements dans les consommations d'énergie. Ces changements seront déterminés par de nombreux facteurs en plus des prix et des revenus. [...] les facteurs les plus importants sont ceux qui influencent le mix des activités personnelles et leur localisation. [...] comprendre comment l'éventail des activités humaines change pourrait être la clé d'une meilleure compréhension des consommations d'énergie futures. [...] Les modèles d'activité future qui se basent sur la traditionnelle analyse économique des dépenses, ou l'estimation de la demande d'énergie en fonction seulement des prix et des revenus, vont négliger l'expansion de la gamme [des activités des personnes et des façons de les réaliser]. [...] nous proposons des modèles d'activités qui utilisent le temps (et la localisation), qui fournissent la meilleure intuition de ce que les personnes font, en plus du lieu et de la durée [de l'activité]. Comme le nombre d'heures par jour est limité, l'approche basée sur l'allocation du temps aux activités oblige l'analyste à considérer à la fois ce que les gens pourraient faire de différent dans le futur par rapport à ce qu'ils font aujourd'hui et ce que les gens ne feront pas en conséquence de leurs nouvelles activités. »³ (Schipper et al., 1989).

L'intégration de données temporelles dans les études énergétiques permet donc de mieux comprendre les mécanismes de consommation et les changements futurs, dans un contexte de rapide évolution des modes de consommation et des emplois du temps. Par exemple, la prise en compte de l'aspect temporel est importante pour analyser des possibles effets rebond relatifs au temps (section 1.2.1). Les aspects temporels des consommations d'énergie sont également fondamentaux pour les analyses de la demande d'électricité, dans le contexte du développement des smart grids et de l'essor des TIC

3. « [...] for most industrialized countries, increases in the ownership or availability of equipment and infrastructure will no longer drive significant changes in energy demand. Instead, changes in use of this equipment will be the dominant source of changes in energy demand. Such changes will be driven by many factors besides prices and incomes. [...] the most important factors are those that influence the mix of personal activities and their locations. [...] understanding how the spectrum of human activities changes may be the key to a better understanding of future energy use. [...] Models of future activity based on traditional economic analysis of expenditures, or estimation of energy demand as a function of prices and incomes alone, will miss this expanding range of "what [people do] and how [they do it]. [...] we propose models of activities that use time (and location), which provide the best insights into what people are doing, as well as where and for how long. Since the number of hours in the day is limited, the time-based activity approach forces the analyst to consider both what people might do in the future that is different from what they do today, as well as what they will not do as a consequence of their new activities. » (Schipper et al., 1989)

dans la gestion des consommations d'énergie domestiques. Cependant, nous limiterons notre revue de littérature, sur cet aspect, aux études qui ont pour finalité d'informer les analyses sur le lien entre modes de vie et consommations d'énergie.

1.2.1 L'effet rebond et le temps

Dans le contexte des consommations d'énergie, on parle d'effet rebond quand des économies réalisées dans les dépenses énergétiques grâce à des mesures d'amélioration d'efficacité énergétique, comme par exemple la rénovation thermique des bâtiments, permettent aux ménages de consommer plus (par exemple, pour améliorer le confort thermique) ou de diriger l'argent économisé vers d'autres postes de consommation qui induisent également des consommations d'énergie. Les réductions dans les consommations d'énergie sont alors moins fortes que celles attendues, et les consommations d'énergie pourraient même augmenter (dans ce cas on parle de *backfire*).

Greening et al. (2000) distinguent trois types d'effets rebond : un effet direct, un effet indirect et un effet macroéconomique. L'effet rebond direct a lieu parce qu'une amélioration de l'efficacité énergétique d'un service en réduit le prix, toutes choses égales par ailleurs, et stimule donc la demande pour le service ; si la réduction du prix d'un service énergétique a des effets sur la demande pour d'autres services qui consomment de l'énergie on parle d'effet rebond indirect (observable grâce à une analyse entrées-sorties) ; les effets macroéconomiques ont lieu parce que la réduction du prix d'un service énergétique peut avoir des répercussions sur les prix de certains produits intermédiaires ou finaux, engendrant des changements des prix et de la demande dans différents secteurs de l'économie (on peut estimer cet effet avec un modèle d'équilibre général calculable) (Sorrell et Dimitropoulos, 2008). En général, les estimations empiriques confirment l'existence de ces effets, même s'il n'y a pas de consensus sur leur importance (Binswanger, 2001; Sorrell et Dimitropoulos, 2008).

Khazzoom (1980) décrit pour la première fois l'effet rebond comme le résultat de l'élasticité prix de la demande d'énergie. Sorrell et Dimitropoulos (2008) présentent différentes définitions de l'effet rebond direct et leurs implications, dans un cadre théorique qui fait référence à celui de la fonction de production des ménages : la demande d'énergie est une conséquence de la demande pour des services énergétiques, tels que le confort thermique ou le transport, les consommateurs n'obtenant pas d'utilité directe de la consommation d'énergie. Un service énergétique est caractérisé par le travail utile qu'il fournit (S) (par exemple dans le cas du transport il pourrait être exprimé en véhicules-kilomètres ou en passagers-kilomètres). L'effet rebond direct est souvent exprimé comme l'élasticité de la demande pour le travail utile par rapport à l'efficacité énergétique : si on note E l'énergie et $\varepsilon = S/E$ l'efficacité énergétique du système, l'effet

rebond est (Sorrell et Dimitropoulos, 2008) :⁴

$$\eta_\varepsilon(S) = \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{S} \quad (1.1)$$

L'élasticité de la demande d'énergie par rapport à l'efficacité est :

$$\eta_\varepsilon(E) = \frac{\partial E}{\partial \varepsilon} \frac{\varepsilon}{E} \quad (1.2)$$

Comme $E = S/\varepsilon$, on peut mettre en relation ces deux élasticités :

$$\eta_\varepsilon(E) = \eta_\varepsilon(S) - 1 \quad (1.3)$$

S'il n'y a pas d'effet rebond, c'est-à-dire si $\eta_\varepsilon(S) = 0$, l'élasticité de la demande d'énergie par rapport à l'efficacité énergétique est égale à -1, donc la demande d'énergie diminue proportionnellement à l'amélioration dans l'efficacité énergétique.

Il existe aussi un effet rebond concernant l'efficacité temps. Il est défini, de façon similaire à l'effet rebond concernant l'efficacité énergétique, comme une élasticité par rapport à l'efficacité temps (1.4) (Sorrell et Dimitropoulos, 2008).

$$\eta_\theta(T) = \eta_\theta(S) - 1 \quad (1.4)$$

Cet effet représente la demande accrue pour un service après l'introduction d'une innovation qui permet d'en augmenter l'efficacité temporelle. Quand l'efficacité temporelle d'un service augmente, son coût diminue (en termes de renoncement au salaire), ce qui fait augmenter la demande pour le service au détriment d'un autre service qui serait moins efficace en temps (Binswanger, 2001). La substitution peut avoir un effet sur les consommations d'énergie, si les intensités énergétiques (par rapport au temps) des deux services sont différentes. La prise en compte du temps permet également d'analyser les arbitrages entre temps et énergie dans la production de services et les arbitrages entre services intensifs en temps et services intensifs en énergie. Si le coût du temps augmente, il y aura une substitution de services intensifs en temps par des services intensifs en énergie, et une substitution du temps par l'énergie dans la production des services (Binswanger, 2001). Les services qui consomment plus d'énergie et moins de temps sont plus demandés quand les prix de l'énergie sont faibles, ce qui est le cas aujourd'hui dans les pays développés (Binswanger, 2001).

Brenčić et Young (2009) procèdent à une estimation empirique de l'effet rebond relatif au temps, à travers l'analyse de l'impact d'appareils électroménagers efficaces en temps (comme les micro-ondes et les lave-vaisselle) sur l'allocation du temps des ménages et leurs consommations d'énergie. Les auteurs réalisent une analyse de régres-

4. Les définitions présentées ici concernent un modèle avec un seul service ; l'énergie est le seul input pour la production du service.

sion expliquant la fréquence d'utilisation des appareils électroménagers sur la base de variables qui indiquent la possession d'un certain nombre d'appareils en plus de variables de contrôle, en considérant à la fois l'effet rebond temporel direct (l'utilisation d'une technologie qui permet d'économiser du temps dans la préparation du repas peut engendrer une augmentation du temps passé à faire la cuisine) et l'effet rebond temporel indirect (l'utilisation de la nouvelle technologie peut causer une augmentation du temps alloué à d'autres activités). Un seul exemple d'effet rebond direct apparaît dans les résultats, concernant la préparation de repas. Les ménages à revenus modestes qui possèdent un four autonettoyant ont tendance à utiliser le lave-vaisselle plus souvent que les autres, ce qui indique que cette technologie qui permet d'économiser du temps dans la préparation du repas inciterait à préparer des repas plus élaborés (ce qui entraîne une plus grande quantité de vaisselle nécessaire à la préparation). Cependant, des familles qui possèdent un four auto-nettoyant pourraient avoir une préférence vers les économies de temps qui pourrait expliquer qu'elles font recours plus souvent au lave-vaisselle, sans que ce soit un effet rebond. De plus, il est étonnant que cet effet rebond n'apparaisse pas pour les ménages à hauts revenus, pour lesquels la valeur du temps devrait être plus élevée. D'autres résultats attestent un effet rebond temps indirect : les ménages qui possèdent un lave-vaisselle ont tendance à utiliser la machine à laver ou le sèche-linge plus souvent. La même réflexion faite pour le résultat précédent peut s'appliquer à ce dernier.

Même si les évaluations empiriques de l'effet rebond par rapport au temps sont rares, il s'agit d'un élément important à prendre en compte dans une analyse qui envisage une redistribution des activités dans la journée due à une modification des modes de vie. La méthode d'évaluation des impacts de changements de modes de vie sur les consommations d'énergie que nous proposons dans le chapitre 4 permet de considérer ce type d'effet rebond.

1.2.2 L'intensité énergétique du temps

Il existe quelques études qui abordent le lien entre temps et énergie en estimant l'intensité énergétique du temps employé dans différentes activités.

Par exemple, Jalas (2002) analyse l'intensité énergétique totale (directe et indirecte) du temps des activités hors travail, pour les ménages finlandais de deux personnes en 1990. Il estime les consommations d'énergie indirecte à partir des données sur les dépenses des ménages et d'une base de données détaillant le contenu énergétique des produits par unité monétaire. Seule une sélection d'activités des ménages est considérée, en particulier des activités liées à l'alimentation ou au temps libre. Les dépenses publiques et les dépenses d'« infrastructure » telles que chauffage, éclairage, loyer, meubles et vêtements, ne sont imputées à aucune activité. Les résultats montrent que l'activité la plus intensive en énergie totale est le transport en voiture, suivie par les repas hors domicile et le lavage et repassage du linge à domicile. L'auteur s'intéresse aux possibilités

d'externalisation de certains services par les ménages et aux effets rebonds relatifs au temps qui pourraient s'en suivre. En effet, si le gain de temps grâce à l'externalisation du service est utilisé pour une activité qui est plus intensive en temps que l'activité substituée, les consommations d'énergie du ménage augmentent, dans le cas contraire elles diminuent.

Jalas (2005) utilise la même méthodologie que Jalas (2002) et il en reprend les résultats pour réaliser une analyse des consommations d'énergie directes et indirectes des ménages finlandais entre 1990 et 2000. L'analyse sépare les effets dus au changement des emplois du temps de ceux dus à l'évolution des intensités énergétiques des activités. Les résultats montrent une évolution vers des activités moins intensives en énergie, cependant l'intensité énergétique moyenne des activités augmente sur la période. En général, l'augmentation du temps dédié à une activité correspond à une augmentation des consommations d'énergie associées et vice versa, avec deux exceptions. Pour les achats, le temps croît mais les consommations d'énergie diminuent. Pour les travaux domestiques, les consommations d'énergie augmentent même si le temps baisse légèrement. Ce dernier résultat pourrait être lié à l'usage d'appareils électroménagers ou à l'externalisation de certains travaux domestiques (qui pourrait être à l'origine d'un effet rebond temps).

Jalas et Juntunen (2015) complètent les travaux précédents en prolongeant l'analyse de décomposition jusqu'en 2009. Les résultats montrent une évolution dans le même sens du temps et des consommations d'énergie pour toutes les activités, sauf les déplacements de loisirs et les déplacements domicile-travail, pour lesquels les consommations d'énergie augmentent sur la période, alors que les temps de déplacements diminuent. Les auteurs comparent les intensités énergétiques des activités de différents types de ménages et révèlent de larges variations dues en partie à des économies d'échelle et à des effets revenus.

Nässén et al. (2009) partent d'une analyse des intensités énergétiques du temps pour évaluer l'impact d'un changement des horaires de travail sur les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre : une réduction des horaires de travail aurait comme conséquence une réduction des revenus disponibles et donc des dépenses (et des consommations d'énergie associées) mais aussi une augmentation du temps libre, qui pourrait entraîner une augmentation des consommations d'énergie selon le type d'activité choisi. Les auteurs estiment par des régressions linéaires les dépenses par ménage sur 104 postes de dépenses, sur la base du revenu et d'autres variables de contrôle, et l'allocation du temps à 12 activités sur la base du temps de travail et du revenu. Ensuite, ils font l'hypothèse que le temps de travail diminue d'une heure, ayant un impact sur les revenus disponibles et sur l'emploi du temps. Les résultats montrent que l'effet revenu est plus fort que l'effet temps libre et que donc une réduction des horaires de travail de 1% produirait une réduction de 0.83% des consommations d'énergie et une réduction de 0.85% des émissions (Nässén et al., 2009). Dans cette étude, comme dans ceux de Jalas, les déplacements en voiture sont l'activité la plus intensive en énergie par unité de temps.

Druckman et al. (2012) combinent des informations sur les emplois du temps, les émissions directes et les dépenses des ménages britanniques avec une analyse entrées-sorties pour calculer les intensités en gaz à effet de serre de plusieurs activités, en prenant en compte les émissions directes et indirectes. Dans cette étude, les soins personnels (y compris le lavage de vêtements et les soins médicaux) sont caractérisés par les intensités les plus élevées, suivis par les repas (au domicile ou hors domicile) et les déplacements domicile-travail.

Les disparités dans les intensités énergétiques entre une activité et l'autre mises en avant dans ces travaux de recherche montrent que des modifications des choix d'activité par les ménages, comme ceux qui pourraient résulter d'un changement de modes de vie, sont susceptibles d'avoir des impacts importants sur les consommations d'énergie, à la fois directe et indirecte (donc, sur les consommations d'énergie des secteurs productifs). Aucun travail de recherche, à notre connaissance, n'utilise des informations de ce type sur les emplois du temps pour alimenter des scénarios de prospective énergétique. Dans les chapitres suivants, nous présentons une analyse approfondie des emplois du temps et des consommations d'énergie directe des ménages français, en estimant des intensités énergétiques dans le même esprit que les études citées dans cette section, mais avec un niveau de détail plus élevé en ce qui concerne l'allocation des consommations d'énergie aux activités. Ensuite, nous utilisons les informations obtenues grâce à cette analyse de données dans l'exercice de prospective décrit dans les chapitres 4 et 5.

Chapitre 2

Création d'une base de données micro des ménages français

Comme nous l'avons vu dans le chapitre introductif, les modes de consommation des ménages et leurs possibles évolutions sont en général étudiés par le biais de données concernant les dépenses. Cependant, le budget monétaire ne constitue pas le seul élément de décision dans les choix de consommation, et le temps à disposition représente une autre contrainte déterminante dont il faut tenir compte.

Malheureusement, il est très rare de trouver des enquêtes recensant en même temps emplois du temps et dépenses des ménages. En France, une enquête de 1989¹ allait dans ce sens, avec des questionnaires concernant les activités domestiques réalisées par les ménages, complétés par la collecte de carnets de dépenses et d'emploi du temps. Les modes de vie des ménages français ont cependant bien évolué depuis 1989, et il n'existe pas d'enquête plus récente combinant les mêmes informations.

Ce chapitre présente donc un travail d'appariement statistique de plusieurs enquêtes récentes, dont les principales sont les enquêtes Budget de Famille (BDF) et Emploi du Temps (EDT) INSEE, afin de disposer d'une base de données permettant une analyse plus complète des modes de consommation que celle permise par les seuls budgets de dépenses. Les sources de données utilisées sont les enquêtes Emplois du Temps, Budget de Famille et Enquête Nationale Logement de l'INSEE, l'Enquête Nationale Transports et Déplacements du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer et une enquête sur les consommations d'électricité spécifique réalisée par EDF R&D. Nous obtenons des informations supplémentaires concernant les prix des énergies de l'enquête PHEBUS du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer.

Les sections 2.1 - 2.9 présentent les différentes étapes du processus, qui sont résumées en Figure 2.1. D'abord, nous réalisons un appariement statistique par régression entre les enquêtes BDF et EDT, qui permet d'estimer l'emploi du temps des ménages de BDF sur la base de 15 activités qui regroupent la totalité des usages du temps détaillés

1. Modes de vie - 1988-1989, INSEE (producteur), ADISP-CMH (diffuseur)

dans EDT. Ensuite, nous intégrons les informations des autres sources de données par étapes successives en procédant par cellulage. Nous pouvons ainsi ventiler les dépenses d'énergie, les temps de transport et les dépenses de transport, et calculer les prix des énergies par ménage et donc estimer les consommations d'énergie en volume. La section 2.10 décrit la méthode de calcul des intensités énergétiques qui seront commentées dans le chapitre suivant dans le cadre de l'analyse des temps et des consommations d'énergie pour différentes catégories de ménages français.

2.1 Les enquêtes

Les deux bases de données principales utilisées pour ce travail sont l'enquête *Emploi du temps* (EDT) 2009-2010 (INSEE, 2010) et l'enquête *Budget de famille* (BDF) 2011 (INSEE, 2011) de l'INSEE, qui ont comme champ d'enquête la France entière.

L'enquête EDT se base sur des carnets journaliers qui décrivent les activités des répondants pendant une période de vingt-quatre heures, par pas horaire de dix minutes. Pour chaque ménage participant à l'enquête, un individu est tiré au sort parmi les personnes âgées de onze ans et plus. Cet individu est interrogé, ainsi que son conjoint éventuel. Chaque répondant remplit un ou deux carnets (un carnet pour un jour de semaine et/ou un carnet pour un jour du weekend) en détaillant les activités réalisées ainsi que leur localisation. Des informations additionnelles de type socio-démographique sur les individus qui ont rempli les carnets et les ménages d'appartenance sont également collectées. Le nombre total de carnets disponibles est de 27 903, pour 18 521 individus appartenant à 12 069 ménages. Comme l'enquête est le résultat de six vagues de collecte de données sur une durée d'un an, les résultats tiennent compte des variations des emplois du temps au cours de l'année et sont donc représentatifs pour une année entière.

Les enquêtes BDF sont réalisées depuis 1979 par l'INSEE à un rythme quinquennal. L'enquête 2010-2011 décrit les dépenses de 15 797 ménages français ainsi que leurs sources de revenu. Chaque ménage participant remplit un carnet de dépenses couvrant une période d'une semaine. Comme EDT, BDF est le résultat de six vagues d'enquête sur une période d'un an pour tenir compte des variations saisonnières des dépenses.

Une différence importante existe dans la manière dont les deux enquêtes présentent les données. Dans BDF, les dépenses sont renseignées au niveau des ménages, alors que dans EDT les emplois du temps sont renseignés au niveau des individus (en général, seule une partie des membres d'un ménage donné remplissent un carnet d'emploi du temps). Pour l'appariement, on pourrait soit estimer les emplois du temps des individus constituant les ménages de BDF, soit estimer des dépenses pour les individus de EDT. Nous avons retenu la première option parce que BDF ne fournit pas les données de dépenses complètement individualisées qui permettraient d'assigner un budget de consommation aux individus de EDT, alors qu'il est possible, grâce aux données d'EDT, d'estimer les emplois du temps des individus dans BDF. En conséquence, l'analyse comparée des

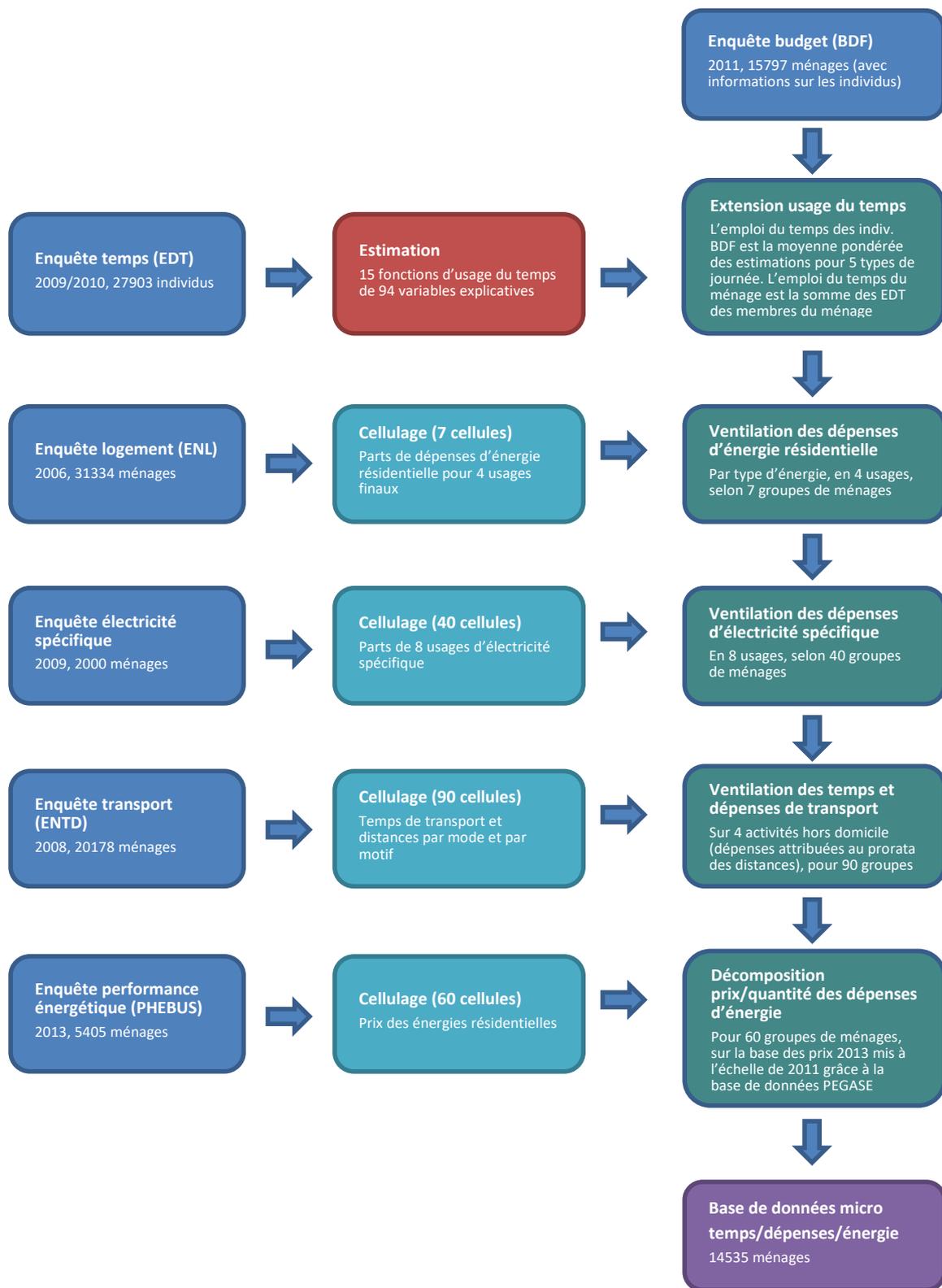


FIGURE 2.1 – Schéma résumant les étapes de création de la base de données micro

budgets de consommation et des emplois du temps présentée ici est réalisée au niveau du ménage et non par individu.

L’objectif de l’appariement est donc d’obtenir une base de données reconstruite détaillant à la fois des dépenses annuelles et un usage du temps annuel pour le plus grand nombre de ménages possible. Le premier pas consiste en la définition, détaillée en section 2.2, d’un certain nombre d’activités représentatives de la vie quotidienne.

2.2 Définition des activités

Les carnets d’emploi du temps de l’enquête EDT représentent les actions de la vie quotidienne sous forme de 140 catégories. Le regroupement de ces catégories en un certain nombre d’activités est nécessaire pour pouvoir estimer statistiquement l’allocation du temps pour chacune d’entre elles. En effet, si le niveau de détail est trop élevé, l’estimation devient difficile pour des activités très spécifiques qui sont pratiquées seulement par une petite fraction des répondants à l’enquête. De plus, l’allocation des dépenses de BDF de manière non ambiguë est impossible si les activités sont décrites trop finement. Le choix de regroupement des catégories d’EDT représente donc un compromis entre la volonté de représenter de manière suffisamment détaillée les activités quotidiennes et les difficultés évoquées plus haut. Nous avons retenu 15 activités, qui couvrent tous les usages du temps des carnets EDT (Tableau 2.1). Ce niveau de détail est similaire à celui d’autres études de ce type (Gronau et Hamermesh, 2006; Druckman et al., 2012; Jalas et Juntunen, 2015). Le tableau A.1 en annexe présente de manière détaillée l’association des catégories EDT aux activités.

Les loisirs au domicile sont regroupés en deux activités : les loisirs « à haute intensité énergétique » qui sont caractérisés par l’utilisation d’appareils électriques ou électroniques (regarder la télévision, naviguer sur Internet, jouer aux jeux vidéo...) et les loisirs à « basse intensité énergétique » (converser avec quelqu’un, lire...). Le sport au domicile est inclus dans cette dernière activité, alors que les loisirs hors domicile se retrouvent dans la catégorie « Sport et sorties ». Évidemment, le choix de regroupement des activités est quelque peu arbitraire, surtout en ce qui concerne la caractérisation de certaines activités en tant que loisir. La préparation de repas ou promener le chien peuvent sûrement être considérés comme des loisirs par certains.

La répartition des lieux de réalisation des activités, après regroupement, est représentée en Figure 2.2. On peut remarquer que 9 activités ont lieu en grande partie au domicile (« Assistance », « Loisirs à basse intensité énergétique », « Loisirs à haute intensité énergétique », « Repas au domicile », « Sommeil », « Temps personnel », « Travaux domestiques : maison », « Travaux domestiques : repas » et « Travaux domestiques : vêtements »), 4 activités ont lieu presque exclusivement hors domicile (« Achats et démarches », « Repas hors domicile », « Sport et sorties », « Travail et études ») et 2 activités sont des trajets. La distinction entre activités au domicile et hors domicile

TABLEAU 2.1 – Liste des activités de la vie quotidienne retenues pour notre analyse

Activité	Détail
Achats et démarches	Achats, démarches, soins reçus hors domicile
Assistance	S'occuper d'autres membres du ménage (enfants ou adultes) ou s'occuper des animaux domestiques
Loisirs (basse int. én.)	Lecture, socialisation au domicile, créations, faire de la musique, sport au domicile
Loisirs (haute int. én.)	Télévision, radio, ordinateur, Internet, consoles de jeu, conversations téléphoniques, regarder ou faire des vidéos, écoute de musique
Repas au domicile	Prise de repas au domicile (temps de préparation et rangement exclus)
Repas hors domicile	Prise de repas hors domicile (repas sur le lieu de travail exclus)
Temps personnel	Hygiène, beauté, soins au domicile
Trajets domicile-travail	Trajets domicile-travail ou domicile-lieu d'études et inversement
Trajets : autres	Trajets pour tous les motifs hors travail / études
Travail et études	Travail rémunéré et études, y compris le temps de prise de repas sur le lieu de travail
Travaux domestiques : repas	Préparation des repas, vaisselle et rangement
Travaux domestiques : maison	Ménage, rangement, bricolage, jardinage
Travaux domestiques : vêtements	Lavage, repassage, réparation de vêtements
Sommeil	Sommeil, temps autour du sommeil, être malade au lit
Sport et sorties	Sport hors domicile, visites, événements sociaux, sportifs ou culturels, activités de plein air

n'est pas systématique dans EDT, parce que seulement dans le cas des repas l'enquête propose clairement deux codes d'activités distincts pour séparer les repas au domicile des autres. Pour la suite des analyses, nous séparons les activités en activités au domicile et activités hors domicile, selon la part du domicile dans la localisation de l'activité.

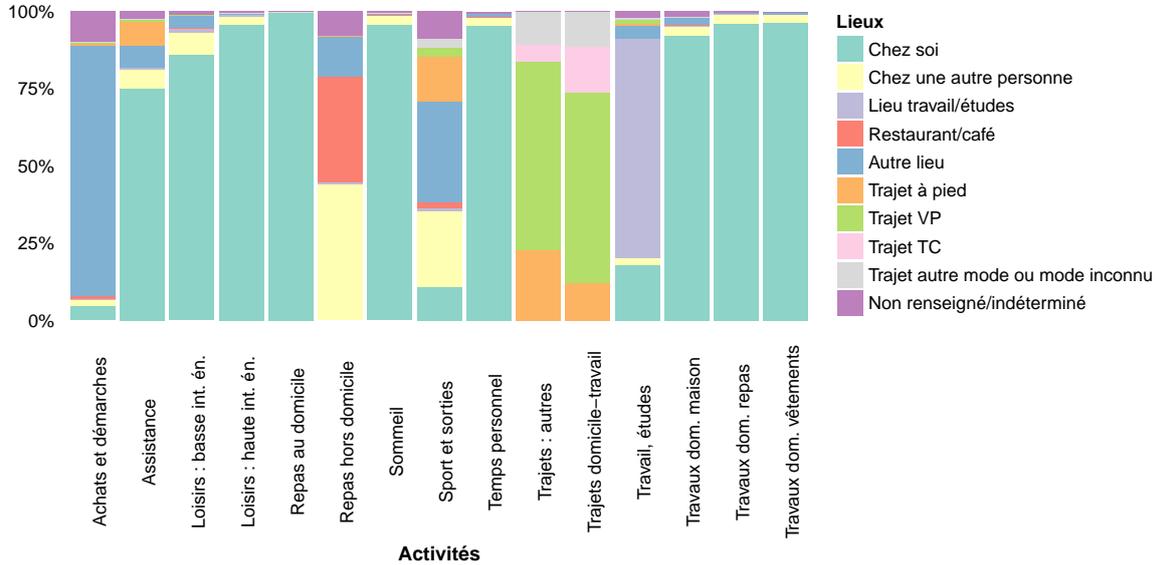


FIGURE 2.2 – Distribution moyenne des lieux de réalisation des activités dans l'enquête EDT

2.3 Choix de la méthodologie d'appariement

Nous avons pris en considération deux méthodologies possibles d'appariement : par cellulaire (*clustering*) ou par régression. L'appariement par cellulaire se base sur le choix, à priori, de quelques variables caractéristiques des ménages qu'on pense être déterminantes pour les comportements en termes de dépenses et d'emploi du temps. Sur la base des combinaisons des valeurs prises par ces variables (qui doivent être des variables catégorielles), les ménages sont regroupés en « cellules » qui représentent chacune une classe de ménages (par exemple, si les variables sont décile de revenu et tissu urbain, nous obtenons la classe des ménages de décile 10 résidant en milieu rural, celle des ménages de décile 10 résidant en centre ville, etc.). L'étape suivante est le calcul de la valeur moyenne des variables d'intérêt (c'est-à-dire les temps par activité de l'enquête EDT, dans notre cas) pour chaque cellule. Ces valeurs seront ensuite associées aux ménages de BDF appartenant à la même cellule. Cette méthode a les mérites de la rapidité et de la simplicité. En revanche, une fois le choix des variables de classement effectué, il est impossible de le modifier sans reprendre les calculs dès le début. Parce que un grand nombre de variables sont susceptibles d'influencer les emplois du temps des ménages, et que pour avoir des cellules avec un nombre de ménages statistiquement significatif il n'aurait pas été possible d'utiliser plus de deux ou trois variables

(en fonction du nombre de modalités de chacune) pour la classification, nous avons préféré l'appariement par régression. Cette méthode se base sur l'estimation des emplois du temps par des régressions statistiques, ce qui permet de tenir compte d'un grand nombre de variables explicatives en même temps, sans besoin de définir des classes de ménages a priori. Les régressions sont estimées grâce aux données EDT, en choisissant des variables explicatives communes aux deux enquêtes, pour ensuite utiliser les lois estimées pour la prévision des temps par activité dans BDF. Il existe de nombreux exemples en littérature d'utilisation de régressions pour l'appariement d'enquêtes sur l'emploi du temps et les budgets des ménages (Jenkins et O'Leary, 1996; Hamermesh, 2007; Gardes, 2014).

Un autre choix méthodologique s'impose concernant le type de régression à utiliser. En effet, les carnets journaliers de l'enquête EDT présentent un nombre important de temps nuls sur les 24 heures pour certaines activités. On pourrait donc utiliser, plutôt que des régressions linéaires, des modèles de régression alternatifs, adaptés à des situations où la variable expliquée est continue mais limitée à une plage de valeurs (par exemple les valeurs non négatives). Ces variables sont appelées « réponses d'angle » (Wooldridge, 2010), parce que les réponses se « densifient » autour de un ou deux points. Des exemples typiques de ce type de variables dépendantes sont les dépenses observées dans les enquêtes sur les budgets des ménages et les temps par activité observés dans les carnets des enquêtes emploi du temps.

Un modèle souvent utilisé dans le cas de réponse d'angle est le modèle Tobit d'après Tobin (1958). Si la variable observée a une seule limite inférieure qui se trouve à 0, le modèle peut être écrit comme $y = \max(0, y^*)$, où y^* est une variable latente qui satisfait les hypothèses du modèle linéaire classique (Wooldridge, 2010), avec : $y^* = \mathbf{x}\boldsymbol{\beta} + u$, $u|\mathbf{x} \sim \text{Normal}(0, \sigma^2)$. Le modèle Tobit standard implique que les effets relatifs de deux variables explicatives sur la décision de « participation » (c'est-à-dire sur la probabilité $P(y > 0 | \mathbf{x})$) et sur la décision de la « quantité » (la valeur de y quand elle est positive) sont les mêmes. Une extension de cette approche est le modèle en deux parties proposé par Cragg (1971), qui permet de considérer différents mécanismes qui déterminent la participation et la quantité (Wooldridge, 2010).

Cependant, la présence d'une valeur nulle dans un carnet d'emploi du temps n'implique pas que l'individu ne réalise jamais l'activité, mais seulement qu'il ne l'a pas réalisée pendant le temps d'observation. Il y a donc un problème de différence d'échelle entre la période d'intérêt (qui pour notre étude est d'un an) et la période d'observation (24 heures). Le modèle Tobit pourrait ne pas être adapté dans ce cas. Stewart (2009) compare des estimations d'usage du temps à partir de carnets journaliers réalisées avec trois méthodes : moindres carrés ordinaires, Tobit et modèle en deux parties de Cragg (1971). Il conclut que « Vu la robustesse des moindres carrés ordinaires aux différentes hypothèses concernant le processus de génération des données et [vu] la facilité d'estimation des moindres carrés ordinaires, il est difficile de recommander le modèle Tobit ou le modèle en deux parties. Si le chercheur est intéressé à la probabilité d'entreprendre une activité un jour donné, le modèle en deux parties, même si imprévisible,

est plus performant que le Tobit. Cependant, pour la plupart des questions de politique publique, il est seulement nécessaire de connaître comment certaines variables influencent le temps moyen passé sur une activité et l'information supplémentaire sur la probabilité de réaliser l'activité un jour donné n'ajoute pas grand-chose. » (Stewart, 2009). Pour Frazis et Stewart (2012) également, les modèles linéaires sont préférables pour estimer les moyennes à long terme des usages du temps à partir d'observations journalières, même si une large proportion des valeurs observées pour certaines activités sont nulles. Foster et Kalenkoski (2013) utilisent un modèle linéaire et un modèle Tobit pour estimer le temps passé à s'occuper des enfants en trouvant des résultats similaires pour les deux méthodes. Gershuny (2012) considère également le problème de période d'observation concernant les carnets et affirme que les données basées sur des carnets journaliers peuvent conduire à des estimations précises des moyennes de temps par activité pour des sous-échantillons et sous-groupes, même si elles ne permettent pas d'avoir beaucoup d'informations sur la distribution des activités sur l'échantillon de population. Pour ces raisons, et comme pour notre analyse nous nous intéresserons à terme à des valeurs moyennes d'usage du temps par classe de ménages et nous n'utiliserons pas directement les valeurs d'usage du temps individuels, nous retenons comme méthode pour l'appariement la régression linéaire.

Les enquêtes de l'INSEE sont représentatives de la France entière à condition d'utiliser les pondérations des ménages fournies. Nous avons donc recours à des régressions linéaires aux moindres carrés pondérées, et nos analyses suivantes se basent systématiquement sur ces pondérations.

2.4 Variables explicatives

Comme nous l'avons anticipé dans la section précédente, les variables explicatives utilisées pour les régressions décrivant les usages du temps des individus de EDT doivent également être présentes dans BDF. Les deux enquêtes étant menées par l'INSEE, un bon nombre de variables caractérisant les ménages et les individus sont communes et elles sont définies de la même manière (il s'agit essentiellement des variables du « tronc commun des ménages »² INSEE). De légers ajustements ont été nécessaires pour d'autres variables. Le Tableau 2.2 résume les variables explicatives retenues pour les régressions. La liste complète des variables et de leurs modalités est présentée en annexe dans le Tableau A.2. Quand nous faisons référence aux revenus, il s'agit toujours des revenus par unité de consommation (UC), selon la définition de l'OCDE³ (variable *decuc1*).

Les variables *classe d'âge* et *catégorie socio-professionnelle* étant fortement corrélées,

2. C'est la partie commune à toutes les enquêtes de l'INSEE réalisées auprès des ménages.

3. La personne de référence du ménage compte pour une unité de consommation, toute personne additionnelle âgée 14 ans ou plus compte pour 0,5 unités et chaque enfant de moins de 14 ans compte pour 0,3 unités.

TABLEAU 2.2 – Variables explicatives utilisées pour les régressions

Type	Variabes
Variabes sociodémographiques	Revenu, âge, sexe, catégorie socio-professionnelle, type de ménage, nationalité
Variabes géographiques	Taille de l'unité urbaine, zonage en aires urbaines, Zone d'Étude et d'Aménagement du Territoire (ZEAT)
Variabes relatives au logement	Type de logement, surface, statut d'occupation, type d'habitat dans le voisinage, recours à une aide rémunérée pour les travaux ménagers
Possession d'équipements	Télévision, ordinateur, Internet, téléphone, téléphone portable, micro-ondes, lave-vaisselle, lave-linge, deux-roues motorisé, voiture
Possession d'animaux	Chats, chiens, autres animaux
Type de journée	Journée travaillée, semi-travaillée, non travaillée, maladie, autre

l'inclusion des deux dans la régression aurait généré un phénomène de multicollinéarité. Pour éviter ce problème, nous réalisons une ACP de ces variables (séparément) et nous utilisons dans la régression les composantes principales de chacune à la place des variables originales (les modalités originales des variables sont présentées dans les tableaux A.3 et A.4 en annexe). Les enfants⁴ sont caractérisés par un type de ménage à part dans les régressions par individu, parce que nous faisons l'hypothèse que l'emploi du temps des enfants ne dépend pas du type de ménage dans lequel ils vivent (que ce soit un couple avec enfants ou un ménage monoparental). EDT ne concerne que des individus de 11 ans et plus, donc nous n'avons pas d'informations concernant l'emploi du temps des enfants plus jeunes.

La variable *type de journée*, présente dans l'enquête EDT et relative au jour décrit dans le carnet, n'est pas présente dans l'enquête BDF puisque les carnets BDF couvrent une période d'une semaine. Elle a été cependant retenue dans les régressions pour tenir compte des différences entre jours travaillés et jours non travaillés qui influencent grandement certains usages du temps (notamment temps de travail et temps de loisirs). L'intégration de cette variable dans les régressions permet d'obtenir de meilleurs résultats statistiques, notamment en ce qui concerne les coefficients de détermination (part de variance expliquée par rapport à la variance totale de la variable dépendante) et la normalité des résidus.

Pour remédier à l'absence de la variable *type de journée* dans BDF, nous avons estimé pour chaque individu de BDF les emplois du temps journaliers pour chaque type de journée. Ensuite, nous avons calculé l'emploi du temps pour une journée « moyenne » sur l'année, en appliquant aux individus BDF la distribution des types de journée observée dans EDT sur la base de la catégorie socio-professionnelle (Tableau 2.3).

4. L'enfant est défini dans les enquêtes auprès des ménages INSEE comme « une personne célibataire, qui n'est pas en couple avec une personne de son ménage (au sens des enquêtes auprès des ménages), ayant un parent (père ou mère) dans son ménage, et n'étant pas lui-même parent (père ou mère) d'une personne de son ménage. » (INSEE, 2016)

TABLEAU 2.3 – Répartition des types de journée par CSP (%)

	Travaillée	Semi-trav.	Non trav.	Maladie	Autre
Agriculteurs	68,8	13,9	12,9	0,6	3,8
Artisans, commerçants, chefs d'entreprise	62,9	11,3	24,8	0,5	0,5
Cadres etc.	57,7	4,5	35,5	1,0	1,2
Prof. intermédiaires	54,9	5,2	35,7	2,7	1,5
Employés	57,2	4,9	33,2	3,0	1,7
Ouvriers	59,8	3,8	32,0	2,8	1,5
Anciens agriculteurs	2,0	0,2	0,2	0,0	97,6
Anciens artisans etc.	0,5	0,6	0,2	0,0	98,7
Anciens cadres et prof. int.	0,3	0,1	0,8	0,1	98,8
Anciens employés et ouvriers	0,9	0,1	0,5	0,0	98,6
Pers. au foyer et autres inactifs	1,2	0,1	2,2	0,5	96,0
Chômeurs	3,8	0,5	4,8	0,0	90,9
Étudiants et élèves	20,0	4,3	27,7	0,1	47,9

2.5 Résultats des régressions

Les résultats des estimations des régressions expliquant les temps dédiés aux 15 activités dans les carnets EDT sont présentés dans les tableaux A.5–A.7 en annexe. Le nombre d'observations (23352) est inférieur au nombre de carnets totaux (27903) du fait de l'exclusion des carnets ayant une ou plusieurs variables explicatives manquantes.

La plupart des coefficients de détermination sont compris entre 15% et 30%, avec des valeurs extrêmes de 6,0% pour l'activité « Temps personnel » et de 74,3% pour l'activité « Travail et études ». On remarque que la plupart des variables explicatives sont très significatives pour certaines activités et moins significatives pour d'autres. Par exemple, le revenu par unité de consommation (exprimé en déciles) est très significatif pour « Loisirs (basse intensité énergétique) », « Repas au domicile » et « Repas hors domicile », « Temps personnel », « Travail, études », « Travaux domestiques : maison » et « Sport et sorties ». Il est moins significatif concernant « Achats et démarches », « Loisirs : haute intensité énergétique », « Trajets domicile-travail », « Trajets : autres », « Travaux domestiques : repas ». Enfin, il est très peu significatif (voire pas significatif du tout) pour les activités « Assistance », « Travaux domestiques : vêtements » et « Sommeil ».

La taille de l'unité urbaine est très significative pour « Achats et démarches », « Loisirs (haute intensité énergétique) », « Repas hors domicile » et « Sport et sorties ». La composition du ménage a une forte influence sur le temps accordé aux activités « Assistance », « Loisirs (haute intensité énergétique) », « Repas au domicile », « Travaux domestiques : repas » et « Travaux domestiques : maison », « Sommeil » et « Sport et sorties ».

Le type de journée a une influence très significative sur toutes les activités. Ceci confirme la nécessité de l'inclure dans les régressions en tant que variable explicative, même s'il n'existe pas de variable correspondante dans BDF, grâce à la méthode de

taillée en section 2.4.

L'étape suivante consiste en l'utilisation des résultats des régressions pour prédire les temps par activité pour les individus de BDF. Par la nature de la méthode de régression, puisque la somme des temps totaux est égale à une constante (1440 minutes, c'est-à-dire 24 heures) dans les données initiales, et que toutes les équations de régression incluent une constante, la somme des temps estimés pour les individus de BDF est également de 24 heures. Cependant, pour quelques individus, les temps dédiés à certaines activités sont légèrement négatifs. Même si l'existence de ces temps négatifs ne perturbe pas l'analyse comparée des temps moyens et dépenses moyennes par groupe de ménages présentée dans le chapitre suivant, celle-ci poserait problème dans l'utilisation de la base appariée pour l'analyse de scénarios futurs qui est développée ultérieurement, par la nature du processus de repondération illustré dans le chapitre 4. Pour cette raison, nous avons procédé à un ajustement des temps en redistribuant les temps négatifs sur les autres activités, proportionnellement aux temps par activité, de sorte que tous les temps négatifs deviennent des temps nuls (et que le total reste de 24 heures). Une comparaison des résultats avant et après ajustement montre que les résultats moyens par groupe de ménages sont affectés de manière négligeable par ce processus. Les résultats utilisés dans les chapitres suivants tiennent donc compte de la correction des temps négatifs.

2.6 Allocation des dépenses aux activités

L'analyse comparée des temps et dépenses par activité demande une allocation, aux activités définies auparavant, des dépenses recensées dans l'enquête BDF. BDF détaille les dépenses des ménages au niveau 5 de la nomenclature COICOP⁵, pour un total de 248 postes de dépenses. Nous les attribuons à 13 des 15 activités, en excluant les deux activités qui représentent des trajets. En effet, nous ventilons ensuite les temps et les dépenses de transport sur les 4 activités hors domicile (voir section 2.8).

L'attribution aux activités peut se faire sans ambiguïtés pour une grande partie des dépenses BDF (tableau 2.4). Les aliments, par exemple, sont associés à l'activité « Repas au domicile », les produits de toilette et les médicaments à l'activité « Temps personnel » qui inclut l'hygiène et les soins au domicile, les produits de ménage et d'entretien aux « Travaux domestiques : maison », les dépenses pour les soins hors domicile aux « Achats et démarches » (activité qui inclut les soins médicaux hors domicile et autres soins hors domicile). Les équipements électroniques et de loisirs sont imputés aux types de loisirs correspondants.

Nous faisons l'hypothèse qu'une partie des dépenses est indépendante de l'allocation du temps. Nous ne ventilons pas sur les activités les dépenses pour les vêtements, ni celles pour les accessoires (bijoux, sacs...), le tabac et les assurances. D'autres dépenses

5. *Classification of Individual Consumption According to Purpose*, nomenclature développée par les Nations Unies.

TABLEAU 2.4 – Dépenses BDF allouées directement aux activités (par code COICOP niveau 5)

Activité	Dépenses (COICOP 5)
Achats et démarches	06211 à 06411, 12111
Assistance	09331
Loisirs (basse int. én.)	08111, 09122, 09221, 09222, 09311*, 09511, 09521, 09541
Loisirs (haute int. én.)	08121, 08131, 09111, 09112, 09121, 09131, 09141, 09151, 09311*, 09423
Repas au domicile	01111 à 01224, 02111 à 02131, 05411, 05412
Repas hors domicile	01311, 11111, 11112, 11131
Temps personnel	06111, 06112, 12122
Travail et études	10111 à 10151, 11121
Travaux domestiques : repas	05413, 05414
Travaux domestiques : maison	04311, 05611, 05612, 09321, 09341
Travaux domestiques : vêtements	03111, 03131
Sommeil	
Sport et sorties	09211, 09231, 09312, 09411, 09421, 09422, 09431

* Les dépenses pour la catégorie 09311, c'est-à-dire « Jeux, jouets et passe-temps y compris jeux vidéo », ont été distribuées entre les deux types de loisirs sur la base du fichier « Consommation des ménages par produits » de l'INSEE, qui permet d'établir qu'environ 80% de ce poste de dépense représente les jeux et jouets en 2010, et les 20% restant représentent les jeux vidéo.

supposées fixes concernant le logement : loyer, charges et mobilier. Le traitement des équipements du logement est plus délicat. En effet, on pourrait attribuer par exemple les électroménagers de cuisine à la préparation de repas, en supposant un lien entre le temps dédié à la cuisine et le taux d'équipement. Cependant, nous faisons ici l'hypothèse que l'équipement électroménager est indépendant de l'allocation du temps, en raison du manque de détail concernant le type d'appareils électroménagers achetés dans les données BDF (la catégorie de dépenses « petit électroménager » ne permet pas de faire la différence entre un robot de cuisine, un fer à repasser ou un sèche-cheveux, qu'on voudrait attribuer à trois activités différentes).

Il reste enfin deux grandes catégories de dépenses, les dépenses d'énergie et les dépenses de transport, qui ne sont pas indépendantes de l'allocation du temps, mais qui ne sont pas attribuables directement aux activités étant présentées de manière agrégée dans BDF. Pour désagréger ces dépenses selon les activités, des données supplémentaires sont nécessaires, selon la méthode de ventilation des dépenses d'énergie décrite plus bas.

2.7 Ventilation des dépenses d'énergie résidentielle

L'enquête BDF fournit à la fois des informations concernant les dépenses d'énergie résidentielle (selon huit catégories, présentées dans le tableau 2.5) et les dépenses de carburant pour les véhicules particuliers.

Pour ventiler les consommations d'énergie résidentielle sur les activités qui ont lieu au domicile, nous avons recours à deux enquêtes supplémentaires : l'Enquête Logement

TABLEAU 2.5 – Liste des dépenses d’énergie dans l’enquête BDF

Code COICOP	Description
4500	Facture électricité + gaz (non dissociables)
4511	Facture d’électricité résidence principale, autre logement, garage, dépendance
4521	Facture de gaz résidence principale, autre logement
4522	Achats de butane, propane résidence principale, autre logement
4531	Combustibles liquides pour la résidence principale : fuel, mazout, pétrole
4541	Combustible solide résidence principale
4551	Chauffage urbain (par vapeur)

2006 de l’INSEE (ENL) (INSEE, 2006) et une enquête menée par EDF R&D concernant l’électricité spécifique.

L’enquête ENL permet de répartir les dépenses d’énergie selon quatre usages finaux (chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson, électricité spécifique), sur la base du type de chauffage principal dont le logement dispose, qui influence grandement la répartition des consommations d’énergie par usage. A titre d’exemple, la répartition des consommations d’électricité en fonction du mode de chauffage principal du logement est présentée en figure 2.3. Les répartitions des consommations pour les autres énergies sont déterminées suivant la même méthodologie. L’enquête ENL ne présente pas de variable « mode de chauffage principal » équivalente à celle de BDF (qui prévoit sept modalités), mais nous la reconstruisons à partir des informations présentes dans ENL concernant les systèmes de chauffage du logement.

Les dépenses du poste « Facture électricité + gaz (non dissociables) » de BDF sont d’abord désagrégées en dépenses d’électricité et dépenses en gaz sur la base de la répartition des dépenses d’électricité et de gaz des ménages de BDF utilisant les deux énergies et ayant le même type de chauffage principal. Les dépenses en électricité et en gaz obtenues sont ensuite ventilées comme les autres.

TABLEAU 2.6 – Modalités de la variable « mode de chauffage principal » dans l’enquête BDF

Code	Description
1	Chauffage central collectif (y.c. chauffage urbain)
2	Chauffage central individuel (y.c. chaudière électrique)
3	Chauffage mixte (collectif + appoint individuel)
4	Chauffage électrique intégré
5	Poêle à bois, à charbon, cheminée
6	Autre mode de chauffage individuel
7	Pas de chauffage

Les dépenses de cuisson, pour chaque type d’énergie, sont directement attribuées à l’activité « Travaux domestiques : repas », alors que les dépenses pour l’eau chaude sanitaire sont attribuées à l’activité « Temps personnel » (en négligeant des possibles utilisations d’eau chaude sanitaire pour le nettoyage de la maison ou de la vaisselle à

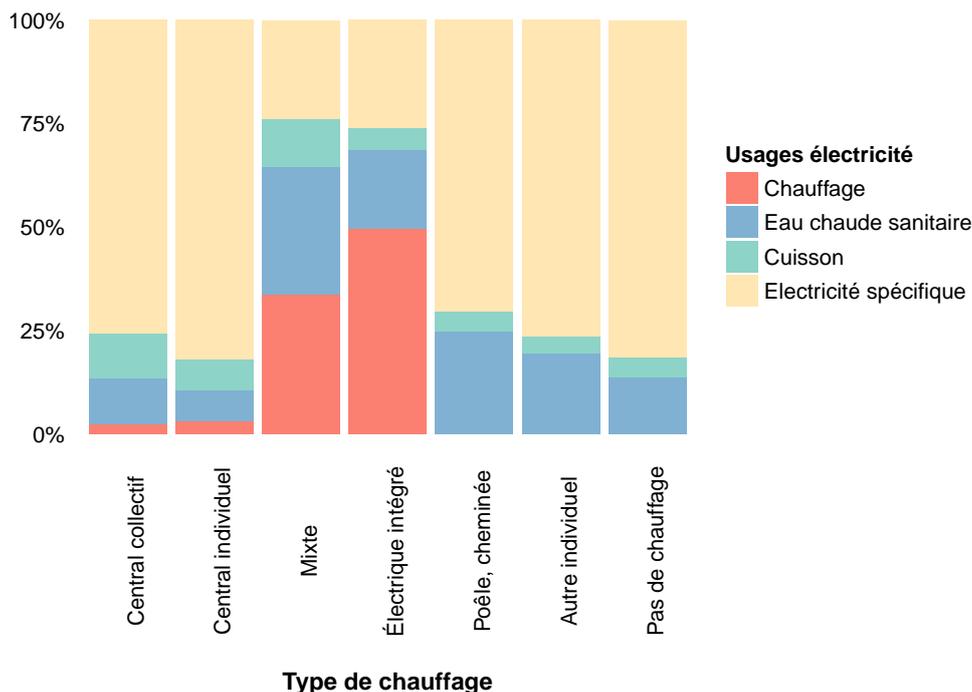


FIGURE 2.3 – Répartition des consommations d’électricité en fonction du mode de chauffage principal à partir de l’enquête ENL (INSEE)

la main). On ventile les dépenses d’énergie de chauffage sur toutes les activités qui ont lieu au domicile, au prorata du temps dédié à ces activités.

L’électricité spécifique inclut un grand nombre d’usages différents (appareils électroménagers, éclairage, climatisation...) : pour les désagréger, nous utilisons les résultats de l’enquête d’EDF R&D mentionnée plus haut, qui détaille les consommations d’électricité spécifique de 60 appareils électroménagers pour 2000 ménages. On peut ainsi déterminer la répartition des consommations d’électricité spécifique sur les usages suivants : climatisation, ventilation mécanique contrôlée, éclairage, cuisine (réfrigérateur, congélateur, lave-vaisselle, autres équipements de cuisine), vêtements (lave-linge, sèche-linge), loisirs (télévisions, ordinateurs, équipements audio, TIC), hygiène (sèche-cheveux, aspirateurs etc.), jardinage. Les répartitions sont calculées en moyenne pour des classes de ménages définies sur la base de trois variables : quintile de revenu par unité de consommation, composition du ménage⁶ et type de logement (maison individuelle ou logement collectif). Ces répartitions sont ensuite appliquées aux ménages de BDF sur la base de leur classe d’appartenance.

Les dépenses d’électricité pour la cuisine sont attribuées à l’activité « Travaux domestiques : repas », celles pour les vêtements à l’activité « Travaux domestiques : vêtements », celles pour les loisirs aux « Loisirs (haute intensité énergétique) », celles pour l’hygiène aux activités « Temps personnel » et « Travaux domestiques : maison » (en

6. En 4 modalités : célibataire jusqu’à 65 ans, couple sans enfant avec personne de référence (PR) jusqu’à 65 ans, ménage avec enfants, ménage avec PR de plus de 65 ans.

proportion des consommations des appareils concernés), celles pour le jardinage aux « Travaux domestiques : maison ». Les consommations d'énergie liées à la climatisation sont attribuées à toutes les activités au domicile, au prorata du temps (comme dans le cas du chauffage). Même procédure pour l'éclairage, avec exclusion du temps de sommeil.

Au final, les activités au domicile sont associées à une dépense d'énergie « de base » de chauffage, climatisation et éclairage, à laquelle s'ajoutent des dépenses d'énergie spécifiques à l'activité (énergie de cuisson, électricité pour les appareils électroménagers, etc.).

2.8 Ventilation des temps et des dépenses de transport

L'enquête EDT permet de différencier les déplacements liés au travail ou aux études des autres déplacements, mais ne donne pas d'information sur la répartition des « autres » temps de trajet selon les motifs. D'autre part, l'enquête BDF fournit les dépenses d'un certain nombre de postes de consommations liés aux transports (tableau 2.7), y compris les carburants pour les véhicules particuliers. Il est nécessaire pour notre analyse de ventiler ces dépenses selon les activités hors domicile concernées. Nous utiliserons ces informations à la fois pour l'analyse descriptive par groupes de ménages présentée dans le chapitre 3 et pour l'analyse de scénarios prospectifs présentée dans le chapitre 5. Nous avons donc recours à l'Enquête Nationale Transports et Déplacements (ENTD) 2008 (MEEM, 2008), qui inclut des informations sur les motifs, les modes, les temps de parcours et les distances parcourues par les ménages français, pour ventiler temps et dépenses de transport sur les 4 activités hors domicile qui font partie de notre classification (« Achats et démarches », « Repas hors domicile », « Sport et sorties », « Travail et études »).

Nous utilisons les résultats d'une analyse de l'enquête ENTD menée précédemment par EDF R&D et qui fournit les distances parcourues⁷ par mode et par motif et les vitesses de parcours en fonction de la gamme de distance (12 gammes) et de la classe de ménage (90 classes). Cette dernière est définie en fonction du quintile de revenu par unité de consommation, du type de ménage⁸ et du tissu urbain de résidence (urbain centre, urbain banlieue, rural). Comme il n'y a pas de variable correspondant au tissu urbain dans l'enquête BDF, nous considérons des classes de ménage simplifiées (quintile et type de ménage) et nous calculons la distribution des différents tissus urbains en fonction

7. Exprimées en véhicules-kilomètres en ce qui concerne les déplacements en véhicules particuliers et en personnes-kilomètres pour les autres modes.

8. Le type de ménage est le même que dans les analyses EDT et BDF, en 6 modalités : célibataire ≤ 65 ans, célibataire > 65 ans, famille mono-parentale, couple ou ménage complexe avec enfants, couple ou ménage complexe sans enfants (PR ≤ 65 ans), couple ou ménage complexe sans enfants (PR > 65 ans).

TABLEAU 2.7 – Liste des dépenses de transport dans l’enquête BDF (Source : INSEE)

Code COICOP	Description
7111	Achats d’automobiles neuves
7112	Achats d’automobiles d’occasion*
7121	Achats de motocycles neufs et occasion
7131	Achats de cycles neufs et occasion
7141	Achats d’autres véhicules neufs et occasion
7211	Pièces détachées, pneus et accessoires pour les véhicules personnels, yc pour vélo
7221	Carburants, électricité, huiles, lubrifiants. . .
7231	Réparations, dépannages, révisions, lavage, entretien et contrôle technique
7241	Services de location d’un local, frais de parking
7242	Autres services liés à l’utilisation de véhicules personnels
7311	Services de transports de voyageurs locaux (métro, tram) et SNCF longue distance
7321	Services de transports de voyageurs par route yc car scolaire
7331	Services de transports de voyageurs par air
7341	Services de transport par mer et voies navigables intérieures
7351	Services combinés de transport de voyageurs (carte navigo, tickets train + bus. . .)
7361	Autres services de transport (yc déménagement)
7411	Autres dépenses de transport : cérémonie, séjours hors domicile...
7412	Autres dépenses de transport : cadeau offert (à destination d’un autre ménage)

* Les achats d’automobiles d’occasion seront exclus des dépenses des ménages dans les analyses de scénarios prospectifs, parce que la comptabilité nationale ne tient pas compte des transferts entre ménages.

de la variable « taille de l’unité urbaine » présente dans la base BDF (tableau 2.8). Ensuite, nous attribuons à chaque ménage une répartition des modes, motifs, temps et distances résultante de la moyenne pondérée des répartitions par tissu urbain, sur la base de la taille de l’unité urbaine de résidence du ménage.

Nous attribuons les temps de trajet par motif (donc par activité) pour chaque classe de ménages et chaque mode de transport par cellulaire, sur la base des temps par motif calculés par classe sur les données ENTND. La ventilation des dépenses de transport (y compris les dépenses pour les carburants) est basée sur les distances parcourues par motif, calculées dans ENTND.

Les carburants sont la seule consommation d’énergie associée aux activités hors domicile, vu que les ménages ne payent pas directement pour d’autres consommations d’énergie qui ont lieu pendant ces activités (au travail ou dans des endroits publics).

2.9 Calcul des consommations d’énergie à partir des dépenses d’énergie

Pour transformer les dépenses d’énergie liées à chaque activité en consommations d’énergie résidentielle (électricité, gaz, fioul, GPL, bois, chaleur), nous utilisons des prix moyens en €/MWh par énergie pour 60 classes de ménages (définies sur la base

TABLEAU 2.8 – Distribution (%) des tissus urbains par taille de l’unité urbaine (variable *TUU* INSEE) sur la base d’une analyse EDF R&D

TUU	Description	Rural	Urbain banlieue	Urbain centre
0	Rural (< 2000 hab.)	96	4	0
1	2 000 - 4 999 hab.	95	5	0
2	5 000 - 9 999 hab.	89	11	0
3	10 000 - 19 999 hab.	40	60	0
4	20 000 - 49 999 hab.	4	96	0
5	50 000 - 99 999 hab.	0	1	0
6	100 000 - 199 999 hab.	0	46	54
7	200 000 - 1 999 999 hab.	0	56	44
8	Unité urbaine de Paris	0	36	64

du quintile de revenu par unité de consommation, du type de ménage⁹ et du type de logement¹⁰) calculés par cellulage, à partir d’une analyse de l’enquête Phébus (MEEM, 2013) réalisée par EDF R&D (Tableau 2.9). La partie fixe de l’abonnement pour électricité et gaz, qui par exemple dépend de la puissance souscrite dans le cas de l’électricité, est variable d’un ménage à l’autre. L’écart entre le prix par MWh le plus haut et le plus bas observés pour les 60 classes de ménages est de 60% pour l’électricité, de 345% pour le gaz. Il est intéressant pour cette raison d’avoir des prix spécifiques aux classes de ménages plutôt qu’un prix moyen unique, ou les erreurs dans le calcul des volumes d’énergie consommés seraient significatives.

Alors que les prix sont variables selon la classe de ménage pour électricité et gaz, pour les autres énergies (GPL, fuel, bois) les prix sont les mêmes par manque d’informations plus détaillées. Nous avons recours à la base PEGASE (MEEM), qui fournit l’évolution des prix des énergies en fonction des abonnements et tarifs souscrits, pour obtenir des prix des énergies en 2010 à partir des prix 2013 recensés par Phébus. En ce qui concerne le chauffage urbain, nous utilisons le prix moyen de vente de la chaleur des réseaux français en 2010, disponible dans l’enquête AMORCE/ADEME de 2010 (AMORCE, 2012).

Dans BDF, les dépenses de carburants des ménages sont regroupées dans un seul poste de dépenses, ce qui ne permet pas de différencier essence et gazole. Pour déterminer la consommation d’énergie correspondante, nous calculons un prix moyen de carburant pour chaque classe de ménages, pondéré selon les consommations de gazole et essence de chaque classe obtenues à partir de l’enquête transports (ENTD). Les prix à la consommation de gazole et essence en France en 2010 sont disponibles dans les comptes des transports en 2010 en euros par litre (SOeS, 2011), nous les exprimons ensuite en €/MWh en considérant le pouvoir calorifique inférieur des carburants considérés. Ce qui cause la différence de prix de carburant entre une classe de ménages et l’autre est donc la répartition différente entre essence et gazole. L’écart entre le prix le

9. En 6 types, comme dans la section 2.8.

10. Maison individuelle ou logement collectif.

plus élevé et le prix le plus faible est de 3%, bien inférieur aux écarts observés pour gaz et électricité.

TABLEAU 2.9 – Prix des énergies par classe de ménages (€/MWh)

Quintile	Type ménage	MI	Élec.	Gaz	Fuel	GPL	Bois	Chaleur	Carb.
1	Célib.<=65	0	121,49	62,11	71,80	113,09	37,10	66,10	123,28
1	Célib.<=65	1	112,32	83,81	71,80	113,09	37,10	66,10	123,34
1	Célib.>65	0	143,03	74,34	71,80	113,09	37,10	66,10	123,24
1	Célib.>65	1	133,83	81,40	71,80	113,09	37,10	66,10	123,44
1	Fam. monop.	0	117,62	65,10	71,80	113,09	37,10	66,10	122,29
1	Fam. monop.	1	116,51	58,82	71,80	113,09	37,10	66,10	122,31
1	Couple avec enf.	0	121,65	67,29	71,80	113,09	37,10	66,10	120,94
1	Couple avec enf.	1	113,33	61,56	71,80	113,09	37,10	66,10	121,53
1	Couple s enf.<=65	0	117,51	75,73	71,80	113,09	37,10	66,10	122,18
1	Couple s enf.<=65	1	126,36	86,27	71,80	113,09	37,10	66,10	122,39
1	Couple s enf.>65	0	152,66	97,54	71,80	113,09	37,10	66,10	122,00
1	Couple s enf.>65	1	124,33	55,80	71,80	113,09	37,10	66,10	122,16
2	Célib.<=65	0	126,01	81,66	71,80	113,09	37,10	66,10	122,67
2	Célib.<=65	1	108,35	48,45	71,80	113,09	37,10	66,10	122,94
2	Célib.>65	0	107,03	65,30	71,80	113,09	37,10	66,10	122,94
2	Célib.>65	1	119,13	43,57	71,80	113,09	37,10	66,10	122,68
2	Fam. monop.	0	112,48	67,23	71,80	113,09	37,10	66,10	122,10
2	Fam. monop.	1	114,28	63,77	71,80	113,09	37,10	66,10	122,56
2	Couple avec enf.	0	124,09	68,97	71,80	113,09	37,10	66,10	120,32
2	Couple avec enf.	1	112,32	60,19	71,80	113,09	37,10	66,10	120,72
2	Couple s enf.<=65	0	95,65	59,88	71,80	113,09	37,10	66,10	121,96
2	Couple s enf.<=65	1	118,03	58,00	71,80	113,09	37,10	66,10	122,21
2	Couple s enf.>65	0	118,47	50,40	71,80	113,09	37,10	66,10	122,32
2	Couple s enf.>65	1	116,79	70,14	71,80	113,09	37,10	66,10	122,08
3	Célib.<=65	0	124,71	68,80	71,80	113,09	37,10	66,10	122,37
3	Célib.<=65	1	122,47	53,26	71,80	113,09	37,10	66,10	122,56
3	Célib.>65	0	140,95	67,29	71,80	113,09	37,10	66,10	122,93
3	Célib.>65	1	121,09	58,58	71,80	113,09	37,10	66,10	123,27
3	Fam. monop.	0	108,04	67,97	71,80	113,09	37,10	66,10	122,26
3	Fam. monop.	1	116,03	57,51	71,80	113,09	37,10	66,10	122,42
3	Couple avec enf.	0	126,95	64,98	71,80	113,09	37,10	66,10	120,57
3	Couple avec enf.	1	114,52	53,12	71,80	113,09	37,10	66,10	121,54
3	Couple s enf.<=65	0	123,52	62,52	71,80	113,09	37,10	66,10	120,88
3	Couple s enf.<=65	1	114,27	54,22	71,80	113,09	37,10	66,10	122,06
3	Couple s enf.>65	0	108,33	22,09	71,80	113,09	37,10	66,10	122,06
3	Couple s enf.>65	1	110,14	48,54	71,80	113,09	37,10	66,10	122,04
4	Célib.<=65	0	123,05	75,22	71,80	113,09	37,10	66,10	121,94
4	Célib.<=65	1	122,63	62,34	71,80	113,09	37,10	66,10	122,28
4	Célib.>65	0	154,12	80,68	71,80	113,09	37,10	66,10	122,45
4	Célib.>65	1	115,38	35,86	71,80	113,09	37,10	66,10	122,63
4	Fam. monop.	0	113,48	70,86	71,80	113,09	37,10	66,10	121,95
4	Fam. monop.	1	122,35	58,67	71,80	113,09	37,10	66,10	121,81
4	Couple avec enf.	0	118,52	65,89	71,80	113,09	37,10	66,10	120,55
4	Couple avec enf.	1	112,01	56,68	71,80	113,09	37,10	66,10	120,96
4	Couple s enf.<=65	0	121,08	71,99	71,80	113,09	37,10	66,10	120,60
4	Couple s enf.<=65	1	114,52	63,60	71,80	113,09	37,10	66,10	121,50
4	Couple s enf.>65	0	119,88	58,21	71,80	113,09	37,10	66,10	121,39
4	Couple s enf.>65	1	111,50	55,71	71,80	113,09	37,10	66,10	121,94
5	Célib.<=65	0	131,00	74,16	71,80	113,09	37,10	66,10	121,81
5	Célib.<=65	1	118,51	58,38	71,80	113,09	37,10	66,10	121,94
5	Célib.>65	0	123,89	62,98	71,80	113,09	37,10	66,10	121,88
5	Célib.>65	1	119,69	51,23	71,80	113,09	37,10	66,10	121,87
5	Fam. monop.	0	124,88	63,12	71,80	113,09	37,10	66,10	120,16
5	Fam. monop.	1	111,50	59,09	71,80	113,09	37,10	66,10	121,43
5	Couple avec enf.	0	115,28	61,42	71,80	113,09	37,10	66,10	121,05
5	Couple avec enf.	1	111,15	58,40	71,80	113,09	37,10	66,10	121,77
5	Couple s enf.<=65	0	121,32	64,32	71,80	113,09	37,10	66,10	121,16
5	Couple s enf.<=65	1	112,37	55,38	71,80	113,09	37,10	66,10	121,28
5	Couple s enf.>65	0	135,33	61,68	71,80	113,09	37,10	66,10	122,82
5	Couple s enf.>65	1	116,34	48,88	71,80	113,09	37,10	66,10	123,53

2.10 Calcul des intensités en énergie et en dépenses pour chaque activité

Pour mieux comprendre les modes de vie des ménages français et les consommations d'énergie associées, nous déterminons d'une part l'intensité énergétique par rapport au temps pour les différentes activités de la vie quotidienne identifiées dans notre base micro, et d'autre part l'intensité en dépenses hors énergie (que nous appellerons dorénavant simplement intensité en dépenses).

Pour comparer les intensités entre ménages différents, nous calculons les intensités sur la base des temps moyens par personne (pour chaque ménage) et les dépenses moyennes par UC (pour chaque ménage). Nous avons décrit plus haut l'estimation des temps par individu de BDF. Pour obtenir des temps moyens par ménage, nous devons d'abord reconstruire les emplois du temps « totaux » pour chaque ménage de BDF. Afin de ne pas introduire de biais dans le calcul de ces temps moyens, nous retenons seulement les ménages « complets », c'est-à-dire les ménages pour lesquels nous avons pu estimer l'emploi du temps de tous les individus¹¹ grâce à des données complètement renseignées en ce qui concerne les variables explicatives des régressions. Le nombre de ménages restants est de 15 511 sur les 15 797 ménages interrogés pour l'enquête BDF.

Ensuite, nous calculons les consommations d'énergie par UC et les dépenses moyennes par UC pour chaque ménage. Le choix de diviser les dépenses et les consommations d'énergie par le nombre d'unités de consommation plutôt que par le nombre de personnes permet de tenir compte des différences de consommation entre enfants et adultes, et des économies d'échelle qui deviennent possibles pour les ménages composés par plusieurs personnes.

Il serait possible de déterminer les intensités énergétiques et les intensités en dépenses pour chaque ménage. Cependant, de nombreux ménages sont caractérisés par des temps nuls pour certaines activités (alors que les dépenses ne le sont pas toujours), donc cette approche n'est pas praticable. En conséquence, nous calculons des dépenses, consommations d'énergie et temps moyens par classe de ménages, et nous déterminons ensuite les intensités en tant que rapports entre dépenses et temps moyens ou énergie et temps moyens. Le chapitre suivant présente les résultats de cette analyse par décile de revenus par UC, type de ménage et type de logement, ainsi que les résultats moyens sur tous les ménages.

11. Individus de 11 ans et plus. On rappelle que les mineurs de 11 ans ne participent pas à l'enquête EDT. Les temps moyens sont donc des moyennes pour les personnes du ménage âgées de 11 ans et plus.

Chapitre 3

Temps, dépenses et consommations d'énergie par activité de la vie quotidienne des ménages français

La base de données micro décrite dans le chapitre précédent permet d'analyser les dépenses, les consommations d'énergie et les temps dédiés à 13 activités qui fournissent une représentation complète de la vie quotidienne des ménages français. Dans ce chapitre, nous présentons une analyse de ces éléments, ainsi que des intensités en énergie et dépenses (non énergétiques) du temps, pour la population française en général et pour différents sous-groupes de ménages.

3.1 Valeurs moyennes sur la population de la France entière

Tout d'abord nous nous intéressons aux valeurs moyennes, pour l'ensemble des ménages, des dépenses par UC, énergie par UC et temps par personne et des intensités en dépenses non-énergétiques (non-E) et en énergie des activités par rapport au temps. Quand nous parlons de dépenses, nous faisons systématiquement référence aux dépenses non-énergétiques, puisque nous considérons directement les consommations d'énergie en volume, grâce à la décomposition prix/quantités décrite en section 2.9.

Il émerge un cadre très varié d'une activité à l'autre (tableau 3.1). Les dépenses totales (hors énergie), au delà du sommeil auquel aucune dépense n'est attribuée par hypothèse, vont de valeurs très faibles pour les activités « Travaux domestiques : vêtements » (2,41 €/mois/UC) et « Travaux domestiques : repas » (3,71 €/mois/UC), à des valeurs très élevées pour « Sport et sorties » (110,04 €/mois/UC) et « Repas au domicile » (247,36 €/mois/UC). Les dépenses d'alimentation représentent donc, sans surprise, le premier poste de consommation des ménages français hors loyers et charges

(qui sont exclus de l'analyse).

TABLEAU 3.1 – Dépenses, consommations d'énergie et usage du temps moyens pour toutes les activités

Activité	Dép. (€/mois/ UC)	Énergie (kWh/mois/ UC)	Temps (h/mois/ pers.)	Intens. non-E (€/h)	Intens. énergie (kWh/h)
Achats et démarches	57,47	111,72	21,59	2,66	5,17
Assistance	6,46	10,12	12,47	0,52	0,81
Loisirs (haute int. én.)	83,80	113,16	80,06	1,05	1,41
Loisirs (basse int. én.)	25,17	38,29	41,61	0,60	0,92
Repas au domicile	247,36	45,39	48,68	5,08	0,93
Repas hors domicile	66,39	12,03	14,84	4,48	0,81
Temps personnel	29,67	158,54	27,60	1,07	5,74
Travail et études	66,28	141,72	96,20	0,69	1,47
Travaux domestiques : repas	3,71	195,73	26,84	0,14	7,29
Travaux domestiques : maison	29,85	54,74	35,76	0,83	1,53
Travaux domestiques : vêtements	2,41	22,28	6,85	0,35	3,25
Sommeil	0,00	200,31	257,39	0,00	0,78
Sport et sorties	110,04	292,15	50,09	2,20	5,83
Moyennes	56,05	107,40	55,38	1,51	2,77

Les consommations d'énergie les plus élevées sont associées aux activités « Sport et sorties » et « Sommeil ». Pour la deuxième, il s'agit exclusivement des consommations de chauffage et climatisation, qui sont distribuées sur les activités au domicile au prorata du temps. Donc le sommeil est caractérisé par des consommations d'énergie élevées, vu le grand nombre d'heures dédiées à l'activité. Pour l'activité « Sport et sorties », les consommations d'énergie très élevées sont celles de carburant pour les véhicules particuliers. Cette activité, en effet, est associée au plus grand nombre de véhicule-km parcourus en voiture sur l'année selon les données de l'Enquête Nationale Transports et Déplacements 2008 (MEEM, 2008). En particulier, la raison des grandes distances parcourues en voiture pour l'activité « Sport et sorties » est que sont inclus dans cette catégorie les voyages sur des longues distances¹ effectués pour un motif de loisir (Figure 3.1).

D'autre part, les plus faibles consommations d'énergie sont associées à l'activité « Assistance », qui comporte seulement des consommations d'énergie résidentielle de « base » pour un temps total assez faible, et l'activité « Repas hors domicile », caractérisée également par un temps total faible et par des distances moyennes parcourues en véhicule particulier très modérées (Figure 3.1).

Si nous regardons les intensités en dépenses non-E, les deux types de repas sont les plus intensifs (5,08 €/h pour les repas au domicile et 4,48 €/h pour les repas hors domicile), loin devant toutes les autres activités. Le fait que l'intensité en dépenses non-E des repas au domicile soit supérieure à celle des repas hors domicile peut surprendre,

1. Dans l'ENTD, les trajets longue distance sont ceux qui dépassent un rayon de 80 km autour du domicile.

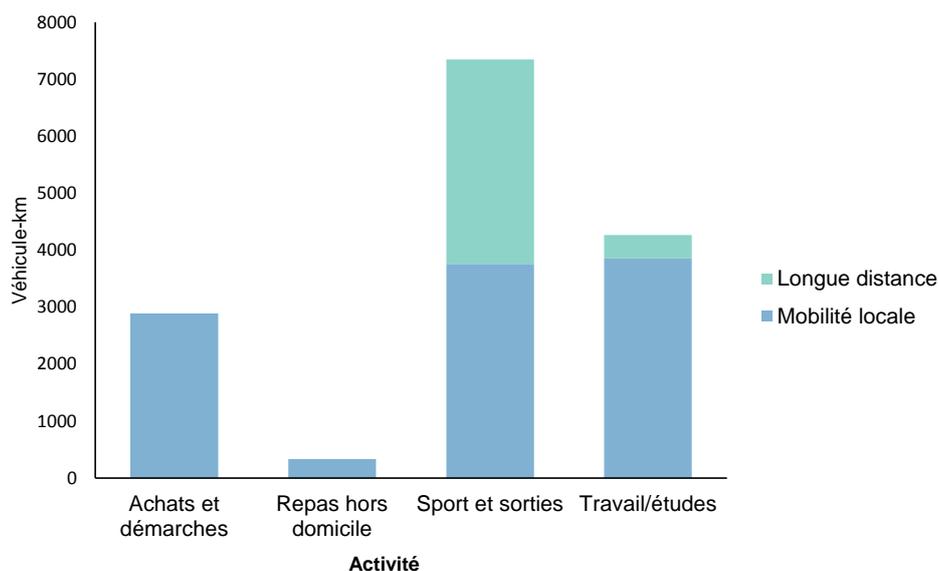


FIGURE 3.1 – Véhicule-km parcourus par ménage et par an, ENT D 2008 (MEEM, 2008)

vu que les prix des restaurants et cafés couvrent en général les coûts d’exploitation ainsi qu’une partie des coûts de capital, en plus du coût de la nourriture. Cependant, les repas au restaurant prennent en moyenne plus de temps que les repas au domicile, d’où l’intensité inférieure. L’intensité élevée des activités « Achats et démarches » et « Sport et sorties » reflète les types de dépenses qui leur sont allouées. Celles-ci incluent respectivement les dépenses de santé et soins de beauté hors domicile pour « Achats et démarches » et les billets pour des événements sportifs ou culturels pour « Sport et sorties ». Il s’agit de dépenses en général relativement élevées par rapport au temps dédié à ces activités.

Les intensités en dépenses non-E les plus faibles, si l’on exclut le sommeil qui a une intensité nulle par construction, sont associées aux « Travaux domestiques : repas », « Travaux domestiques : vêtements » et « Assistance » : la consommation matérielle de ces activités est faible comparée au temps qui y est consacré.

Cependant, nous rappelons qu’aucune dépense pour les équipements électroménagers n’a pu être attribuée aux activités domestiques, en raison du manque de détail à ce propos de l’enquête BDF. Dans le cas contraire, leur intensité en dépenses aurait été plus élevée, même si probablement pas de manière à bouleverser le classement relatif des intensités, en raison de la longue durée de vie des équipements, qui impliquerait un amortissement de la dépense sur un grand nombre d’années.² En revanche, comme nous l’avons expliqué dans le chapitre 2, les consommations d’électricité des

2. Par exemple, une machine à laver qui coûte 500€ et qui a une durée de vie de 10 ans, pour un ménage de 2 UC, correspond à une dépense de 2,08/UC/mois. En la prenant en compte, les dépenses associées à l’activité « Travaux domestiques : vêtements » doubleraient presque, mais en restant très loin derrière les dépenses les plus élevées.

équipements électroménagers sont bien attribuées aux activités correspondantes.

Concernant les consommations d'énergie, les activités à faible intensité sont « Sommeil », « Assistance », « Loisirs (basse int. én.) » et « Repas au domicile », c'est-à-dire, parmi les activités au domicile, celles auxquelles nous attribuons seulement les consommations d'énergie « de base » (chauffage, climatisation, éclairage) au prorata du temps. Les « Repas hors domicile » sont également associés à une faible intensité énergétique, due aux consommations de carburant pour les véhicules particuliers (les consommations de carburants des transports en commun ne sont pas imputées aux ménages). Même si le choix modal pour cette activité est plutôt orienté en faveur du véhicule particulier (87,3 % en incluant les deux roues motorisés) l'intensité énergétique qui en résulte est basse en raison des courtes distances des trajets associés, ainsi que le fait que le temps dédié aux repas peut être long par rapport au trajet et que souvent plusieurs membres d'un ménage utilisent la même voiture pour se rendre au restaurant. En conséquence, des consommations de carburant pour une voiture sont rapportées dans un bon nombre de cas aux temps de repas de plusieurs personnes.

L'activité la plus intensive en énergie est « Travaux domestiques : repas » (7,29 kWh/h), suivie par « Sport et sorties », « Temps personnel » et « Achats et démarches ». Pour les deux activités au domicile, les intensités élevées sont dues à la somme de trois types de consommations d'énergie : l'énergie de base, l'électricité spécifique pour les appareils électroménagers et l'énergie de cuisson ou l'eau chaude sanitaire respectivement. Une analyse de l'enquête ENTD révèle que pour les activités « Achats et démarches » et « Sport et sorties » les personnes se déplacent souvent en voiture (parts modales de 89,5% et 67,6% respectivement), d'où l'intensité énergétique élevée de ces activités. De plus, les personnes se déplacent souvent seules et la durée des activités peut être faible, en conséquence la consommation de carburants est élevée par rapport au temps dédié. Pour l'activité « Travail, études » aussi les personnes voyagent souvent seules en voiture ou deux roues motorisé (72,2%), mais dans ce cas le temps total dédié à l'activité est beaucoup plus long que pour les deux activités citées précédemment, donc l'intensité énergétique est plus faible. Le Tableau 3.2 présente les différentes contributions des temps de transport au temps total, pour les 4 activités hors domicile.

TABLEAU 3.2 – Part du temps de transport sur le temps total pour les activités hors domicile

Activité	Temps de transport (%)
Achats et démarches	41,3
Repas hors domicile	07,7
Sport et sorties	33,3
Travail, études	10,8

Évidemment, les intensités énergétiques des activités hors domicile seraient plus élevées si l'on considérait également les consommations d'énergie indirecte, c'est-à-dire celles associées aux activités de restauration, aux lieux de travail et étude, aux services

tertiaires ainsi qu'à leurs fournisseurs. Nous tiendrons compte de ces consommations d'énergie dans les analyses prospectives présentées dans les chapitres suivants.

Les résultats moyens présentés jusqu'ici cachent en réalité une grande hétérogénéité au sein de la population. C'est pourquoi nous proposons, dans les sections suivantes, une désagrégation de ces résultats par niveau de vie (revenu par unité de consommation), type de ménage (selon les 6 modalités utilisées déjà dans l'appariement de BDF et EDT) et type de logement (maisons individuelles ou logements collectifs).

3.2 Analyse par revenu

Temps, consommations d'énergie et dépenses présentent des variations importantes selon le revenu (par UC) des ménages (Figures 3.2–3.4). En général, les dépenses augmentent avec le revenu pour toutes les activités (Figure 3.2). Dans quelques cas, l'augmentation des dépenses est presque linéaire (« Travail et études », « Repas au domicile »), pour d'autres nous observons une stagnation concernant les revenus les plus élevés (« Assistance ») ou au contraire une forte augmentation pour ces mêmes revenus (« Repas hors domicile »). Pour quelques activités, notamment « Loisirs (haute int. én.) », « Loisirs (basse int. én.) », « Repas hors domicile », « Travail et études » et « Sport et sorties », les dépenses du premier décile de revenu sont plus élevées que celles du deuxième décile. Ceci s'explique par la présence, dans le groupe ayant les revenus les plus bas, d'une large proportion de jeunes célibataires, parmi lesquels beaucoup d'étudiants.

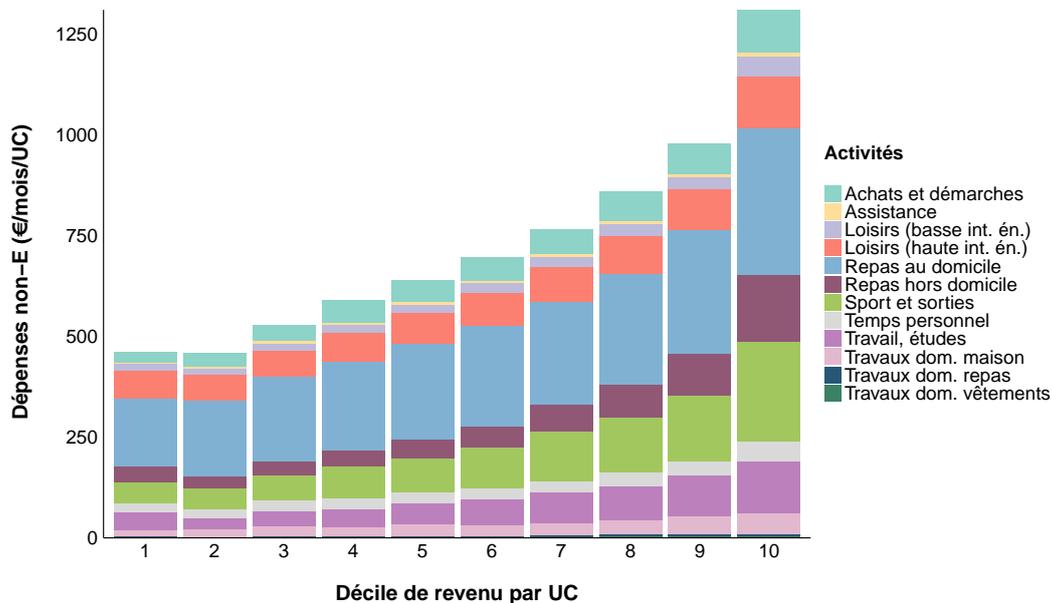


FIGURE 3.2 – Dépenses non-énergétiques par activité, par décile de revenu (par UC)

Les différences observées dans les dépenses sont le résultat de plusieurs facteurs : des quantités supérieures, des prix plus élevés pour les mêmes biens, ou la consommation

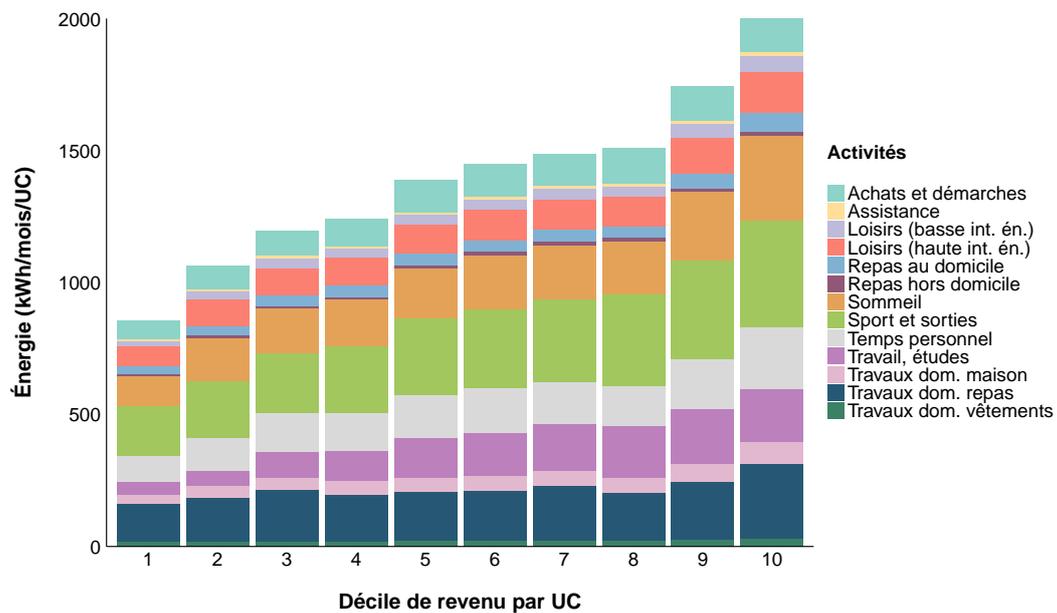


FIGURE 3.3 – Consommations d'énergie par activité, par décile de revenu (par UC)

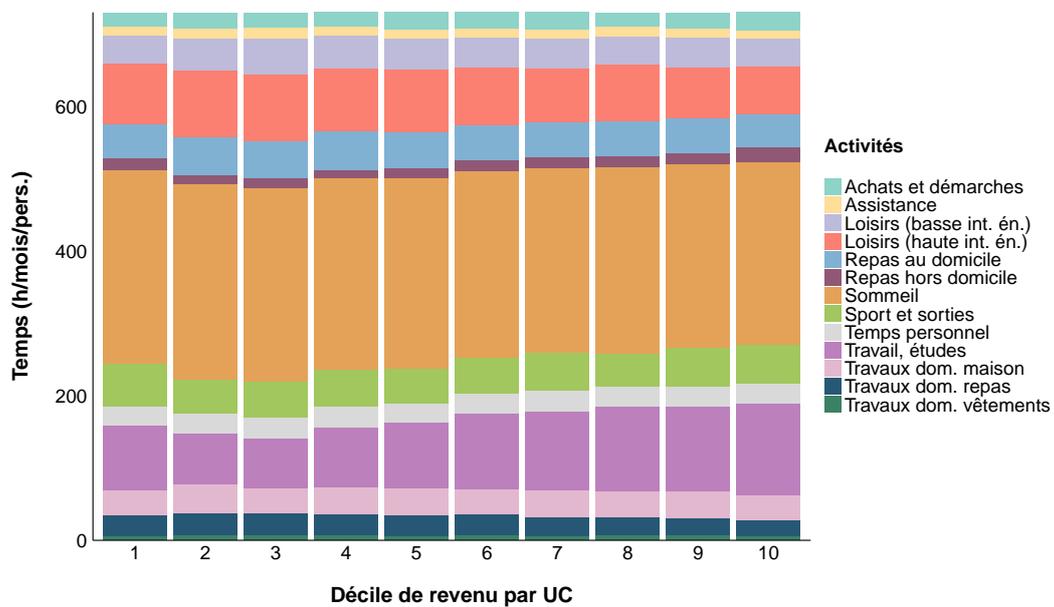


FIGURE 3.4 – Temps par activité, par décile de revenu (par UC)

de biens différents qui seraient plus chers. Si l'effet des prix plus élevés est important, l'augmentation des dépenses peut cacher une possible saturation des quantités consommées. Girod et de Haan (2010) comparent les prix payés par unité fonctionnelle (kg , m^2 , pkm) de différents biens pour deux groupes de consommateurs, le premier ayant des revenus supérieurs à la médiane et le deuxième inférieurs. Ils trouvent que pour 62% des dépenses analysées au niveau 4 de la nomenclature COICOP, les prix sont significativement plus élevés pour le groupe à hauts revenus (pour l'alimentation, la différence est de 17%).³

Les carnets de dépenses BDF nous permettent de reproduire une telle analyse des écarts de prix pour des biens homogènes. En effet, les carnets fournissent des informations sur les quantités achetées pour chaque poste de dépenses : nous pouvons donc calculer des prix moyens par décile de revenu (par UC) pour chaque catégorie de dépenses COICOP et comparer les prix entre le premier et le dernier décile. Nous limitons l'analyse aux dépenses alimentaires, parce qu'elles sont décrites à un niveau de détail très fin. Ceci implique une certaine homogénéité dans les produits par catégorie, donc les prix obtenus peuvent être interprétés plus facilement. De plus, le nombre de carnets qui reportent des dépenses alimentaires est élevé, ce qui améliore la qualité de l'analyse. Pour la plupart des catégories de dépenses considérées (57 sur 65), les prix payés par les ménages du décile 10 sont plus élevés que ceux payés par le décile 1 (Tableau 3.3). Nous pouvons donc affirmer que les différences de prix sont responsables d'une part non négligeable de l'écart global entre les dépenses alimentaires du décile 10 et celles du décile 1 (qui est de 117% pour l'activité « Repas au domicile »). Il est probable que ces différences existent également en ce qui concerne les dépenses non alimentaires.

Une désagrégation des consommations d'énergie par niveau de vie montre également des différences considérables entre un décile et l'autre (Figure 3.3). Par exemple, pour 7 des 9 activités qui ont lieu au domicile, les consommations d'énergie du décile 10 sont au moins deux fois plus élevées que celles du décile 1 (« Assistance », « Loisirs (basse int. én.) », « Loisirs (haute int. én.) », « Repas au domicile », « Temps personnel », « Travaux domestiques : maison », « Sommeil »); même pour les deux autres activités au domicile, les consommations d'énergie du décile 10 sont presque doubles de celles du décile 1. Les activités hors domicile présentent également des consommations d'énergie grandissantes avec les revenus. Nous observons une augmentation presque linéaire dans le cas des « Sport et sorties », alors que pour « Achats et démarches » et « Repas hors domicile » la croissance ralentit pour les derniers déciles (qui ont tout de même des consommations beaucoup plus importantes que le premier). Nous trouvons une élasticité-revenu⁴ des consommations totales d'énergie directe de 0,395. Une partie des écarts dans les consommations d'énergie entre classes de revenu pourrait être due à l'hétérogénéité des actions regroupées dans chaque activité, qui fait que la « compo-

3. Dans un exercice de modélisation prospective, supposer des prix homogènes pour tous les ménages peut porter à une surestimation des consommations d'énergie et des émissions indirectes associées aux ménages les plus aisés.

4. Nous calculons l'élasticité sur la base des revenus par UC moyens pour les 10 déciles et des consommations d'énergie directe moyennes pour les 10 déciles.

TABLEAU 3.3 – Écart (%) entre les prix moyens payés par les ménages appartenant au dixième décile de revenu et ceux payés par les ménages du premier décile, pour les produits alimentaires (source : calculs de l’auteur à partir de BDF, INSEE)

Produit	Écart %
Riz sous toutes ses formes et produits à base de riz	117
Pain et autres produits de boulangerie et de viennoiserie yc biscuits et gâteaux	33
Pâtes alimentaires sous toutes leurs formes et plats à base de pâtes	64
Préparations telles que pâte à pâtisser, gâteau industriel, tarte, tourte, quiche, pizza	35
Autres céréales et produits à base de céréales yc farine, semoule, céréales petit déjeuner, couscous, taboulé	60
Viande bovine fraîche ou surgelée	72
Viande porcine fraîche ou surgelée	61
Viande ovine ou caprine fraîche ou surgelée	38
Viande de volaille fraîche ou surgelée	95
Viande séchée salée ou fumée, charcuterie et abats, frais ou surgelé (jambon, saucisses, pâtés, abats, etc.)	58
Conserves de viande, produit de transformation des viandes, plat préparé de viande	89
Autres viandes comestibles fraîches ou surgelées (cheval, lapin, gibier) yc animaux sur pied	30
Poissons frais	100
Poissons surgelés ou congelés (hors poissons panés ou cuisinés)	102
Fruits de mer frais ou surgelés (yc cuits, nc cuisinés)	55
Poissons et fruits de mer salés, fumés, séchés yc surgelé	239
Conserves de poisson et de fruits de mer et plats préparés à base de poissons ou de fruits de mer	178
Lait entier	28
Lait demi-écrémé, écrémé	10
Lait de conserve	-15
Yaourts, fromage blanc et petits suisses yc de soja	29
Fromage et lait caillé	28
Autres produits laitiers (dessert à base de lait, crème fraîche, lait aromatisé)	37
Oufs	60
Beurre	14
Margarine, allégés et autres graisses végétales	22
Huiles alimentaires d'olive	33
Huiles alimentaires d'arachide, de tournesol, de maïs, colza	40
Saindoux et autres graisses d'origine animale	69
Agrumes frais	14
Bananes fraîches	22
Pommes	23
Poires	26
Fruits à noyaux frais (pêches, cerises, prunes, avocats etc.)	31
Baies fraîches (raisins, fraises, cassis etc.)	27
Autres fruits, fruits tropicaux frais	14
Fruits séchés	12
Fruits au sirop et fruits surgelés	10
Légumes frais à feuilles et à tiges (endives, laitues, céleri, épinards, etc.), herbes aromatiques fraîches	8
Choux frais	25
Légumes frais cultivés pour leurs fruits (tomates, haricots verts, soja, petits pois, courgettes etc.)	38
Racines alimentaires fraîches (carottes, artichauts, poireaux, oignons, etc.) et champignons frais	87
Légumes secs	63
Légumes surgelés non cuisinés	46
Légumes et plats à base de légume, en conserve (sans pommes de terre)	43
Légumes préparés et plats à base de légumes, frais et surgelés (sauf les plats à base de pommes de terre)	46
Pomme de terre, autres tubercules, produits à base de pommes de terre (chips) et tubercules	26
Sucre yc édulcorants	37
Confiture, marmelade, compote, gelées, purées et pâtes de fruits, miel	24
Chocolat et confiseries à base de chocolat	42
Sucreries, bonbons et autres confiseries	54
Crèmes glacées, sorbets, entremets glacés	-4
Autres produits à base de sucre (pâtes à tartiner, fruits confits, etc.)	-1
Sauces, condiments et aides culinaires	26
Sel, poivre et épices sèches	135
Levure, préparations pour desserts, soupes	9
Autres produits alimentaires (alimentation pour petits enfants, produits diététiques)	53
Café	22
Thé et plantes à infusion	39
Cacao et chocolat en poudre	38
Eaux minérales	75
Boissons gazeuses	19
Jus de fruits et de légumes, sirops, boissons aromatisées	36
Jus de légumes	35

tion » d'une activité pourrait changer d'un décile de revenu à l'autre. Pour les activités hors domicile, outre des différences dans les choix modaux et les distances parcourues, les efficacités des véhicules pourraient également influencer les consommations de carburants. Les consommations totales sont d'autre part influencées par le temps dédié à chaque activité.

Le temps total disponible est évidemment constant pour tous les déciles ; cependant, l'allocation du temps aux activités présente des variations importantes (Figure 3.4). Par exemple, le temps dédié aux activités « Travail et études » et « Repas hors domicile » augmente avec le revenu, alors qu'il diminue avec le revenu pour « Loisirs (haute int. én.) », « Travaux domestiques : repas », « Repas au domicile » et « Sommeil ». Le temps alloué aux autres activités ne montre pas de tendance claire en fonction du revenu. Pour le temps également nous retrouvons la particularité du premier décile de revenu, qui est caractérisé par une présence importante de jeunes et d'étudiants, comme mentionné plus haut. Concernant les « Repas hors domicile », nous rappelons que les repas pris sur le lieu de travail ne sont pas inclus dans cette activité, puisqu'ils sont comptés dans le temps de travail. L'augmentation du temps de repas hors domicile pour les plus hauts revenus pourrait cependant être en partie expliquée par la plus grande proportion d'actifs, parce que les repas qui ne sont pas pris sur le lieu de travail mais dans ses environs sont en effet inclus dans les repas hors domicile (la distinction dépend du choix du répondant à l'enquête emploi du temps et de ce qu'il considère comme étant un repas sur le lieu de travail).

Pour les activités hors domicile, le temps de transport est inclus dans le temps total. En le regardant séparément, nous remarquons qu'il augmente globalement avec le revenu, même s'il est légèrement plus élevé pour le décile 1 que pour le décile 2 à cause de sa spécificité démographique. Le temps de trajet total est d'environ 32 heures par mois et par personne pour le décile 2 et de 47 h/mois/pers. pour le décile 10, et la répartition par motif change également avec le revenu : la part de temps de transport pour « Travail et études » augmente avec le revenu alors que celle pour « Achats et démarches » diminue.

Ces observations des dépenses, temps et énergie associés à chaque activité permettent d'analyser d'éventuelles substitutions entre les « inputs » du processus de production d'une activité au sens de Becker (1965). Par exemple, nous pouvons comparer les « Repas au domicile » d'un côté et les « Travaux domestiques : repas » (c'est à dire préparation des repas et rangement) de l'autre côté. Une substitution entre les inputs d'un repas pris au domicile semble se dessiner. En effet, si le temps de prise des repas au domicile diminue très légèrement avec le revenu, le temps de préparation des repas diminue fortement, alors que les dépenses en produits alimentaires augmentent. L'énergie associée à la préparation des repas augmente aussi, et la plus grande partie de cette consommation d'énergie est liée à l'électricité spécifique des appareils électroménagers et à l'énergie de cuisson (Figure 3.5).

Les différences dans les consommations d'énergie, les temps et les dépenses associés à

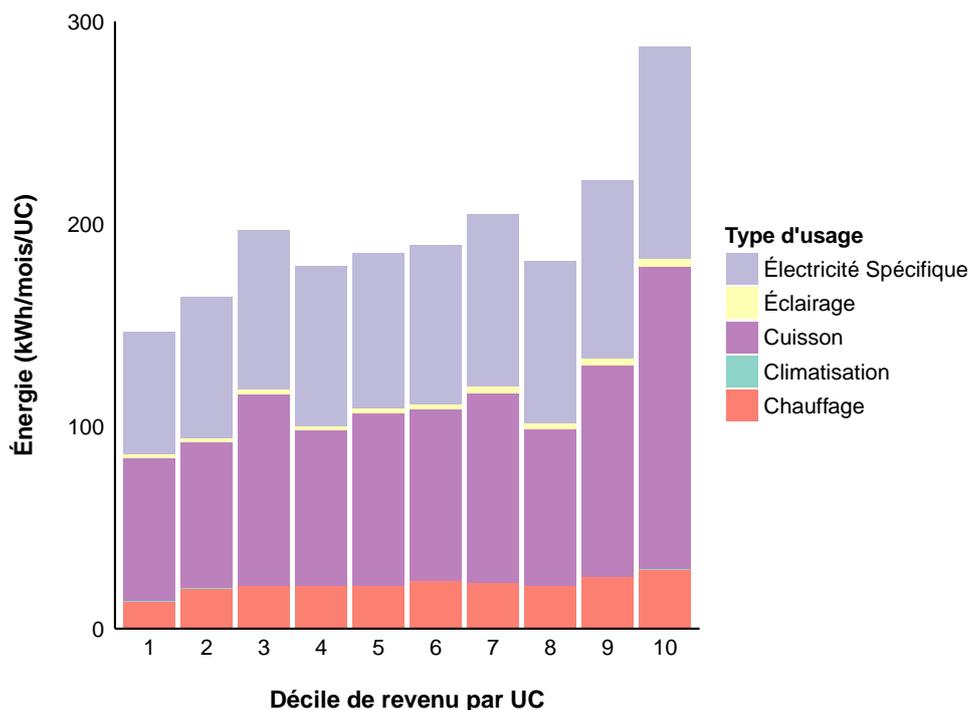


FIGURE 3.5 – Consommations d’énergie liées à l’activité « Travaux domestiques : repas », par usage

chaque activité par niveau de vie se reflètent dans les intensités en dépenses et en énergie. En général, et de manière attendue à temps identique, les deux intensités augmentent avec le revenu (Figures 3.6 et 3.7) pour toutes les activités.

Pour les activités « Repas au domicile » et « Repas hors domicile » (qui sont les plus intensives en dépenses en moyenne), l’intensité en dépenses augmente de manière presque exponentielle. Dans le premier cas, ceci est le résultat de la forte augmentation des dépenses avec le revenu, associée à une diminution du temps dédié à l’activité. Dans le deuxième cas, dépenses et temps augmentent avec le revenu, mais les dépenses ont une croissance bien plus rapide. Les écarts entre les intensités en dépenses du 9^e décile et du 10^e décile de revenu sont souvent importants, en particulier pour « Repas au domicile », « Repas hors domicile » et « Sport et sorties ». Pour « Sport et sorties », les très hautes dépenses du 10^e décile (et les intensités qui en résultent) sont principalement expliquées par les dépenses de transport, en particulier pour l’achat de véhicules neufs.⁵

Si les intensités en dépenses les plus élevées sont systématiquement celles du plus haut décile de revenu par UC, l’augmentation des intensités est moins uniforme en ce qui concerne l’énergie. En effet, pour les activités hors domicile, d’autres déciles que le dixième sont caractérisés par l’intensité la plus élevée, même s’il s’agit toujours d’un des déciles à plus hauts revenus (le décile 8 pour « Achats et démarches » et « Sport et sorties », le décile 6 pour les « Repas hors domicile », le décile 9 pour

5. Les dépenses de transport sont ventilées sur les activités hors domicile, selon la méthodologie détaillée dans le chapitre précédent.

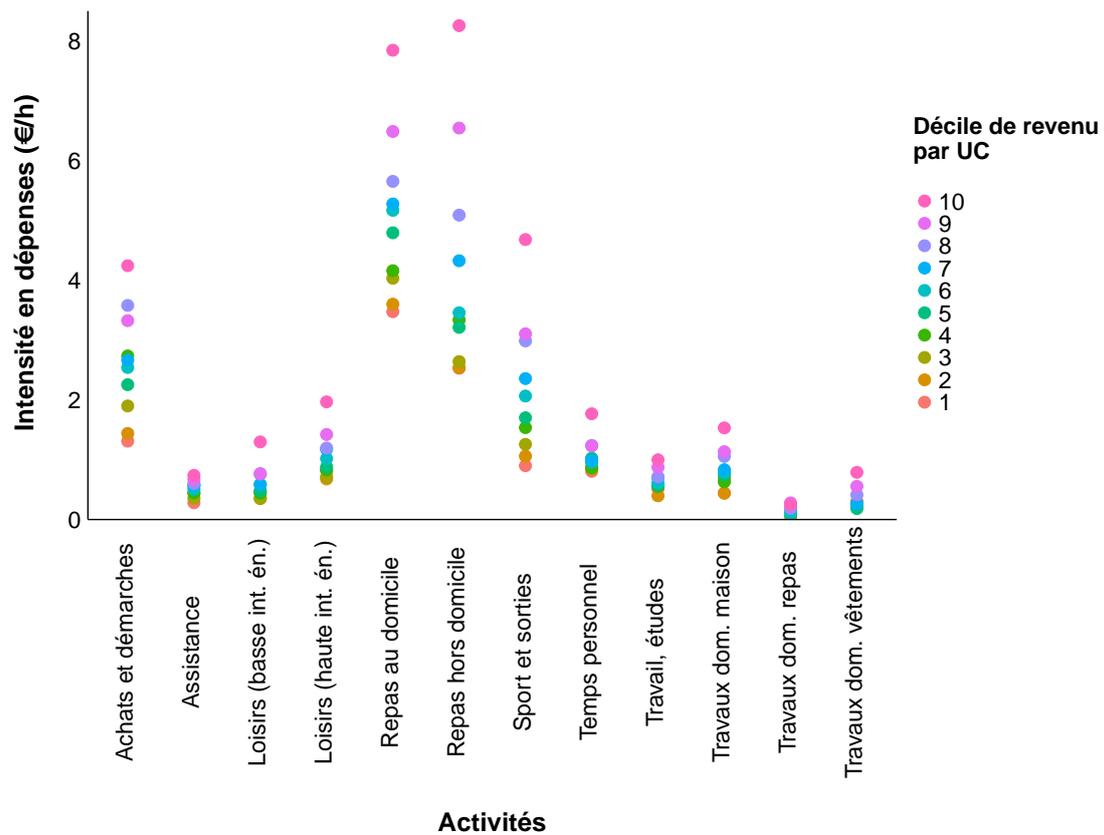


FIGURE 3.6 – Intensités en dépenses des différentes activités, par décile de revenu par UC

« Travail, études »). Les variations d'intensité énergétique des activités hors domicile sont la conséquence des différences dans les comportements de mobilité et la répartition géographique des ménages par décile de revenu : dans le 10^e décile, sont sur-représentés les ménages de l'agglomération parisienne, qui bénéficient d'un service de transports en commun particulièrement dense, et pour lesquels la part modale de la voiture dans les déplacements est bien inférieure à la moyenne nationale. Les intensités énergétiques des activités au domicile associées au 10^e décile, au contraire, sont toujours les plus élevées. Pour « Temps personnel » et « Travaux domestiques : repas » l'écart entre les intensités du décile 9 et du décile 10 est considérable : le 10^e décile est caractérisé par une forte augmentation de la consommation d'énergie pour l'eau chaude sanitaire pour le « Temps personnel » par rapport au décile 9, accompagnée par une légère diminution du temps dédié à l'activité. Pour les « Travaux domestiques : repas », le décile 10 est associé à des consommations d'énergie de cuisson et d'électricité spécifique plus élevées que celles du décile 9, mais surtout par des temps nettement plus faibles. Si nous comparons les intensités du 1^{er} et du 10^e déciles, nous remarquons qu'elles sont au moins deux fois plus élevées pour le décile 10, pour la plupart des activités (et presque deux fois plus élevées pour le reste).

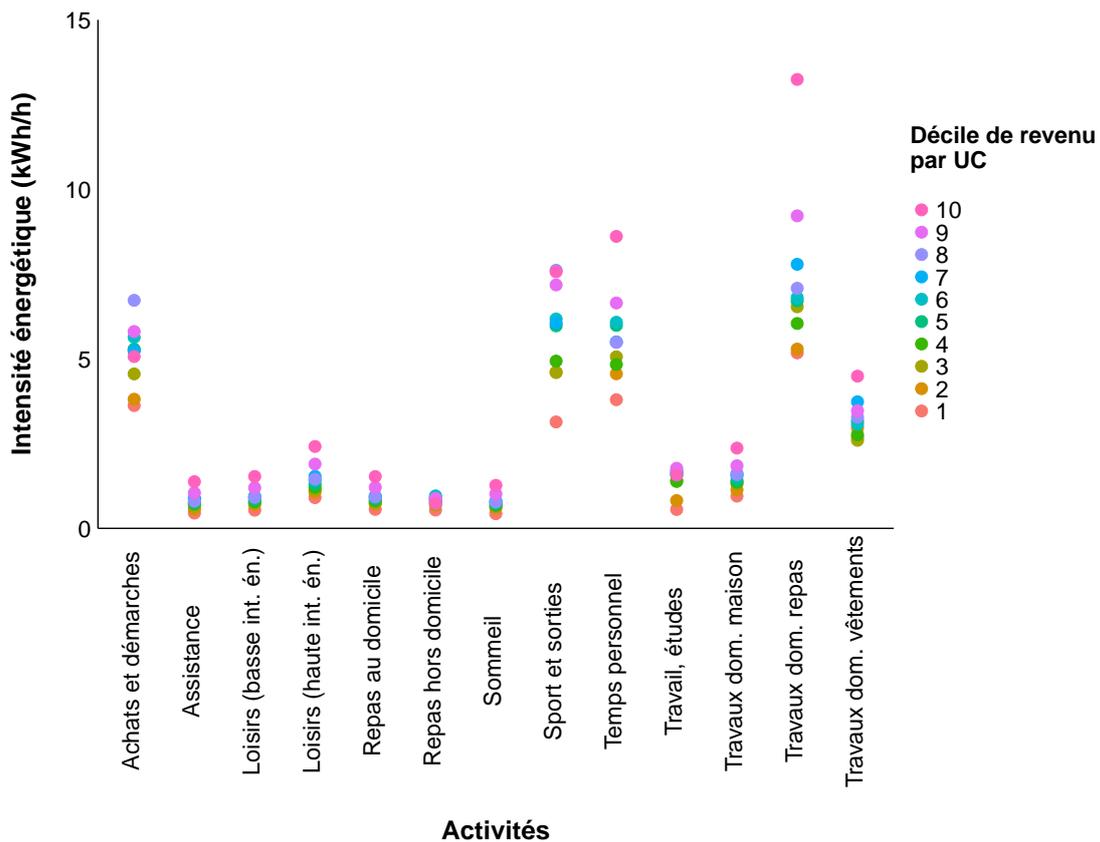


FIGURE 3.7 – Intensités en énergie des différentes activités, par décile de revenu par UC

Les consommations finales (directes) d'énergie des ménages sont le résultat de l'agencement de l'emploi du temps et des intensités énergétiques des différentes activités :

nous pouvons nous demander quel serait l'impact d'un changement d'emploi du temps en gardant les intensités énergétiques constantes. Nous avons réalisé ce calcul pour les ménages du décile 10, en leur imposant l'emploi du temps moyen des ménages du 2^e décile (puisque le 1^{er} décile est caractérisé par une démographie particulière, avec un grand nombre de jeunes et d'étudiants) : les consommations d'énergies seraient légèrement plus élevées (de 4,7 %). L'impact en termes d'élasticité revenu est marginal, de 0,395 que nous avons trouvé avec les emplois du temps propres à chaque décile de revenu à 0,414 si les ménages de tous les déciles avaient l'emploi du temps du décile 2.

3.3 Analyse par composition du ménage

Nous considérons les mêmes 6 types de ménages mentionnés dans le chapitre précédent : célibataires ≤ 65 ans, célibataires > 65 ans, familles mono-parentales, couples et ménages complexes avec enfants, couples et ménages complexes sans enfants (pers. de référence ≤ 65 ans), couples et ménages complexes âgés sans enfants (pers. de référence > 65 ans). La composition du ménage influence de manière significative les emplois du temps. En effet, comme nous avons introduit une distinction liée à l'âge de la personne de référence (PR), les ménages des deux catégories ayant une PR de plus de 65 ans incluent un grand nombre de retraités. Le temps de travail et études est, sans surprise, très faible pour ces ménages, alors que les temps de loisirs (à la fois intensifs en énergie et non intensifs en énergie) sont très élevés (Figures 3.8 et 3.9). Les consommations d'énergie reflètent les temps élevés dédiés à ces activités, alors que les dépenses sont plus faibles que pour les autres types de ménages. En ce qui concerne les dépenses associées à l'activité « Loisirs (haute int. én.) », ceci s'explique par l'hétérogénéité des équipements imputés, qui incluent télévisions et radios mais aussi ordinateurs, tablettes et consoles de jeu, plus chers et plus répandus parmi les ménages plus jeunes. Une autre activité pour laquelle les variations liées à la composition du ménage sont particulièrement importantes est « Travaux domestiques : repas » (Figure 3.10) : les dépenses sont élevées pour les couples sans enfants (PR ≤ 65 ans), alors que les temps dédiés à la préparation de repas et rangement, et les consommations d'énergie, sont nettement plus importants pour les célibataires de plus de 65 ans et les couples et ménages complexes sans enfants (PR ≤ 65 ans).

Pour séparer l'influence du revenu de celle de la composition du ménage (car les ménages plus âgés sont en moyenne plus riches), nous analysons les intensités énergétiques et les intensités en dépenses des activités par quintiles de revenu (par UC). Les figures 3.11 et 3.12 présentent respectivement les intensités en dépenses et en énergie pour le 1^{er}, 3^e et 5^e quintiles.

À la différence de ce que nous avons observé dans l'analyse par revenu, où le 10^e décile était toujours le plus intensif en dépenses et pour la plupart des activités aussi le plus intensif en énergie, une fois qu'on désagrège les intensités par type de ménage, à parité de revenu, il n'y a pas une composition du ménage qui est caractérisée par

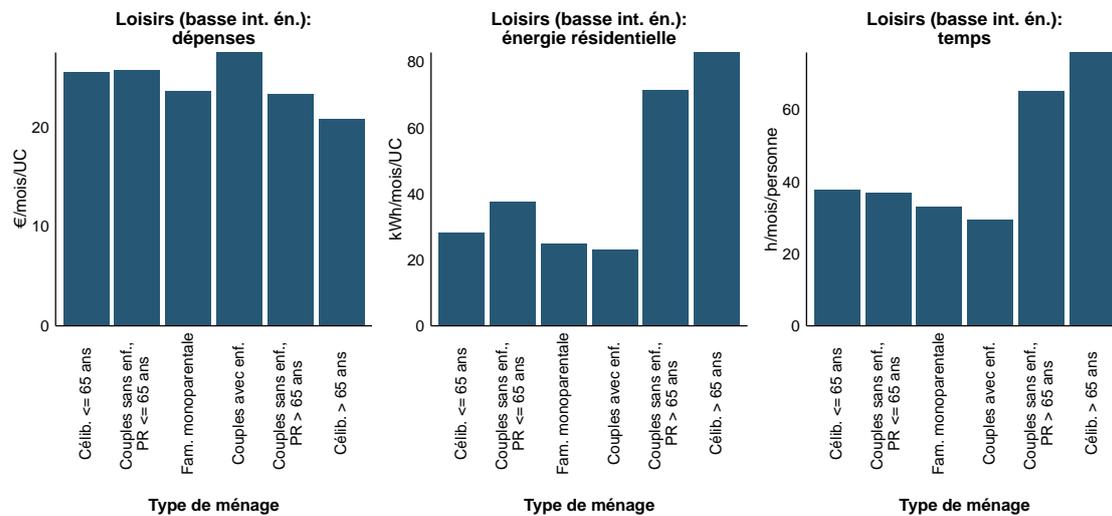


FIGURE 3.8 – Dépenses, consommations d'énergie et temps associés à l'activité « Loisirs (basse int. én.) »

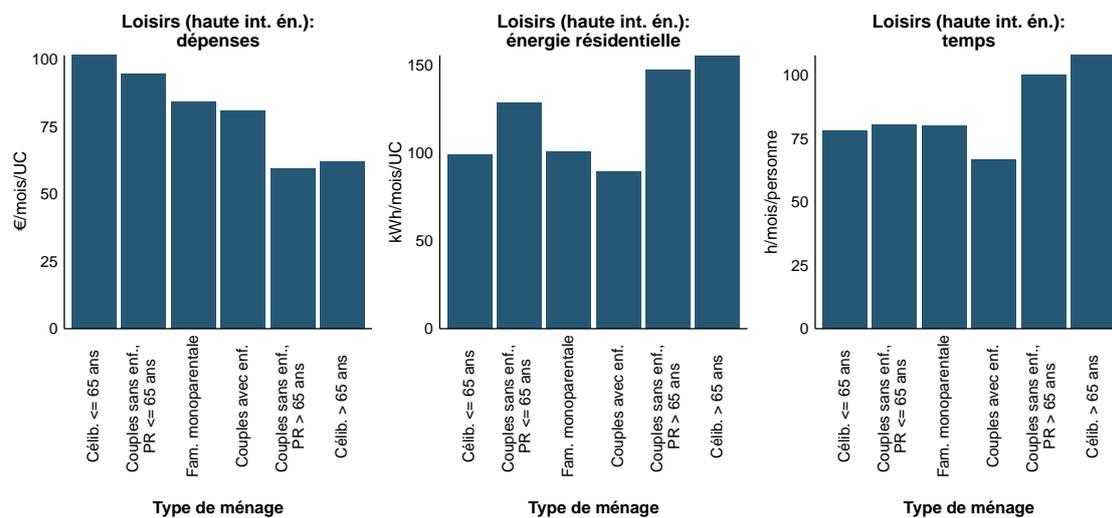


FIGURE 3.9 – Dépenses, consommations d'énergie et temps associés à l'activité « Loisirs (haute int. én.) »

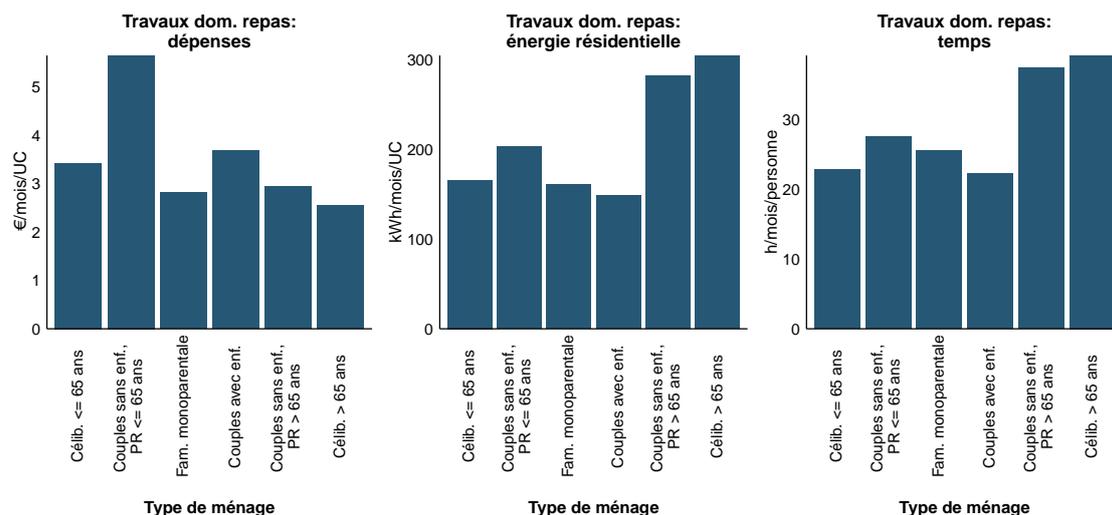


FIGURE 3.10 – Dépenses, consommations d'énergie et temps associés à l'activité « Travaux domestiques : repas »

des intensités systématiquement plus élevées que les autres, que ce soit en dépenses ou en temps. En effet, le type de ménage associé aux intensités les plus élevées change en fonction de l'activité, et pour la même activité ce peut être différent en fonction du quintile de revenu. Par exemple, pour l'activité « Repas hors domicile », les intensités en dépenses des personnes célibataires âgées de 65 ans ou plus sont inférieures à la moyenne si l'on considère les quintiles de revenu 1 et 3, mais ces mêmes intensités sont les plus élevées si l'on considère le 5^e quintile. Pour l'activité « Repas au domicile », les ménages les plus intensifs en dépenses sont les célibataires de moins de 65 ans et les familles mono-parentales, en raison du fait que pour ces ménages, le temps dédié aux repas au domicile est nettement plus faible que pour les autres, alors que les dépenses sont inférieures à celles des autres types de ménages, mais avec des différences plus faibles. Les ménages avec enfants (couples ou familles mono-parentales) ont les plus hautes intensités en dépenses de l'activité « Travail, études ». Ce n'est pas surprenant, parce que toutes les dépenses pour l'éducation sont allouées à cette activité, alors que les dépenses professionnelles sont souvent prises en charge par l'employeur et elles n'apparaissent donc pas dans le budget des ménages. En revanche, pour le premier quintile de revenu, ce sont les célibataires de moins de 65 ans qui ont les intensités en dépenses les plus élevées pour « Travail, études » : en effet, nous retrouvons dans ce groupe un grand nombre d'étudiants universitaires. Les intensités en dépenses de l'activité « Assistance » n'incluent que les dépenses pour les animaux de compagnie, parce que le niveau de détail de BDF est insuffisant pour d'autres types de dépenses qui pourraient être associées à l'activité : c'est pour cette raison que les intensités sont faibles pour les ménages avec enfants, qui sont caractérisés par des temps élevés dédiés à l'activité, tout en ayant des dépenses moyennes (alors que les dépenses des couples sans enfant avec PR de moins de 65 ans sont les plus élevées).

Si l'on regarde maintenant les intensités énergétiques (Figure 3.12), nous remarquons que pour un certain nombre d'activités, notamment « Assistance », « Repas au

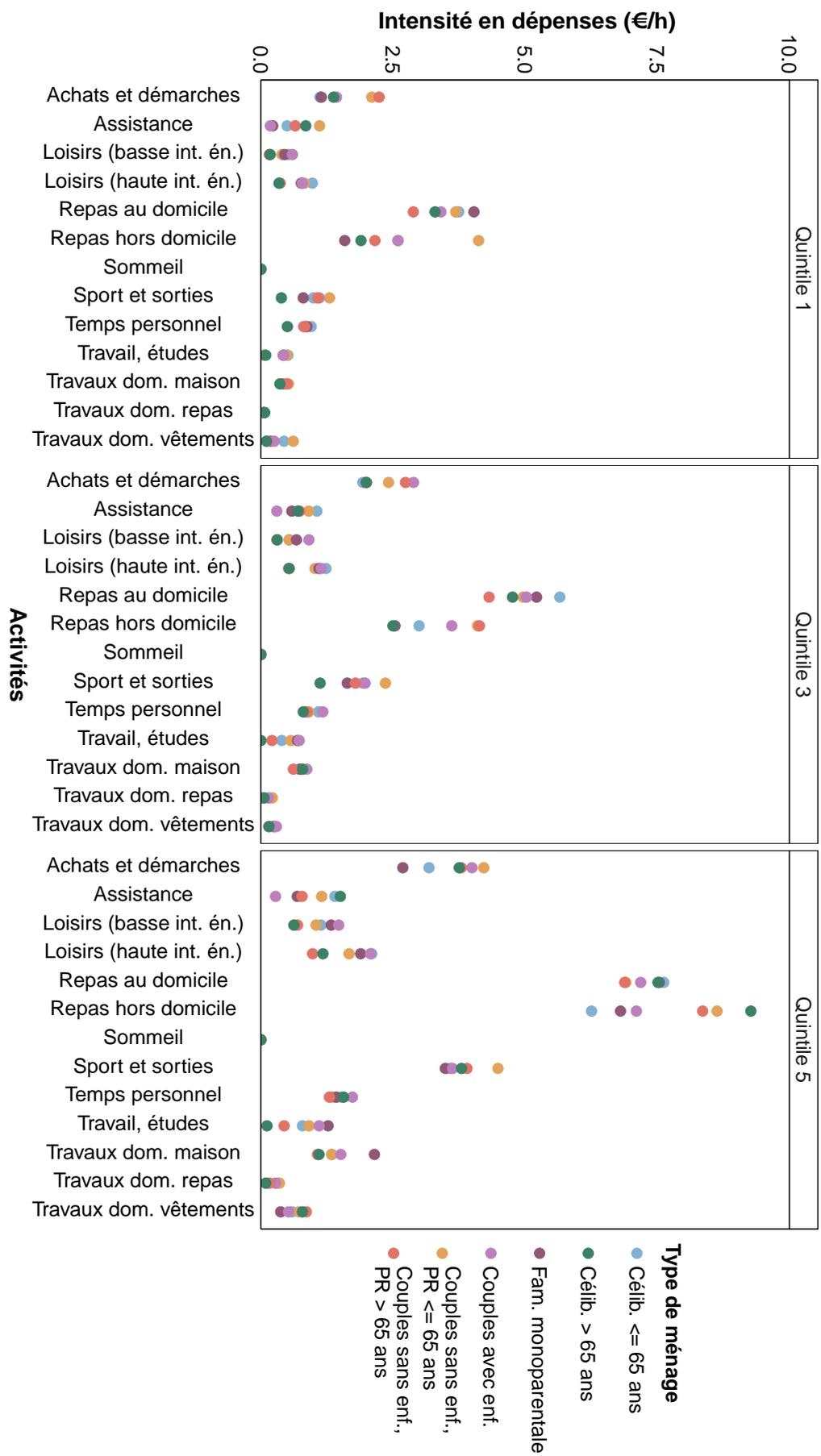


FIGURE 3.11 – Intensités en dépenses des différentes activités, par composition du ménage et quintile de revenu par UC

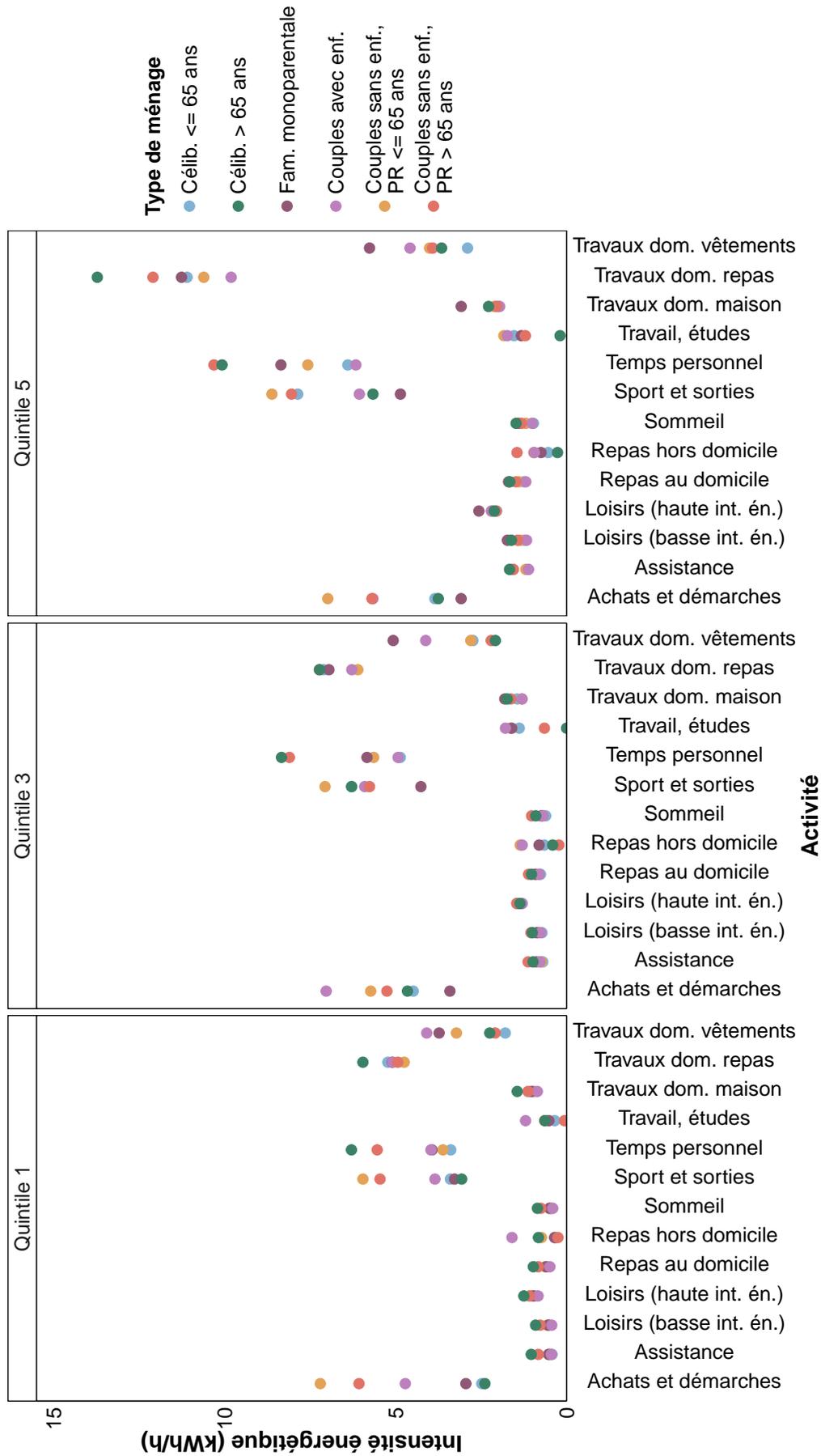


FIGURE 3.12 – Intensités en énergie des différentes activités, par composition du ménage et quintile de revenu par UC

domicile », « Loisirs (basse int. én.) », « Loisirs (haute int. én.) » et « Sommeil », elles sont très similaires pour différents types de ménage à parité de revenu. En revanche, pour « Achats et démarches », « Repas hors domicile », « Travail, études » et « Travaux domestiques : vêtements », les intensités énergétiques varient bien plus entre types de ménages à parité de revenu que, en moyenne, entre groupes de revenu différent. Enfin, les intensités de « Sport et sorties », « Temps personnel », « Travaux domestiques : repas » et « Travaux domestiques : maison » augmentent avec les revenus mais montrent une grande hétérogénéité au sein d'un même groupe de revenu en fonction du type de ménage.

Les différences que nous avons observées dans les intensités énergétiques des activités pour différentes compositions du ménage, même à parité de revenu, confirment la nécessité de prendre en compte d'autres variables que les revenus dans les études prospectives concernant les consommations d'énergie des ménages, notamment leur composition.

3.4 Analyse par type de logement

Nous analysons ici les dépenses, consommations d'énergie et temps par activité en fonction du type de logement, selon deux modalités : logements collectifs et maisons individuelles (Tableau 3.4). Le type de logement est un proxy d'autres variables telles que la surface du logement (plus grande pour les maisons individuelles, en moyenne) ou le tissu urbain (les logements collectifs sont plus fréquents en centre ville et zones péri-urbaines qu'en tissu rural). Il est aussi corrélé au revenu, c'est pourquoi nous calculons les intensités énergétiques et les intensités en dépenses non-énergétiques pour différents groupes de revenu.

Le type de logement semble influencer l'emploi du temps des ménages seulement pour quelques activités, notamment les trois types de travaux domestiques, qui arrivent à un total de 80,6 h/mois/pers. pour les ménages résidant en maison individuelle, alors qu'ils sont de 57,4 h/mois/pers. pour les ménages résidant en appartement. En particulier, la différence est considérable pour les « Travaux domestiques : maison », sans surprise. Les deux activités concernant les repas montrent aussi des variations de temps importantes entre les deux types de logement : pour les « Repas au domicile », nous observons 53,9 h/mois/pers. en maison individuelle et 43,5 h/mois/pers. en appartement ; à l'inverse, les ménages résidant en appartement dédient plus de temps aux « Repas hors domicile » (18,2 h/mois/pers., vs. 12,6 h/mois/pers. pour les ménages en maison individuelle), sans doute à cause des différences dans la distribution des tissus urbains entre les deux modalités.

L'impact du type de logement sur les dépenses non énergétiques est aussi évident seulement sur quelques catégories de dépenses, notamment celles mentionnées plus haut en parlant des temps : les dépenses pour les « Travaux domestiques : maison » sont presque doubles pour les ménages en maison individuelle. Les autres dépenses sont

TABLEAU 3.4 – Consommations d'énergie (kWh/mois/UC), dépenses (€/mois/UC) et temps (h/mois/pers.) par type de logement

Activité		Log. collectif	Maison indiv.
Achats et démarches	dép.	47,6	65,1
Assistance	dép.	4,1	8,3
Loisirs (basse int. én.)	dép.	27,0	23,8
Loisirs (haute int. én.)	dép.	91,4	77,9
Repas au domicile	dép.	218,4	269,8
Repas hors domicile	dép.	76,8	58,3
Sommeil	dép.	0,0	0,0
Sport et sorties	dép.	100,0	117,8
Temps personnel	dép.	31,5	28,2
Travail, études	dép.	62,2	69,4
Travaux dom. maison	dép.	21,2	36,6
Travaux dom. repas	dép.	3,1	4,2
Travaux dom. vêtements	dép.	2,8	2,1
DÉPENSES TOT.	dép.	686,1	761,5
Achats et démarches	én.	67,4	146,1
Assistance	én.	5,0	14,0
Loisirs (basse int. én.)	én.	17,9	55,5
Loisirs (haute int. én.)	én.	74,4	143,2
Repas au domicile	én.	19,3	65,6
Repas hors domicile	én.	9,3	14,1
Sommeil	én.	91,4	284,8
Sport et sorties	én.	237,5	334,5
Temps personnel	én.	101,5	202,7
Travail, études	én.	101,5	172,9
Travaux dom. maison	én.	21,8	80,3
Travaux dom. repas	én.	159,8	223,6
Travaux dom. vêtements	én.	13,5	29,1
ÉNERGIE TOT.	én.	920,5	1766,4
Achats et démarches	tps	23,4	20,7
Assistance	tps	12,3	12,9
Loisirs (basse int. én.)	tps	39,8	44,0
Loisirs (haute int. én.)	tps	85,5	77,8
Repas au domicile	tps	43,5	53,9
Repas hors domicile	tps	18,2	12,6
Sommeil	tps	262,4	259,8
Sport et sorties	tps	55,0	47,5
Temps personnel	tps	28,5	27,6
Travail, études	tps	104,0	92,6
Travaux dom. maison	tps	25,6	44,5
Travaux dom. repas	tps	25,5	28,6
Travaux dom. vêtements	tps	6,3	7,5
TEMPS TOT.	tps	730,0	729,9

assez similaires entre les deux types de logement. Une raison de cette similarité est que nous n'avons pas considéré les dépenses pour les équipements électroménagers, le mobilier etc. (pour les raisons expliquées dans le chapitre précédent), qui auraient pu être plus importantes pour les ménages en maison individuelle en raison des surfaces moyennes plus grandes associées à ce type de logement.

En revanche, les consommations d'énergie des ménages résidant en maison individuelle sont systématiquement plus élevées que celles des ménages en appartement, pour toutes les activités. La différence dans les consommations d'énergie résidentielle, pour les activités au domicile, est due au fait que les surfaces des maisons individuelles sont en moyenne plus grandes que celles des appartements (donc le besoin d'énergie pour le chauffage/climatisation et l'éclairage augmente), et que la taille moyenne des ménages est également supérieure. Selon l'enquête sur les consommations d'électricité spécifique menée par EDF R&D que nous avons utilisée pour cette analyse, la taille des appareils électroménagers augmente avec la surface du logement, donc les maisons individuelles sont associées à des consommations d'électricité spécifique plus élevées. Le type de logement influence également les consommations de carburants associées aux activités hors domicile, puisque cette variable agit comme un proxy de la localisation. En effet, il y a plus de maisons individuelles en banlieue et milieux ruraux que dans les villes centre, où l'offre de transports publics est meilleure et où il est également plus facile de se déplacer en modes doux (marche, vélo). Le nombre de véhicules possédés est d'ailleurs plus élevé pour les ménages en maison individuelle pour tous les quintiles de revenu, selon l'ENTD 2008. La taille des voitures est également plus grande pour les ménages vivant en milieu rural : pour tous les quintiles de revenu, ces ménages ont une part plus importante de voitures de taille moyenne et grande (poids à partir de 1000 kg), que de voitures de petite taille.

Comme il y a une corrélation entre le type de logement et le revenu, nous présentons ici les résultats relatifs aux intensités en dépenses et en temps des activités par type de logement en considérant séparément 3 quintiles de revenu. Les intensités en dépenses non-E des activités, à parité de revenu, sont très similaires entre les ménages résidant en appartement et ceux résidant en maison individuelle (Figure 3.13). Au contraire, les intensités énergétiques varient de manière importante entre les deux types de logements (Figure 3.14), pour les raisons mentionnées plus haut : dans de nombreux cas, l'intensité est deux fois plus élevée pour les ménages en maison individuelle. La plus grande variation est observée pour « Travaux domestiques : vêtements » et « Temps personnel », ceci s'explique par l'augmentation des consommations d'électricité spécifique et d'eau chaude sanitaire (liées aux nombre de personnes). D'autre part, la plus faible intensité énergétique de l'activité « Temps personnel » pour les ménages en appartement pourrait en partie être liée au fait que parfois, pour les logements collectifs, les dépenses d'eau chaude sanitaire sont incluses dans les charges. Dans ce cas, il est impossible de les désagréger et de les attribuer à l'activité en question. Les activités hors domicile présentent des différences parfois considérables dans les intensités énergétiques des deux types de logement, en particulier pour les activités « Achats et démarches » et « Sport

et sorties ». En effet, le temps de transport représente une part bien plus importante du temps total pour ces deux activités, que pour les deux autres activités hors domicile. En conséquence, une augmentation des consommations d'énergie due au report modal vers la voiture et à l'augmentation des distances parcourues se répercute sur un temps total faible, causant une augmentation marquée de l'intensité énergétique.

3.5 Conclusion

Nous avons montré à quel point différentes caractéristiques des ménages influencent à la fois leurs choix d'activités et les dépenses et consommations d'énergie attachées à chacune de ces activités. Les emplois du temps, dépenses et consommations d'énergie varient grandement selon le revenu, mais nous avons remarqué que parfois, les variations entre types de ménage ou types de logement, à parité de revenu, sont supérieures aux différences entre groupes de revenus différents : il est donc fondamental de tenir compte de l'hétérogénéité des ménages dans les analyses prospectives des consommations d'énergie, surtout si l'on considère que la société traversera des changements profonds dans les décennies à venir, notamment à cause du vieillissement de la population (du moins dans les pays industrialisés).

La base de données temps/dépenses/énergie que nous avons obtenue dans le chapitre précédent, vu la richesse d'informations concernant les ménages, est un excellent outil dans ce sens puisque elle permet d'analyser les consommations d'énergie directe des ménages en tant que conséquence de leur mode de vie. C'est pourquoi nous utilisons cette base en combinaison avec un modèle macro-économique pour l'analyse prospective d'impacts de changements de modes de vie à long terme. La description du modèle et des scénarios étudiés fait l'objet des chapitres qui suivent.

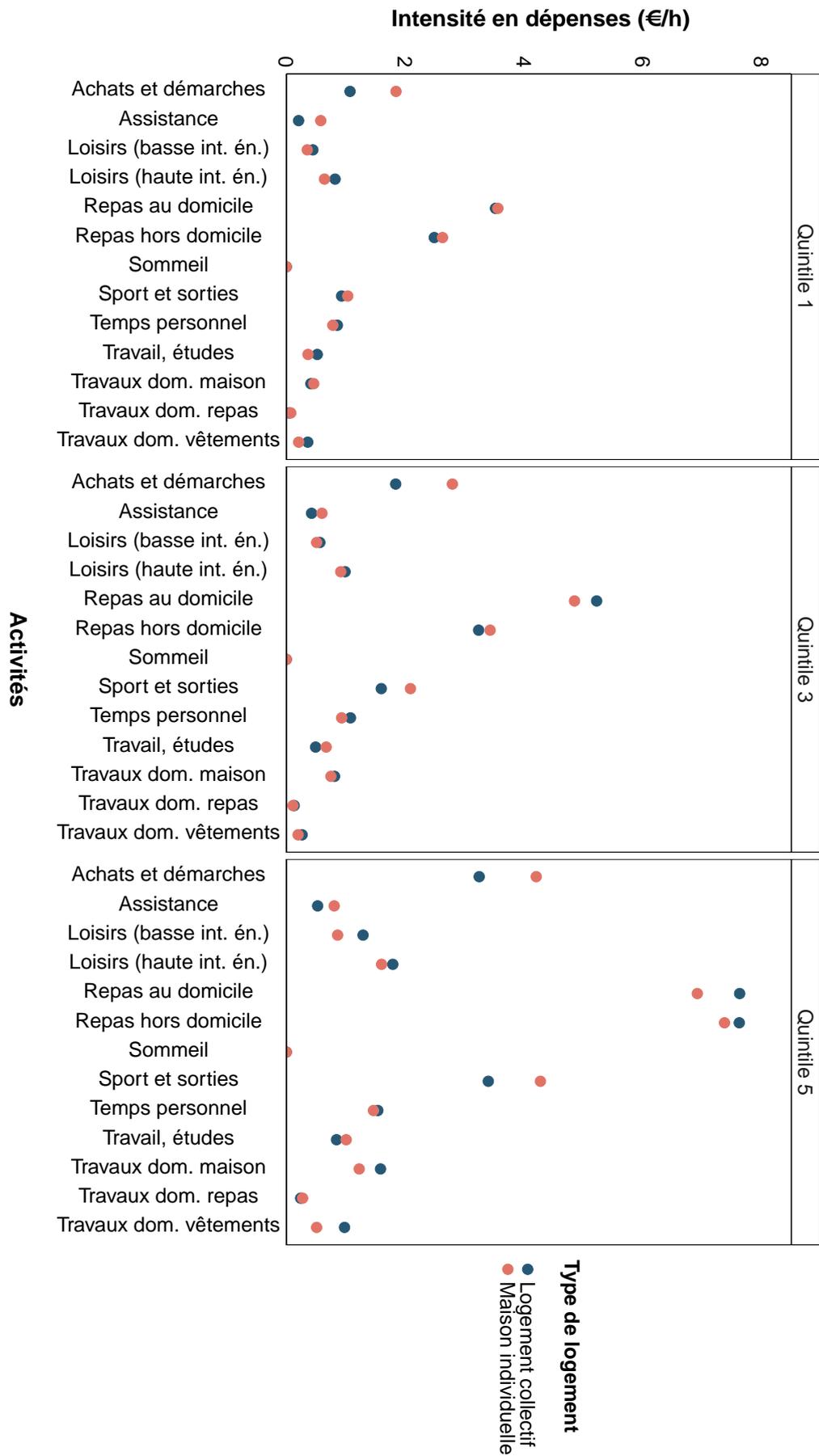
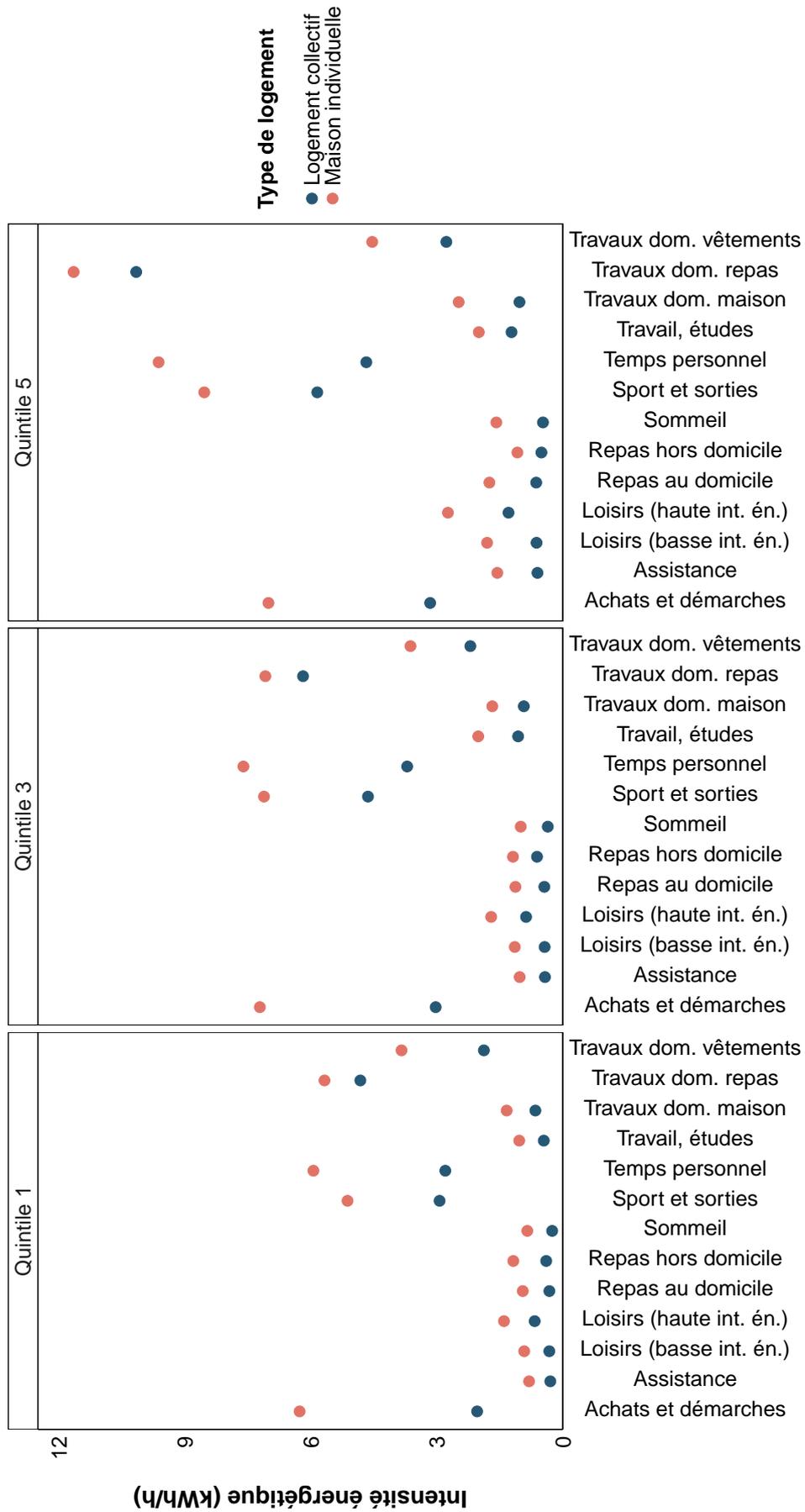


FIGURE 3.13 – Intensités en dépenses des différentes activités, par type de logement et quintile de revenu par UC



Activités

FIGURE 3.14 – Intensités en énergie des différentes activités, par type de logement et quintile de revenu par UC

Chapitre 4

Modélisation macroéconomique des effets des changements de modes de vie

Nous abordons dans ce quatrième chapitre le cœur de la contribution méthodologique de notre travail : l'élaboration d'une architecture de modélisation qui instaure un dialogue entre la base de données microéconomique originale dont le chapitre 2 décrit la construction, et un modèle économie-énergie-environnement de la famille IMACLIM.¹ L'objectif est de produire un outil prospectif conjuguant les forces des deux objets couplés : la richesse de notre base de données d'une part, et notamment son extension aux usages du temps, l'exhaustivité de la représentation des flux économiques et énergétiques de l'équilibre général hybride des modèles IMACLIM d'autre part.

Nous consacrons les deux sections de ce chapitre à une description des traits saillants de notre version d'IMACLIM (dont un formulaire exhaustif est disponible en Annexe B), puis à une présentation de la mécanique d'articulation entre ce modèle et notre base de ménages par un processus itératif d'échange de données jusqu'à leur convergence dans les deux systèmes numériques.

4.1 Le Modèle IMACLIM

4.1.1 Vue d'ensemble et traits saillants

Le modèle IMACLIM, qui définit le cadre macroéconomique de notre architecture prospective, est un modèle d'équilibre général calculable statique : il représente simultanément l'équilibre de l'offre et de la demande sur l'ensemble des marchés de biens et services de consommation (agrégés en un certain nombre de produits, voir ci-dessous)

1. Voir <http://www2.centre-cired.fr/IMACLIM>.

et de facteurs de production, en une année donnée, par un jeu d'équations dont des changements de paramètres permettent de simuler certaines mutations économiques. En particulier, une fois calibré sur une année de base il peut être utilisé pour l'exploration de scénarios de croissance par la prise d'hypothèses croisées sur l'évolution de la productivité du travail, suivant l'hypothèse d'un progrès technique dit neutre au sens de Harrod, et de sa démographie.

Il présente certains des traits saillants communs aux modèles de la plateforme IMA-CLIM, qui les distinguent du modèle d'équilibre général calculable standard. Tout d'abord, il se calibre en une année de base sur des données hybrides conciliant comptabilité nationale et bilans énergétiques, afin de garantir une double comptabilité monétaire et physique des flux énergétiques (voir section 4.1.3). Ces deux mesures des flux énergétiques sont liées par un vecteur de prix d'importation et de consommation, qui pour chaque bien énergétique sont spécifiques à chaque flux (importations et emplois des secteurs productifs, des ménages, exportations), au-delà des seules différences de taxation. La formulation du modèle garantit une représentation de cette variété de prix par le calibrage de marges spécifiques à chaque emploi, corrigeant ainsi les biais induits par la règle de « prix unique » dans l'approche standard de la modélisation en équilibre général (voir Le Treut et al. (2014)).

Second trait saillant, notre modèle IMACLIM distingue, dans la valeur ajoutée, la consommation de capital fixe (CCF) de l'excédent net d'exploitation (les profits). Le facteur primaire Capital (K), intrant des productions décrites par le modèle, est calibré sur la seule consommation de capital fixe (CCF), et sa tarification évolue comme l'indice des prix de l'investissement I . L'hypothèse sous-jacente est que les conditions de financement de l'activité économique sont inchangées entre l'année de calibrage du modèle et l'année de projection, et donc que seul le coût des biens immobilisés (bâti-ments, machines) relativement aux autres prix du modèle évolue. Le stock de capital n'est pas explicitement représenté suivant la règle standard de l'inventaire perpétuel, cependant en une année donnée (de calibrage ou de projection) la somme de la CCF induit la demande d'investissement par une matrice de coefficients techniques décrivant sa composition moyenne en biens (employés à l'investissement I).² Les profits quant à eux sont modélisés comme un taux de marge fixe (*mark up*) s'appliquant à la somme des coûts de production (capital compris), ce qui revient à considérer une stabilité de l'écart entre coût moyen et prix.

Troisième particularité, IMACLIM renonce à l'abstraction du « ménage représentatif » propriétaire de l'ensemble des facteurs de production et distingue les comptabilités effectives de trois agents domestiques : ménages, entreprises et administrations publiques. Le modèle représente ainsi à la fois la distribution primaire du revenu des facteurs entre ces trois agents et les transferts secondaires qui s'opèrent entre eux (transferts sociaux, impôts directs, intérêts d'emprunts, revenus du patrimoine, etc.) ainsi qu'en direction des économies extérieures. Cette modélisation de la distribution secon-

2. Voir Annexe B.

daire du revenu entre acteurs est particulièrement utile à notre analyse dans la mesure où notre architecture « macro-micro » (voir section 4.3) repose notamment sur le calcul par IMACLIM de l'évolution du revenu des ménages ; affiner la description des composantes de ce revenu augmente donc la pertinence des liaisons faites avec notre base microéconomique. Le modèle distingue ainsi 7 sources de revenu des ménages : revenus du travail (facteur L), part de l'excédent brut d'exploitation (somme de la rémunération du facteur K et des profits), allocations chômage, retraites, autres transferts sociaux, revenus du patrimoine et un solde d'autres transferts (correspondant aux revenus des jeux, aux primes d'assurance, etc.). En prospective ces sources de revenu suivent des dynamiques spécifiques dont la résultante, pour un ménage donné, dépend du poids de chaque source dans son revenu de l'année de base. En particulier, les allocations chômage de chaque chômeur, les retraites de chaque retraité et le solde de transferts sociaux par tête sont ajustés afin de maintenir l'endettement public (dont le calcul précis est l'une des conséquences de la représentation de la distribution secondaire du revenu) à un niveau constant en pourcentage du PIB.

4.1.2 Spécifications comportementales

En lien direct avec le calibrage sur données hybrides et la distinction entre capital physique et profits, l'approche IMACLIM insiste sur la nécessité de fonder la modélisation énergie/économie sur une représentation explicite des systèmes techniques sous-jacents aux consommations d'énergie. Cette nécessité se traduit de différentes manières selon les versions du modèle, soit par le développement de modules techniques spécifiques intercalés aux pas de temps de la prospective en équilibre général, et qui en infléchissent graduellement les coefficients techniques (modèle IMACLIM-R, voir Sassi et al. (2010)); soit par couplage avec des modèles d'ingénieur garantissant une représentation appropriée des contraintes d'offre et de demande énergétique (modèles IMACLIM-S, voir Ghersi (2015)).

Notre version d'IMACLIM s'écarte volontairement de ce paradigme en ce qui concerne la consommation des ménages. En effet, notre architecture couplée fait reposer les variations des consommations des ménages sur des repondérations de notre base microéconomique, après mise à l'échelle de notre horizon de projection (voir section 4.3). Les hypothèses d'évolution des systèmes techniques conditionnant ces consommations sont en fait introduites, implicitement, au moment de la mise à l'échelle de la base. Par la suite, les consommations agrégées des ménages varient au gré de la repondération des ménages de la base et donc de la représentativité dans la population totale des ménages du sous-système technique (logement, équipements, usages du temps, localisation et besoins de transport induits, etc.) propre à chaque ménage de la base mise à l'échelle.

Nous traitons les consommations d'énergie du système productif de manière plus fruste dans la mesure où elles ne constituent pas notre objet principal d'étude. Nous aurions théoriquement pu adopter la méthode de calibrage de formes réduites sur projec-

tions de modèles d'ingénieurs décrite in Ghersi et Hourcade (2006). Cependant sa mise en oeuvre pour la désagrégation en 18 secteurs productifs adaptée à nos simulations aurait constitué une charge de travail supplémentaire incompatible avec le temps imparti à nos travaux. Nous postulons donc une évolution exogène des intensités énergétiques de chacune des productions du modèle, y compris les productions de biens énergétiques, sur la base d'hypothèses décrites en section 4.2. Ces hypothèses sont maintenues dans les trois scénarios alternatifs envisagés à l'horizon de projection (hypothèse de Leontief).

Les intensités d'intrants non-énergétiques (autres productions et facteurs primaires) sont elles-aussi exogénéisées pour les sept productions de biens énergétiques, basées pour les plus importantes sur des expertises d'ingénieurs. En revanche, les intensités en intrants non-énergétiques des productions non-énergétiques découlent de l'hypothèse que ces intrants se combinent selon une structure de production imbriquée (Figure 4.1). Quatre fonctions de production de type *Constant Elasticity of Substitution* (CES) interviennent dans la combinaison de capital et travail pour produire un agrégat KL , dans la combinaison de cet agrégat avec un agrégat énergétique (sous contrainte de l'intensité énergétique exogène précédemment postulée) pour produire un agrégat KLE , dans la combinaison de l'agrégat KLE avec les inputs secondaires non énergétiques pour donner la production domestique Y , et enfin dans l'arbitrage entre production domestique et importations pour donner la ressource totale Q .

Sur le plan des décisions d'épargne et d'investissement, des hypothèses doivent être prises pour les trois agents domestiques. Les ménages sont supposés maintenir leur taux d'épargne en proportion de leur revenu disponible brut, et faire évoluer leur investissement, c'est-à-dire leurs achats de logements neufs comme leurs dépenses de logement (utilisées comme proxy). Les administrations publiques consacrent à l'investissement un montant qu'on suppose une part fixe du PIB, ajusté, comme l'ensemble des dépenses publiques, afin de respecter la contrainte d'un endettement stable en points de PIB précédemment décrite. Les entreprises sont contraintes à fournir le solde de l'investissement total, induit par l'évolution de la consommation de capital fixe comme indiqué précédemment. La somme des « capacités d'autofinancement » (solde budgétaire) des agents nationaux est mécaniquement compensée par l'épargne extérieure, dont le pendant est la balance commerciale. En d'autres termes la clôture du modèle est assurée par une balance commerciale endogène garantissant l'équilibre entre épargne et investissement.

4.1.3 Calibrage : tableau entrées-sorties hybride de l'économie française et tableau économique d'ensemble

Le calibrage des paramètres du modèle s'effectue sur l'année 2010, puisque les enquêtes EDT et BDF utilisées pour créer la base de données micro-économique ont été réalisées respectivement en 2009-2010 et 2010-2011. Les données de calibrage sont issues principalement des comptes nationaux 2010 de l'INSEE, et notamment de deux tableaux : le tableau entrées-sorties (TES) et le tableau économique d'ensemble (TEE)

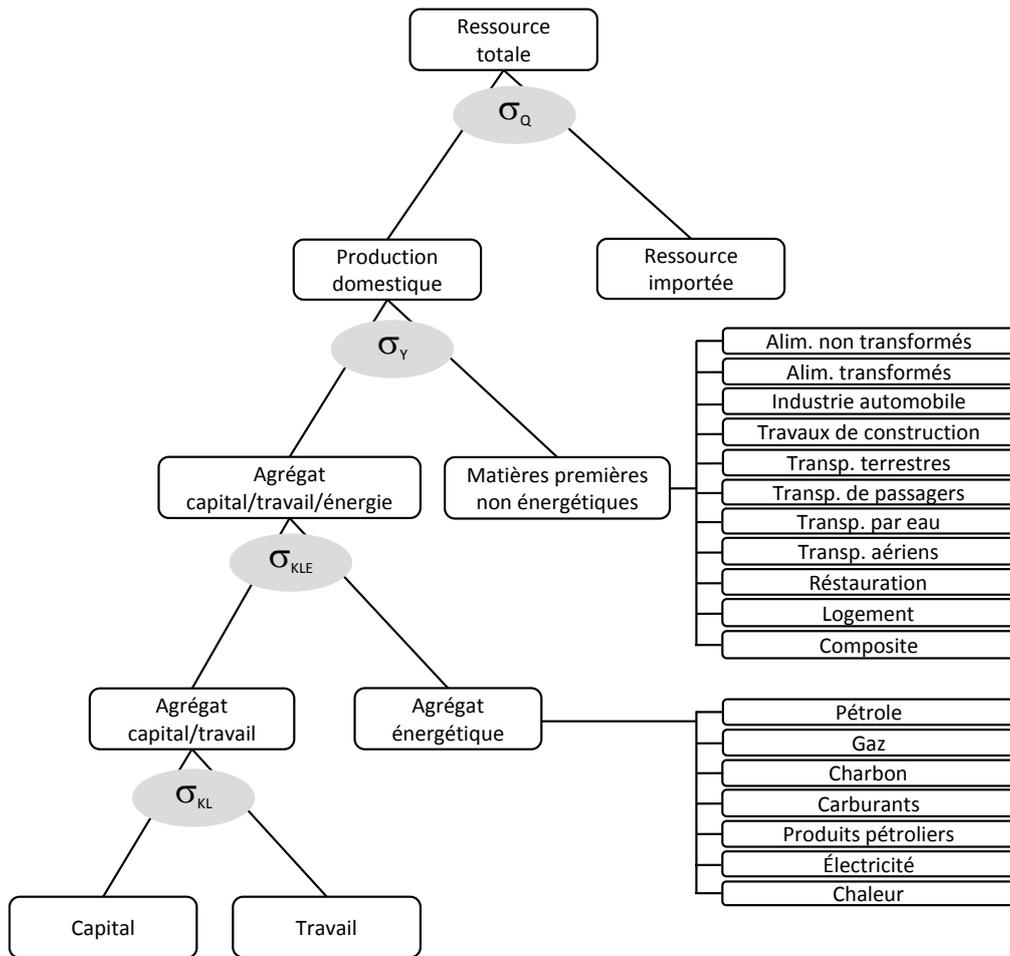


FIGURE 4.1 – Structure de production imbriquée pour les secteurs non énergétiques

net. Le TES représente l'équilibre entre ressources (production nationale ou importations) et emplois (consommations intermédiaires ou consommations finales) de chaque secteur productif de l'économie nationale, et il fournit également des informations sur la valeur ajoutée et les taxes par secteur. Le TEE détaille les transferts primaires et secondaires entre six secteurs institutionnels : cinq appartenant à l'économie nationale (sociétés non financières, sociétés financières, administrations publiques, ménages, institutions sans but lucratif) et un qui représente le reste du monde. Pour le calibrage du modèle, les secteurs institutionnels sont réagregés en quatre secteurs (entreprises, ménages, administrations publiques et reste du monde).

Le TES fournit les ressources et les emplois par secteur productif de l'économie française en termes monétaires globaux, y compris pour les secteurs énergétiques. Comme nous l'avons souligné en section 4.1.1 notre modélisation, qui s'intéresse à l'évolution des consommations d'énergie et des émissions de CO₂, requiert de passer de ces agrégats monétaires à des valeurs physiques dans les unités appropriées (notamment, des tonnes d'équivalent pétrole, tep, pour l'énergie). Pour ce faire, nous devons désagréger les emplois fournis par l'INSEE en tant que produit de prix et quantités physiques. Des informations sur les prix des énergies (différenciés par agent) peuvent se trouver dans plusieurs bases de données (comme celle de l'AIE, ou la base Pégase du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer) alors que les consommations d'énergie en quantités physiques sont disponibles dans les bilans de l'AIE. Cependant, la reconstruction des consommations totales en valeur, grâce aux prix et aux quantités provenant de ces bases de données, montre des discordances par rapport aux totaux communiqués dans le TES. La raison réside dans les différents traitements statistiques et dans les différences de périmètres considérés pour chaque secteur énergétique.

Le CIRED a donc développé une méthode de « hybridation » des TES, qui consiste à substituer aux valeurs du TES de l'INSEE, pour les secteurs énergétiques, les nouvelles valeurs calculées sur la base des prix et des quantités effectivement consommées. Puisque cette substitution déséquilibre le TES (c'est-à-dire que les ressources totales de chaque secteur ne sont pas égales aux emplois totaux du même secteur), la différence entre les valeurs INSEE et les nouvelles valeurs est attribuée à un autre secteur économique, qui est en général le « secteur composite » (une addition des secteurs productifs qui ne sont pas centraux dans l'analyse à réaliser, et qui sont donc modélisés agrégés). Il est également nécessaire de corriger les éléments qui composent la valeur ajoutée de chaque secteur. Ceci est fait au prorata de la différence trouvée entre les emplois INSEE et les emplois ajustés, par secteur.

Comme précédemment évoqué (section 4.1.1) il est essentiel de considérer que les prix des énergies peuvent avoir des variations importantes selon le consommateur final (entre des industries et des particuliers, par exemple), qui vont bien au-delà des différences de taxation. Les négliger (avec une hypothèse standard de prix unique) porterait à des erreurs dans l'évaluation des volumes d'énergie consommés par les acteurs. L'origine de ces différences est à rechercher à la fois dans l'hétérogénéité de certains produits énergétiques modélisés mais aussi dans les coûts réels (par exemple les coûts

de distribution) de produits homogènes (électricité, gaz naturel) qui varient selon les clients. Pour tenir compte des différences de prix dans les consommations des biens énergétiques, nous avons recours au calibrage de « marges spécifiques ». Ces marges agrègent, pour chaque agent, les écarts entre les tarifications induites par l'hypothèse d'un prix unique (prix de production moyen augmenté des taxes spécifiques) et les tarifications effectivement observées. Par construction, leur somme est nulle à l'année de calibrage et l'introduction des marges ne modifie pas le bilan énergétique. Enfin, les TES de l'INSEE présentent pour chaque secteur les variations de stocks. Dans cette analyse nous ne considérons que les productions effectivement consommées, immobilisées ou exportées : les variations de stocks ne sont donc pas comptées dans les emplois finaux, et les ressources de chaque secteur sont ajustées de manière à respecter l'équilibre emplois/ressources, en faisant l'hypothèse que les stocks ont la même structure de coûts que la production consommée. Plus de détails sur le processus d'hybridation sont disponibles dans Le Treut et al. (2014).

Pour les analyses présentées ici, nous utilisons comme base de départ des TES hybrides développés par Le Treut et al. (2014), que nous ré-agrégeons ensuite selon nos secteurs d'intérêt ; outre les secteurs énergétiques, nous réservons un traitement particulier aux secteurs alimentaires et au transport de passagers, qui sont au cœur des analyses de scénarios proposées. Concernant les transports, nous différencions les secteurs des transports terrestres, par eau et aériens. Ensuite, nous désagrégeons le secteur des transports terrestres en transport de passagers pour les ménages et autres transports terrestres, grâce aux données INSEE sur les consommations des ménages en 2010. Cette dernière source de données est également à l'origine de la séparation de la viande et du poisson non transformés du secteur de l'industrie agroalimentaire, et de leur ré-intégration au secteur agricole. Enfin, nous séparons la foresterie du secteur agricole, (grâce à un TES INSEE à 88 secteurs, d'accès restreint), pour la déplacer dans le composite. De cette manière, le secteur agricole devient le secteur regroupant les produits alimentaires non transformés. Dans le tableau hybride, nous recalculons la taxe sur la valeur ajoutée en gardant le même taux que dans le TES original de l'INSEE à 88 secteurs, sur la base de la valeur ajoutée obtenue après hybridation. Au final, notre TES hybride inclut 18 secteurs, dont 7 secteurs énergétiques, 10 secteurs non énergétiques et un secteur non énergétique composite qui regroupe le solde des secteurs productifs de l'économie nationale (Tableau 4.1). Le TES hybride de calibrage 2010 ainsi que le bilan énergétique et les prix des énergies sous-jacents aux factures énergétiques sont respectivement présentés en figure 4.2, 4.3 et 4.4. Dans le TES, les autoconsommations des secteurs gaz et électricité incluent le trading respectivement de gaz ou d'électricité entre entreprises du même secteur. Comme évidemment le trading ne représente pas une consommation réelle d'énergie, nous ne le considérons pas dans le calcul des consommations d'énergie et des émissions pour les différents scénarios (grâce à des données sur les autoconsommations effectives des secteurs gaz et électricité).

	PITTOIE	GAZ	CHARBON	CARBURANTS	PROFITROL	ELEC	CHALEUR	ALUMIN	ALUMIN TR	ALUMIN TRAF	AUTOMOB	TRAVAUX	TRANSPOR	TRANSP PASS	TRANSP FAU	TRANSP	RESTAUR	LOG	COMPOSITE	C	G	I	X	Total emplois	
PITTOIE	3 225	13 225 608	601	195 723	81 040	1 378 233	826 090	296 142	764 910	113 163	126 260	13 488	6 042	6 750	9 479	160 642	123 989	5 413 962	10 486 194	-	-	-	24 190	33 055 373	
GAZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	513 333	3 525 775
CHARBON	-	-	867 002	-	-	789 793	1 867	11 175	42 304	1 333	917	537 755	1 773 798	2 382 752	1 981 611	2 792 752	201	102	1 628 388	128 805	-	-	-	53 376	6 088 776
CARBURANTS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6 531 735	66 088 776
PROFITROL	-	-	-	-	-	480 759	91 037	564 139	178 778	12 158	109 217	398 886	229 556	102 829	114 876	161 318	495 551	323 383	14 065 537	19 736 647	-	-	-	2 236 786	21 785 758
ELEC	15 651	9 800	2 913	111 638	46 224	25 738 013	104 969	415 118	663 434	220 521	459 855	358 886	102 829	114 876	161 318	52 145	46 218	1 268 768	74 427	-	-	-	-	6 573 693	
CHALEUR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 659 187	13 209 228
ALUMIN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	134 289 228	17 328 222
ALUMIN TRAF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17 328 222	24 327 037
AUTOMOBILE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15 511 000	15 511 000
TRAVAUX	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15 511 000	15 511 000
TRANSPOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15 511 000	15 511 000
TRANSP PASS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15 511 000	15 511 000
TRANSP FAU	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15 511 000	15 511 000
TRANSP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15 511 000	15 511 000
RESTAUR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15 511 000	15 511 000
LOG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15 511 000	15 511 000
COMPOSITE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15 511 000	15 511 000
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15 511 000	15 511 000
G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15 511 000	15 511 000
I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15 511 000	15 511 000
X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15 511 000	15 511 000
Total emplois	29 248 616	33 055 373	3 525 775	66 088 776	21 785 758	6 573 693	1 659 187	13 209 228	17 328 222	24 327 037	68 276 371	280 843 232	2 937 379 965	290 843 232	2 937 379 965										

FIGURE 4-2 – Tableau entrées-sorties hybride, 2010 (millions d'euros)

	PIETROLE	GAZ	CHARBON	CARBURANTS	PDT/PETROL	ELEC	CHALEUR	ALIM NON TRANSF	ALIM TRANSF	AUTOMOB	TRAVAUX CONST	TRANSP TERR	TRANSP PASS	TRANSP EAU	TRANSP AERIEN	RESTAUR	LOG	COMPOSITE	C	X	
PIETROLE	-	-	-	47 359	19 609	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53
GAZ	10	40 199	2	595	246	4 191	2 511	693	1 875	277	309	33	15	17	23	394	304	14 078	14 396	2 557	
CHARBON	-	-	3 228	-	-	5 324	11	60	225	3	6	-	-	-	-	7	5	5 647	485	178	
CARBURANTS	-	-	-	-	-	-	-	2 540	188	57	210	4 204	1 883	2 104	2 954	268	207	8 450	23 451	14 494	
PDT/PETROL	-	-	-	-	-	1 088	173	740	305	13	135	886	397	443	623	172	133	9 850	8 001	11 368	
ELEC	27	17	5	192	80	51 067	181	579	1 144	380	432	396	177	198	278	550	424	19 019	13 602	4 316	
CHALEUR	-	-	-	-	-	-	61	-	209	-	60	-	-	-	-	76	59	1 853	-	97	

FIGURE 4.3 – Bilan énergétique 2010 (ktep)

	PIETROLE	GAZ	CHARBON	CARBURANTS	PDT/PETROL	ELEC	CHALEUR	ALIM NON TRANSF	ALIM TRANSF	AUTOMOB	TRAVAUX CONST	TRANSP TERR	TRANSP PASS	TRANSP EAU	TRANSP AERIEN	RESTAUR	LOG	COMPOSITE	C	X	
PIETROLE	-	-	-	436	436	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	458
GAZ	329	329	329	329	329	329	329	427	408	408	408	408	408	408	408	408	408	385	725	201	
CHARBON	-	-	246	-	-	148	172	188	188	386	168	-	-	-	-	28	19	288	266	300	
CARBURANTS	-	-	-	-	-	-	-	706	1 145	1 145	2 556	942	942	942	942	431	283	1 146	1 475	589	
PDT/PETROL	-	-	-	-	-	442	526	762	585	950	1 475	537	537	537	537	249	163	636	915	466	
ELEC	580	580	580	580	580	504	580	716	580	580	831	580	580	580	580	831	831	762	1 451	518	
CHALEUR	-	-	-	-	-	-	684	-	684	-	684	-	-	-	-	684	684	684	-	769	

FIGURE 4.4 – Prix des énergies 2010 (M€/ktep)

TABLEAU 4.1 – Liste des secteurs détaillés dans le modèle

Secteur
Pétrole brut (y compris gaz naturel liquéfié et usage en tant que matière première)
Gaz naturel
Charbon
Carburants
Produits pétroliers (GPL, fioul et autres produits d'usage résidentiel)
Électricité
Chaleur (incl. géothermie et solaire thermique)
Aliments non transformés (culture, production animale, viande et poisson non transformés)
Aliments transformés (industrie agroalimentaire sauf viande et poisson non transformés)
Industrie automobile
Travaux de construction
Transports terrestres (sauf transport de passagers pour les ménages)
Transport de passagers pour les ménages
Transports par eau
Transports aériens
Restauration
Logement
Composite

4.2 Projection de référence

Nous présentons ici la projection de référence de notre modèle IMACLIM à l'horizon 2050. Cette projection est en effet partie intégrante de notre dispositif de modélisation macroéconomique des changements de mode de vie, tandis que la mise en œuvre stricte de ce dispositif ne concerne en définitive que l'exploration de scénarios contrefactuels à l'horizon 2050, dont le chapitre 5 regroupe les résultats.

4.2.1 Hypothèses

La productivité du travail, principal moteur de croissance avec la démographie, varie de 2010 à 2014 suivant l'évolution du PIB réel par actif employé (nous disposons des données jusqu'en 2014). Pour l'évolution entre 2015 et 2050, nous supposons un taux de croissance annuel moyen de 0,91%, hypothèse conservatrice qui correspond au taux moyen de croissance du PIB réel par actif employé entre 2000 et 2007³ (chiffres INSEE).

Étant donné le terme de notre prospective, nous faisons aussi l'hypothèse d'un taux de chômage exogène (contrairement à de nombreuses applications d'IMACLIM, qui mettent en œuvre un marché du travail imparfait). Nous retenons un taux de chômage de 4,5% en 2050 selon le scénario moyen du COR (COR, 2012) (le taux de chômage était de 8,6% en 2010).

D'autres hypothèses exogènes concernent la démographie, les coefficients techniques,

3. Nous n'incluons pas les années au-delà de 2007 afin de ne pas prendre en compte les années de crise économique.

les coefficients d'émissions de CO₂, l'évolution de la production domestique des secteurs énergétiques, le contenu en travail et capital des productions domestiques des secteurs énergétiques, les prix d'importation des énergies et les élasticités de substitution dans les fonctions de production. Les sources de ces données ainsi que les éventuels traitements sont détaillés en Annexe B. L'ensemble de ces hypothèses est commun à tous les scénarios étudiés.

Comme nous l'avons précédemment indiqué (section 4.1.2) les arbitrages de consommation des ménages sont exogènes dans le modèle pour permettre le dialogue avec la base de données micro-économiques. Pour le scénario de référence, l'évolution des consommations des ménages (en volumes) par rapport à l'année de calibrage est scénarisée suivant soit des études d'experts existantes, soit des tendances historiques. Les consommations du bien composite sont les seules à être définies de manière endogène par le modèle, par l'évolution du solde budgétaire sous contrainte des autres consommations. Plus de détail est disponible en annexe B.

4.2.2 Résultats

La croissance du PIB réel entre 2010 et 2050 dans le scénario de référence est de 57% : elle est en grande partie le résultat de l'augmentation de la productivité du travail (+44%) et de la population active (+14%), exogènes, dont le croisement définit une croissance potentielle de 64%. Le taux de croissance annuel du PIB est de 1,1%.

La distribution des composantes du PIB varie légèrement entre les deux équilibres : le poids des consommations des ménages diminue de deux points et celui des dépenses publiques diminue de trois points (nous rappelons que les volumes de consommation des ménages sont exogènes et que les dépenses publiques varient comme le PIB, mais elles sont corrigées par la variable d'ajustement liée à la contrainte sur la dette publique). Au contraire, la part des investissements augmente de deux points (en lien avec sa dynamique exogène). En conséquence, la balance commerciale change de signe, en passant de -2,4% à +1,3% du PIB.

La variable d'ajustement de la dette publique, qui multiplie les recettes publiques (taxes, impôts) et divise les dépenses publiques (consommations, transferts sociaux) est de 1,12. À cause du vieillissement de la population, de l'augmentation du nombre de retraités et de la contrainte que nous avons imposée sur la dette publique, la pression fiscale augmente pour financer le budget de l'état, en passant de 45% à 47% du PIB. L'ajustement des dépenses publiques implique aussi que les transferts sociaux moyens par personne (retraites, chômage et autres transferts sociaux) augmentent moins que les salaires moyens (respectivement +30% et +45%).

Les hypothèses exogènes d'évolution des coefficients techniques des consommations d'énergie pour les secteurs productifs, et les évolutions exogènes des consommations des ménages détaillées en annexe, résultent en une diminution de 20% des consommations

d'énergie totales, grâce au développement de l'efficacité énergétique. En particulier, les consommations d'énergie agrégées des ménages diminuent plus fortement que celles des industries (-37% et -13% respectivement), notamment grâce à l'amélioration des performances énergétiques du parc de logements (les consommations de chauffage par m² diminuent de 57%) et à la forte diminution des consommations de carburants, qui est le résultat de l'amélioration de l'efficacité des voitures thermiques et du développement du parc de voitures électriques ou hybrides rechargeables.⁴

En conséquence de ces réductions des consommations d'énergie, les émissions de CO₂ diminuent respectivement de 9% pour les entreprises, de 49% pour les ménages, et de 23% au total, ce qui est loin des objectifs de réduction des émissions tels que le facteur 4 préconisé par la loi Grenelle pour la France.

4.3 Articulation macro-micro

Nous avons présenté dans les chapitres 2 et 3 la base de données microéconomique détaillant temps, dépenses et consommations d'énergie des ménages français.

Pour mettre en œuvre un dialogue entre cette base et le modèle macroéconomique, nous nous servons d'un processus itératif basé sur la technique de calage sur marges, à l'issue duquel la cohérence entre les résultats d'IMACLIM et la base de données est assurée. Le calage sur marges opère une modification des poids de représentativité des ménages de la base afin que les sommes pondérées (appelées marges) de certaines variables de la base soient égales aux valeurs prises par ces mêmes variables au niveau national, connues par une autre source. Parmi l'infinité de repondérations possibles qui satisfont les contraintes, la méthode choisit celle qui minimise les écarts entre les pondérations nouvellement contraintes et les pondérations précédentes. Cette technique est couramment utilisée dans les enquêtes pour assurer que les ménages interrogés, une fois les pondérations prises en compte, soient représentatifs de la population étudiée.

Nous nous servons de cette technique dans un cadre inhabituel, pour l'évaluation de scénarios prospectifs à horizon 2050. Dans notre cas, les pondérations de départ des ménages sont celles de l'enquête BDF 2010-2011. L'utilisation de cette technique repose sur la supposition que la base de données originale présente des ménages suffisamment hétérogènes en 2010 (en termes de structure de dépenses, de revenus et d'emploi du temps) pour pouvoir représenter, après mise à l'échelle économique de l'horizon projeté, la population de 2050. Il nous faut en effet tout d'abord mettre les revenus et les dépenses de consommation de chaque ménage de la base à l'échelle de 2050 selon les résultats de la projection de référence d'IMACLIM (section 4.2), pour tenir compte des variations des prix et des revenus. Une fois la mise à l'échelle effectuée, nous utilisons

4. Nous n'imposons pas d'augmentation du prix des véhicules pour refléter le développement du parc de voitures électriques et hybrides, en supposant que le prix moyen du parc des véhicules en 2050 est comparable au prix moyen du parc en 2010 (en tenant compte de l'évolution générale des prix à la consommation).

les ménages obtenus comme autant de « ménages-types » à notre horizon de projection. Cette hypothèse peut paraître osée en relation au progrès technique que nous pouvons préfigurer sur 40 ans. Mais si nous considérons de manière plus abstraite des structures de revenu, des postes de consommation agrégés ainsi qu'un jeu additionnel de variables socio-économiques (qui sont indépendantes du progrès technique) l'hypothèse devient recevable bien plus aisément, d'autant plus grâce à la mise à l'échelle économique opérée.⁵

Nous décrivons cette mise à l'échelle des revenus et des dépenses en section 4.3.1. Les sections suivantes décrivent la méthode de calage sur marges et le processus d'itération.

4.3.1 Mise à l'échelle de l'horizon d'analyse de la base de données temps/dépenses

Vu les variations de prix relatifs et l'augmentation des revenus moyens anticipés à l'horizon de projection 2050 retenu, le calage sur marges de la base de données micro-économique pour cohérence avec les sorties du modèle, sans ajustement préalable, conduirait à une sur-pondération des ménages aisés de 2010 et une sous-pondération des ménages aux revenus modestes (et aux dépenses plus faibles). Ceci introduirait un biais dans les résultats, parce que ce qu'il est nécessaire de représenter est bien un enrichissement général de la population dans les prochains décennies, qui touche tous les types de ménages et tous les quintiles de revenu, et non une concentration statistique en faveur des ménages aisés de l'année 2010 qui conduirait à surpondérer leurs structures de consommation, donc leurs comportements. Pour éviter ce biais, nous ajustons les revenus et les dépenses de chaque ménage de la base de données afin de refléter les évolutions agrégées de notre scénario de référence avant de procéder à la repondération.

Tout d'abord, nous agrégeons les sources de revenu et les dépenses, dans la base, pour reconstruire les six sources de revenu correspondant à celles détaillées par le modèle et les dépenses pour chacun des 18 biens. Une correction des données BDF est nécessaire parce que les préretraites sont incluses dans les allocations de chômage, alors qu'elles font partie des retraites dans le modèle. La correction est réalisée sur la base du nombre de chômeurs et de retraités dans les ménages concernés, sachant que 300 ménages seulement comptent à la fois au moins une personne retraitée et une personne au chômage.⁶ Pour chaque ménage, nous faisons évoluer les revenus par source selon leur évolution dans le

5. Imaginons, par exemple, de réaliser le même exercice pour une base de ménages de 1970 à projeter en 2010. Le plus grand changement dans les modes de consommation est sans doute relatif aux technologies de l'information et de la communication (TIC). Si ce poste de consommation était identifié dans notre désagrégation (il est agrégé au bien composite) notre procédure de mise à l'échelle garantirait que la part budgétaire dévolue aux TIC, concentrée sur les téléviseurs, téléphones et postes radio en 1970, évoluerait de manière à couvrir l'ensemble des nouveaux usages des TIC.

6. Pour ces ménages, nous répartissons les revenus de chômage au prorata du nombre de chômeurs et de retraités, mais seulement si les revenus de retraite déclarés sont nuls. Si les revenus de retraites sont également non nuls, nous faisons l'hypothèse que les revenus de chômage ne contiennent pas de préretraites.

modèle : les revenus d'activités selon celle du salaire moyen ; les retraites, allocations de chômage et autres revenus sociaux selon celle de leur valeur par personne dans le modèle. L'EBE, les revenus du patrimoine, les autres ressources et la FBCF de chaque ménage varient comme les agrégats correspondant dans le modèle. Nous ajustons également les impôts sur le revenu et les autres impôts directs. Ensuite, nous supposons que le taux d'épargne de chaque ménage de la base en 2050 est le même qu'en 2010, ce qui permet de déduire le nouveau revenu consommé par chaque ménage.

La structure de consommation est modifiée aussi par rapport à l'année 2010 : nous supposons que la variation des parts budgétaires consacrées aux dépenses par secteur, pour chaque ménage, correspond à la variation de ces mêmes part budgétaires, agrégées, dans le modèle. Nous conservons donc une variabilité des parts budgétaires qui renvoie aux préférences spécifiques à chaque ménage. Le seul secteur composite fait exception : les dépenses pour ce secteur représentent le solde entre le revenu de consommation total et les dépenses pour les autres secteurs calculées sur la base des nouvelles parts budgétaires (dans aucun cas ce solde ne devient négatif). Nous obtenons donc des nouvelles dépenses par secteur pour chaque ménage, et ainsi une base de ménages compatible avec notre scénario de référence en 2050.

4.3.2 Repondération dans le scénario de référence

Nous utilisons une méthode de repondération des ménages inspirée de la technique de calage sur marges de l'INSEE (INSEE, 1993) et décrite par Agénor et al. (2004) sous le nom de *micro-accounting with reweighting techniques*.

La base de données dont nous disposons présente déjà des pondérations par ménage, qui sont celles fournies par l'enquête BDF de l'INSEE, et qui assurent que l'enquête soit représentative de la population française selon un certain nombre de variables de calage. Dans le calcul des nouvelles pondérations, nous utilisons un algorithme de programmation quadratique⁷ qui minimise les écarts relatifs entre les nouvelles pondérations et les anciennes, exprimés comme le carré du ratio entre la différence de pondération et l'ancienne pondération. Le problème est décrit par l'équation (4.1), où le vecteur x représente l'écart entre la nouvelle et l'ancienne pondération ($x = w' - w$) et x^T est sa transposée, H est une matrice diagonale dont les éléments de la diagonale sont $h_{i,i} = 1/w_i^2$, A est une matrice qui contient sur chaque ligne les valeurs d'une variable d'intérêt, pour tous les ménages de la base (14535 ménages à l'issue des traitements statistiques présentés dans le chapitre 2). Le vecteur b représente la différence entre les nouvelles valeurs des agrégats macroéconomiques et les anciennes.

$$\min_x x^T H x \quad \text{avec} \quad \begin{cases} Ax = b \\ x \geq -w \end{cases} \quad (4.1)$$

7. *quadprog*, qui fait partie de la *Optimization toolbox* de MATLAB®.

Nous appliquons une première fois la repondération pour assurer la cohérence de la base avec les sorties du modèle dans le scénario de référence. Dans ce cas, la pondération initiale est celle de l'enquête BDF. Les sorties du modèle que nous utilisons en tant que contraintes dans la repondération sont les dépenses pour chacun des 18 secteurs (en réalité, 17 secteurs parce que les dépenses des ménages en pétrole brut sont toujours nulles) et les revenus pour chacune des 6 sources détaillées dans IMACLIM (revenus d'activité, retraites, allocations de chômage, autres revenus sociaux, revenus du patrimoine et autres ressources) et les éléments concernant la distribution secondaire du revenu des ménages (impôts sur les revenus, autres impôts directs, formation brute de capital fixe et excédent brut d'exploitation, qui pour les ménages représente les loyers perçus, qu'ils soient réels ou fictifs). S'ajoutent les contraintes concernant démographie et marché du travail qui sont des hypothèses exogènes dans le modèle : population totale, nombre de retraités, nombre d'actifs occupés et de personnes au chômage (nous rappelons que le taux de chômage est exogène dans le modèle et que le nombre total d'actifs, occupés ou non, l'est également).

Aux contraintes dérivées des sorties du modèle, nous ajoutons des contraintes sur les variables de calage utilisées par l'INSEE pour le calage sur marges de l'enquête BDF (tableau 4.2), afin d'éviter l'apparition de biais à l'issue de la repondération. Notamment, comme BDF est le résultat de 6 vagues d'enquête qui couvrent une période d'un an, il est indispensable que le résultat de la repondération garde la même proportion de ménages enquêtés dans chacune des vagues, ou il y aurait un biais concernant les dépenses à caractère saisonnier (chauffage, fruits etc.) dans les totaux des dépenses par poste calculés sur toute la population avec les nouvelles pondérations (INSEE, 2014). Les seules deux variables de calage INSEE sur lesquelles nous n'imposons pas de contraintes sont la catégorie socio-professionnelle de la personne de référence (en 3 modalités), puisque ce serait redondant avec les contraintes concernant le nombre d'actifs occupés, de chômeurs et de retraités, et la présence de non diplômés dans le ménage, faute d'un scénario d'évolution de la présence de non diplômés dans le ménage à horizon 2050. L'INSEE fournit le nombre de modalités retenues pour chacune des variables de calage, mais pas le détail des modalités exactes. Nous recréons donc les modalités pour chaque variable de calage INSEE en respectant le nombre original.

Pour le type de ménage, l'âge de la personne de référence et le croisement âge et sexe des individus en 2050, nous nous appuyons sur les scénarios démographiques de l'INSEE à horizon 2030 et 2060 (INSEE, 2010, 2006). La projection du nombre de ménages par type à horizon 2030 est prolongée en gardant constante, pour chaque âge de la personne de référence, la répartition entre les 6 types de ménages. La pyramide des âges par sexe de la population entière en 2060 est ajustée à horizon 2050 en appliquant à la population 2050 par classes d'âges (fournie par la projection INSEE) la même répartition entre femmes et hommes que celle fournie par l'INSEE pour 2060 (dont le détail manque pour 2050). Pour les autres variables (vague de collecte, taille d'unité urbaine etc.) nous gardons en 2050, en proportion, la même répartition des ménages entre les différentes modalités qu'en 2010.

TABLEAU 4.2 – Contraintes, utilisées dans la repondération du scénario de référence, issues des variables de calage de l’enquête BDF (INSEE, 2014) et modalités considérées (la dernière modalité de chaque variable est redondante puisque le nombre total de ménages est également contraint)

Variable de calage INSEE	Modalités considérées pour les contraintes de repondération
Type de ménage	Célibataires ≤ 65 ans, célibataires > 65 ans, famille monoparentale, couples et ménages complexes avec enfants, couples et ménages complexes sans enfants (PR ≤ 65 ans), couples et ménages complexes sans enfants (PR > 65 ans)
Âge de la PR du ménage	Moins de 30 ans, entre 30 et 44 ans, entre 45 et 59 ans, entre 60 et 74 ans, 75 ans ou plus
Croisement âge / sexe individus	Hommes / femmes âgés de moins de 15 ans, de 15 à 24 ans, de 25 à 39 ans, de 40 à 59 ans, de 60 à 74 ans, de 75 ans ou plus
Vague de collecte	De la vague 1 à la vague 6
Taille d’unité urbaine	$< 20\,000$ hab., de $20\,000$ à $199\,999$ hab., de $200\,000$ à $1\,999\,999$ hab., agglomération de Paris
Type de logement	Maison individuelle ou logement collectif
Région regroupée (ZEAT)	DOM, région parisienne et bassin parisien, Nord, Est, Ouest, Sud-Ouest, Centre-Est, Méditerranée

La base repondérée permet d’observer des variations agrégées des variables non contraintes, en particulier les temps par activité (que nous allons par la suite manipuler dans nos scénarios). Dans le scénario de référence, le temps moyen de travail diminue de 7% en 2050 par rapport à 2010 (Figure 4.5) alors que les temps de loisirs au domicile augmentent (+12% pour les loisirs à basse intensité énergétique et +1% pour les loisirs à haute intensité énergétique), du fait du vieillissement de la population et de l’augmentation, en conséquence, de la part de retraités. Il est intéressant de remarquer que les retraités de 2050 pourraient avoir des préférences concernant les loisirs différentes de celles des retraités d’aujourd’hui (par exemple, ils pourraient utiliser les TIC bien plus souvent), mais nous soulignons que l’activité « Loisirs à haute intensité énergétique » inclut l’utilisation de télévisions et radios aussi bien que celle de consoles de jeu et ordinateurs. Une évolution des préférences entre les différents loisirs couverts par cette activité, qui déjà en 2010 est suffisamment hétérogène, ne serait pas gênante vis-à-vis de l’analyse prospective.

4.3.3 Processus d’itération pour l’évaluation de scénarios de changements de modes de vie

La méthode de repondération est légèrement différente dans son application aux scénarios de changements de modes de vie, par rapport à ce qui vient d’être décrit

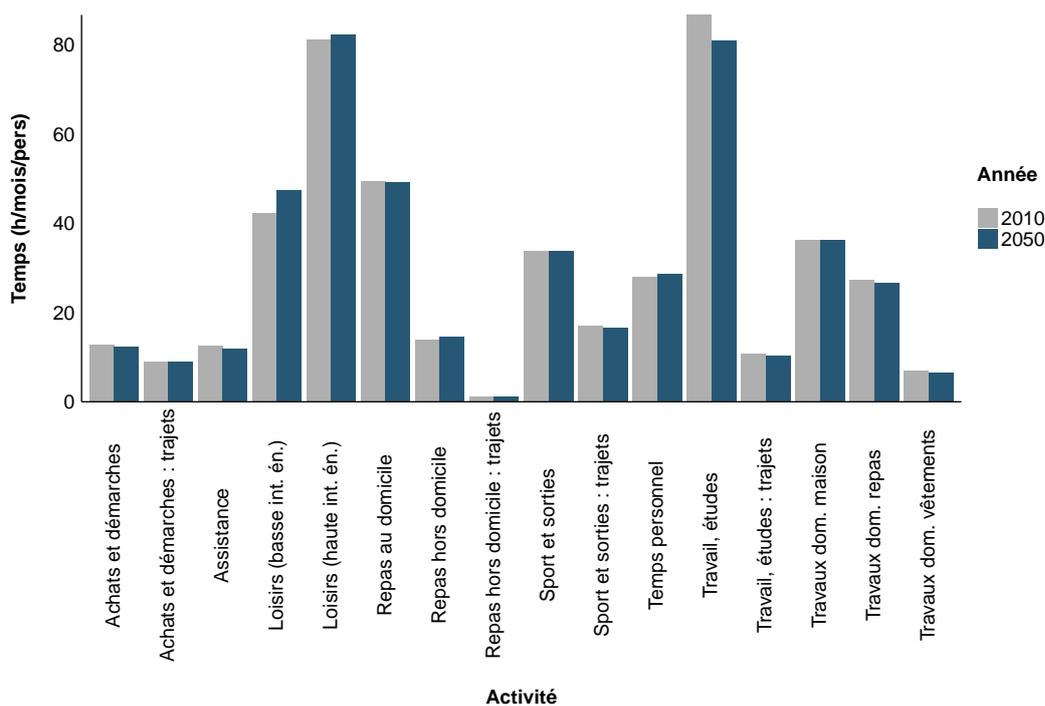


FIGURE 4.5 – Comparaison des emplois du temps de 2010 (base appariée temps/dépenses) et de 2050 dans le scénario de référence (base temps/dépenses après repondération). Le temps de sommeil n’est pas représenté à cause des différences d’échelle. Il reste pratiquement constant (+0,5% en 2050).

concernant le scénario de référence. En effet, puisque nous voulons étudier des changements dans les consommations des ménages, nous ne souhaiterions pas imposer de contraintes sur les dépenses totales par secteur dans la repondération.

Toutefois, sept secteurs présentent des dépenses nulles l’année 2010 pour la plupart des ménages (plus de 80%, tableau 4.3) : charbon, chaleur, industrie automobile, travaux de construction, transports terrestres, transports par eau, transports aériens. Pour ces secteurs, la distribution des dépenses est loin d’être uniforme au sein de la base de données (par exemple, les dépenses en travaux de construction sont en général nulles ou très élevées). Lors des premières mises en œuvre de la méthode, nous avons observé des variations des dépenses totales pour ces secteurs qui sont difficiles à corréler au changement de mode de vie considéré (par exemple, nous supposons que le covoiturage n’a pas de raison d’avoir un impact sur le transport par eau), et qui sont vraisemblablement dues à ce problème de concentration des dépenses sur quelques ménages seulement. Comme en général il s’agit de secteurs de consommation qui ne sont pas centraux pour les changements de modes de vie analysés, nous préférons imposer pour ces secteurs des contraintes sur les volumes totaux de dépenses, fixés au niveau du scénario de référence.⁸

8. Dans les scénarios E-COMMERCE et MOBILITÉ les dépenses du secteur industrie automobile seront définies indépendamment de leur valeur dans le scénario de référence, étant contraintes par des hypothèses exogènes.

TABLEAU 4.3 – Part de ménages qui ont des dépenses nulles dans la base temps/dépenses (parce-que leurs dépenses pour ces secteurs sont nulles dans la base BDF INSEE), par secteur

Secteur	% ménages
Gaz naturel	68,6
Charbon	89,3
Carburants	50,2
Produits pétroliers	49,9
Électricité	3,5
Chaleur	99,9
Aliments non transformés	14,7
Aliments transformés	4,4
Industrie automobile	94,7
Travaux de construction	90,3
Transports terrestres	97,5
Transport de passagers	71,8
Transports par eau	99,0
Transports aériens	96,2
Restauration	31,1
Logement	0,3
Composite	0,0

Nous mettons à l'échelle la base micro à chaque itération, sur la base des résultats macro agrégés de l'itération précédente (évolutions des revenus par source et des dépenses). Comme pour le scénario de référence, nous supposons que le taux d'épargne de chaque ménage est le même qu'en 2010, et nous imposons comme contrainte que le taux d'épargne agrégé soit égal à celui du modèle (où il est exogène en 2050, égal à sa valeur de 2010). Nous supposons que les parts budgétaires 2050 de chaque ménage sont les mêmes que celles obtenues pour le scénario de référence avec la méthodologie décrite dans la section précédente. En effet, nous considérons que le processus de mise à l'échelle et repondération associé au scénario de référence crée une base de ménages-types (au nombre de 14 517), caractérisés par des préférences de consommation et d'emploi du temps, des structures de revenu, des localisations etc. Donc dans notre analyse de scénarios, la repondération fait évoluer la distribution de ces ménages-types dans la population, mais nous n'intervenons pas sur les comportements de chaque ménage.

Quand nous imposons les contraintes relatives au scénario (qui peuvent être sur certains temps et/ou sur certaines dépenses), la repondération fait que les dépenses totales (des secteurs non contraints) ainsi que les parts budgétaires agrégées (pondérées) sont différentes de celles qu'on avait en sortie du modèle avec les hypothèses du scénario de référence.

En plus des contraintes sur les dépenses des secteurs problématiques illustrés dans le paragraphe précédent, nous imposons, dans l'analyse des scénarios, des contraintes qui reflètent les hypothèses propres à chacun des scénarios, ainsi que des contraintes sur les variables de calage utilisées par l'INSEE (Tableau 4.4), comme déjà vu pour le scénario de référence. Ces contraintes sur les variables de calage ne sont pas appliquées

exactement sur les mêmes modalités que pour le scénario de référence. Si pour le scénario de référence nous souhaitons garder une population aussi homogène que possible par rapport à celle de la base originale de 2010, pour les analyses de changements de modes de vie nous préférons laisser une marge de liberté supérieure à l'algorithme de repondération. En effet, le principe de la repondération consiste à chercher dans la base de données, en respectant les différentes contraintes, les ménages qui ont des modes de vie compatibles avec les hypothèses de chaque scénario. Nous voulons donc imposer seulement les contraintes indispensables, celles sans lesquelles nous risquerions d'avoir un biais dans les résultats. Par exemple, les contraintes sur la vague d'enquête ou le type de logement sont indispensables pour éviter des variations des consommations d'énergie dues au moment de l'année où le sondage s'est déroulé ou aux déperditions thermiques accrues des logements individuels. En revanche, nous faisons le choix de ne pas garder de contraintes sur l'âge et le sexe parce que les comportements de la société qu'on imagine en 2050 pourraient être plus présents dans une certaine catégorie d'âge (ou de sexe) de 2010, sans que cela puisse introduire un biais dans l'analyse. De même, nous gardons une distinction par région pour tenir compte des différences climatiques (et des particularités de la région parisienne en termes de densité de population et d'infrastructures, qui ne seront pas vraisemblablement égalées en 2050 ailleurs en France). Cependant, nous décidons d'utiliser une distinction en régions plus agrégée dans ce cas que dans la repondération du scénario de base, parce que nous faisons l'hypothèse que, par exemple, les ménages vivant en 2010 dans la région centre-est peuvent se comporter en 2050 comme certains ménages vivant, en 2010, dans la région est, sans que cela constitue un biais de l'analyse (et sans impliquer un déplacement des habitants). Enfin, nous rajoutons des contraintes sur deux variables : le système de chauffage principal (variable que nous créons à partir du croisement des variables « mode de chauffage principal » et « principale source d'énergie pour le chauffage » de BDF) et la distribution des surfaces de logement. Dans le scénario de référence, l'évolution de toutes les consommations est exogène dans IMACLIM et toutes les dépenses sont contraintes dans la repondération, donc les systèmes de chauffage et les surfaces de logement sont libres de varier et ils contribuent au respect des contraintes sur les consommations d'énergie (une comparaison a posteriori des distributions des modalités de ces deux variables après la repondération du scénario de référence montre que les distributions restent très similaires à celles de 2010). En revanche, dans les scénarios de changement de modes de vie, les consommations d'énergie des ménages sont libres de varier. Dans nos premières applications, nous avons remarqué des variations dans la distribution des technologies de chauffage suite à la repondération de la base. Puisque nous voulons focaliser l'attention sur les impacts de ces changements de comportements et pas de changements technologiques dans les systèmes de chauffage, nous décidons alors de garder la distribution de ces derniers égale à celle du scénario de référence. La surface n'est pas contrainte dans sa valeur totale, puisque nous supposons que les choix de mode de vie peuvent avoir des conséquences sur les préférences en termes de surfaces de logement. Cependant, un contrôle sur la distribution est nécessaire (suivant trois grands agrégats : surface de moins de 100 m², entre 100 et 200 m², de plus de 200 m²) pour

éviter des changements trop importants de surfaces qui seraient incompatibles avec le taux de renouvellement du parc immobilier. En effet, nous autorisons des déplacements au sein du parc existant et une réorientation du nouveau parc vers plus ou moins de surface, mais pas un bouleversement supposant une restructuration profonde du parc immobilier de 2050, dont on sait qu'à 70% il était déjà construit en 2006 (CLIP, 2010). Enfin, nous supposons pour tous les scénarios que le temps de travail total de la population en 2050 est le même que dans le scénario de référence (dans le modèle également, nous supposons une quantité de travail disponible constante).

TABLEAU 4.4 – Contraintes, utilisées dans l'analyse de scénarios de changements de modes de vie, issues des variables de calage de l'enquête BDF (INSEE, 2014) et modalités considérées (la dernière modalité de chaque variable est redondante puisque le nombre total de ménages est également contraint)

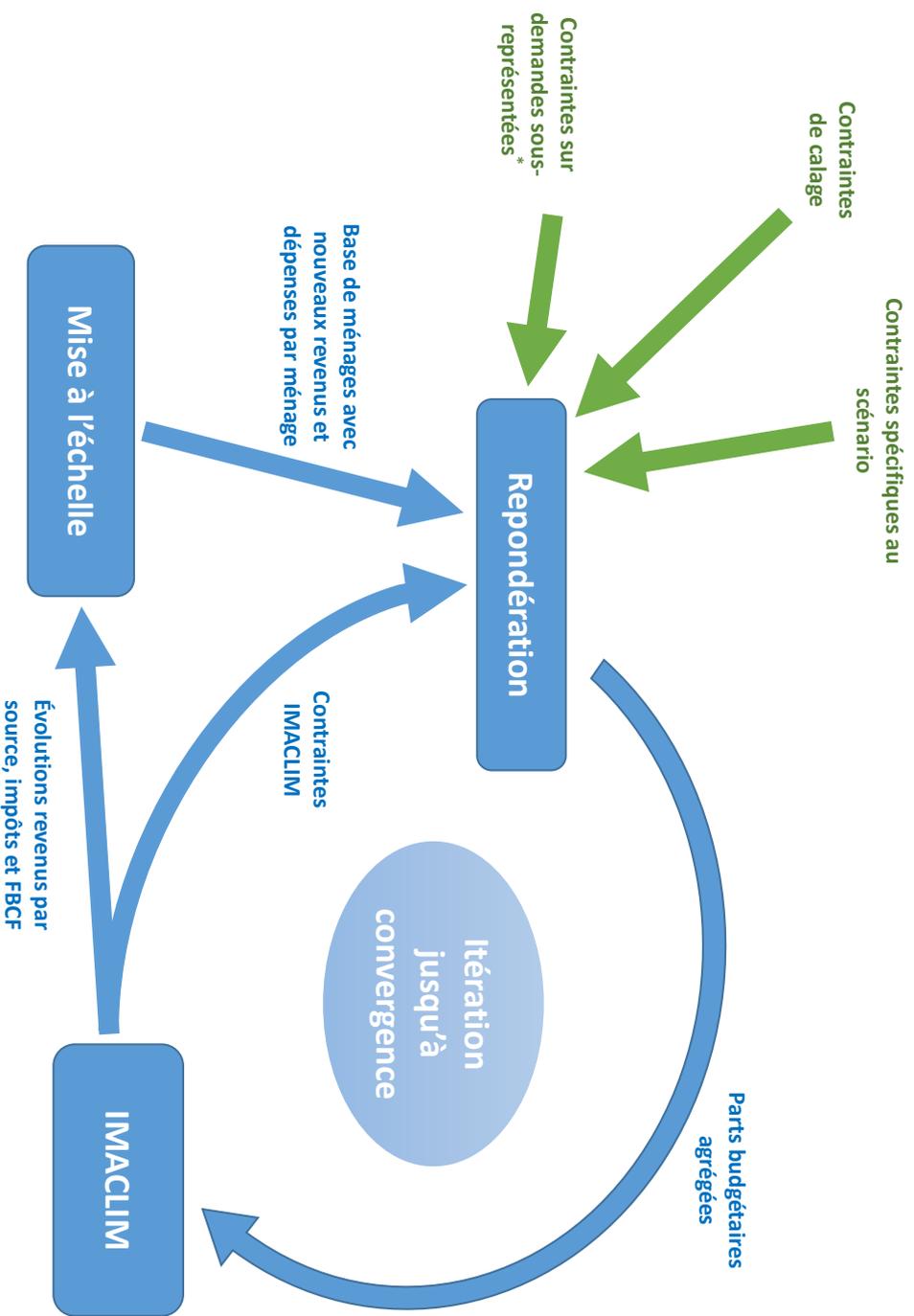
Variable de calage	Modalités considérées pour les contraintes de repondération
Type de ménage	Célibataires, famille mono-parentale, couples et ménages complexes avec enfants, couples et ménages complexes sans enfants
Vague de collecte	De la vague 1 à la vague 6
Taille d'unité urbaine	< 20 000 hab., de 20 000 à 199 999 hab., de 200 000 à 1 999 999 hab., agglomération de Paris
Type de logement	Maison individuelle ou logement collectif
Région regroupée (ZEAT)	DOM, région parisienne et bassin parisien, centre-nord-est-ouest, sud-méditerranée
Système de chauffage	Collectif, indiv. gaz, indiv. électricité, indiv. prod. pétroliers, indiv. autre, pas de chauffage
Surface de logement	Moins de 100 m ² , entre 100 et 200 m ² , plus de 200 m ²

La première étape du processus d'itération pour l'évaluation de scénarios de changements de modes de vie consiste en la mise à l'échelle de la base de données, en utilisant les sorties IMACLIM du scénario de référence pour la première itération. Ensuite, nous procédons à la repondération en imposant les contraintes décrites dans les paragraphes précédents, c'est-à-dire les contraintes de calage (Tableau 4.4), les contraintes sur les dépenses totales des secteurs pour lesquels plus de 80% des ménages présentent des dépenses nulles dans BDF, les contraintes qui imposent la cohérence avec les sorties IMACLIM et enfin les contraintes spécifiques aux scénarios. Les contraintes concernant IMACLIM sont celles sur la population (nombre total de personnes, de personnes retraitées, de personnes au chômage et d'actifs occupés⁹), sur les sources de revenu (revenus d'activités, retraites, allocations chômage, autres revenus sociaux, revenus du patrimoine, autres ressources, EBE), sur les impôts (impôts sur le revenu et autres impôts directs) et sur la formation brute de capital fixe. Pour tous les scénarios de changement

9. Le taux de chômage étant exogène dans IMACLIM, ainsi que la population active et la population retraitée, ces contraintes sont les mêmes dans tous les scénarios.

de modes de vie, nous utilisons comme pondération de départ celle issue du processus de repondération concernant le scénario de référence. Nous obtenons ainsi les nouvelles parts budgétaires agrégées, qui sont imposées dans le modèle IMACLIM. Les résultats du modèle fournissent les nouvelles valeurs concernant l'évolution des revenus et des impôts, que nous utilisons pour la mise à l'échelle de la base de données micro à l'itération suivante. Le processus itératif (Figure 4.6) continue jusqu'à convergence des agrégats macro-économiques (revenus, impôts, FBCF, épargne, dépenses).

Le chapitre 5 présente l'application de cette méthode d'articulation macro-micro à l'étude de trois scénarios de changements de modes de vie.



* Secteurs pour lesquels plus de 80% des ménages BDF déclarent des dépenses nulles

FIGURE 4.6 – Processus d'itération pour l'évaluation de scénarios de changements de modes de vie (en vert, contraintes exogènes au processus)

Chapitre 5

Analyse de scénarios de changement de mode de vie

Nous présentons dans ce chapitre trois exemples d'application à l'analyse de scénarios de changements de modes de vie de la méthode décrite dans le chapitre précédent. Nous nous concentrons sur trois grandes typologies de changement de modes de vie : le retour vers le « faire soi-même », l'économie collaborative et la diffusion des services en ligne. Pour le premier, nous analysons le « faire soi-même » en matière d'alimentation, avec une augmentation du temps dédié à la préparation de repas à domicile. Pour le deuxième, nous nous concentrons sur les pratiques collaboratives relatives aux transports, en analysant un scénario de diffusion du covoiturage et de l'autopartage. Enfin, en ce qui concerne les services en ligne, nous nous intéressons à une généralisation des achats en ligne en substitution aux achats en grande surface.

5.1 Scénario ALIMENTATION : augmentation du temps dédié à la préparation de repas

Dans ce premier scénario, nous étudions les effets d'une augmentation du temps de préparation de repas à domicile, et des changements dans la structure de consommation que cette modification d'emploi du temps entraîne.

5.1.1 Contexte et hypothèses

La manière dont nous produisons et consommons les produits alimentaires a des répercussions importantes sur l'environnement, de l'usage des terres aux consommations d'eau, des besoins d'énergie aux émissions de gaz à effet de serre (Duchin, 2005; Odegard et van der Voet, 2014). Pour cette raison, l'alimentation revêt un rôle central dans les

discussions sur le développement durable, et un large éventail d'études existent sur le sujet.

De nombreux travaux se basent sur l'analyse de cycle de vie pour comparer les impacts environnementaux de différents produits. Quelques uns analysent les repas achetés déjà prêts à consommer (Calderón et al., 2010) ou les comparent à des repas fait maison (Schmidt Rivera et al., 2014). D'autres se concentrent sur les effets environnementaux des repas hors domicile (Baldwin et al., 2011), mais les analyses comparées entre les repas pris au domicile et les repas hors domicile sont très rares. Un exemple en est l'étude de Dutilh et Kramer (2000), qui compare la consommation d'énergie de cuisson par kg de nourriture, en observant qu'elle est plus élevée pour les restaurants que pour les repas à domicile, alors que l'énergie de cuisson des repas faits maison est comparable à celle des repas préparés industriellement et réchauffés à domicile.

L'analyse entrées-sorties peut également être utilisée, parfois de manière couplée avec l'analyse de cycle de vie, pour évaluer les impacts des consommations alimentaires au niveau d'une économie entière plutôt que d'un unique produit ou procédé. L'analyse entrées-sorties permet de tenir compte des effets indirects qui ne peuvent pas être inclus dans une analyse de cycle de vie. Par exemple, Tukker et al. (2011) montrent qu'une modification des régimes alimentaires dans les pays européens vers des régimes plus sains avec une consommation de viande réduite pourrait réduire de 8% l'impact environnemental global (incluant réchauffement climatique, acidification, eutrophisation etc.) de la consommation alimentaire. Reynolds et al. (2015) comparent les impacts environnementaux des consommations de ménages appartenant à différents quintiles de revenu en Australie : ils trouvent que les repas hors domicile représentent un des principaux contributeurs à l'impact global pour la plupart des groupes de revenu, mais en même temps ils montrent que l'impact par dollar dépensé est inférieur pour les repas hors domicile à celui pour les repas au domicile (pour ces derniers, les auteurs considèrent seulement la production des aliments et les effets indirects sur les chaînes de production, mais pas les impacts de la préparation et consommation des repas au domicile). Duarte et al. (2016) analysent avec un modèle CGE un scénario de changement de régime alimentaire des ménages espagnols vers une alimentation plus saine (régime recommandé par les autorités) : ils obtiennent une augmentation d'environ 0,1% pour l'ensemble des émissions de CO₂, de 0,25% pour les émissions de dioxyde de soufre (SO₂), et une réduction de 1,5% des émissions de méthane (CH₄).

Pour notre scénario ALIMENTATION, nous supposons simplement une augmentation de 20% du temps dédié à la préparation des repas au domicile (et aux activités annexes concernant la vaisselle et le rangement). Ceci pourrait à la fois impliquer une réduction des repas hors domicile et une réduction des consommations de repas prêts à consommer au domicile en faveur d'une hausse de consommations d'aliments non transformés. C'est précisément ce que la repondération va arbitrer. En effet, l'algorithme va donner un poids plus élevé aux ménages qui, en 2010, dédiaient plus de temps à la préparation des repas, et un poids moins élevé aux autres, tout en minimisant les variations par rapport aux pondérations initiales. Nous supposons également que le temps

de travail moyen ne varie pas par rapport au scénario de référence. Des hypothèses supplémentaires concernent les variables de calage de la population et les dépenses agrégées pour les secteurs caractérisés par un grand nombre de dépenses nulles dans BDF, comme expliqué en section 4.3.3.

5.1.2 Résultats

La technique de repondération permet d’observer, une fois que le processus d’itération résumé en Fig. 4.6 est complété, les résultats agrégés au niveau de la population entière pour chaque variable présente dans la base de données temps/dépenses. L’augmentation imposée de temps de préparation de repas, en effet, entraîne une variation des temps passés dans d’autres activités, qui sont déterminés par les comportements observés pour les ménages qui déjà en 2010 sont caractérisés par des temps de préparation de repas élevés. Il est important de rappeler que, grâce aux contraintes sur la structure de la population, sur le nombre d’actifs, de retraités et de chômeurs, et la contrainte additionnelle sur le temps de travail, il ne s’agit pas de représenter une société qui évolue vers des pratiques caractéristiques des inactifs d’aujourd’hui, mais plutôt de donner un poids supérieur aux ménages qui, à parité d’autres conditions (y compris le type d’habitation et la taille d’unité urbaine), dédient plus de temps à la préparation de repas.

Cette méthodologie permet d’inclure implicitement l’« effet rebond par rapport au temps », décrit par Jalas (2002) et Binswanger (2004), même si dans notre cas, plus que les répercussions d’un gain de temps sur les consommations d’énergie, nous observons les répercussions d’une « perte » de temps. Si la préparation de repas est plus intensive en énergie que les activités que les ménages réalisaient à la place dans le scénario de référence, les consommations d’énergie augmenteront.

Nous détaillons maintenant les résultats du scénario après convergence. Le seuil de tolérance fixé est de 0,5% pour tous les agrégats qui varient au cours du processus itératif (les sept sources de revenu, impôts sur le revenu, autres impôts directs, FBCF, épargne). Le processus converge à la troisième itération. Nous commençons par décrire emplois du temps et consommations des ménages, pour passer ensuite aux résultats macroéconomiques, aux consommations d’énergie et aux émissions.

Emplois du temps et consommations des ménages

Tout d’abord nous pouvons observer comment l’augmentation du temps de préparation de repas (représenté par l’activité « Travaux domestiques repas ») dans le scénario ALIMENTATION par rapport au scénario RÉFÉRENCE se répercute sur le temps dédié aux autres activités (Fig. 5.1). Une augmentation de 20% du temps de préparation de repas correspond à 5,3 heures de plus dédiées à cette activité par mois et par personne par rapport au scénario de base (de 26,7 h/mois/pers. à 32,0 h/mois/pers.). Pour

les autres activités, les changements les plus importants concernent les travaux domestiques associés aux vêtements (+24%, de 6,6 à 8,2 h/mois/pers.), les repas hors domicile (-6,9%, de 14,7 à 13,7 h/mois/pers.), les achats (+4,7%, de 12,4 à 13 h/mois/pers.), les loisirs à haute intensité énergétique (-4,5%, de 82,2 à 78,6 h/mois/pers.) et les sports et sorties (-5,5%, de 33,7 à 31,9 h/mois/pers.). Des légers ajustements concernent la plupart des autres activités également, à l'exception du temps de travail qui est constant par construction. Globalement, le temps passé au domicile augmente très légèrement (+0,5%, de 551,0 à 553,6 h/mois/pers.).

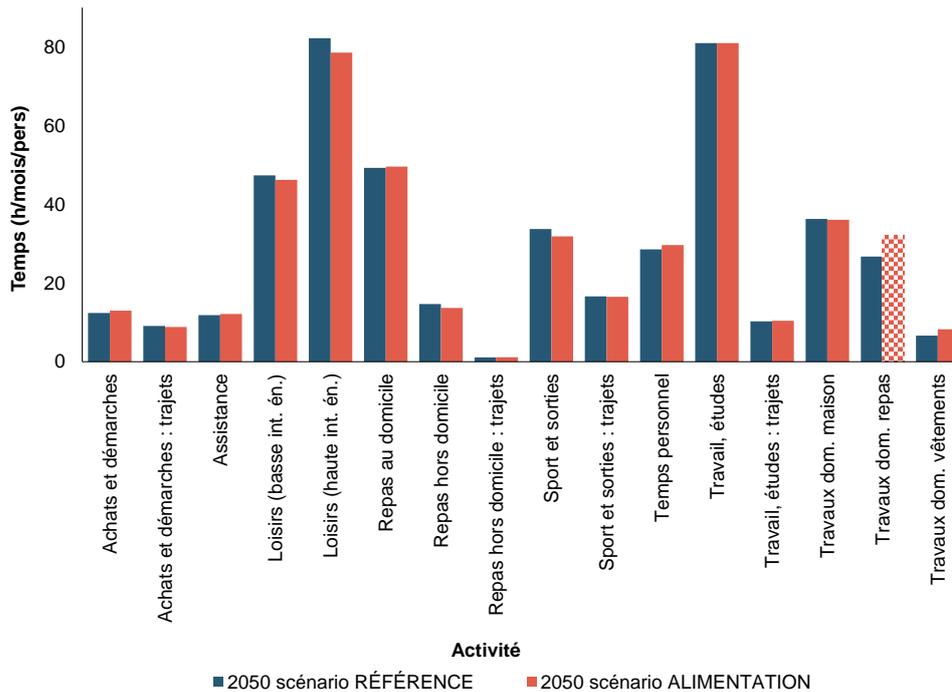


FIGURE 5.1 – Comparaison de l’emploi du temps moyen en 2050 dans le scénario RÉFÉRENCE et dans le scénario ALIMENTATION. Le sommeil n’est pas représenté à cause de la différence d’échelle (+0,4% dans ALIMENTATION). Le remplissage quadrillé indique le temps dont la variation est fixée par hypothèse.

Nous avons vu que les temps associés aux repas hors domicile diminuent dans le scénario ALIMENTATION. Les consommations en volume associées à cette activité baissent également de manière significative (-9,3%, Figure 5.2), alors que les consommations de produits alimentaires augmentent respectivement de 1,4% pour les produits non transformés et de 1,7% pour les produits transformés, ce qui est cohérent avec une augmentation du nombre de repas pris au domicile et une diminution de la fréquence de repas hors domicile.

Regardons maintenant les consommations des ménages en volume pour les autres secteurs (Figure 5.2). Nous observons une baisse significative des consommations de carburants (-5,2%) et du transport de passagers (-3,2%), ce qui indique une diminution des déplacements en voiture liée à la diminution des repas hors domicile et des sports et sorties, qui n’est pas compensée par l’augmentation des achats. Nous commentons

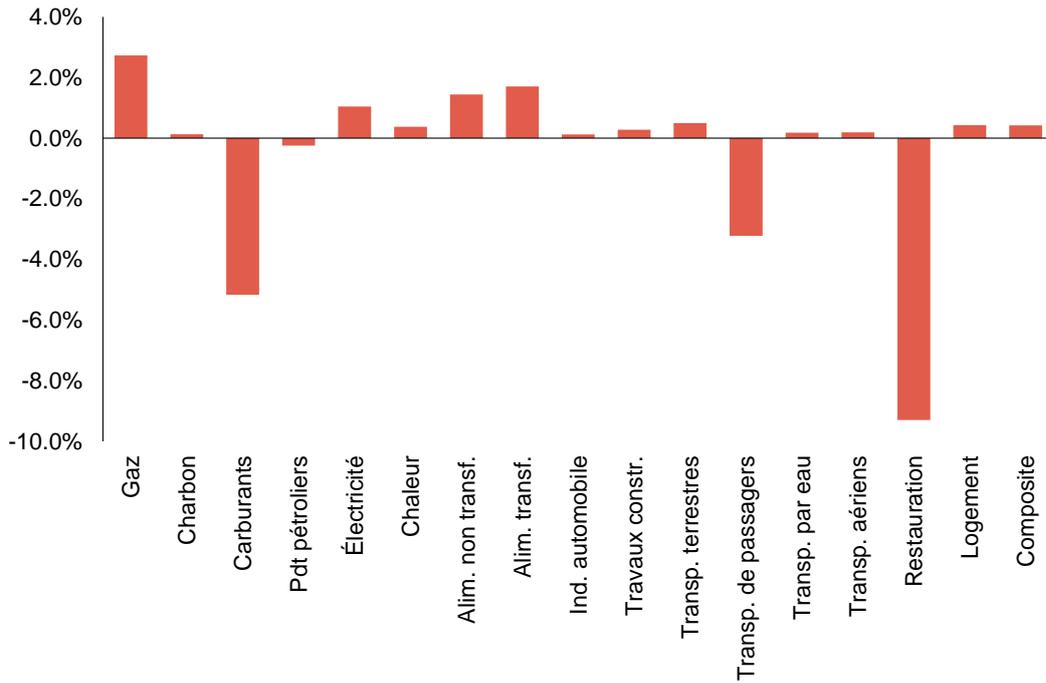


FIGURE 5.2 – Variations de la consommation totale des ménages 2050 en volume par poste dans le scénario ALIMENTATION par rapport au scénario RÉFÉRENCE

les consommations d'énergie des ménages plus bas dans la section dédiée.

Macroéconomie

D'un point de vue macroéconomique, le scénario ALIMENTATION présente des indicateurs très similaires à ceux du scénario RÉFÉRENCE (Tableau 5.1). L'indice de prix par rapport à 2010 du scénario ALIMENTATION est 0,3% plus faible, le PIB réel est 0,1% supérieur à celui du scénario RÉFÉRENCE. Le revenu disponible brut réel des ménages reste également très similaire entre les deux scénarios.

TABLEAU 5.1 – Résultats macroéconomiques du scénario ALIMENTATION en comparaison avec ceux du scénario RÉFÉRENCE

Indicateur	2050 RÉF.	2050 ALIM.	Diff. %
PIB réel (€ constants 2010)	3 037 957	3 041 231	+0,1
Revenu disponible brut réel des ménages (€ const. 2010)	2 063 096	2 063 820	0,0
Pression fiscale (ratio taxes et impôts / PIB, %)	47,32	47,31	0,0
Ratio balance commerciale/PIB, %	1,34	1,34	-0,2
Indice des prix à la consommation par rapport à 2010	1,469	1,465	-0,3

Les productions en volume montrent des variations significatives pour les secteurs restauration (-7,6%), transport de passagers (-3,2%) et carburants (-1,7%). Les productions des deux secteurs alimentaires (produits non transformés et produits transformés) augmentent de 0,5%. Les productions des autres secteurs sont caractérisées par des

variations plus faibles. Globalement, les effets macro sur la production ne sont pas les mêmes que ceux sur la demande des ménages, du fait qu'une partie de l'activité des secteurs productifs est tournée vers les autres secteurs. Les variations des volumes de production modifient légèrement le poids des secteurs dans le PIB, avec le secteur restauration qui passe de 1,5% du scénario RÉFÉRENCE à 1,4% du scénario ALIMENTATION et le secteur composite (dont la production augmente de 0,2%) qui passe de 71,9% à 72,0%.

Consommations d'énergie et émissions de CO₂

Les consommations totales d'énergie directe des ménages dans le scénario ALIMENTATION sont proches de celles du scénario RÉFÉRENCE (Figure 5.3), avec une baisse de 0,2% dans le scénario ALIMENTATION. En effet, la baisse des consommations de carburants mentionnée plus haut (-5,2%) est compensée par une hausse des consommations d'énergie résidentielles (+2,7% pour le gaz et +1,0% pour l'électricité), liée à l'augmentation du nombre de repas au domicile (énergie de cuisson et appareils électroménagers). La réduction des émissions de CO₂ due à la baisse des consommations de carburants est partiellement compensée par la hausse des émissions de CO₂ liée à l'augmentation des consommations de gaz. Les émissions directes totales des ménages diminuent de 1,3% (Figure 5.5).

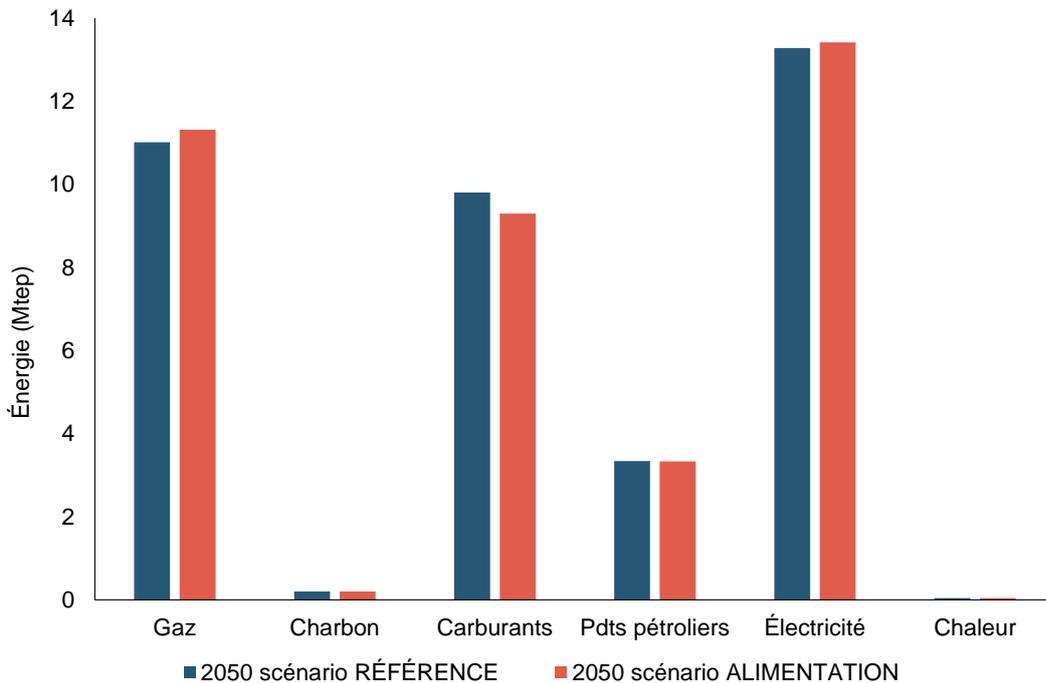


FIGURE 5.3 – Consommations d'énergie directe de la part des ménages en 2010 et en 2050 pour les deux scénarios RÉFÉRENCE et ALIMENTATION

Les consommations d'énergie des secteurs productifs reflètent les variations des volumes de production, parce que les coefficients techniques (exogènes) concernant les

consommations énergétiques des productions intermédiaires sont les mêmes pour le scénario RÉFÉRENCE et le scénario ALIMENTATION. Nous observons donc pour les consommations d'énergie des secteurs carburants, restauration, aliments non transformés, aliments transformés et transport de passagers les mêmes variations que celles commentées plus haut pour les volumes de production. Les consommations totales d'énergie des secteurs productifs baissent très légèrement, de 0,3% (Figure 5.4). L'impact de ce changement des consommations d'énergie sur les émissions de CO₂ des secteurs productifs est négligeable (Figure 5.5), alors que les émissions de CO₂ totales (ménages et secteurs productifs) baissent de 0,3% par rapport au scénario RÉFÉRENCE.

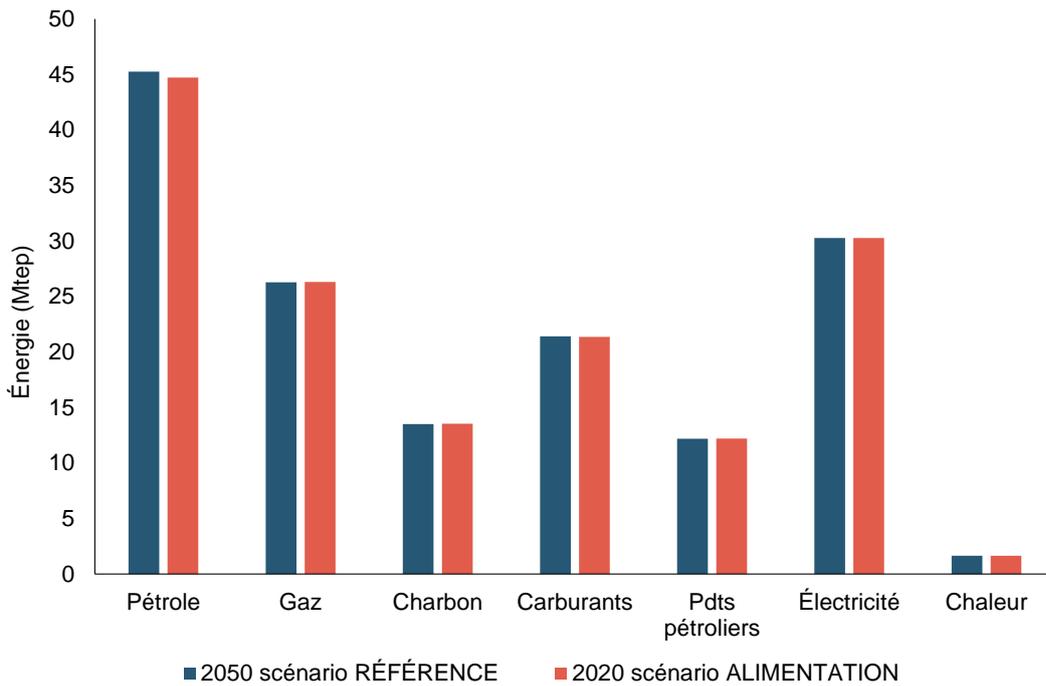


FIGURE 5.4 – Consommations d'énergie directe des secteurs productifs en 2010 et en 2020 pour les deux scénarios RÉFÉRENCE et ALIMENTATION

5.2 Scénario E-COMMERCE : généralisation des achats en ligne

5.2.1 Contexte et hypothèses

Les chercheurs s'intéressent depuis longtemps à l'essor des achats en ligne et aux impacts potentiels sur la mobilité, les consommations de carburants et les émissions associées. Rotem-Mindali et Weltevreden (2013) présentent une vaste revue de littérature sur le sujet, en discutant les différentes conséquences possibles d'une diffusion de ce mode d'achat. En effet, les facteurs à tenir en considération sont nombreux, et les études ne concordent pas sur le résultat global. D'une part, augmenter les achats

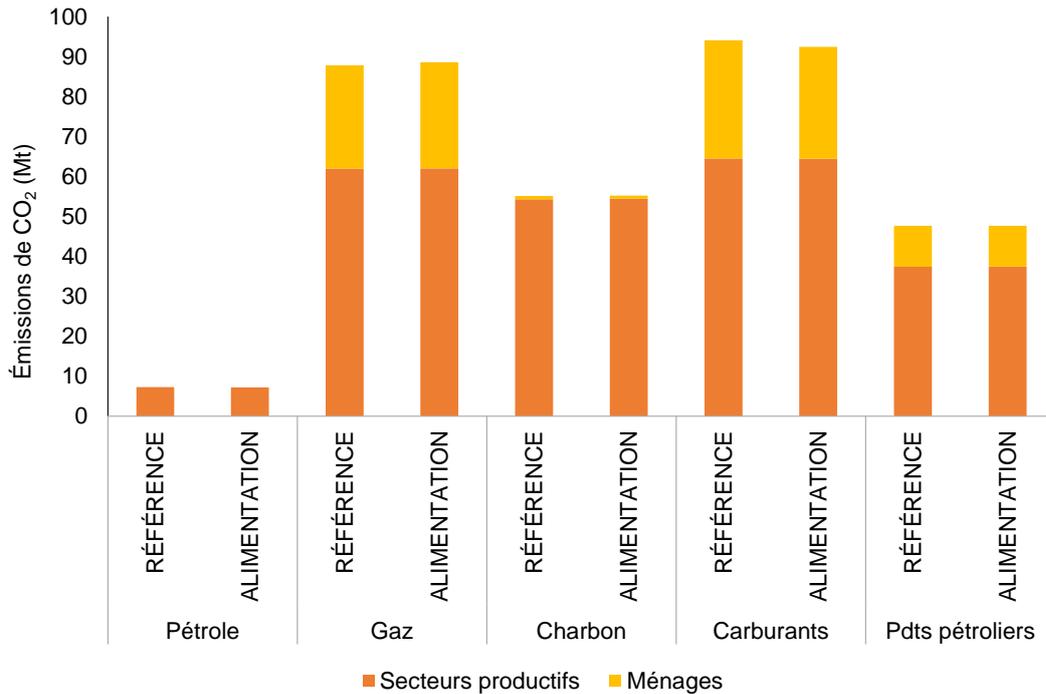


FIGURE 5.5 – Émissions de CO₂ des secteurs productifs et des ménages en 2050, par énergie, pour les deux scénarios RÉFÉRENCE et ALIMENTATION

en ligne réduirait le nombre de déplacements des ménages, même si l'ampleur de cette réduction est discutable. En effet, il faut tenir compte du fait que souvent des trajets pour différents motifs sont chaînés les uns aux autres (par exemple, on peut faire des courses en rentrant du travail), donc un achat en magasin en moins n'induit pas forcément un déplacement en moins. De plus, souvent les déplacements regroupent plusieurs achats différents, donc le déplacement n'est plus nécessaire seulement dans le cas où tous les achats sont effectués sur Internet. Il faut tenir compte également du fait que les achats ont un aspect récréatif, et les ménages pourraient diminuer leurs déplacements pour motif d'achat moins que ce qui serait attendu. D'autre part, le développement des achats en ligne implique une augmentation des livraisons à domicile, et les études qui considèrent à la fois la mobilité des ménages et le transport de marchandises sont rares. L'augmentation des kilomètres parcourus par les véhicules de livraison pourrait être inférieure à la réduction des kilomètres parcourus par les ménages, en faisant l'hypothèse que les livraisons sont plus efficaces grâce au regroupement de plusieurs livraisons dans le même déplacement. Mais les distances parcourues au total pourraient également être plus élevées puisque les consommateurs peuvent acheter en ligne des produits de fournisseurs très distants, et aussi parce que le nombre de produits retournés est élevé. Rotem-Mindali et Weltevreden (2013) concluent que l'effet net peut être très variable et qu'il dépend du type de produit acheté, de la part modale initiale de la voiture pour les déplacements liés aux achats, et d'autres facteurs comme la densité urbaine.

Pour le cas particulier des achats alimentaires, plusieurs études concluent qu'un développement des achats en ligne conduirait à une réduction des véhicules-km totaux

parcourus, en tenant compte à la fois de l'impact sur les déplacements des ménages et sur les distances parcourues par les véhicules de livraison. Wygonik et Goodchild (2012) montrent, pour un échantillon de ménages achetant en ligne, que la réduction des émissions de CO₂ totales liées au transport concernant les achats alimentaires des ménages concernés peut atteindre 80%-90% si les livraisons sont optimisées (groupées par zone de résidence). Siikavirta et al. (2002) estiment, dans un cadre similaire, une réduction des émissions de CO₂ totales liées au transport pour les achats alimentaires de 87% pour les ménages concernés. Cairns (2005), en reprenant les résultats de Cairns (1997), montre une réduction de 77% des véhicules-km totaux (véhicules personnels plus véhicules de livraison) liés aux achats alimentaires pour les ménages concernés par les achats en ligne, et une réduction de 0,8% des véhicules-km totaux pour la population entière du Royaume Uni, en supposant que 1% des ménages achètent leurs produits alimentaires en ligne.

Nous étudions, dans ce scénario, un développement des achats en ligne combinés avec un service de livraison à domicile, pour la France. Nous nous concentrons sur les achats en grande surface et sur leur substitution par des achats en ligne, en nous appuyant pour les hypothèses d'entrée sur les résultats d'une étude récemment publiée par l'association *The shift project* (2017). En particulier, nous utilisons les résultats du scénario « Gisement Livraison par tournées ». Même si l'étude citée ne concerne que la mobilité dans les zones de moyenne densité en France, nous supposons que les résultats restent valides à l'échelle de la France entière, sachant que le « périurbain élargi », qui constitue le périmètre du scénario considéré, couvre 60% du territoire français (en sont exclues les zones à haute densité de population et les zones rurales). Les résultats de ce scénario montrent que la généralisation d'un système de livraison au domicile des courses en hypermarché, par des tournées de véhicules de livraison, permettrait d'éviter 78% des véhicules-km générés par le motif achats en grande surface. En effet, 12% des véhicules-km actuels (basés sur l'ENTD 2008) représentent une activité de loisir (« lèche-vitrine ») qui ne pourrait pas être remplacée par des achats en ligne, et 10% des véhicules-km seraient parcourus par les véhicules de livraison.

Nous supposons que cette réduction de véhicules-km se traduit par une réduction dans les mêmes proportions du temps de trajet lié aux achats en grande surface. Dans notre base de données, les déplacements pour les achats en grande surface font partie des trajets liés à l'activité « Achats et démarches ». Pour distinguer les temps de trajet concernant les achats en grande surface des autres temps de trajet associés à l'activité (c'est-à-dire les trajets pour les achats de proximité, les démarches et les soins), nous nous basons sur les données de l'ENTD 2008. Nous déterminons que la réduction de 78% du temps de trajet pour les achats en grande surface se traduit par une réduction de 26,5% du temps de trajet total lié à l'activité « Achats et démarches ». Les autres résultats du scénario « Gisement Livraison par tournées » de *The Shift Project* (2017) que nous utilisons comme hypothèses d'entrée pour notre simulation sont une réduction de 6,6% des dépenses de carburant totales de la part des ménages, une diminution de 7,1% des dépenses des ménages en produits de l'industrie automobile, et une réduction

de 1,1% des dépenses des ménages en titres de transports collectifs. Les hypothèses spécifiques au scénario E-COMMERCE sont résumées dans le Tableau 5.7.

Comme pour le scénario précédent, nous rajoutons des contraintes sur les dépenses des secteurs qui dans la base temps/dépenses sont caractérisés par des dépenses nulles pour plus de 80% des ménages (à part le secteur automobile qui, dans ce scénario, est contraint par l'hypothèse mentionnée plus haut et non plus par son niveau de dépenses du scénario de référence). Les contraintes de calage de la population (section 4.3.3) et une contrainte concernant le temps de travail constant par rapport au scénario RÉFÉRENCE s'appliquent également.

5.2.2 Résultats

Emplois du temps et consommations des ménages

La baisse de 26,5% du temps de trajet pour motif « Achats et démarches » que nous avons considérée en tant qu'hypothèse d'entrée signifie une diminution de 2,4 h/mois/pers. de ce temps de trajet. D'autre part, le développement du e-commerce résulte aussi en une diminution de 6,1% (de 12,4 à 11,6 h/mois/pers.) du temps dédié aux « Achats et démarches » par mois et par personne, déplacements exclus (Figure 5.6). Les temps dédiés aux autres activités hors domicile (sauf le temps de « Travail, études », par construction) baissent également de manière significative : -8,0% pour les « Repas hors domicile » (de 14,7 à 13,5 h/mois/pers.) et -9,1% pour les « Sports et sorties » (de 33,7 à 30,7 h/mois/pers.), avec les temps de trajet associés qui diminuent respectivement de 13,4% et de 18,1% (nous rappelons que dans la base micro nous disposons du détail sur les temps de trajet par activité, donc les temps de trajet peuvent varier, suite à la repondération, de manière différente des temps de l'activité à laquelle ils sont associés). Le temps de trajet pour l'activité « Travail, études » est presque constant (-0,5%). Le temps dédié aux loisirs au domicile augmente : +6,8% pour les « Loisirs basse int. E » (de 47,3 à 50,6 h/mois/pers.) et +5,4% pour les « Loisirs haute int. E » (de 82,2 à 86,7 h/mois/pers.). Les ménages passent globalement moins de temps à s'occuper des travaux domestiques : -11,3% pour le temps de « Travaux dom. vêtements » (de 6,6 à 5,9 h/mois/pers.) et -4,6% pour le temps de « Travaux dom. maison » (de 36,3 à 34,6 h/mois/pers.), alors que le temps dédié aux « Travaux dom. repas » reste constant. Le temps de « Repas au domicile » augmente de 4,2%. Globalement, dans le scénario E-COMMERCE les Français passent presque 10 h/mois/pers. de plus au domicile que dans le scénario RÉFÉRENCE (+1,8%).

Même si le temps dédié aux repas hors domicile diminue de 8,0%, les consommations en volume augmentent de 11,5%. Les ménages dépensent donc plus pour chaque repas hors domicile (nous pouvons supposer une diminution du nombre de repas hors domicile, mais avec une dépense totale qui augmente).

Cette augmentation des volumes consommés est probablement due à l'hétérogénéité

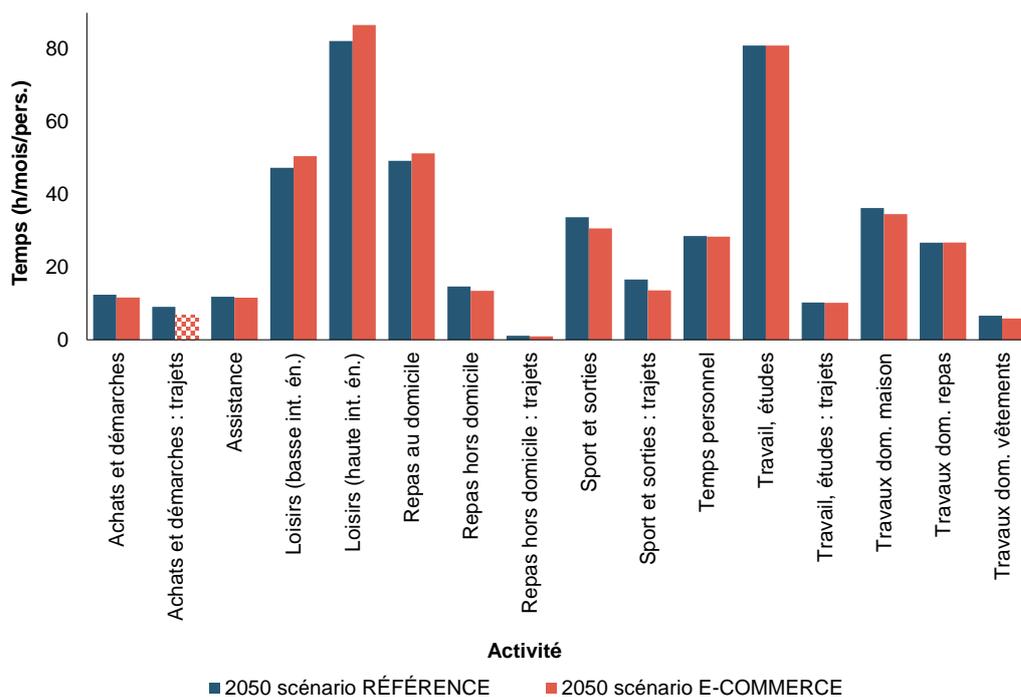


FIGURE 5.6 – Comparaison des emplois du temps en 2050 dans le scénario RÉFÉRENCE et dans le scénario E-COMMERCE. Le temps de sommeil n'est pas représenté à cause de la différence d'échelle (+1% dans E-COMMERCE). Le remplissage quadrillé indique le temps dont la variation est fixée par hypothèse.

des prix payés par les ménages de BDF pour les repas hors domicile. En effet, dans le modèle, nous faisons l'hypothèse d'un prix unique pour les consommations du secteur restauration pour tous les ménages. En réalité, les prix payés pour un repas au restaurant peuvent avoir des écarts considérables. Une repondération qui donne plus de poids à des ménages préférant des repas hors domicile plus chers se traduit donc par une augmentation des consommations de restauration en volume. Tenir compte de l'hétérogénéité des prix est d'autant plus important que l'hétérogénéité est forte. Pour le secteur de la restauration, nous pouvons facilement imaginer des prix allant du simple au triple pour un même repas. Les diminutions de respectivement 2,2% et 7,5% des consommations de produits alimentaires non transformés et transformés, alors que le temps de repas au domicile augmente de 4,2%, pourraient également être le reflet d'une variation des prix moyens payés par les ménages de la base de données.

Nous avons illustré dans le chapitre 2 (Tableau 2.9) les différences de prix entre classes de ménages pour certaines énergies. Les prix de l'électricité observés vont de 96 à 154 €/MWh et les prix du gaz vont de 22 à 98 €/MWh pour différentes classes de ménages. Si nous appliquons les mêmes variations de prix (par rapport à la moyenne) entre classes de ménages dans la base de données 2050 (en utilisant les prix moyens et les pondérations qui résultent du processus d'itération pour le scénario E-COMMERCE), nous pouvons calculer les prix des énergies par ménage en 2050 et donc les consommations d'énergie en volume à partir des dépenses pour chaque ménage. En comparant les

totaux des consommations d'énergie ainsi obtenues avec les totaux des consommations d'énergie en volume dans IMACLIM pour le scénario E-COMMERCE, nous observons des écarts dans les volumes totaux, qui sont assez élevés pour le gaz (11,50 Mtep dans la base de données et 9,84 Mtep dans IMACLIM) alors qu'ils sont plus faibles pour l'électricité (12,75 Mtep et 12,78 Mtep respectivement). Ces résultats montrent que tenir compte de ces hétérogénéités de prix payés par les ménages est nécessaire dans la modélisation prospective, en particulier si l'on s'intéresse aux changements de comportement des ménages. Une amélioration possible de la méthode consisterait à calculer des volumes de consommations d'énergie dans la base de données, en exploitant les informations sur les différences de prix par classe de ménages, et imposer ces volumes dans l'itération avec IMACLIM plutôt qu'imposer des parts budgétaires. De manière plus générale, pour tenir compte de l'hétérogénéité des prix pour tous les secteurs de consommation et observer son impact sur les résultats de l'analyse de scénarios, il serait possible de calculer, à partir des prix révélés dans la base, une évolution du prix moyen auquel les ménages font face, et imposer cette évolution en ajustant la marge spécifique sur les ventes aux ménages du bien en question.

À part l'énergie, les deux autres secteurs ne faisant pas l'objet de contraintes sont le composite, pour lequel les consommations augmentent de 0,3% dans le scénario E-COMMERCE par rapport au scénario de référence, et le logement (c'est-à-dire les consommations de mètres carrés), pour lequel les consommations augmentent de 3,6%. Le logement représente un type de bien particulier parce qu'il est homogène (m² de surface) et parce que dans BDF nous disposons d'une double information concernant la surface de logement de chaque ménage et les dépenses de logement. Il aurait été possible, donc, de calculer à chaque itération le prix moyen par m² et de l'imposer dans le modèle. Cette amélioration du processus assurerait la cohérence entre l'évolution des consommations de logement en volume dans IMACLIM et l'évolution des surfaces dans la base repondérée, dans le même esprit que pour les prix de l'énergie mentionnés plus haut, ce qui n'est pas le cas pour l'instant. Dans la base de données, le prix moyen du logement pour le scénario E-COMMERCE est de 9% plus élevé que celui du scénario RÉFÉRENCE, alors que dans IMACLIM nous obtenons pour le scénario E-COMMERCE un prix du logement 1% plus élevé que pour le scénario RÉFÉRENCE (la conséquence est que, dans la base de données, les surfaces de logement diminuent de 5% alors qu'elles augmentent de presque 4% dans le modèle).

Macroéconomie

Du point de vue des résultats macroéconomiques, le scénario E-COMMERCE ne présente pas de différences importantes avec le scénario RÉFÉRENCE (Tableau 5.2). Le PIB réel et le revenu disponible brut réel des ménages sont légèrement supérieurs, dans le scénario E-COMMERCE, à ceux du scénario référence (+0,1% et +0,3% respectivement). L'indice de prix à la consommation est également supérieur (de 1,0%), ainsi que l'indice de prix du PIB (+ 1,2 %). Les variations les plus importantes dans les



FIGURE 5.7 – Variation des consommations des ménages 2050 en volume dans le scénario E-COMMERCE par rapport au scénario RÉFÉRENCE. Le remplissage quadrillé indique les secteurs dont la variation des dépenses est fixée par hypothèse.

volumes de production concernent le secteur restauration (+9,4%), suivi par le secteur produit pétroliers (-4,1%), le secteur aliments transformés (-3,8%), l'industrie automobile (-3,1%), les carburants (-2,8%), le logement (+2,4%) et les transports de passagers (-2,1%).

TABLEAU 5.2 – Résultats macroéconomiques du scénario E-COMMERCE en comparaison avec ceux du scénario RÉFÉRENCE

Indicateur	2050 RÉF.	2050 E-COMM.	Diff. %
PIB réel	3 037 957	3 039 964	+0,1
Revenu disponible brut réel des ménages	2 063 096	2 068 652	+0,3
Pression fiscale (ratio taxes et impôts / PIB, %)	47,32	47,27	-0,1
Ratio balance commerciale/PIB, %	1,34	1,33	-0,6
Indice des prix à la consommation par rapport à 2010	1,469	1,483	1,0

Consommations d'énergie et émissions de CO₂

Regardons maintenant les consommations d'énergie (Figure 5.8). La diminution de 7,1% des consommations de carburants est une conséquence directe de la diminution des dépenses en carburants (-6,6%) qui constituait une des hypothèses du scénario, alors que le prix des carburants pour les ménages augmente de 0,5%. Nous observons ensuite une baisse de 3,9% des consommations d'électricité, qui dérive principalement de la réduc-

tion du temps dédié aux travaux domestiques, très intensifs en énergie (voir chapitre 3) et en partie de la réduction des consommations de chauffage. Les consommations d'électricité spécifique liées aux « Travaux domestiques : maison » baissent de 10% et celles liées aux « Travaux domestiques : vêtements » baissent de 4%. Les consommations de chauffage diminuent (-4%) malgré la légère augmentation du temps passé au domicile, en reflétant la baisse des surfaces de logement. Les consommations d'électricité pour le chauffage diminuent donc également (-3%). Ces baisses des consommations d'électricité ne sont pas compensées par l'augmentation du temps de « Loisirs (haute int. E) » (radio, télévision, ordinateur etc.), dont les consommations restent stables malgré l'augmentation du temps dédié à l'activité. L'explication réside dans l'hétérogénéité des tâches qui font partie des « Loisirs (haute int. E) » et dans l'hétérogénéité des efficacités énergétiques des appareils possédés par les ménages. Enfin, nous observons un report des consommations de produits pétroliers vers les consommations de gaz.¹ Les consommations de produits pétroliers diminuent de 17% et celles de gaz augmentent de 4%, ce qui en termes absolus correspond à un report quasi parfait (-0,6 Mtep et +0,5 Mtep respectivement). Globalement, les consommations d'énergie des ménages diminuent de 3,4% (-2,1% pour l'énergie résidentielle et -7,1% pour les carburants).

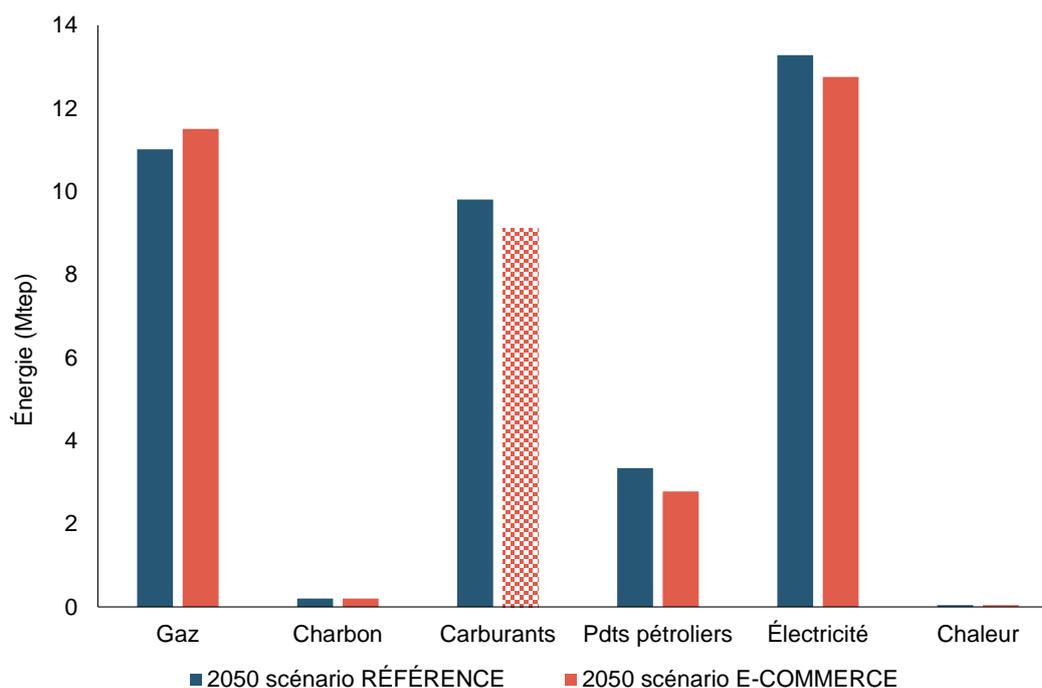


FIGURE 5.8 – Consommations d'énergie directe de la part des ménages en 2010 et en 2050 pour les deux scénarios RÉFÉRENCE et E-COMMERCE. Le remplissage quadrillé indique l'énergie dont la variation des dépenses est fixée par hypothèse.

Les consommations d'énergie des secteurs productifs (Figure 5.9) baissent aussi (-1,7%) dans le scénario E-COMMERCE par rapport au scénario RÉFÉRENCE. Les variations des consommations d'énergie de chaque secteur sont proportionnelles aux

1. À parité de distribution de système de chauffage principal et de type de logement, tel que prévu par les contraintes de calage de la population.

variations dans les volumes de production commentés plus haut, pour la constance des coefficients techniques concernant l'énergie. En termes de sources d'énergie, la variation la plus marquée concerne le pétrole (-3,2%), en conséquence des diminutions des consommations de carburants de la part des ménages. Les consommations des autres produits énergétiques baissent légèrement (-0,7% pour carburants et charbon, -0,6% pour le gaz, -0,5% pour les produits pétroliers, -0,2% pour l'électricité).

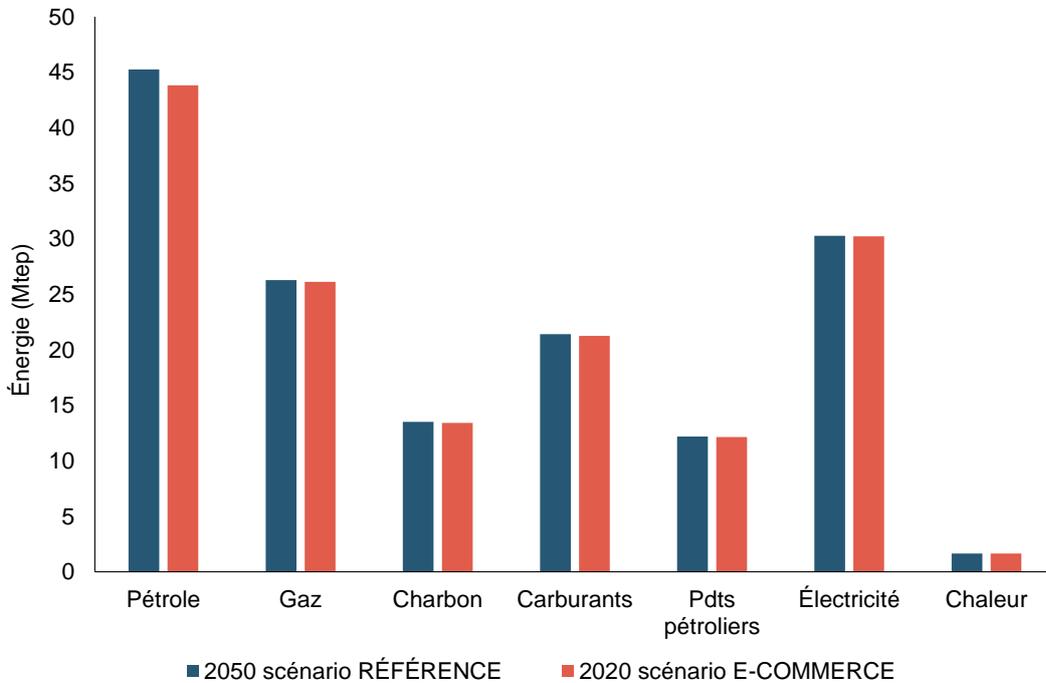


FIGURE 5.9 – Consommations d'énergie directe des secteurs productifs en 2010 et en 2050 pour les deux scénarios RÉFÉRENCE et E-COMMERCE

Avec les réductions marginales des consommations d'énergie des ménages et des secteurs productifs décrites auparavant, les émissions de CO₂ totales en France du scénario E-COMMERCE sont de 1,5% inférieures à celles du scénario RÉFÉRENCE (Figure 5.10). La baisse est plus marquée pour les ménages (-4%) que pour les entreprises (-0,7%).

5.3 Scénario MOBILITÉ : diffusion du covoiturage et de l'autopartage

5.3.1 Contexte et hypothèses

Selon les données du TES hybride présenté dans le chapitre 4, les carburants représentaient en 2010, en France, le premier poste de consommations d'énergie directe des ménages, avec 23,5 Mtep qui correspondent à 39% du total (le gaz et l'électricité représentent 24% et 23% des consommations respectivement). Du point de vue des émissions

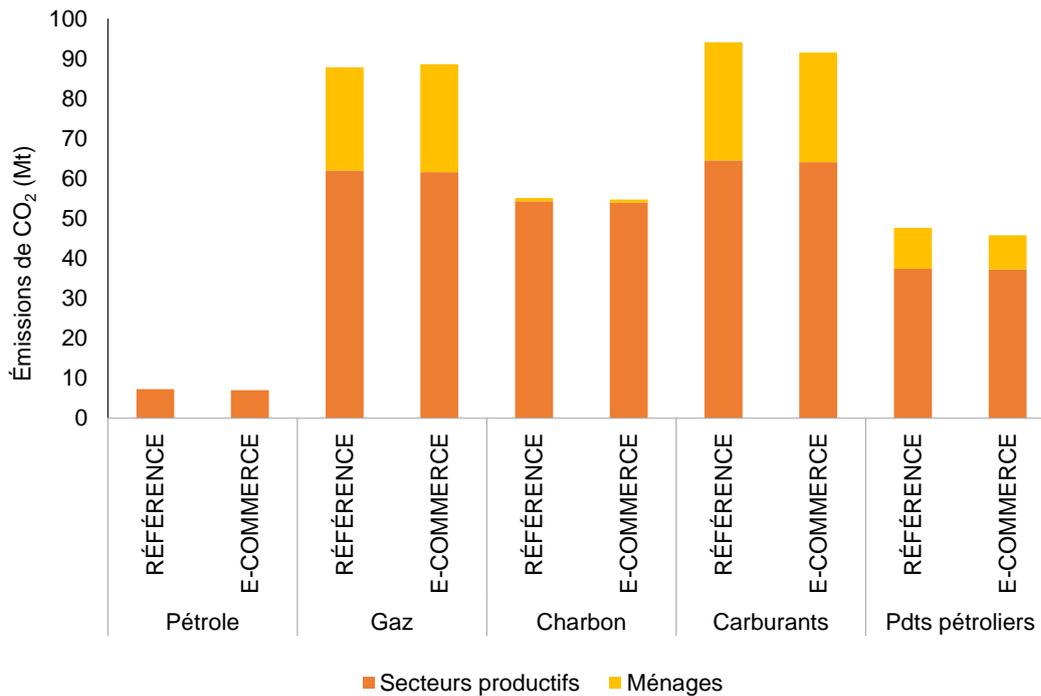


FIGURE 5.10 – Émissions de CO₂ des secteurs productifs et des ménages en 2050 pour les deux scénarios RÉFÉRENCE et E-COMMERCE

de CO₂ des ménages, le poids des carburants est encore plus élevé : 54% du total (suivi par les émissions liées au gaz, 26%, et par celles liées aux produits pétroliers, 19%). Il n'est donc pas surprenant que la mobilité soit au centre des discussions sur le développement durable et sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre. D'une part, il est possible d'agir sur les technologies de conversion de l'énergie dans les véhicules, ou sur les technologies qui rendraient les systèmes de transport plus « intelligents », par exemple des systèmes d'information pour réduire les embouteillages (voir Shaheen et Lipman (2007) pour une revue). D'autre part, le comportement des usagers joue un rôle central. On peut agir pour encourager le report modal vers les modes doux (marche à pieds, vélo), vers les transports en commun, ou vers de nouvelles formes de mobilité. Ces dernières années ont vu se développer en particulier deux types de mobilité fondés sur le partage qui pourraient répondre à une partie des besoins de transport des ménages tout en réduisant les consommations d'énergie et les émissions associées : covoiturage et autopartage. On parle de covoiturage (*carpooling* en anglais) quand un conducteur met à disposition les places restantes de sa voiture pour des passagers intéressés à parcourir le même trajet, afin de partager les frais. L'autopartage (*car sharing*), en revanche, est un système dans lequel un même véhicule est utilisé par plusieurs personnes à différents moments, et où chacun finance les frais associés au véhicule sur la base de son utilisation effective.

Plusieurs travaux scientifiques ont analysé les bénéfices environnementaux des nouvelles formes de mobilité. L'autopartage encourage une réduction de l'usage de la voiture (en termes de fréquence d'utilisation et de nombre de véhicules-km parcourus) et un

report modal vers les transports en commun et les modes doux (Meijkamp (1998), Martin et Shaheen (2011), Sioui et al. (2013), Nijland et van Meerkerk (2017)). Firnkorn et Müller (2011) estiment une réduction d'environ 8% des émissions directes de CO₂ liées à la mobilité pour un usager moyen d'un service d'autopartage « libre » (sans stations de parking) en Allemagne. Nijland et van Meerkerk (2017) trouvent que, en tenant compte des émissions de CO₂ liées à la fois à la production des véhicules, leur utilisation et leur démolition, la baisse des émissions de CO₂ par usager d'un service d'autopartage aux Pays Bas est comprise entre 13% et 18%. Pour Chen et Kockelman (2016), la réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre par membre d'un service d'autopartage aux États-Unis, en considérant tout le cycle de vie des véhicules et également l'utilisation accrue des transports en commun, est d'environ 51%, ce qui se traduit en une réduction de 5% des émissions de CO₂ associées à la mobilité pour la population totale. Toujours en référence à la population totale, Grischkat et al. (2014) estiment, dans un scénario optimiste, une réduction de 1% des émissions de gaz à effet de serre liées à la mobilité par personne grâce au développement de l'autopartage, ainsi qu'une réduction des émissions de 4% grâce au développement du covoiturage.

Un élément dont il est nécessaire de tenir compte dans ce type d'études est l'effet rebond. L'utilisation de services d'autopartage et de covoiturage peut être à l'origine d'un effet rebond direct, sous forme d'un recours plus fréquent à des transports en commun ou à des modes doux (ceci est souvent pris en compte dans les études), mais également à un effet rebond indirect : les éventuelles économies réalisées au niveau du ménage peuvent induire une augmentation des consommations d'autres produits et services en dehors de la mobilité, avec des impacts sur les consommations d'énergie et les émissions. L'estimation de l'influence de l'effet rebond indirect est très rare dans la littérature sur les études d'impact des nouvelles mobilités. Chen et Kockelman (2016) estiment que, une fois l'effet rebond indirect pris en compte (sur la base d'estimations d'effet rebond présentes en littérature), la réduction des émissions de CO₂ liées aux transports pour la population totale passerait de 5% à environ 3%. La méthode d'estimation de scénario que nous utilisons tient compte par construction des deux types d'effet rebond, puisque nous partons de comportements de consommations observés qui concernent les dépenses sur tous les secteurs, et grâce à la repondération nous modifions le comportement moyen de la population.

En France, plusieurs études prospectives incluent le développement du covoiturage et de l'autopartage parmi les leviers d'action pour réduire les impacts environnementaux liés aux modes de consommation des ménages. L'ADEME (2014), dans son rapport « Alléger l'empreinte environnementale de la consommation des français en 2030 », suppose que 10% des flux de mobilité urbains sont couverts par des services de mobilité partagée à horizon 2030. Le scénario NegaWatt 2011 prévoit en 2050 un fort développement du covoiturage, avec une augmentation de 33% du taux de remplissage moyen des voitures par rapport à 2008, ainsi que de l'autopartage, qui contribue à faire baisser la part modale de la voiture (Association négaWatt, 2014).

Pour notre analyse des effets d'une diffusion à large échelle de l'autopartage et du

covoiturage, nous formulons nos hypothèses d'entrée sur la base d'une étude prospective menée par la Direction Générale des Entreprises, dont les résultats sont présentés dans le rapport « Usages novateurs de la voiture et nouvelles mobilités » (DGE et al., 2016). Cette étude explore les possibilités de diffusion de l'autopartage et du covoiturage, et propose trois scénarios prospectifs qui se distinguent par le rôle des différents acteurs dans le développement de ces services. En particulier, nous avons choisi d'exploiter les résultats du scénario 1, « Enrichissement de l'offre intermodale », qui met les pouvoirs publics au centre du développement des nouvelles mobilités. Les acteurs des transports publics proposent des services de covoiturage et d'autopartage, qui sont complémentaires à l'offre de transports publics classique.

L'horizon du scénario de la DGE est 2030. Nous supposons pour notre analyse que le même niveau de diffusion des services de covoiturage et d'autopartage se réalise à horizon 2050, sachant qu'il s'agit d'une hypothèse conservatrice et qu'avec un horizon de temps plus lointain, des évolutions de mobilités encore plus poussées pourraient être envisagées.

L'étude de la DGE prend en compte l'évolution des besoins de mobilité et de la part modale de la voiture, ainsi que du parc de véhicules et de leur utilisation. En particulier, le développement du covoiturage modifie le taux de remplissage des véhicules, alors que l'autopartage a des conséquences sur la taille du parc de véhicules automobiles et sur sa vitesse de renouvellement. Dans le scénario 1 que nous avons pris en considération, le taux de remplissage des véhicules augmente en moyenne de 10%, avec une différenciation par zones selon la densité urbaine. La diffusion de l'autopartage cause une augmentation des kilométrages parcourus par chaque véhicule d'environ 20% en moyenne, avec également une différenciation par zones selon la densité urbaine. Les résultats de ce scénario que nous utilisons en tant que hypothèses pour notre analyse prospective concernent les dépenses de carburants des ménages, qui baissent de 21,4%, et celles de véhicules automobiles, qui baissent de 2,5%. La faible diminution des dépenses de véhicules automobiles est due au fait que l'acquisition des voitures neuves pour les parcs publics est réimputée aux ménages.²

Nous imposons également des variations de temps de transport. En effet, le covoiturage comporte un allongement des temps de trajet à cause des déviations réalisées pour aller chercher et déposer les autres passagers, alors que dans le cas de l'autopartage l'allongement des temps est dû aux trajets additionnels pour rejoindre les véhicules en libre service. Le scénario DGE fournit des informations concernant la variation du taux de remplissage par zone de résidence (basées sur la variable « Taille de l'unité urbaine » des enquêtes INSEE). Grâce au modèle de transports IMMOVE développée par EDF R&D³, qui tient compte du covoiturage, nous pouvons calculer quelle est la part de

2. Faute de temps, nous n'avons pas pu réimputer ces dépenses aux entreprises de transports publics (le secteur « transport de passagers » d'IMACLIM) et transformer la facture de véhicules en facture de service de transport. D'un point de vue macro, les résultats du modèle ne seraient pas changés si l'on néglige d'éventuelles marges de services spécifiques.

3. Le modèle se base sur l'ENTD2008 (MEEM, 2008).

déplacements concernés par le covoiturage qui résulte en une augmentation du taux de remplissage des voitures (différencié entre zones urbaines, périurbaines et rurales) correspondante à celle du scénario DGE. Nous calculons la part de trajets concernés par motif (Tableau 5.3). Les déplacements pour les repas hors domicile ne sont pas covoiturés, par hypothèse du modèle EDF R&D. Nous supposons ensuite que pour chaque trajet concerné par le covoiturage, le temps de transport augmente de 20%, ce qui est cohérent avec les hypothèses d'autres études, telles celle de The Shift Project (2017).

Nous ne disposons pas de détails sur le recours à l'autopartage par motif de déplacement. Le scénario DGE est fondé sur l'hypothèse que 25% des besoins totaux de mobilité automobile sont couverts par l'autopartage. Pour estimer l'augmentation des temps de déplacement due à l'autopartage, nous supposons donc que, pour chaque motif, l'autopartage concerne 25% des trajets (Tableau 5.3). Nous supposons également qu'un trajet effectué en recourant à l'autopartage a une durée de 20% supérieure à celle qu'aurait été la durée du trajet effectué avec un véhicule particulier.

Enfin, nous tenons compte des parts modales de la voiture (Tableau 5.3) et des parts de trajets concernées par motif pour obtenir l'augmentation du temps de déplacement total (pour toute la population), par motif (Tableau 5.4). Nous imposons ces variations des temps de déplacement en tant que contrainte pour la repondération de la base de données temps/dépenses dans le processus d'itération.

TABLEAU 5.3 – Part modale de la voiture et part des trajets en voiture concernés par le covoiturage et par l'autopartage dans le scénario MOBILITÉ (calculs de l'auteur à partir des résultats de DGE et al. (2016))

Motif	Part modale voiture (%)	Trajets en voiture concernés (%)	
		Covoiturage	Autopartage
Achats et démarches	90	10,3	25,0
Repas hors domicile	87	0,0	25,0
Sport et sorties	68	18,8	25,0
Travail, études	72	37,7	25,0

TABLEAU 5.4 – Variation des temps de déplacement dans le scénario MOBILITÉ par rapport au scénario RÉFÉRENCE, par motif (calculs de l'auteur à partir des résultats de DGE et al. (2016))

Motif	Variation de temps de trajet (%)		
	Covoiturage	Autopartage	Total
Achats et démarches	1,8	4,5	6,3
Repas hors domicile	0,0	4,4	4,4
Sport et sorties	2,5	3,4	5,9
Travail, études	5,4	3,6	9,1

Les hypothèses spécifiques au scénario MOBILITÉ sont résumées dans le Tableau 5.7. Nous rajoutons également les contraintes sur les demandes sous-représentées (à

part le secteur automobile qui, dans ce scénario, est contraint par l'hypothèse mentionnée plus haut et non plus par son niveau de dépenses du scénario de référence), les contraintes de calage de la population (section 4.3.3) et une contrainte concernant le temps de travail constant par rapport au scénario RÉFÉRENCE.

5.3.2 Résultats

Emplois du temps et consommations des ménages

Les hypothèses concernant les temps de trajet comportent une augmentation de 2,5 h/mois/pers. du temps de déplacement total dans le scénario MOBILITÉ par rapport au scénario RÉFÉRENCE. Les baisses les plus significatives des temps par activité concernent en revanche les loisirs au domicile, à la fois les « Loisirs (basse int. E) » (-2,5%) et les « Loisirs (haute int. E) » (-2,3%). Le temps dédié aux repas au domicile diminue également (-1,5%), même si la réduction la plus significative en valeur absolue est celle concernant le temps de sommeil (-2,0 h/mois/pers., ce qui correspond à une diminution de 0,8%). Les activités qui montrent des augmentations sensibles du temps associé sont, à part les trajets, l'« Assistance » aux enfants ou à des adultes du ménage (+7,1%), les « Achats et démarches » (+4,4%) et les « Travaux domestiques : vêtements » (+4,4%). Globalement, le temps passé au domicile baisse de 0,6% (-3,5 h/mois/pers.).

La plus grande variation dans les consommations des ménages en volume pour le scénario MOBILITÉ concerne le secteur des carburants (-21,5%), pour lequel la variation des dépenses (21,4%) est imposée par hypothèse (alors que le prix augmente de 0,2%). Les consommations de transports publics de passagers augmentent de 8%. Cette augmentation est cohérente avec la baisse du taux d'équipement en automobiles sous-jacente au scénario DGE, et avec l'utilisation de transports en commun en combinaison avec le covoiturage ou l'autopartage (qui ne fait pas l'objet d'hypothèses exogènes dans notre analyse). D'autres variations fortes concernent le secteur restauration (-4,2%), dont les consommations baissent même si le temps dédié augmente légèrement (+1,6%), et les secteurs alimentaires (-2,8% pour les aliments non transformés et -3,1% pour les aliments transformés). Comme mentionné dans les commentaires des résultats du scénario précédent, la diminution des consommations de repas hors domicile accompagnée d'une hausse du temps de repas hors domicile, pourrait être le reflet d'une diminution des prix moyens payés par repas (donc une diminution des marges de profit du secteur restauration), plutôt que d'une réelle diminution des quantités de nourriture consommées. Le temps de préparation de repas au domicile augmente de 1,8% alors que les temps de repas au domicile diminuent (-1,5%). Une possible explication est l'augmentation de repas préparés au domicile et consommés ailleurs, par exemple emportés sur le lieu de travail.⁴

4. Pour rappel, le temps de repas sur le lieu de travail est inclus dans le temps de travail et non dans le temps de repas hors domicile, donc l'augmentation des repas emportés sur le lieu de travail ne

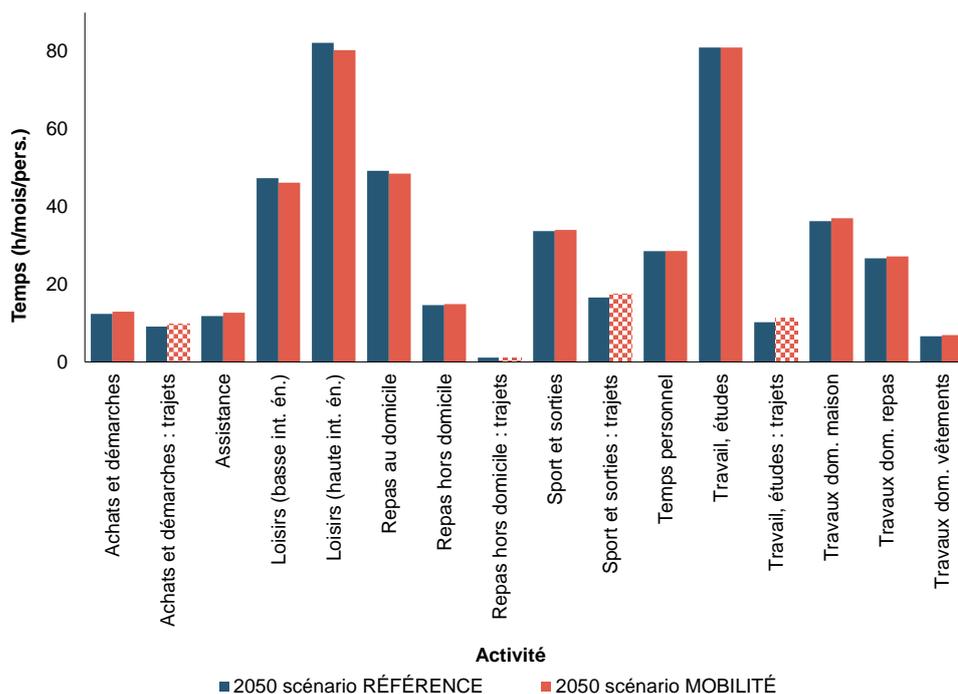


FIGURE 5.11 – Comparaison des emplois du temps en 2050 dans le scénario RÉFÉRENCE et dans le scénario MOBILITÉ. Le sommeil n'est pas représenté à cause de la différence d'échelle (-0,8% dans MOBILITÉ). Le remplissage quadrillé indique les temps dont la variation est fixée par hypothèse.

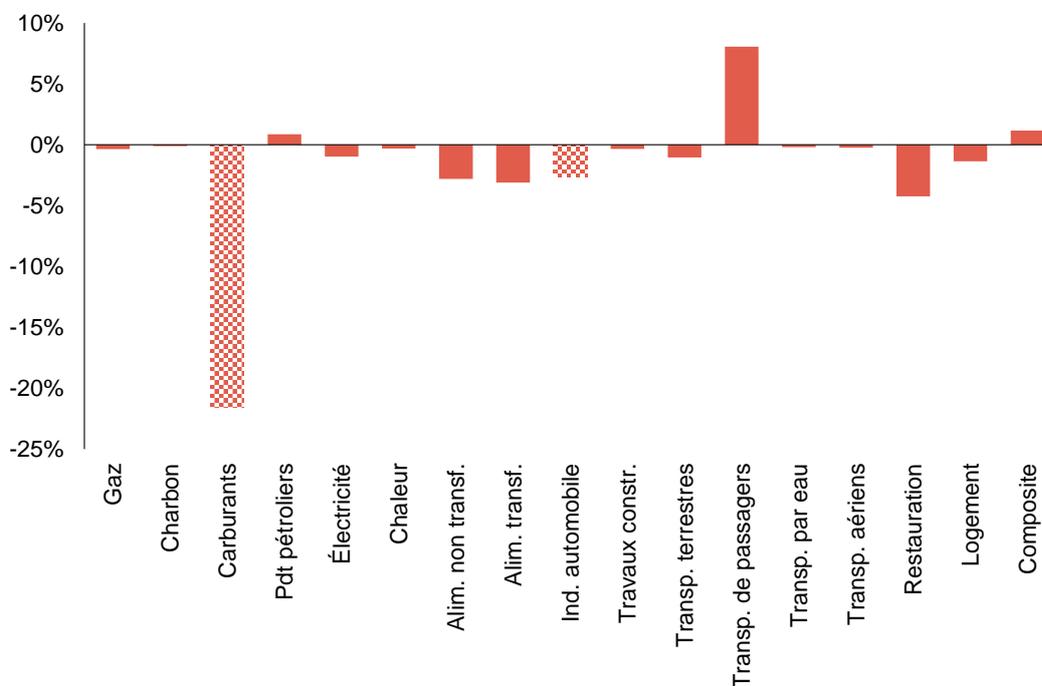


FIGURE 5.12 – Variation des consommations des ménages 2050 en volume dans le scénario MOBILITÉ par rapport au scénario RÉFÉRENCE. Le remplissage quadrillé indique les secteurs dont la variation des dépenses est fixée par hypothèse.

Macroéconomie

Les indicateurs macroéconomiques sont assez similaires à ceux du scénario RÉFÉRENCE (Tableau 5.5). Le PIB réel en 2050 pour le scénario MOBILITÉ est légèrement inférieur à celui du scénario RÉFÉRENCE (-0,2%). Le revenu disponible brut réel des ménages est aussi très légèrement inférieur (-0,1%), suite à une augmentation de 0,4% de l'indice des prix à la consommation. La pression fiscale reste inchangée. Les volumes de production caractérisés par les variations les plus fortes concernent les secteurs transport de passagers (+8,0%), carburants (-6,3%), restauration (-3,5%), aliments transformés (-2,1%), aliments non transformés (-1,8%) et industrie automobile (-1,2%).

TABLEAU 5.5 – Résultats macroéconomiques du scénario MOBILITÉ en comparaison avec ceux du scénario RÉFÉRENCE

Indicateur	2050 RÉF.	2050 MOB.	Diff. %
PIB réel	3 037 957	3 030 670	-0,2
Revenu disponible brut réel des ménages	2 063 096	2 060 457	-0,1
Pression fiscale (ratio taxes et impôts / PIB, %)	47,32	47,33	0,0
Ratio balance commerciale/PIB, %	1,34	1,35	+0,7
Indice des prix à la consommation par rapport à 2010	1,469	1,474	0,4

Consommations d'énergie et émissions de CO₂

Les consommations d'énergie directe des ménages (Figure 5.13) baissent de 6,0% dans le scénario MOBILITÉ par rapport au scénario RÉFÉRENCE. Cette baisse est en grande partie le résultat de la réduction des consommations de carburants imposée dans le scénario : toutes choses égales par ailleurs, la baisse de 21,5% des consommations de carburants des ménages comporterait une baisse de 5,6% dans les consommations d'énergie directe des ménages. Les autres énergies montrent des légères variations entre les deux scénarios, avec une baisse des consommations d'électricité (-1,0%) et de gaz (-0,4%) et une hausse des consommations de produits pétroliers (+0,9%).

Les consommations d'énergie des secteurs productifs diminuent de 1,3% dans le scénario MOBILITÉ. Cette baisse est loin d'être uniforme, puisque les variations des consommations par secteur suivent les variations dans les volumes de production commentées plus haut. Les consommations par type d'énergie (Figure 5.14) montrent la plus grande variation pour le pétrole (-4,3%, notamment à cause de la baisse de la demande de la part du secteur carburants) et les carburants (+0,6%).

En conséquence des variations des consommations d'énergie commentées plus haut, les émissions des secteurs productifs du scénario MOBILITÉ sont très proches de celles du scénario RÉFÉRENCE (-0,1%), alors que les émissions de CO₂ des ménages baissent de 9,6%, par rapport au scénario RÉFÉRENCE, essentiellement grâce à la réduction

serait pas à l'origine de l'augmentation du temps de repas hors domicile.

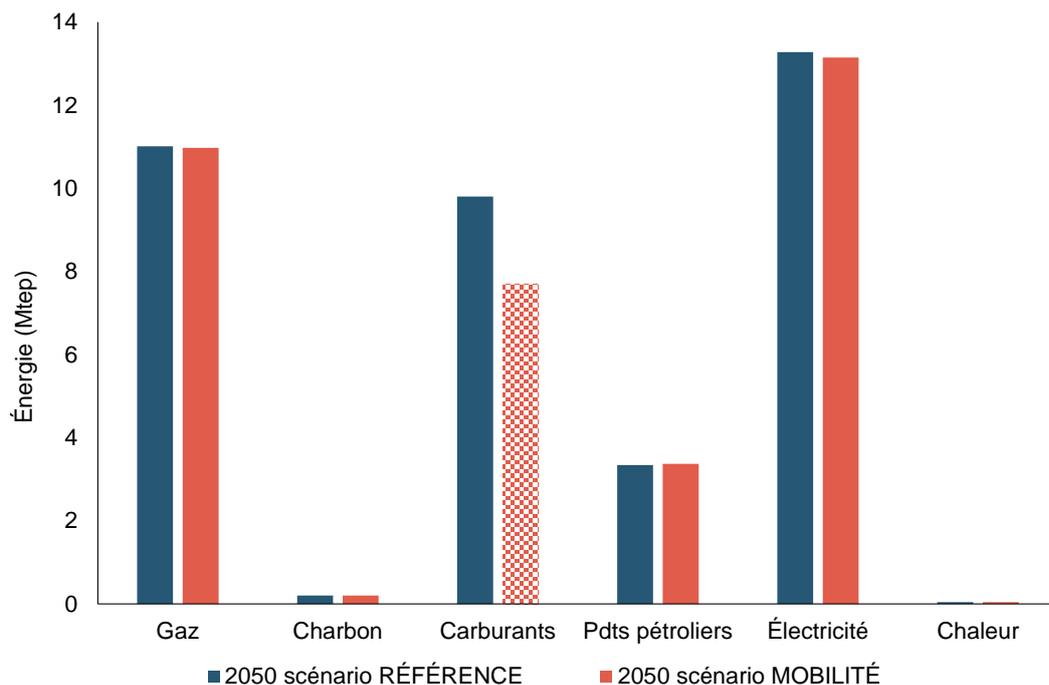


FIGURE 5.13 – Consommations d’énergie directe de la part des ménages en 2010 et en 2050 pour les deux scénarios RÉFÉRENCE et MOBILITÉ. Le remplissage quadrillé indique l’énergie dont la variation des dépenses est fixée par hypothèse.

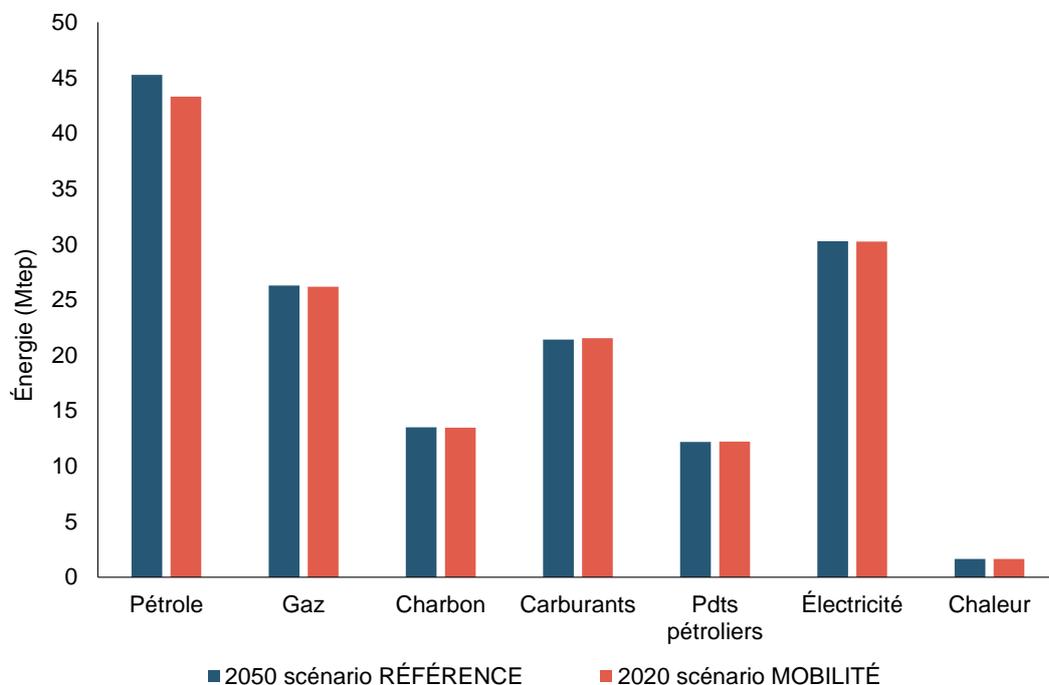


FIGURE 5.14 – Consommations d’énergie directe des secteurs productifs en 2010 et en 2050 pour les deux scénarios RÉFÉRENCE et MOBILITÉ

des consommations de carburants. Les émissions de CO₂ totales sont de 2,3% inférieures à celles du scénario RÉFÉRENCE (Figure 5.15).

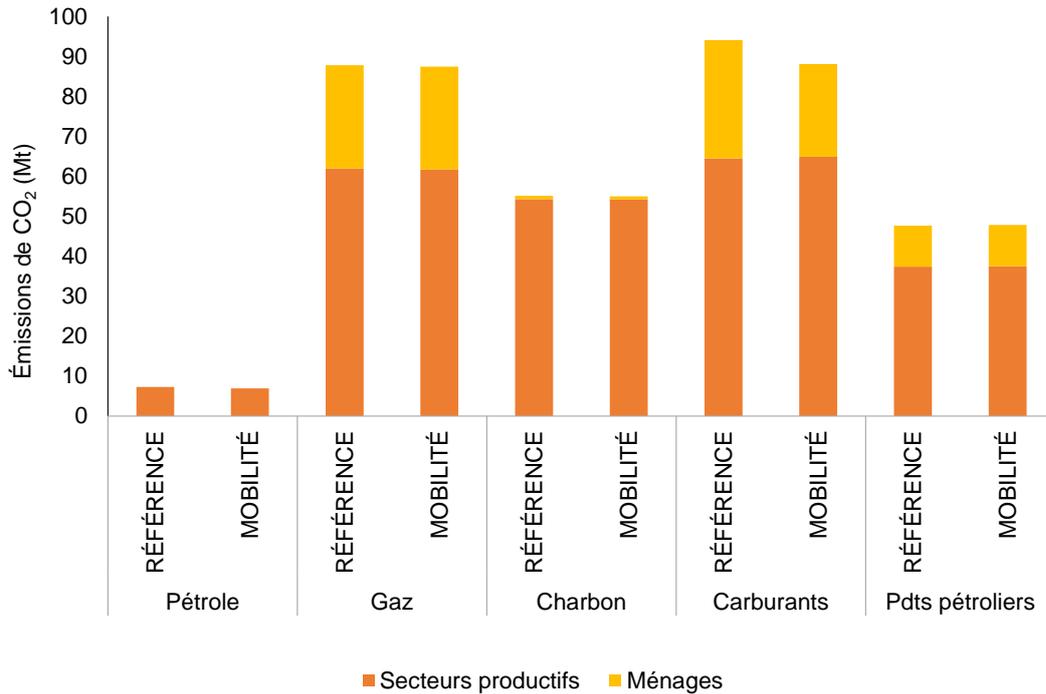


FIGURE 5.15 – Émissions de CO₂ des secteurs productifs et des ménages en 2050 pour les deux scénarios RÉFÉRENCE et MOBILITÉ

5.4 Conclusion

Nous avons analysé dans ce chapitre trois scénarios de changement de mode de vie des ménages à horizon 2050. Les trois scénarios induisent une réduction des consommations d'énergie et des émissions totales (des secteurs productifs et des ménages) par rapport au scénario de référence en 2050 (Tableau 5.6), dont les ordres de grandeur sont cohérents avec les quelques analyses existantes en littérature (par exemple celle de Duarte et al. (2016)).

Dans chacun des scénarios, les changements des dépenses ou des temps par activité que nous avons imposés en tant qu'hypothèse de départ (Tableau 5.7) comportent des variations significatives des autres temps et dépenses. Ceci démontre l'importance de disposer, pour ce type d'analyse, d'une représentation complète des modes de vie des ménages, à la fois incluant les temps et les dépenses. En effet, réaliser une analyse partielle des effets d'un changement de mode de vie sans tenir compte des effets rebond directs et indirects, à la fois concernant les temps et les dépenses, risque de négliger des informations importantes qui peuvent modifier le résultat final. Les scénarios analysés ici présentent des changements de mode de vie avec des hypothèses assez conservatrices. Les réductions des consommations d'énergie et des émissions observées peuvent être significatives, en particulier pour les ménages, mais une fois comparées

aux consommations d'énergie et émissions totales, les réductions sont d'environ 2% dans le meilleur des cas. Pour aboutir à des réductions de grande ampleur, donc, il serait nécessaire d'une part de combiner plusieurs changements de modes de vie, et d'autre part d'imaginer des modifications des modes de vie encore plus audacieuses. Le contexte macroéconomique ne subit pas de modifications majeures entre les scénarios, en raison de l'hypothèse concernant la constance du temps de travail entre le scénario de référence et les scénarios de changements de modes de vie, et également du fait que le taux de chômage et la population active sont exogènes dans la modélisation. Il serait intéressant d'élargir l'analyse à des scénarios prévoyant un temps de travail variable, qui permettrait aux ménages des arbitrages plus amples dans leurs choix de modes de vie. Enfin, nous avons montré à quel point l'hétérogénéité des prix payés par les ménages pour le même produit peut créer des biais potentiels dans une analyse de scénarios de ce type. L'amélioration du cadre de modélisation en introduisant des prix différents par groupes de ménages est donc nécessaire, puisque les variations dans les volumes totaux consommés pourraient être assez significatives pour influencer le résultat final.

TABLEAU 5.6 – Variations (%) des consommations d'énergie et des émissions de CO₂ en 2050 dans les trois scénarios par rapport au scénario RÉFÉRENCE

	Scénario		
	ALIMENTATION	E-COMMERCE	MOBILITÉ
Consommations d'énergie			
Ménages	-0,2	-3,4	-6,0
Secteurs productifs	-0,3	-1,3	-1,3
Total	-0,3	-1,7	-2,2
Émissions de CO ₂			
Ménages	-1,3	-4,0	-9,6
Secteurs productifs	0,0	-0,7	-0,1
Total	-0,3	-1,5	-2,3

TABLEAU 5.7 – Hypothèses spécifiques aux trois scénarios, exprimées en tant que variations par rapport au scénario RÉFÉRENCE

Scénario	Hypothèses
ALIMENTATION	+30% temps de « Travaux domestiques : repas »
E-COMMERCE	-26,5% temps de trajet motif « Achats et démarches », -6,6% dépenses de carburant, -7,1% dépenses industrie automobile, -1,1% dépenses de transports passagers
MOBILITÉ	+9,1% temps de trajet motif « Travail/études », +6,3% temps de trajet motif « Achats et démarches », +5,9% temps de trajet motif « Sport et sorties », +4,4% temps de trajet motif « Repas hors dom. », -21,4% dépenses de carburant, -2,5% dépenses industrie automobile

Conclusion

Notre travail de recherche a permis de montrer comment la prise en compte des emplois du temps dans la définition des modes de vie des ménages apporte à la modélisation prospective des éléments supplémentaires importants par rapport à la simple analyse des évolutions de dépenses. Le modèle macroéconomique développé permet ainsi pour la première fois de **simuler l'impact économique et énergétique de changements de comportement à long-terme qui soient cohérents avec les variations d'emploi du temps** en plus d'être cohérents avec les variations de dépenses monétaires induites par ces changements de comportement, en tenant compte également des éventuels **effets rebond par rapport au temps**.

L'analyse se fonde sur le **dialogue entre une base de données détaillée décrivant temps, dépenses et consommations d'énergie des ménages français et un modèle macro-économique** qui permet d'observer les impacts directs, indirects et macro-économiques de changements de modes de vie. Le dialogue entre la base micro-économique et le modèle se fonde sur un **processus de repondération qui présente une grande flexibilité**, puisqu'il est aisé de modifier les contraintes en rajoutant par exemple des contraintes sur des nouvelles variables. Le nombre et la variété de variables présentes dans la base fournissent un niveau de détail tel qu'**il est possible de modéliser une grande variété de changements dans les modes de consommation**. En effet, les changements de modes de vie considérés impliquent des variations dans les dépenses monétaires et les emplois du temps. Ces variations sont prises en compte par une repondération en faveur des ménages de la base de données microéconomique dont les dépenses et emplois du temps sont compatibles avec ces changements. La repondération va alors déterminer des variations concomitantes des temps pour les autres activités et des dépenses pour les autres biens et services consommés, permettant par là-même de se baser sur des arbitrages observés, réellement opérés par les ménages. Cette méthode innovante permet d'apporter une **cohérence supplémentaire en matière de choix d'équipements, de localisations et de préférences individuelles implicites**.

Dans une application de la méthodologie proposée, nous avons considéré trois grandes catégories de changements de mode de vie : **l'évolution des habitudes en matière d'alimentation**, le **développement des services en ligne** et la **consommation collaborative**. Pour chacune nous avons modélisé un exemple caractéristique, avec un retour vers le faire-soi-même pour l'alimentation, le développement des achats en ligne

et la diffusion du covoiturage et de l'autopartage. Les scénarios analysés se fondent sur des hypothèses assez conservatrices concernant les changements de modes de vie, qui ne demandent pas de rupture radicale dans les comportements des ménages ou la structure de la société. Les résultats montrent que les modifications de mode de vie considérées engendrent des réductions dans les consommations d'énergie et les émissions de CO₂ des ménages et des secteurs productifs, avec notamment des réductions dans les émissions de CO₂ totales qui sont de 0,3% pour le scénario sur l'alimentation, de 1,5% pour le scénario sur les achats en ligne et de 2,3% pour le scénario sur la mobilité partagée. Ces résultats confirment le potentiel de contribution des changements des modes de vie à la réduction des émissions. Pour obtenir des réductions de plus grande ampleur, il serait nécessaire d'une part de combiner un certain nombre de changements de modes de vie, et d'autre part de considérer des modifications des modes de vie plus radicales. **L'intérêt de poursuivre les exercices de modélisation dans ce sens, avec la prise en compte d'un plus large éventail de modifications de modes de vie et de leurs complémentarités,** est donc évident.

Nous avons rencontré au cours des analyses une limite majeure, commune à une grande partie des exercices de modélisation prospective, qui est une conséquence du manque de désagrégation prix/quantités dans les statistiques micro-économiques concernant les consommations des ménages. Certains secteurs touchés par les changements de modes de vie considérés, notamment le secteur restauration, peuvent présenter des prix très différents pour le même type de bien (par exemple, un repas au restaurant) pour des ménages différents. La prise en compte de ces écarts de prix est nécessaire pour représenter de manière juste les variations d'activité en volume des secteurs productifs, qui ont un impact sur les consommations d'énergie et les émissions associées. Une perspective d'amélioration de cette étude consiste donc en la prise en compte de l'impact de ces variations sur les prix moyens des consommations des ménages modélisés dans le modèle macro.

Une autre limite de notre cadre de modélisation concerne le processus de repondération à partir de la base de données micro qui se fonde sur des enquêtes existantes. Plus on impose des mutations radicales dans les modes de vie, plus le nombre de ménages de la base compatibles avec ces mutations se réduit. L'algorithme va donc devoir surpondérer ces ménages pour satisfaire les contraintes, avec le risque d'accentuer des éventuelles dimensions aberrantes du comportement de ces ménages. En conséquence, pour une analyse de comportements très en rupture avec les modes de vie actuels, le risque de biais est élevé. Il est même possible, à la limite, que l'algorithme ne trouve pas de solution de repondération satisfaisant simultanément toutes les contraintes. Des enquêtes avec un plus grand nombre de répondants permettraient de réduire ce risque. En revanche, pour une modélisation de scénarios de rupture avec la base de données micro disponible, une scénarisation de toutes les variations d'emploi du temps et de dépenses semble plus adaptée que le recours à la repondération.

Nos analyses sont réalisées dans un cadre de statique comparative entre 2010 et 2050. Une extension intéressante de l'étude serait d'**analyser des trajectoires de**

mise en œuvre sur la période considérée des changements de mode de vie proposés.

Enfin, nous sommes partis d'hypothèses exogènes concernant les changements de modes de vie, en répondant à la question « que se passerait-il si...? », mais il faudra **s'interroger sur les politiques publiques susceptibles de susciter ces changements**, ainsi que sur leur traduction dans notre outil numérique afin d'en prendre en compte les conséquences macroéconomiques.

Annexe A : construction de la base micro

TABLEAU A.1 – Correspondance entre activités et catégories EDT

Activité	Catégorie EDT (codes)
Achats et démarches	123, 132, 351, 352, 361
Assistance	384, 385, 411 à 439
Loisirs (basse int. én.)	381, 512, 521, 523, 524, 616, 631 à 633, 641, 661, 662, 664, 667 à 669
Loisirs (haute int. én.)	522, 634 à 638, 665, 671, 673, 674, 678
Repas au domicile	141, 144
Repas hors domicile	143, 146
Temps personnel	121, 122, 124, 131, 133, 151
Trajets domicile-travail	811
Trajets : autres	810, 812, 813, 819
Travail et études	142, 145, 211 à 272
Travaux domestiques : repas	311 à 322
Travaux domestiques : maison	323, 324, 341 à 344, 371 à 374, 382, 383, 399, 672, 911, 999
Travaux domestiques : vêtements	331 à 335
Sommeil	111 à 113
Sport et sorties	510, 511, 513, 514, 531 à 615, 617 à 627, 651 à 658, 663

TABLEAU A.2 – Variables explicatives et leur modalités

Nom variable	Type	Description	Modalité de référence
Décile 2	Catég.	Décile de revenu par UC : 2	1
Décile 3	Catég.	Décile de revenu par UC : 3	1
Décile 4	Catég.	Décile de revenu par UC : 4	1
Décile 5	Catég.	Décile de revenu par UC : 5	1
Décile 6	Catég.	Décile de revenu par UC : 6	1
Décile 7	Catég.	Décile de revenu par UC : 7	1
Décile 8	Catég.	Décile de revenu par UC : 8	1
Décile 9	Catég.	Décile de revenu par UC : 9	1
Décile 10	Catég.	Décile de revenu par UC : 10	1
age_PC1	Continu	Âge 1ère composante ACP	
age_PC2	Continu	Âge 2ème composante ACP	
age_PC3	Continu	Âge 3ème composante ACP	
age_PC4	Continu	Âge 4ème composante ACP	
age_PC5	Continu	Âge 5ème composante ACP	
sexe F	Catég.	Sexe : femme	Homme
Nationalité 2	Catég.	Française par naturalisation	Française de naissance
Nationalité 3	Catég.	Union Européenne	Française de naissance
Nationalité 5	Catég.	Algérienne, marocaine, tunisienne	Française de naissance
Nationalité 6	Catég.	Pays d’Afrique sauf Maghreb	Française de naissance
Nationalité 7	Catég.	Autre ou apatride	Française de naissance
Type de journée 2	Catég.	Semi-travaillée	Journée travaillée
Type de journée 3	Catég.	Non travaillée	Journée travaillée
Type de journée 4	Catég.	Maladie	Journée travaillée
Type de journée 5	Catég.	Autre	Journée travaillée
csp_PC1	Continu	CSP 1ère composante ACP	
csp_PC2	Continu	CSP 2ème composante ACP	
csp_PC3	Continu	CSP 3ème composante ACP	
csp_PC4	Continu	CSP 4ème composante ACP	
csp_PC5	Continu	CSP 5ème composante ACP	
csp_PC6	Continu	CSP 6ème composante ACP	
csp_PC7	Continu	CSP 7ème composante ACP	
csp_PC8	Continu	CSP 8ème composante ACP	
csp_PC9	Continu	CSP 9ème composante ACP	
csp_PC10	Continu	CSP 10ème composante ACP	
csp_PC11	Continu	CSP 11ème composante ACP	
csp_PC12	Continu	CSP 12ème composante ACP	
Type ménage 2	Catég.	Célibataire ≤ 65 ans	Enfant
Type ménage 3	Catég.	Couple et ménage complexe sans enfants (PR ≤ 65 ans)	Enfant
Type ménage 4	Catég.	Famille mono-parentale	Enfant
Type ménage 5	Catég.	Couple et mén. compl. avec enfants	Enfant
Type ménage 6	Catég.	Couple et mén. compl. sans enfants (PR > 65 ans)	Enfant
Type ménage 7	Catég.	Célibataire > 65 ans	Enfant
Taille unité urb. 1	Catég.	$< 5\,000$ habitants	Commune rurale
Taille unité urb. 2	Catég.	De $5\,000$ à $9\,999$ hab.	Commune rurale
Taille unité urb. 3	Catég.	De $10\,000$ à $19\,999$ hab.	Commune rurale
Taille unité urb. 4	Catég.	De $20\,000$ à $49\,999$ hab.	Commune rurale
Taille unité urb. 5	Catég.	De $50\,000$ à $99\,999$ hab.	Commune rurale
Taille unité urb. 6	Catég.	De $100\,000$ à $199\,999$ hab.	Commune rurale
Taille unité urb. 7	Catég.	De $200\,000$ à $1\,999\,999$ hab.	Commune rurale
Taille unité urb. 8	Catég.	Unité urbaine de Paris	Commune rurale

zau 112	Catég.	Couronne des grands pôles	Grands pôles
zau 120	Catég.	Multipolarité des grands pôles	Grands pôles
zau 211	Catég.	Moyens pôles	Grands pôles
zau 212	Catég.	Couronne des moyens pôles	Grands pôles
zau 221	Catég.	Petits pôles urbains	Grands pôles
zau 222	Catég.	Couronne des petits pôles	Grands pôles
zau 300	Catég.	Autre multipolarisé	Grands pôles
zau 400	Catég.	Communes isolées hors influence des pôles	Grands pôles
zeat 1	Catég.	Région parisienne	DOM
zeat 2	Catég.	Bassin parisien	DOM
zeat 3	Catég.	Nord	DOM
zeat 4	Catég.	Est	DOM
zeat 5	Catég.	Ouest	DOM
zeat 7	Catég.	Sud ouest	DOM
zeat 8	Catég.	Centre est	DOM
zeat 9	Catég.	Méditerranée	DOM
Statut d'occup. 2	Catég.	Propriétaire non accédant	Accédant à la propriété
Statut d'occup. 3	Catég.	Usufruitier	Accédant à la propriété
Statut d'occup. 4	Catég.	Locataire ou sous-locataire	Accédant à la propriété
Statut d'occup. 5	Catég.	Logé gratuitement	Accédant à la propriété
Surface	Continu	Surface du logement en m2	
Type vois. 2	Catég.	Type d'habitat au voisinage : maisons	Maisons dispersées
Type vois. 3	Catég.	Immeubles en ville (autres que cité ou grand ensemble)	Maisons dispersées
Type vois. 4	Catég.	Immeubles en cité ou grand ensemble	Maisons dispersées
Type vois. 5	Catég.	Habitat mixte : à la fois immeubles et maisons	Maisons dispersées
Type log. 2	Catég.	Maison de ville mitoyenne, jumelée, en bande	Maison indépendante
Type log. 3	Catég.	Appartement dans un immeuble de deux logements	Maison indépendante
Type log. 4	Catég.	Appartement dans un immeuble de 3 à 9 logements	Maison indépendante
Type log. 5	Catég.	Appartement dans un immeuble de 10 logements ou plus	Maison indépendante
Disp. télévision	Dummy	Dispose de télévision	
Disp. ordinateur	Dummy	Dispose d'un ordinateur à sa résidence principale	
Disp. Internet	Dummy	Dispose d'Internet (haut ou bas débit)	
Disp. tél. fixe	Dummy	Dispose d'un téléphone fixe	
Disp. tél. portable	Dummy	Dispose de téléphone portable	
Disp. micro-ondes	Dummy	Dispose d'un micro-ondes	
Disp. lave-vaisselle	Dummy	Dispose de lave-vaisselle	
Disp. lave-linge	Dummy	Dispose de lave-linge	
Disp. 2 roues mot.	Dummy	Dispose d'un 2-roues moteur	
Disp. Voiture	Dummy	Dispose d'une voiture à usage privé	
Disp. Jardin	Dummy	Dispose de jardin d'agrément	
Poss. Chat	Dummy	Possède chat	
Poss. Chien	Dummy	Possède chien	
Poss. autres anim.	Dummy	Possède d'autres animaux	
Aide ménage	Dummy	A recours à de l'aide rémunérée pour les tâches ménagères	

TABLEAU A.3 – Modalités de la variable classe d'âge

Modalité	Description
0	Âge 0-14
15	Âge 15-29
30	Âge 30-39
40	Âge 40-49
50	Âge 50-59
60	Âge > 60

TABLEAU A.4 – Agrégation de la variable catégorie socio-professionnelle en 13 modalités (recodée à partir de la CSP en 24 modalités de l'INSEE)

Modalité	Description
1	Agriculteurs
2	Artisans, commerçants, chefs d'entreprise
3	Cadres
4	Professions intermédiaires
5	Employés
6	Ouvriers
7	Anciens agriculteurs exploitants
8	Anciens artisans, commerçants, chefs d'entreprise
9	Anciens cadres et professions intermédiaires
10	Anciens employés et ouvriers
11	Personnes au foyer et autres inactifs sauf chômeurs
12	Chômeurs
13	Étudiants et élèves

TABLEAU A.5 – Résultats des régressions sur les usages du temps pour les activités achats et démarches, assistance, loisirs (basse intensité énergétique), loisirs (haute intensité énergétique), repas au domicile

	<i>Variable expliquée (temps, en minutes par jour) :</i>				
	Achats et d.	Assistance	Loisirs (b.)	Loisirs(h.)	Repas dom.
Decile 2	5,966***	-3,164*	4,610*	7,136*	-4,684**
Decile 3	1,168	4,190**	16,961***	1,173	-7,771***
Decile 4	0,717	0,468	12,027***	-4,198	-5,312***
Decile 5	6,174***	0,871	13,116***	-2,322	-10,351***
Decile 6	3,502**	1,427	13,058***	-3,813	-11,413***
Decile 7	5,759***	-0,174	18,260***	-14,908***	-11,956***
Decile 8	1,456	1,479	15,355***	-2,702	-10,282***
Decile 9	4,293**	0,923	18,208***	-15,718***	-14,081***
Decile 10	7,142***	2,997	12,948***	-22,852***	-16,166***
Âge CP 1	0,137	-6,204***	8,309***	-3,998**	6,560***
Âge CP 2	-0,754**	4,725***	-3,161***	2,000**	-3,922***
Âge CP 3	1,264***	-8,495***	1,601***	1,237	2,733***
Âge CP 4	0,668*	-4,282***	3,567***	5,278***	5,515***
Âge CP 5	0,865	-15,683***	13,536***	13,504***	-3,303
Sexe F	5,527***	12,082***	-0,203	-31,289***	-0,052
Nation. 2	-0,954	-1,456	-4,364	6,847	-0,030
Nation. 3	-6,708***	0,105	7,893**	4,725	0,127
Nation. 5	7,788**	-17,669***	-3,885	-14,627*	2,315
Nation. 6	-9,665**	1,586	19,211**	1,887	20,719***
Nation. 7	-11,555***	-8,921***	13,664***	-35,064***	3,352
Type journée 2	17,258***	8,117***	23,475***	12,172**	15,669***
Type journée 3	22,895***	16,824***	36,778***	71,757***	27,829***
Type journée 4	70,900***	24,446***	39,176***	78,433***	28,217***
Type journée 5	17,575***	17,466***	16,293***	54,948***	20,597***
CSP CP 1	-1,672***	-1,933***	-6,003***	-11,716***	-2,460***
CSP CP 2	1,657***	0,700	4,113***	9,735***	0,929
CSP CP 3	0,162	-0,195	1,680***	3,286***	0,965**
CSP CP 4	-2,235***	-1,921***	-8,956***	-14,252***	-2,247***
CSP CP 5	-0,633	-1,982***	-2,609***	0,430	0,184
CSP CP 6	-0,063	3,591***	5,562***	6,927***	1,788***
CSP CP 7	-1,685***	-2,857***	0,586	-3,887***	-1,153**
CSP CP 8	-3,733***	-2,345***	0,846	-8,732***	-1,646***
CSP CP 9	0,081	-0,380	1,568**	-2,786***	0,282
CSP CP 10	-0,607	-2,059***	-4,651***	-6,095***	-1,034**
CSP CP 11	0,446	-0,138	3,326***	-0,524	0,781
CSP CP 12	-2,384	12,611***	12,221**	33,151***	-22,530***
Type ménage 2	2,885	14,738***	7,337**	-39,048***	-7,502***
Type ménage 3	-0,639	19,360***	2,598	-29,201***	12,529***
Type ménage 4	1,487	40,186***	0,310	-60,850***	-3,657
Type ménage 5	-1,983	54,221***	1,185	-58,527***	11,523***
Type ménage 6	-4,084*	18,720***	15,415***	-25,523***	15,855***
Type ménage 7	-6,457**	13,697***	24,821***	-20,256***	-11,060***
Taille unité urb. 1	1,345	-1,800	0,647	-1,577	1,243
Taille unité urb. 2	14,949***	-0,191	-4,272	-6,328	7,237***
Taille unité urb. 3	17,733***	-2,398	-1,310	8,226	14,299***
Taille unité urb. 4	14,404***	2,505	-8,823**	35,810***	-1,415
Taille unité urb. 5	14,951***	2,532	6,778	40,446***	0,896
Taille unité urb. 6	14,375***	4,128	-2,285	30,681***	-3,314
Taille unité urb. 7	12,991***	-0,491	-1,150	29,525***	-1,429

Tableau A.5 - suite

	<i>Variable expliquée (temps, en minutes par jour) :</i>				
	Achats et d.	Assistance	Loisirs (b.)	Loisirs(h.)	Repas dom.
Taille unité urb. 8	15,570***	2,869	5,581	26,588***	0,281
ZAU 112	9,206***	2,193	3,922	20,809***	-4,290
ZAU 120	10,945***	5,034	12,584**	16,696**	11,223***
ZAU 211	1,361	8,081***	-3,479	21,313***	-8,755***
ZAU 212	9,101	-3,084	-0,778	21,146	4,401
ZAU 221	-2,025	2,637	4,953	16,308**	-0,752
ZAU 222	-2,175	-11,929*	-4,078	30,929**	43,156***
ZAU 300	11,947***	2,177	5,480	8,591	3,736
ZAU 400	8,907***	6,297*	2,837	13,709*	4,994
ZEAT 1	0,113	4,806	-55,214***	-2,309	15,863***
ZEAT 2	1,248	4,153	-45,452***	6,526	16,623***
ZEAT 3	2,742	12,522***	-41,382***	-4,745	7,460**
ZEAT 4	1,933	9,906***	-44,718***	6,409	5,731
ZEAT 5	0,593	3,810	-39,166***	4,053	13,047***
ZEAT 7	3,687	6,897**	-34,430***	8,011	9,771***
ZEAT 8	-1,912	9,132***	-35,503***	-5,980	10,013***
ZEAT 9	2,142	7,701**	-34,484***	-4,602	17,415***
statut d'occ. 2	-3,076***	-4,711***	-1,173	-0,923	-0,258
statut d'occ. 3	-4,043	-3,359	6,646	15,016*	-3,345
statut d'occ. 4	-5,854***	1,415	2,744	4,772*	2,103*
statut d'occ. 5	-6,112**	-11,581***	8,112**	7,394	6,344**
Surface	0,039***	0,008	-0,024	-0,071***	-0,002
Type vois. 2	0,123	2,184**	2,960*	5,349**	-4,165***
Type vois. 3	-1,272	3,860	-1,298	11,757**	-1,578
Type vois. 4	0,538	5,901**	4,307	18,322***	0,540
Type vois. 5	-7,524***	2,215	1,280	2,683	-1,525
Type log. 2	0,227	-0,425	3,910**	-5,424**	1,777
Type log. 3	1,259	6,470*	-2,424	-14,255*	-1,136
Type log. 4	4,322*	-8,167***	3,826	2,082	-2,205
Type log. 5	7,470***	-2,147	2,732	-5,301	-3,104
Disp. télévision	1,775	3,753*	-32,745***	57,963***	3,432
Disp. ordinateur	-0,033	-2,965*	-1,327	-10,975***	-5,585***
Disp. Internet	3,324**	-1,670	-1,454	23,371***	3,614**
Disp. tél. fixe	-0,720	-2,384	1,893	4,553	4,604***
Disp. tél. portable	4,523***	3,165**	-14,086***	-6,892**	-5,008***
Disp. micro-ondes	1,087	0,711	-2,157	5,611**	-0,292
Disp. lave-vaisselle	-0,586	-0,049	-0,233	-11,212***	4,457***
Disp. lave-linge	-3,993**	5,022**	13,776***	10,999**	2,332
Disp. 2 roues mot.	4,287***	-1,396	-3,085*	-0,291	-3,521***
Disp. voiture	1,576	0,810	-10,760***	-11,415***	-1,743
Disp. jardin	-0,226	-0,807	0,548	-8,783***	7,613***
Poss. chat	-0,205	-0,960	5,358***	4,681**	-0,839
Poss. chien	-2,924***	11,177***	-4,336***	3,902*	3,550***
Poss. autres anim.	1,669*	3,947***	-1,746	-3,167	1,425
Aide ménage	-3,741***	1,860	25,094***	-0,204	1,861
Constante	-14,173**	-38,444***	123,044***	95,978***	69,209***
Observations	23352	23352	23352	23352	23352
R ²	0,077	0,200	0,160	0,164	0,167
Adjusted R ²	0,073	0,197	0,157	0,160	0,164
F Statistic (df = 94 ; 23257)	20,695***	61,934***	47,230***	48,434***	49,640***

Note :

*p<0,1; **p<0,05; ***p<0,01

TABLEAU A.6 – Résultats des régressions sur les usages du temps pour les activités repas hors domicile, temps personnels, trajets domicile/travail, autres trajets, travail/études

	<i>Variable expliquée :</i>				
	Repas h.	T. pers.	Traj. d./t.	Traj. aut.	Trav./ét.
Decile 2	0,841	2,800**	-2,991**	2,843	5,569
Decile 3	4,274**	5,722***	-0,898	8,919***	0,318
Decile 4	1,655	6,803***	-3,116***	3,301	8,712**
Decile 5	5,078***	3,873***	-1,117	8,009***	6,834*
Decile 6	4,850**	4,589***	-2,012*	7,257***	13,968***
Decile 7	6,462***	8,363***	-4,506***	7,263***	17,890***
Decile 8	7,058***	4,791***	1,735	1,746	14,234***
Decile 9	4,470**	5,436***	-1,190	4,571*	18,741***
Decile 10	9,960***	3,234**	0,471	10,639***	23,741***
Âge CP 1	-3,469***	1,498***	-1,136**	-0,295	-8,797***
Âge CP 2	2,709***	-1,696***	0,759***	0,539	1,695*
Âge CP 3	-0,144	1,185***	-0,029	0,807*	-0,030
Âge CP 4	-4,379***	1,005***	-0,718**	-0,794	-7,888***
Âge CP 5	-5,628**	5,728***	3,940***	10,794***	-8,576*
Sexe F	-3,849***	8,652***	-2,206***	0,114	-20,622***
Nation. 2	-1,778	-1,757	-0,396	2,818	-0,906
Nation. 3	5,173*	-4,782***	-0,764	-0,893	-26,037***
Nation. 5	-3,530	-0,673	5,534**	14,201***	-7,754
Nation. 6	-13,701**	6,880*	35,903***	-6,350	34,345***
Nation. 7	1,498	1,205	17,564***	-3,346	29,724***
Type journée 2	4,865**	5,620***	-20,125***	26,945***	-208,275***
Type journée 3	27,296***	3,201***	-61,904***	54,775***	-450,025***
Type journée 4	9,675***	1,950	-60,078***	28,337***	-439,110***
Type journée 5	6,153***	2,455**	-44,690***	31,359***	-267,006***
CSP CP 1	-0,695	-0,113	3,038***	0,190	34,493***
CSP CP 2	0,562	-0,225	-2,981***	1,834***	-28,812***
CSP CP 3	-2,084***	0,037	-1,518***	-0,545	-7,327***
CSP CP 4	0,664	-1,360***	4,740***	-3,728***	43,480***
CSP CP 5	-1,165**	-0,956***	1,452***	-3,118***	14,257***
CSP CP 6	0,252	0,245	-3,521***	1,079*	-29,719***
CSP CP 7	-0,242	-0,225	-0,510*	2,046***	8,078***
CSP CP 8	-1,918***	0,007	2,827***	-2,165***	32,915***
CSP CP 9	1,646***	-0,461*	-0,804***	0,967*	1,841**
CSP CP 10	-0,165	0,196	1,531***	-2,698***	25,405***
CSP CP 11	0,606	-0,840**	-0,718**	1,184**	-10,480***
CSP CP 12	4,872	3,814	16,326***	2,208	-91,794***
Type ménage 2	17,021***	-3,901***	-3,371**	8,238***	15,156***
Type ménage 3	3,102	-5,951***	-2,841**	2,353	-0,986
Type ménage 4	5,995**	-5,168***	0,490	16,389***	5,110
Type ménage 5	-0,667	-9,610***	-2,747**	6,746***	2,969
Type ménage 6	2,099	-0,217	-1,928	-2,952	3,292
Type ménage 7	9,436***	-1,367	-0,746	0,846	9,711
Taille unité urb. 1	5,834***	-2,530**	-4,627***	4,146*	-9,541**
Taille unité urb. 2	7,048***	-0,178	-1,033	9,105***	-13,802**
Taille unité urb. 3	-5,963**	-2,757	3,405**	-0,469	-3,420
Taille unité urb. 4	-8,396***	3,771**	-2,542	-3,187	-2,786
Taille unité urb. 5	-7,932**	-0,407	0,068	-8,306**	-12,097*
Taille unité urb. 6	-4,822	-0,765	-3,386	-2,465	-19,243**
Taille unité urb. 7	-6,738**	3,023	-0,004	-2,910	-5,706
Taille unité urb. 8	-13,340***	2,373	9,292***	-12,500***	-4,907
ZAU 112	-8,875***	5,316***	1,599	-5,941*	-8,343

Tableau A.6 - suite

	<i>Variable expliquée :</i>				
	Repas h.	T. pers.	Traj. d./t.	Traj. aut.	Trav./ét.
ZAU 120	-6,901**	1,526	2,081	-16,234***	-12,653*
ZAU 211	-3,287	0,198	-2,454	3,797	-22,683***
ZAU 212	-14,442**	1,089	-3,191	-4,066	36,427**
ZAU 221	-3,592	10,952***	-0,651	-2,618	-18,760**
ZAU 222	-17,581**	-3,848	-0,611	-32,161***	-24,028
ZAU 300	-5,340	5,895**	0,823	-4,682	-25,698***
ZAU 400	-4,833	2,541	-3,871*	-11,415***	-3,066
ZEAT 1	9,343**	-15,701***	-5,674**	16,804***	-2,000
ZEAT 2	-0,525	-19,345***	-1,730	-2,869	7,357
ZEAT 3	-1,471	-13,040***	-3,682*	-11,294***	9,444
ZEAT 4	-0,433	-16,748***	-2,406	-7,708*	13,439*
ZEAT 5	1,853	-23,325***	-5,983***	-7,191*	11,007
ZEAT 7	1,795	-18,872***	-3,745*	-2,359	-0,461
ZEAT 8	1,624	-19,754***	0,036	-5,497	15,364**
ZEAT 9	1,901	-13,376***	-2,128	-9,678**	5,469
statut d'occ. 2	1,774	-3,809***	-0,520	-0,973	-8,033***
statut d'occ. 3	-5,489	-6,620**	-3,738	-9,443**	-11,469
statut d'occ. 4	0,922	0,796	-0,661	-1,406	-7,950***
statut d'occ. 5	-0,853	2,673	-5,405***	-11,635***	-6,972
Surface	-0,0002	0,004	0,017**	0,007	0,006
Type vois. 2	-1,867	-0,245	-0,873	-2,305*	0,269
Type vois. 3	-1,629	-1,424	-3,496**	-3,434	1,221
Type vois. 4	-8,037***	-3,348*	-2,594	-5,017	-3,081
Type vois. 5	0,771	0,963	0,041	-4,827	-1,492
Type log. 2	0,781	1,699**	-0,439	1,367	-1,143
Type log. 3	-2,484	3,090	-3,899*	10,798**	3,170
Type log. 4	1,259	3,119*	-2,120	11,425***	-5,868
Type log. 5	9,247***	9,726***	-2,986*	10,952***	-5,280
Disp. télévision	-4,764*	3,300**	-1,212	-8,905***	-11,929**
Disp. ordinateur	-0,894	2,176*	-2,824**	10,606***	1,276
Disp. Internet	-0,177	-5,086***	1,600	-6,582***	8,788**
Disp. tél. fixe	0,816	1,730	0,568	1,664	-2,660
Disp. tél. portable	7,076***	0,481	0,550	12,987***	-3,709
Disp. micro-ondes	1,710	-1,190	-0,467	0,688	-2,602
Disp. lave-vaisselle	4,548***	-0,324	0,786	3,434***	5,022**
Disp. lave-linge	-8,162***	0,658	0,500	-3,980	-2,644
Disp. 2 roues mot.	4,130***	-1,087	-0,207	-0,860	-4,828**
Disp. voiture	1,241	0,543	-1,469*	9,162***	-2,378
Disp. jardin	-0,356	5,288***	-1,250	0,769	-0,426
Poss. chat	3,754***	-1,224**	-1,522***	-0,359	-1,698
Poss. chien	-1,596*	0,053	-1,793***	-4,627***	-0,692
Poss. autres anim.	-2,652***	-0,789	-2,861***	1,263	-9,823***
Aide ménage	3,101**	2,588***	-3,219***	-3,227*	1,496
Constante	14,724**	55,218***	67,827***	10,425	415,996***
Observations	23352	23352	23352	23352	23352
R ²	0,069	0,060	0,391	0,110	0,743
Adjusted R ²	0,065	0,056	0,389	0,107	0,742
F Statistic (df = 94 ; 23257)	18,277***	15,839***	159,151***	30,648***	713,986***

Note :

*p<0,1 ; **p<0,05 ; ***p<0,01

TABLEAU A.7 – Résultats des régressions sur les usages du temps pour les activités travaux domestiques alimentation, travaux domestiques maison, travaux domestiques vêtements, sommeil, sport et sorties

	<i>Variable expliquée :</i>				
	Tr. d. alim.	Tr. d. maison	Tr. d. vet.	Sommeil	Sport
Decile 2	-4,082**	-2,623	-1,028	2,443	-13,635***
Decile 3	-5,085***	-14,665***	-0,452	0,443	-14,298***
Decile 4	-3,800**	-10,390***	-0,310	-1,741	-4,816
Decile 5	-5,297***	-8,453***	-1,041	-1,439	-13,935***
Decile 6	-1,525	-12,604***	0,553	-3,345	-14,492***
Decile 7	-2,655	-12,175***	-1,091	-5,512	-11,019***
Decile 8	-3,306*	-14,167***	0,675	0,535	-18,608***
Decile 9	-4,181**	-10,063***	0,851	-2,033	-10,225***
Decile 10	-6,516***	-12,335***	0,262	-2,726	-10,801***
Âge CP 1	1,839**	5,786***	1,574***	-2,930**	1,128
Âge CP 2	-1,689***	-1,467**	-0,735***	2,562***	-1,565**
Âge CP 3	2,128**	0,529	0,737***	-3,965***	0,443
Âge CP 4	3,660***	5,925***	1,886***	-4,636***	-4,809***
Âge CP 5	11,504***	21,229***	8,302***	-64,924***	8,714**
Sexe F	39,043***	-6,906***	17,224***	-1,414	-16,100***
Nation. 2	0,568	-2,786	-0,567	6,677*	-1,916
Nation. 3	-0,594	7,389*	0,987	10,750**	2,628
Nation. 5	19,523***	-18,990***	-3,012	8,693	12,087**
Nation. 6	-4,398	-12,153	-1,521	-54,800***	-17,942*
Nation. 7	0,149	-18,804***	-7,169***	-0,604	18,307***
Type journée 2	13,236***	39,003***	4,220***	12,867***	44,953***
Type journée 3	21,560***	53,296***	9,114***	85,000***	81,605***
Type journée 4	23,103***	28,148***	12,574***	133,509***	20,721***
Type journée 5	17,549***	45,755***	2,977***	45,498***	33,071***
CSP CP 1	-5,448***	-1,125	-0,261	-3,245***	-3,049***
CSP CP 2	4,130***	0,475	0,151	3,495***	4,236***
CSP CP 3	0,867**	2,065***	1,106***	3,011***	-1,508**
CSP CP 4	-3,062***	-4,253***	0,358	-1,292	-5,937***
CSP CP 5	-0,328	-0,589	0,203	0,306	-5,453***
CSP CP 6	5,044***	1,244	0,894***	6,366***	0,310
CSP CP 7	-2,319***	-0,845	0,884***	2,270***	-0,142
CSP CP 8	-4,272***	-5,046***	-0,755***	0,540	-6,524***
CSP CP 9	-1,002***	0,259	-0,803***	-0,740	0,331
CSP CP 10	-1,175**	-3,373***	-0,701**	-0,282	-4,291***
CSP CP 11	0,484	0,897	-0,567**	4,681***	0,860
CSP CP 12	6,052*	30,015***	1,825	-0,820	-5,568
Type ménage 2	9,901***	29,237***	1,342	-30,066***	-21,968***
Type ménage 3	14,936***	36,143***	1,368	-14,883***	-37,886***
Type ménage 4	20,632***	33,863***	0,947	-21,273***	-34,462***
Type ménage 5	18,161***	34,893***	3,091***	-18,690***	-40,563***
Type ménage 6	13,793***	24,722***	2,922**	-19,234***	-42,881***
Type ménage 7	5,312**	21,750***	3,338**	-11,646**	-37,382***
Taille unité urb. 1	-0,137	4,303	-0,704	-6,610*	10,008***
Taille unité urb. 2	-3,396	-5,765	-2,203	-5,200	4,030
Taille unité urb. 3	0,994	-11,073***	-4,251***	-2,450	-10,566**
Taille unité urb. 4	0,451	0,687	-6,133***	-9,877*	-14,470***
Taille unité urb. 5	-0,604	-0,090	-3,959**	-8,660	-23,617***
Taille unité urb. 6	9,098***	0,246	-1,188	1,712	-22,773***
Taille unité urb. 7	2,362	-0,940	-4,906***	3,144	-26,770***

Tableau A.7 - suite

	<i>Variable expliquée :</i>				
	Tr. d. alim.	Tr. d. maison	Tr. d. vet.	Sommeil	Sport
Taille unité urb. 8	6,108*	0,878	-4,106**	-8,026	-26,661***
ZAU 112	3,125	3,826	-2,449	-0,958	-19,140***
ZAU 120	3,731	8,609	-5,216***	-1,556	-29,869***
ZAU 211	2,222	1,752	-2,811	16,426***	-11,682**
ZAU 212	5,183	-6,760	-6,812*	6,460	-44,675***
ZAU 221	7,554**	3,455	0,185	-0,722	-16,922***
ZAU 222	-6,854	9,581	-10,975***	37,669***	-7,095
ZAU 300	2,676	11,884**	-4,658**	-8,527	-4,305
ZAU 400	5,873*	5,244	-3,085	1,987	-26,119***
ZEAT 1	7,960**	7,530	-1,682	41,197***	-21,037***
ZEAT 2	13,490***	13,490**	1,549	28,346***	-22,861***
ZEAT 3	22,524***	5,114	1,191	34,240***	-19,623***
ZEAT 4	13,902***	16,354***	1,772	14,857**	-12,291**
ZEAT 5	9,330***	8,444	-0,288	35,860***	-12,043**
ZEAT 7	10,466***	14,852***	0,741	23,198***	-19,553***
ZEAT 8	13,359***	9,073*	-1,434	22,317***	-10,837*
ZEAT 9	12,652***	12,623**	0,138	16,378***	-12,150**
statut d'occ. 2	-0,906	10,246***	-1,520**	13,940***	-0,058
statut d'occ. 3	-0,346	14,922**	1,813	12,988*	-3,534
statut d'occ. 4	-0,518	2,027	-0,235	8,823***	-6,979***
statut d'occ. 5	4,503*	9,205**	-1,570	-1,374	7,271
Surface	0,015	0,043**	0,010*	-0,008	-0,043**
Type vois. 2	0,089	-6,534***	0,002	3,265	1,747
Type vois. 3	-5,496**	-9,572**	-2,738*	2,519	12,580***
Type vois. 4	-3,574	-12,358**	-2,112	-0,459	10,975**
Type vois. 5	-4,526*	-5,385	0,281	12,621**	4,425
Type log. 2	-2,673***	-5,280***	-0,700	2,682	3,643*
Type log. 3	5,892*	-17,039***	-1,816	21,186***	-8,812
Type log. 4	3,233	-18,283***	2,415	9,433*	-4,472
Type log. 5	-3,701	-16,606***	1,941	9,105*	-12,048**
Disp. télévision	0,193	-12,023***	-1,116	16,215***	-13,935***
Disp. ordinateur	-1,913	-2,011	0,696	2,037	11,733***
Disp. Internet	-1,921	-4,144	-0,299	-11,697***	-7,667**
Disp. tél. fixe	-0,230	-1,576	1,196	-3,436	-6,019**
Disp. tél. portable	-4,236***	7,657***	0,934	-15,585***	12,143***
Disp. micro-ondes	-4,134***	1,650	1,356**	-3,026	1,055
Disp. lave-vaisselle	-4,149***	2,748*	0,368	-4,556***	-0,253
Disp. lave-linge	0,041	1,671	-3,900***	0,927	-13,245***
Disp. 2 roues mot.	-1,547	1,339	0,140	0,320	6,608***
Disp. voiture	6,080***	5,505**	2,429***	-14,110***	14,531***
Disp. jardin	-2,215*	2,735	1,132	9,025***	-13,046***
Poss. chat	-2,551***	1,425	-1,030**	-2,924*	-1,906
Poss. chien	-1,222	0,944	-0,766	1,754	-3,425**
Poss. autres anim.	-0,358	3,030*	0,633	6,361***	3,068*
Aide ménage	-5,667***	-19,899***	-1,406*	7,448***	-6,085**
Constante	8,273	21,863**	2,464	467,437***	140,159***
Observations	23352	23352	23352	23352	23352
R ²	0,285	0,166	0,109	0,177	0,126
Adjusted R ²	0,282	0,163	0,106	0,173	0,123
F Statistic (df = 94 ; 23257)	98,498***	49,253***	30,412***	53,077***	35,748***

Note :

*p<0,1 ; **p<0,05 ; ***p<0,01

Annexe B : modèle

Hypothèses exogènes

Démographie

Les hypothèses concernant la démographie sont principalement basées sur les projections de l'INSEE à horizon 2050. En particulier, puisque une projection de la population de la France entière à horizon 2050 n'est pas disponible (et que le modèle représente l'économie de la France entière), nous avons calculé le taux de croissance annuel entre 2014 et 2050 de la population de la France métropolitaine dans la projection INSEE (INSEE, 2010) et ensuite nous avons appliqué ce taux de croissance à la valeur historique de la population de la France entière en 2014. L'évolution de la population active (qui inclut chômeurs et actifs employés) est également scénarisée suivant la projection de l'INSEE (INSEE, 2011) : nous appliquons à la population de la France entière en 2050 le taux d'activité proposé par l'INSEE en 2050 pour la France métropolitaine. Pour le nombre de retraités en 2050, nous appuyons sur le onzième rapport du conseil d'orientation des retraites (COR, 2012).

Pour l'analyse de scénarios, des hypothèses démographiques supplémentaires sont nécessaires. En effet, dans le processus de repondération qui a été illustré en section 4.3, nous imposons la cohérence du nombre de ménages par type (en six modalités : célibataires ≤ 65 ans, célibataires > 65 ans, famille mono-parentale, couples et ménages complexes avec enfants, couples et ménages complexes sans enfants avec PR ≤ 65 ans, couples et ménages complexes sans enfants avec PR > 65 ans) avec les projections de population de l'INSEE (Projections de ménages pour la France métropolitaine, à l'horizon 2030). Ces projections sont prolongées à l'horizon 2050 en gardant constante la part de ménages par type et par âge (par exemple, la part de célibataires parmi les personnes âgées de 25 ans est la même en 2030 et en 2050). Le tableau B.1 résume les hypothèses concernant la démographie.

TABLEAU B.1 – Hypothèses démographiques pour tous les scénarios (en milliers)

	2010	2050
Population tot. France	64 613	74 380
Population active	29 023	31 680
Nb. de retraités	15 080	21 224
Nb. de ménages tot.	28 524	35 672
Nb. mén. célib. ≤ 65 ans	6 465	8 817
Nb. mén. célib. > 65 ans	3 427	7 109
Nb. mén. monoparentales	2 369	2 912
Nb. mén. couple avec enfants	8 131	7 997
Nb. mén. couple sans enfants, PR ≤ 65	5 290	4 194
Nb. mén. couple sans enfants, PR > 65	2 843	4 643

Consommations des ménages (scénario de référence)

Pour le scénario de référence, l'évolution des consommations des ménages en volumes (Tableau B.2) par rapport à l'année de calibrage est scénarisée suivant soit des études d'expert existantes, soit des tendances historiques. En particulier, les tendances d'évolution des consommations d'énergie, de logement (mètres carrés habités) et de travaux de construction s'appuient sur l'expertise EDF R&D ; celles concernant les transports s'appuient en partie sur l'expertise EDF R&D et en partie sur les projections du Ministère de l'Environnement (MEEM, 2016) ; pour l'évolution des consommations de produits alimentaires (transformés et non transformés), ainsi que celle de la restauration hors domicile, nous supposons une prolongation des tendances observées pendant les vingt années précédant 2010, grâce aux données INSEE sur les consommations des ménages par produit (INSEE, 2013).

Coefficients techniques

Les coefficients techniques α_{ij} des productions intermédiaires décrivent, pour chaque paire de secteurs i et j de l'économie nationale, la quantité de bien i nécessaire pour la production d'une unité de bien j . Leurs valeurs en 2010 sont calculées grâce aux données de calibrage.

Pour la projection en 2050, nous pouvons soit garder des coefficients techniques constants, soit produire des hypothèses sur leur évolution. Dans notre projection de référence comme dans les scénarios alternatifs, les coefficients techniques concernant les consommations de biens non énergétiques sont gardés constants, alors que les coefficients concernant les consommations énergétiques évoluent de manière exogène pour tenir compte du progrès de l'efficacité énergétique. Les hypothèses d'évolution de ces derniers coefficients (tableaux B.3 et B.4) sont basées sur des évaluations d'experts d'EDF R&D.

TABLEAU B.2 – Hypothèses de taux d'évolution annuels moyens, entre 2010 et 2050, des consommations des ménages par secteur (en volumes)

Secteur	Taux (%)
Pétrole	0,00
Gaz naturel	-0,67
Charbon	-2,16
Carburants	-2,16
Produits pétroliers	-2,16
Électricité	-0,06
Chaleur	-2,16
Aliments non transformés	0,00
Aliments transformés	0,70
Industrie automobile	-0,10
Travaux de construction	0,00
Transports terrestres	0,00
Transport de passagers	1,44
Transports par eau	0,00
Transports aériens	1,24
Restauration	0,53
Logement	0,72

Coefficients d'émissions de CO₂

Nous utilisons les coefficients d'émissions de CO₂ par type d'énergie fournis par l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2006) pour charbon, carburants et produits pétroliers. Nous calculons le coefficient d'émissions du pétrole sur la base des émissions liées à la combustion de pétrole brut fournies par l'IPCC et au bilan énergétique des raffineries. En effet, dans notre modèle, le pétrole est utilisé seulement dans la production de carburants et de produits pétroliers, et le raffinage génère des émissions dues au fait que les raffineries consomment une part de leurs produits en tant que sources d'énergie. Les consommations de produits pétroliers du secteur raffinage dans le bilan énergétique AIE France 2010 représentent 3 840 ktep des 73 353 ktep qu'elles produisent. Nous supposons donc qu'une fraction correspondante (c'est-à-dire 5,24%) du pétrole brut utilisé dans le raffinage est brûlée en donnant lieu à des émissions (en négligeant les différences d'émissions pour différents produits énergétiques qui sont effectivement brûlés dans le processus). Nous considérons donc que le coefficient d'émissions du pétrole brut est 5,24% du coefficient d'émissions concernant la combustion du pétrole fourni par l'IPCC (77 300 kg_{CO₂}/TJ).

Pour charbon, carburants et produits pétroliers, les données de l'IPCC proposent plusieurs typologies de produits : nous avons considéré des valeurs médianes d'émissions. Les consommations de chaleur et d'électricité ne génèrent pas d'émissions. Le tableau B.5 présente les coefficients d'émissions utilisés dans le modèle.

TABLEAU B.3 – Hypothèses de taux d'évolution annuels moyens (%), entre 2010 et 2050, des coefficients techniques concernant les consommations d'énergie des secteurs non énergétiques

Secteur	ALIMNONT.	ALIMTR.	AUTOM.	TRAVAUX.	TRANSP	TERR.	TRANSP	PASS.	TRANSP	EAU	TRANSP	PAER.	REST.	LOG.	COMPO.
PETROLE															
GAZ	-0,13	-0,44	-1,06	-0,61	1,42	1,87	-1,72	-0,47	-0,75	-1,82	-1,22				
CHARBON	-0,31	-3,65	-1,60	-0,09					-3,90	-3,84	-2,05				
CARBURANTS	-0,31	-3,65	-1,60	-0,09	-1,07	-0,95	-0,68	-1,48	-3,90	-3,84	-2,05				
PDPETROL	-0,31	-3,65	-1,60	-0,09	-1,07	-0,95	-0,68	-1,48	-3,90	-3,84	-2,05				
ELEC	-0,06	-0,41	-0,37	1,07	1,59	-0,01	-0,71	0,56	-0,54	-1,37	-0,94				
CHALEUR	-0,31	-3,65		-0,09					-3,90	-3,84	-2,05				

TABLEAU B.4 – Hypothèses de taux d'évolution annuels moyens (%), entre 2010 et 2050, des coefficients techniques concernant les consommations d'énergie des secteurs énergétiques

Secteur	PETROLE	GAZ	CHARBON	CARBURANTS	PDPETROL	ELEC	CHALEUR
PETROLE							
GAZ		-0,61	-0,08	-0,10	-0,08	-0,08	-0,08
CHARBON				-0,09			
CARBURANTS							
PDPETROL							
ELEC		1,07	-0,08	-0,09	-0,08	-0,08	-0,08
CHALEUR							

TABLEAU B.5 – Coefficients d'émissions de CO₂ par type d'énergie (en kg_{CO_2}/TJ)

Type d'énergie	CO ₂ (kg/TJ)
Pétrole	3 837
Gaz naturel	56 100
Charbon	96 000
Carburants	72 000
Produits pétroliers	73 300

Production domestique des secteurs énergétiques

L'évolution des productions domestiques (en volume) de pétrole brut, gaz naturel et charbon, à partir des valeurs de calibrage, est également exogène, et encore une fois les projections s'appuient sur l'expertise EDF R&D. Le tableau B.6 résume les hypothèses de taux de croissance annuels moyens de ces productions entre 2010 et 2050. Les productions domestiques des autres secteurs sont, elles, endogènes au modèle.

TABLEAU B.6 – Hypothèses de taux de croissance annuels moyens (%), entre 2010 et 2050, des productions domestiques des secteurs pétrole, gaz et charbon (en volumes)

Secteur	Taux (%)
Pétrole	0,56
Gaz naturel	0,33
Charbon	0,36

Prix d'importation des biens énergétiques

Les prix d'importation des énergies fossiles varient entre l'année de calibrage et 2050 suivant les tendances fournies par l'Agence Internationale de l'Énergie en ce qui concerne les énergies fossiles, et par l'Union Française de l'Électricité en ce qui concerne les prix de l'électricité (relativement au bien composite international, numéraire de notre modèle).

Le World Energy Outlook 2015 (International Energy Agency, 2015, page 47) détaille les prix d'importation jusqu'en 2040 de pétrole brut, gaz naturel et charbon (en dollars 2014) pour différents scénarios. Nous utilisons les prix du scénario *New policies*, après les avoir exprimés en dollars 2010, en corrigeant pour l'inflation⁵ ; ensuite, nous appliquons la tendance obtenue (en faisant l'hypothèse que les prix restent constants entre 2040 et 2050) aux prix d'importations de l'année de calibrage (2010). Pour les secteurs carburants et produits pétroliers, nous supposons que les prix d'importation suivent les prix d'importation du pétrole.

5. En utilisant le convertisseur fourni par le Bureau of Labor Statistics américain, http://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm

L'Union Française de l'Électricité analyse plusieurs scénarios de transition énergétique de 2012 à 2030 (qui se différencient par la part de nucléaire dans le mix électrique en fin de période) et estime les prix d'électricité pour les particuliers et les entreprises françaises qui en résulteraient (UFE, 2012). Nous faisons l'hypothèse que les prix d'importation d'électricité évoluent comme les prix aux entreprises du scénario médian UFE (50% de nucléaire dans le mix électrique en 2030), en supposant que les prix restent constants entre 2030 et 2050. Nous préférons cette hypothèse à celle d'une prolongation tendancielle du scénario de prix entre 2030 et 2050, puisque les grands investissements liés à la transition énergétique sont prévus d'ici 2030, et prolonger la tendance d'augmentation des prix au-delà de cet horizon pourrait porter à une surestimation des prix finaux.

Enfin, il n'y a pas besoin d'hypothèses concernant les prix d'importation pour la chaleur, puisque les importations sont toujours nulles. Les tendances moyennes d'évolution des prix d'importation des biens énergétiques entre 2010 et 2050 pour nos scénarios sont présentées dans le tableau B.7.

TABLEAU B.7 – Hypothèses de taux de croissance annuels moyens (%), entre 2010 et 2050, des prix d'importation des biens énergétiques

Secteur	Taux (%)
Pétrole	1,03
Gaz naturel	1,06
Charbon	0,01
Carburants	1,03
Produits pétroliers	1,03
Électricité	1,27

Contenu en travail et en capital des productions des secteurs énergétiques

Nous faisons l'hypothèse que le contenu en travail et en capital des productions des secteurs énergétiques reste constant entre l'année de calibrage et 2050, alors que celui des autres productions est endogène au modèle. Une exception notable, cependant, concerne le contenu en capital de la production d'électricité. En effet, comme déjà mentionné en parlant des hypothèses d'évolution des prix d'importation d'électricité, les années à venir seront caractérisées par des investissements massifs dans le secteur électrique pour préparer la transition énergétique. Il ne serait pas réaliste, donc, de supposer que l'intensité en capital de la production reste constante pour ce secteur. Nous calculons donc une nouvelle intensité en capital (en consommation de capital fixe, dans notre approche IMACLIM) de la production électrique (k_E), qui soit cohérente avec le scénario de prix d'électricité considéré (UFE, 2012). Pour déterminer k_E , en supposant que le scénario de prix UFE soit un scénario « toutes choses égales par ailleurs », nous faisons tourner le modèle à l'année de calibrage, mais en introduisant

les prix d'importation 2050 pour les secteurs énergétiques. Ensuite, nous augmentons k_E jusqu'à ce que la variation en termes relatifs du prix d'électricité calculé par le modèle pour les consommations intermédiaires du secteur composite (qui représente la plus grande partie de l'économie) soit égale à la variation du prix d'électricité pour les entreprises dans le scénario médian de l'UFE⁶, c'est-à-dire une augmentation de 65,4%. Nous faisons l'hypothèse qu'il n'y a pas d'augmentation ultérieure de prix entre 2030 et 2050. Nous obtenons un k_E trois fois plus élevé en 2050 qu'en 2010.

Élasticité de substitution dans les fonctions de production

Nous utilisons des élasticité (tableau B.8) présentes dans la littérature, en particulier celles estimées par Koesler et Schymura (2015) pour les agrégats KL, KLE et Y, spécifiquement destinées à une utilisation dans des modèles d'équilibre général calculable. Les estimations de Koesler et Schymura (2015) se fondent sur une base de données au niveau mondial (le *World Input Output Database*), mais les auteurs montrent que les différences d'élasticité entre régions sont négligeables. Les élasticité de substitution entre production domestique et internationale sont basées sur les valeurs calculées pour la France par Welsch (2008). Cependant, pour les élasticité concernant les secteurs énergétiques nous préférons nous tourner vers la documentation du projet GTAP⁷ (Hertel et van der Mensbrugghe, 2016), en raison du fait que Welsch (2008) obtient une élasticité négative pour l'unique secteur énergétique. Nous choisissons une élasticité de 0,5 pour les secteurs non énergétiques qui ne sont pas présents dans l'analyse de Welsch (2008).

Formulaire

Entreprises

Les arbitrages entre intrants dans les productions non-énergétiques se font selon une structure de CES imbriquées illustrée en Figure 4.1 chapitre 4. Tout d'abord, capital et travail sont combinés, pour les secteurs non énergétiques, grâce à une fonction CES caractérisée par une élasticité de substitution σ_{KL} (équations (1) et (2), où $\rho_{KL_i} = \frac{\sigma_{KL_i}-1}{\sigma_{KL_i}}$). Ces équations sont le résultat d'une minimisation des coûts des producteurs dans un cadre CES. L'équation qui décrit la quantité de travail utilisée est modifiée par un facteur ϕ , qui représente l'augmentation de la productivité du travail dans le temps (hypothèse exogène). Pour les secteurs énergétiques, nous supposons que les intensités en travail et en capital de la production sont égales à celles de calibrage, donc nous aurons une fonction de type Leontief des deux facteurs de production.

6. Nous rappelons que ce scénario suppose une part de 50% de nucléaire dans le mix électrique en 2030.

7. *Global Trade Analysis Project* (Aguiar et al., 2016)

TABLEAU B.8 – Élasticités de substitution utilisées dans les fonctions de production CES du modèle

Secteur	σ_{KL}	σ_{KLE}	σ_Y	σ_Q
PETROLE				5,20
GAZ				17,20
CHARBON				3,05
CARBURANTS				2,10
PDTPETROL				2,10
ELEC				2,80
CHALEUR				0,50
ALIMNONTRANSFORM	1,07	0,40	0,98	0,55
ALIMTRANSFORM	0,22	0,19	0,63	0,29
AUTOMOBILE	0,18	0,16	0,38	1,54
TRAVAUXCONST	0,17	0,15	0,61	0,50
TRANSPTERRESTRES	0,14	0,42	0,22	0,50
TRANSPPASSAGERS	0,14	0,42	0,22	0,50
TRANSPEAU	3,36	1,27	0,45	0,50
TRANSPAERIEN	0,24	0,37	1,03	0,50
RESTAURATION	0,08	0,22	0,63	0,50
LOGEMENT	0,31	0,68	0,40	0,50
COMPOSITE	0,13	0,38	1,15	0,50

$$K_i = \left(\frac{a_{KL_i}}{p_{K_i}} \right)^{\sigma_{KL_i}} \left(a_{KL_i}^{\sigma_{KL_i}} p_{K_i}^{1-\sigma_{KL_i}} + b_{KL_i}^{\sigma_{KL_i}} p_{L_i}^{1-\sigma_{KL_i}} \right)^{-\frac{1}{\rho_{KL_i}}} K L_i \quad (1)$$

$$\forall i \notin \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

$$L_i = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\phi b_{KL_i}}{p_{L_i}} \right)^{\sigma_{KL_i}} \left(a_{KL_i}^{\sigma_{KL_i}} \left(\frac{p_{K_i}}{\phi} \right)^{1-\sigma_{KL_i}} + b_{KL_i}^{\sigma_{KL_i}} \left(\frac{p_{L_i}}{\phi} \right)^{1-\sigma_{KL_i}} \right)^{-\frac{1}{\rho_{KL_i}}} K L_i \quad (2)$$

$$\forall i \notin \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

Pour tous les secteurs, les consommations d'énergie de la production sont le résultat d'une relation de Leontief (constance des coefficients techniques) entre différents inputs énergétiques. Ces inputs dépendent des intensités énergétiques α_E de la production Y , qui sont exogènes. Les intensités énergétiques sont définies par rapport à la production domestique Y . L'agrégat capital/travail et l'agrégat énergétique sont ensuite combinés pour les secteurs non énergétiques grâce à une deuxième fonction CES (équation (3)).

$$KLE_i = (a_{KLE_i} KL_i^{\rho_{KLE_i}} + b_{KLE_i} (\alpha_{E_i} Y_i)^{\rho_{KLE_i}})^{\frac{1}{\rho_{KLE_i}}} \quad (3)$$

$$\forall i \notin \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

Pour les secteurs non énergétiques, une troisième fonction CES ayant une élasticité σ_Y décrit la combinaison de l'agrégat KLE avec un agrégat Leontief (Mat) des facteurs de production non énergétiques (nous appelons α_{Mat_i} le coefficient technique qui décrit l'intensité en biens i de l'agrégat Mat_j). Nous obtenons ainsi la production domestique Y . Les équations (4) et (5) représentent les quantités de KLE et de Mat à partir de Y . L'arbitrage entre KLE et les inputs non énergétiques Mat est de type Leontief pour les secteurs énergétiques : nous supposons que l'intensité en inputs non-énergétiques de la production de ces secteurs est constante.

$$KLE_i = \left(\frac{a_{Y_i}}{p_{KLE_i}} \right)^{\sigma_{Y_i}} (a_{Y_i}^{\sigma_{Y_i}} p_{KLE_i}^{1-\sigma_{Y_i}} + b_{Y_i}^{\sigma_{Y_i}} p_{Mat_i}^{1-\sigma_{Y_i}})^{-\frac{1}{\rho_{Y_i}}} Y_i \quad (4)$$

$$\forall i \notin \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

$$Mat_i = \left(\frac{b_{Y_i}}{p_{Mat_i}} \right)^{\sigma_{Y_i}} (a_{Y_i}^{\sigma_{Y_i}} p_{KLE_i}^{1-\sigma_{Y_i}} + b_{Y_i}^{\sigma_{Y_i}} p_{Mat_i}^{1-\sigma_{Y_i}})^{-\frac{1}{\rho_{Y_i}}} Y_i \quad (5)$$

$$\forall i \notin \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

Pour passer maintenant à la description des revenus, le revenu disponible brut des entreprises est déterminé par une fraction EBE_S de l'excédent brut d'exploitation (EBE), auquel nous soustrayons les paiements d'intérêts sur la dette D_S et les impôts sur les sociétés T_S et nous ajoutons une part des autres transferts A_T (équation (6)). Le taux d'intérêt effectif apparent sur la dette des sociétés (i_S) est le même qu'à l'année de calibrage (7). Les entreprises reçoivent une part ω_{AT_S} des autres transferts constante par rapport à l'année de calibrage (8). Le volume des autres transferts représente une part constante du PIB (équation (9)). Les notations indicées d'un 0 représentent les valeurs de calibrage des variables en 2010.

$$RDB_S = EBE_S - i_S D_S - T_S + \omega_{AT_S} A_T \quad (6)$$

$$i_S = i_{S_0} \quad (7)$$

$$\omega_{AT_S} = \omega_{AT_{S_0}} \quad (8)$$

$$\frac{A_T}{PIB} = \frac{A_{T_0}}{PIB_0} \quad (9)$$

Le PIB est défini, sous l'angle des dépenses, comme la somme des consommations finales et de la balance commerciale (équation (10)).

$$PIB = \sum_{i=1}^n p_{C_i} C_i + \sum_{i=1}^n p_{G_i} G_i + \sum_{i=1}^n p_{I_i} I_i + \sum_{i=1}^n p_{X_i} X_i - \sum_{i=1}^n p_{M_i} M_i \quad (10)$$

Nous obtenons l'EBE des sociétés (12) à partir de la différence entre l'EBE total (11) (formé par les consommations de capital fixe, l'excédent net d'exploitation et les marges spécifiques) et ceux des ménages et des administrations (qui seront définis plus loin). Le taux d'excédent net d'exploitation τ_{ENE_i} est constant, pour chaque secteur, par rapport à l'année de calibrage (hypothèse de taux de marge fixe).

$$EBE = \sum_{i=1}^n p_{K_i} K_i + \sum_{i=1}^n \tau_{ENE_i} p_{Y_i} Y_i + \sum_{i=1}^n MS_i \quad (11)$$

$$EBE_S = EBE - EBE_H - EBE_G \quad (12)$$

La somme des marges spécifiques MS_i (équation (13)) qui rentrent dans le calcul de l' EBE est nulle à l'année de calibrage par construction, mais elle ne l'est pas dans l'équilibre de projection, puisque nous appliquons des taux de marges constants aux différents agents, dont les consommations ne varient pas nécessairement homothétiquement.

$$MS_i = \sum_{j=1}^n \tau_{MSCI_{ij}} p_{Q_i} \alpha_{Eij} Y_j + \tau_{MSH_i} p_{Q_i} C_i + \tau_{MSG_i} p_{Q_i} G_i + \tau_{MSX_i} p_{Q_i} X_i \quad (13)$$

$$\forall i \in \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

La formation brute de capital fixe $FBCF$ est également le résultat de la différence entre la FBCF totale (c'est-à-dire la somme des investissements) et les FBCF de ménages et administrations (éq. (14)). La différence entre le RDB des entreprises et leur $FBCF$ donne la capacité d'auto-financement nette CAF (éq. (15)).

$$FBCF_S = \sum_{i=1}^n p_{I_i} I_i - FBCF_H - FBCF_G \quad (14)$$

$$CAF_S = RDB_S - FBCF_S \quad (15)$$

La dette nette des entreprises à l'horizon de simulation dépend de la dette initiale à l'année de calibrage et de l'évolution de la capacité d'auto-financement entre l'équilibre initial et l'équilibre futur. Nous tenons compte également de la « déflation » de la dette historique dans le temps. En effet, même si le modèle en équilibre général calculable est neutre par rapport à la monnaie (tous les prix sont exprimés de manière relative au numéraire), il est raisonnable de supposer que la valeur de la dette historique mesurée « en biens » diminue avec le temps. Nous introduisons donc dans le modèle un taux d'inflation monétaire τ_{INF} (que nous supposons de 1% par an), qui n'intervient que dans le calcul de la dette nette. Pour tenir compte de l'accumulation des intérêts payés sur la dette, nous désagrégeons la CAF selon l'équation (16). La capacité d'auto-financement nette est la somme de la capacité d'auto-financement brute ($CAFB_S$) et des revenus de la propriété RK_S , qui sont positifs si les entreprises sont créditrices nettes et négatifs si elles sont débitrices (la dette D_S est positive si elle représente bien une dette, elle est négative si elle représente un crédit).

$$CAF_S = CAFB_S + RK_S = CAFB_S - i_S D_S \quad (16)$$

Nous pouvons donc décrire l'accumulation de la dette entre l'année de calibrage (D_{S_0}) et l'année de projection (D_{S_t}), en exprimant la dette de chaque année en fonction de la dette de l'année précédente : nous partons de t (éq. (17), où t est la durée de projection en nombre d'années) et nous continuons par récurrence jusqu'à l'année de calibrage, pour obtenir l'équation (18) (le taux d'inflation s'applique également à la CAF brute à partir de celle de l'année $n-2$, puisque la CAFB est calculée en fin d'année).

$$\begin{aligned} D_{S_t} &= \frac{D_{S_{t-1}}}{1 + \tau_{INF}} - CAF_{S_{t-1}} = \frac{D_{S_{t-1}}}{1 + \tau_{INF}} - CAFB_{S_{t-1}} + i_S \frac{D_{S_{t-1}}}{1 + \tau_{INF}} = \\ &= \frac{1 + i_S}{1 + \tau_{INF}} D_{S_{t-1}} - CAFB_{S_{t-1}} \end{aligned} \quad (17)$$

$$D_{S_t} = \frac{(1 + i_S)^t}{(1 + \tau_{INF})^t} D_{S_0} - \sum_{k=0}^{t-1} \frac{(1 + i_S)^k}{(1 + \tau_{INF})^k} CAFB_{S_{t-1-k}} \quad (18)$$

Nous supposons ensuite que la CAFB réelle a une évolution linéaire entre l'année de calibrage et l'année de projection (nous notons d_{CAFB_S} l'incrément annuel de CAFB) :

$$\begin{aligned} CAFB_{S_x} &= CAFB_{S_0} + x \left(\frac{CAFB_{S_t} - CAFB_{S_0}}{t} \right) = CAFB_{S_0} + d_{CAFB_S} x \quad (19) \\ &\forall x \in [0, t] \end{aligned}$$

En substituant (19) dans (18) et en réarrangeant, nous obtenons (20), où les trois

sommes peuvent se calculer analytiquement :

$$D_{S_t} = \frac{(1+i_S)^t}{(1+\tau_{INF})^t} D_{S_0} - \sum_{k=0}^{t-1} \frac{(1+i_S)^k}{(1+\tau_{INF})^k} CAFB_{S_0} \quad (20)$$

$$- \sum_{k=0}^{t-1} \frac{(1+i_S)^k}{(1+\tau_{INF})^k} (t-1) d_{CAFB_S} + \sum_{k=0}^{t-1} k \frac{(1+i_S)^k}{(1+\tau_{INF})^k} d_{CAFB_S}$$

Ménages

Les consommations finales (en volume) des ménages C_i sont définies de manière exogène pour tous les secteurs sauf le secteur composite (voir section 5.4). Pour celui-ci, les consommations sont déterminées par le respect de la contrainte sur le revenu consommé par les ménages (c'est-à-dire le revenu disponible brut des ménages moins l'épargne) :

$$\sum_{i=1}^n p_{C_i} C_i = R_{CONS} \quad (21)$$

Le revenu disponible brut avant impôts ($RDBAI$) des ménages est défini selon l'équation (22). Les ménages reçoivent les salaires versés par les secteurs productifs $w_i l_i Y_i$, plus une part de l'excédent brut d'exploitation qui correspond aux loyers perçus (qu'ils soient réels ou imputés) et une part des autres transferts AT . S'ajoutent les retraites $\rho_P N_P$, les allocations de chômage $\rho_U N_U$ et les autres transferts sociaux $\rho_A N$, où les ρ représentent les montants par personne, N_P le nombre de retraités, N_U le nombre de chômeurs et N la population totale. Nous rajoutons enfin les revenus de la propriété $RK_H = -i_H D_H$, qui sont en général positifs en France (et ils le sont, en effet, à l'année de calibrage), puisque les ménages sont créditeurs et leur dette nette D_H est négative.

$$RDBAI_H = \sum_{i=1}^n w_i l_i Y_i + EBE_H + \omega_{AT_H} AT + \rho_P N_P + \rho_U N_U + \rho_A N - i_H D_H \quad (22)$$

L' EBE des ménages à l'année de projection est calculée à partir de sa valeur de calibrage, qui varie ensuite selon les dépenses de logement des ménages (23). Les ménages reçoivent une part constante (équation (24)) des autres transferts, définis en (9).

$$EBE_H = EBE_{H_0} \frac{p_{C_{LOG}} C_{LOG}}{p_{C_{LOG_0}} C_{LOG_0}} \quad (23)$$

$$\omega_{AT_H} = \omega_{AT_{H_0}} \quad (24)$$

Le revenu disponible brut des ménages RDB_H (éq. (25)) est la différence entre le $RDBAI$, les impôts sur le revenu T_{IR_H} (voir éq. (44)) et les autres impôts directs T_H , qui suivent l'évolution de l'index des prix à la consommation (éq. (37)). Si nous soustrayons au RDB l'épargne (défini par un taux d'épargne constant τ_{S_0}), nous obtenons le revenu de consommation (équation (26)).

$$RDB_H = RDBAI_H - T_{IR_H} - T_H \quad (25)$$

$$R_{CONS} = (1 - \tau_{S_0})RDB_H \quad (26)$$

L'investissement des ménages ($FBCF_H$) suit l'évolution des dépenses de logement, de manière analogue à l' EBE , puisqu'il consiste essentiellement en l'achat de logements neufs :

$$FBCF_H = FBCF_{H_0} \frac{p_{C_{LOG}} C_{LOG}}{p_{C_{LOG_0}} C_{LOG_0}} \quad (27)$$

La capacité d'auto-financement des ménages dérive alors de la différence entre épargne et investissement (équation (28)).

$$CAF_H = \tau_{S_0} RDB_H - FBCF_H \quad (28)$$

L'évolution de la dette nette des ménages est calculée sur la base des capacités d'auto-financement sur la période de projection, en faisant l'hypothèse que la CAF brute évolue de manière linéaire, suivant la même méthode que celle décrite plus haut pour les entreprises. La dette nette des ménages à l'année de projection (c'est-à-dire t années depuis le calibrage) peut donc s'écrire comme en (29), où le taux d'intérêt i_H est constant (30).

$$D_{H_t} = \frac{(1 + i_H)^t}{(1 + \tau_{INF})^t} D_{H_0} - \sum_{k=0}^{t-1} \frac{(1 + i_H)^k}{(1 + \tau_{INF})^k} CAF_{B_{H_0}} \quad (29)$$

$$- \sum_{k=0}^{t-1} \frac{(1 + i_H)^k}{(1 + \tau_{INF})^k} (t - 1) d_{CAF_{B_H}} + \sum_{k=0}^{t-1} k \frac{(1 + i_H)^k}{(1 + \tau_{INF})^k} d_{CAF_{B_H}}$$

$$i_H = i_{H_0} \quad (30)$$

Administrations publiques

Les dépenses publiques gardent la même répartition entre secteurs que celle de l'année de calibrage (équation (31)). En valeur absolue, la consommation finale des administrations publiques est définie à partir du ratio dépenses publiques / PIB de l'année de calibrage (s_G), corrigé par une variable d'ajustement η (éq. (32)) qui varie pour respecter une contrainte sur la dette des administrations publiques, fixée à sa valeur de calibrage en pourcentage du PIB (éq. (33)). La variable d'ajustement des dépenses publiques est également appliquée aux transferts entre l'état et les ménages ou les entreprises dans la distribution secondaire du revenu.

$$\forall i, j \quad \frac{G_i}{G_{i_0}} = \frac{G_j}{G_{j_0}} \quad (31)$$

$$p_G G = \frac{s_G \text{PIB}}{\eta} \quad (32)$$

$$\frac{D_G}{\text{PIB}} = \frac{D_{G_0}}{\text{PIB}_0} \quad (33)$$

Les revenus des administrations publiques ont principalement pour origine des taxes, des impôts et des contributions sociales des entreprises. Les taux moyens d'imposition concernant les impôts à la production T_Y , la TVA T_{TVA} , les impôts sur les sociétés T_{IS} , ainsi que les impôts sur les revenus des ménages T_{IR} , sont égaux aux taux moyens observés à l'année de calibrage multipliés par la variable η . La taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques, à la fois concernant les consommations intermédiaires ($T_{TICPE_{CI}}$) et les consommations finales ($T_{TICPE_{CF}}$), les autres impôts sur produits T_{AIP} et les autres impôts directs acquittés par les ménages (T_H) en plus des impôts sur le revenu, sont basés sur leurs valeurs par unité à l'année de calibrage, mises à l'échelle suivant l'indice des prix à la consommation et ajustées par la variable η (équations de (34) à (37)). La TICPE varie entre les consommations intermédiaires et les consommations finales pour tenir compte des différences de fiscalité et de mix énergétiques entre les deux types de consommations. Les impôts et taxes perçues par l'état sont donc exprimées par les équations (37) à (44). L'indice des prix à la consommation IPC est défini par l'équation (80).

$$t_{TICPE_{CI_i}} = t_{TICPE_{CI_{i_0}}} IPC \eta \quad (34)$$

$$t_{TICPE_{CF_i}} = t_{TICPE_{CF_{i_0}}} IPC \eta \quad (35)$$

$$t_{AIP_i} = t_{AIP_{i_0}} IPC \eta \quad (36)$$

$$T_H = T_{H_0} IPC \eta \quad (37)$$

$$T_Y = \sum_{i=1}^n \tau_{Y_{i_0}} \eta p_{Y_i} Y_i \quad (38)$$

$$T_{TICPE} = \sum_i \left(t_{TICPE_{C_i}} \sum_{j=1}^n \alpha_{E_{ij}} Y_j + t_{TICPE_{C_{F_i}}} (C_i + G_i + I_i) \right) \quad (39)$$

$$\forall i \in \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

$$T_{AIP} = t_{AIP_i} \sum_i \left(\sum_{j=1}^n \alpha_{E_{ij}} Y_j + C_i + G_i + I_i \right) \quad (40)$$

$$\forall i \in \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

$$T_{AIP} = t_{AIP_i} \sum_i \left(\sum_{j=1}^n \alpha_{Mat_{ij}} Mat_j + C_i + G_i + I_i \right) \quad (41)$$

$$\forall i \notin \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

$$T_{TVA} = \sum_{i=1}^n \frac{\tau_{TVA_{i_0}} \eta}{1 + \tau_{TVA_{i_0}} \eta} (p_{C_i} C_i + p_{G_i} G_i + p_{I_i} I_i) \quad (42)$$

$$T_{IS} = \tau_{IS_0} \eta \sum_{i=1}^n \tau_{ENE_i} p_{Y_i} Y_i \quad (43)$$

$$T_{IR} = \tau_{IR_0} \eta RDBA I_H \quad (44)$$

Le taux de contributions sociales est également modifié, par rapport au taux initial, par la variable d'ajustement de la dette publique η . Nous pouvons écrire la somme des contributions sociales comme :

$$T_{CS} = \tau_{CS_0} \eta \sum_{i=1}^n w_i l_i Y_i \quad (45)$$

Nous appelons T la somme de toutes les taxes, impôts et contributions sociales :

$$T = T_Y + T_{TICPE} + T_{AIP} + T_{TVA} + T_{IS} + T_{IR} + T_H + T_{CS} \quad (46)$$

Pour obtenir le revenu disponible brut de l'État, nous soustrayons aux taxes, impôts et contributions sociales une part de l'*EBE* total (11) constante par rapport à l'année de calibrage (ω_{EBEG_0}) et une part des autres transferts constante (ω_{ATG_0}). Nous soustrayons les dépenses publiques, les transferts sociaux (pensions, allocations de chômage et autres transferts sociaux) et le paiement d'intérêts sur la dette (équation (47)), dont l'intérêt i_G est constant.

$$RDB_G = T + \omega_{EBEG_0} EBE + \omega_{ATG_0} A_T - \sum_{i=1}^n p_{G_i} G_i - \rho_P N_P - \rho_U N_U - \rho_A N - i_G D_G \quad (47)$$

Les transferts sociaux par personne ρ_P , ρ_U et ρ_A évoluent comme le salaire moyen (48), corrigé par la variable d'ajustement de la dette publique η (équations (49) à (51)).

$$\rho_L = \frac{\sum_{i=1}^n w_i l_i Y_i}{N_L} \quad (48)$$

$$\rho_P = \rho_{P_0} \frac{\rho_L}{\rho_{L_0}} \frac{1}{\eta} \quad (49)$$

$$\rho_U = \rho_{U_0} \frac{\rho_L}{\rho_{L_0}} \frac{1}{\eta} \quad (50)$$

$$\rho_A = \rho_{A_0} \frac{\rho_L}{\rho_{L_0}} \frac{1}{\eta} \quad (51)$$

Les investissements publics sont basés sur la part d'investissements sur le PIB de l'année de calibrage, corrigée par la variable η (équation (52)). La capacité d'auto-financement nette est alors la différence entre le *RDB* et la *FBCF* (éq. (53)).

$$\frac{FBCF_G}{PIB} = \frac{FBCF_{G_0}}{PIB_0} \frac{1}{\eta} \quad (52)$$

$$CAF_G = RDB_G - FBCF_G \quad (53)$$

Comme pour les ménages et les entreprises, la dette des administrations publiques est calculée à partir de sa valeur à l'année de calibrage et des *CAF* à l'année de calibrage et à l'année de projection, en supposant une évolution linéaire de la *CAF* brute entre les deux valeurs extrêmes. Il en résulte l'équation (54), où t est le nombre d'années entre le calibrage et la projection.

$$\begin{aligned}
D_{G_t} &= \frac{(1+i_G)^t}{(1+\tau_{INF})^t} D_{G_0} - \sum_{k=0}^{t-1} \frac{(1+i_G)^k}{(1+\tau_{INF})^k} CAFB_{G_0} \\
&- \sum_{k=0}^{t-1} \frac{(1+i_G)^k}{(1+\tau_{INF})^k} (t-1) d_{CAFB_G} + \sum_{k=0}^{t-1} k \frac{(1+i_G)^k}{(1+\tau_{INF})^k} d_{CAFB_G}
\end{aligned} \tag{54}$$

Investissements

Nous faisons l'hypothèse que le volume d'investissements évolue en lien avec le volume total de consommation de capital fixe (K) par rapport à l'année de calibrage. Cependant, l'année de calibrage 2010 est une année particulière, marquée par les effets de la crise économique, avec une économie en sous-investissement où les entreprises préfèrent réduire leurs dettes plutôt qu'investir (la capacité d'auto-financement brute des entreprises est positive en 2010). Pour cette raison, nous supposons qu'à horizon 2050 les investissements augmentent 10% de plus que la consommation de capital fixe (équation (55)).

$$I_i = 1,1 I_{i_0} \frac{\sum_{j=1}^n K_j}{\sum_{j=1}^n K_{j_0}} \tag{55}$$

La structure de consommation des investissements reste la même qu'à l'année de calibrage (éq. (56)).

$$\forall i, j \quad \frac{I_i}{I_{i_0}} = \frac{I_j}{I_{j_0}} \tag{56}$$

Il découle de l'équation (14) que la somme des investissements des ménages, des entreprises et des administrations publiques est égale à la consommation finale d'investissement.

Commerce international : importations et exportations

Concernant les importations, nous distinguons deux types de spécifications : la plupart des secteurs (tous sauf pétrole, gaz et charbon) suivent une spécification de type Armington (Armington, 1969), c'est-à-dire une substitution imparfaite entre produits domestiques et produits importés caractérisée par une élasticité de substitution constante. La production domestique et les importations sont alors décrites respectivement par les équations (57) et (58), où Q_i est la ressource totale pour le secteur i .

$$Y_i = \left(\frac{a_{Q_i}}{p_{Y_i}} \right)^{\sigma_{Q_i}} (a_{Q_i}^{\sigma_{Q_i}} p_{Y_i}^{1-\sigma_{Q_i}} + b_{Q_i}^{\sigma_{Q_i}} p_{M_i}^{1-\sigma_{Q_i}})^{-\frac{1}{\rho_{Q_i}}} Q_i \quad (57)$$

$$\forall i \notin \{PETROLE, GAZ, CHARBON\}$$

$$M_i = \left(\frac{b_{Q_i}}{p_{M_i}} \right)^{\sigma_{Q_i}} (a_{Q_i}^{\sigma_{Q_i}} p_{Y_i}^{1-\sigma_{Q_i}} + b_{Q_i}^{\sigma_{Q_i}} p_{M_i}^{1-\sigma_{Q_i}})^{-\frac{1}{\rho_{Q_i}}} Q_i \quad (58)$$

$$\forall i \notin \{PETROLE, GAZ, CHARBON\}$$

En revanche, la production domestique des secteurs pétrole, gaz et charbon est définie de manière exogène dans le modèle. Pour ces trois secteurs, donc, les importations sont simplement la différence entre la ressource totale et la production domestique (éq. (59)).

$$M_i + Y_i = Q_i \quad \forall i \in \{PETROLE, GAZ, CHARBON\} \quad (59)$$

Les exportations suivent également deux spécifications différentes. Les exportations des secteurs énergétiques sont supposées être une part constante des productions domestiques (équation (60), où l'indice 0 désigne les valeurs à l'année de calibrage).

$$X_i = Y_i \frac{X_{i_0}}{Y_{i_0}} \quad (60)$$

$$\forall i \in \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

Les exportations des secteurs non énergétiques, d'autre part, dépendent de l'évolution des prix relatifs par rapport à l'année de calibrage et de la croissance des marchés d'exportation δ_X . La croissance des marchés d'exportation est basée sur les données historiques de croissance mondiale (données de la Banque Mondiale) de 2010 à 2015, elle est de 3% par an en 2016 (telle que la moyenne 2010-2015) et ensuite elle diminue progressivement jusqu'à être 1% par an en 2050.

$$X_i = (1 + \delta_{X_i}) X_{i_0} \left(\frac{p_{M_i} p_{X_{i_0}}}{p_{X_i} p_{M_{i_0}}} \right) \quad (61)$$

$$\forall i \notin \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

Équilibre des marchés

Pour chaque secteur productif, le modèle assure l'équilibre entre ressource totale (production domestique et importations) et consommations (intermédiaires et finales plus exportations) :

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} Y_j + C_i + G_i + I_i + X_i \quad (62)$$

Le travail total utilisé en tant que facteur de production est égal à la dotation de travail des ménages, qui dépend de la variation du nombre d'actifs total par rapport à l'année de calibrage (δ_A) et du taux de chômage (équation (63)). Le taux de chômage est exogène (64) et les salaires s'ajustent pour respecter la contrainte sur la dotation de travail et le taux de chômage.

$$\sum_{i=1}^n L_i = \sum_{i=1}^n l_i Y_i = (1 - u) (1 + \delta_A) L_0 \quad (63)$$

$$u = \bar{u} \quad (64)$$

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre 4, la clôture du modèle se fonde sur une balance commerciale variable qui s'ajuste pour financer l'investissement.

Prix aux producteurs et aux consommateurs

Les coûts du travail dépendent du salaire net par secteur et du taux de contributions sociales τ_{CS} (éq. (65)). Le taux de contributions sociales est égal à sa valeur à l'année de calibrage, corrigée par la variable d'ajustement de la dette publique η (éq. (66)) mentionnée plus haut (éq. (33)). Le salaire du secteur composite varie pour que le marché du travail soit équilibré (éq. (63) et (64)). Les ratios entre les salaires des autres secteurs et le salaire du secteur composite sont constants.

$$p_{L_i} = (1 + \tau_{CS}) w_i \quad (65)$$

$$\tau_{CS} = \tau_{CS_0} \eta \quad (66)$$

Concernant le capital, nous faisons l'hypothèse que le prix évolue comme le prix réel des investissements (défini plus bas), selon un indice des prix à l'investissement de Fischer (81). Sachant que le prix du capital à l'année de calibrage est fixé à une valeur de 1 pour tous les secteurs, nous obtenons (67).

$$p_{K_i} = IPI \quad (67)$$

Le prix de l'agrégat KL , pour les secteurs non énergétiques, est le résultat de la combinaison dans un cadre CES de ces deux facteurs de production (éq. (68), où ϕ est le coefficient d'augmentation de productivité du travail). En revanche, puisque K et L sont exogènes pour les secteurs énergétiques, le prix de l'agrégat KL de ces secteurs est défini par l'équation (69).

$$p_{KL_i} = \left(a_{KL_i}^{\sigma_{KL_i}} p_{K_i}^{1-\sigma_{KL_i}} + b_{KL_i}^{\sigma_{KL_i}} \left(\frac{p_{L_i}}{\phi_L} \right)^{1-\sigma_{KL_i}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_{KL_i}}} \quad (68)$$

$$\forall i \notin \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

$$p_{KL_i} = \frac{p_{K_i} K_i + p_{L_i} L_i}{K_i L_i} \quad (69)$$

$$\forall i \in \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

De manière analogue, puisque les consommations d'énergie des productions de tous les secteurs sont dérivés des intensités énergétiques exogènes, le prix de l'agrégat KLE ne suit pas une fonction CES mais il est donné par l'équation (70).

$$p_{KLE_i} = \frac{p_{KL_i} K L_i + p_{E_i} \alpha_{E_i} Y_i}{K L E_i} \quad (70)$$

Le prix des productions domestiques ne peut pas être défini comme le résultat d'une CES puisque la structure de production des secteurs énergétiques est entièrement exogène. Nous définissons donc p_Y à partir des prix des facteurs de production, du taux d'imposition sur la production τ_Y et du taux d'excédent net d'exploitation τ_{ENE} (pour les secteurs non énergétiques, la spécification CES de p_Y serait également valide).

$$p_{Y_i} = \sum_j p_{CIj_i} \alpha_{ji} + \sum_z p_{CIz_i} \alpha_{zi} \frac{Mat_i}{Y_i} + P_{L_i} l_i + p_{K_i} k_i + \tau_{Y_i} p_{Y_i} + \tau_{ENE_i} p_{Y_i} \quad (71)$$

$$\forall j \in \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

$$\forall z \notin \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

Les prix des importations ont des spécifications différentes selon les secteurs. Les importations de bien composite représentent le numéraire du modèle, en conséquence le prix d'importation pour le secteur composite est constant. Les prix d'importation pour

les autres secteurs sont exprimés de manière relative au p_M du composite : nous faisons l'hypothèse que ces prix relatifs sont constants pour les secteurs non énergétiques, alors que pour les secteurs énergétiques l'évolution des prix est indexée sur les projections de l'AIE (voir section 5.4).

Puisque pour les secteurs pétrole, gaz et charbon l'agrégation de la production domestique et de la ressource importée ne se fait pas à travers une CES, nous dérivons le prix de la ressource totale de l'équation (72) (sachant que pour les secteurs non énergétiques, cette équation et celle qui décrit le prix CES sont toutes deux respectées).

$$p_{Q_i}Q_i = p_{Y_i}Y_i + p_{M_i}M_i \quad (72)$$

Les prix des consommations intermédiaires ($p_{CI_{ij}}$ est le prix de la ressource i utilisée dans les activités productives du secteur j) est défini par le prix de la ressource i (p_{Q_i}), auquel s'ajoutent les marges commerciales (MC) et de transport (MT), les marges spécifiques qui permettent la différenciation des prix des énergies selon les agents (voir section 4.1.3), la taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques (TICPE) et les autres impôts sur produits (éq. (73)).

$$p_{CI_{ij}} = p_{Q_i} (1 + \tau_{MC_i} + \tau_{MT_i} + \tau_{MSCI_{ij}}) + t_{TICPE_{CI_i}} + t_{AIP_i} \quad (73)$$

Les mêmes composantes interviennent dans la construction des prix des consommations finales (p_C , p_G , p_I) et des exportations (p_X), avec comme différence que les consommations finales sont également sujettes à la TVA (taux $\tau_{TVA_i} = \tau_{TVA_{i_0}}\eta$).

$$p_{C_i} = \left(p_{Q_i} (1 + \tau_{MC_i} + \tau_{MT_i} + \tau_{MSH_i}) + t_{TICPE_{CF_i}} + t_{AIP_i} \right) (1 + \tau_{TVA_i}) \quad (74)$$

$$p_{G_i} = \left(p_{Q_i} (1 + \tau_{MC_i} + \tau_{MT_i} + \tau_{MSG_i}) + t_{TICPE_{CF_i}} + t_{AIP_i} \right) (1 + \tau_{TVA_i}) \quad (75)$$

$$p_{I_i} = \left(p_{Q_i} (1 + \tau_{MC_i} + \tau_{MT_i} + \tau_{MSI_i}) + t_{TICPE_{CF_i}} + t_{AIP_i} \right) (1 + \tau_{TVA_i}) \quad (76)$$

$$p_{X_i} = p_{Q_i} (1 + \tau_{MC_i} + \tau_{MT_i} + \tau_{MSX_i}) \quad (77)$$

Les marges de transport sont égales à celles de l'année de calibrage, sauf pour les secteurs des transports terrestres, transports par eau et transports aériens (le secteur des transports de passagers est exclu parce que tous les transports terrestres de marchandises sont comptabilisés dans le secteur transports terrestres). Ces trois secteurs sont caractérisés par des marges variables, qui s'ajustent pour que les marges de transport totales soient nulles (éq. (78)). De manière analogue, les marges commerciales restent constantes pour tous les secteurs sauf le composite (qui inclut le secteur commercial), dont la marge est variable pour que les marges commerciales totales soient nulles (éq. (79)).

$$\begin{aligned}
& \sum_i \tau_{MT_i} p_{Q_i} \left(\sum_{j=1}^n \alpha_{ij} Y_j + C_i + G_i + I_i + X_i \right) \\
& + \sum_k \tau_{MT_k} p_{Q_k} \left(\sum_{j=1}^n \alpha_{kj} Mat_j + C_k + G_k + I_k + X_k \right) = 0
\end{aligned} \tag{78}$$

$$\forall i \in \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

$$\forall k \notin \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_i \tau_{MC_i} p_{Q_i} \left(\sum_{j=1}^n \alpha_{ij} Y_j + C_i + G_i + I_i + X_i \right) \\
& + \sum_k \tau_{MC_k} p_{Q_k} \left(\sum_{j=1}^n \alpha_{kj} Mat_j + C_k + G_k + I_k + X_k \right) = 0
\end{aligned} \tag{79}$$

$$\forall i \in \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

$$\forall k \notin \{PETROLE, GAZ, CHARBON, CARBURANTS, PDTPETROL, ELEC, CHALEUR\}$$

Pour le calcul de l'indice des prix à la consommation, nous utilisons la formule de Fisher, c'est-à-dire une moyenne géométrique des indices de Laspeyres et Paasche (80). L'indice des prix à l'investissement est défini de manière analogue (81).

$$IPC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_{C_i} C_{i_0}}{\sum_{i=1}^n p_{C_{i_0}} C_{i_0}} \frac{\sum_{i=1}^n p_{C_i} C_i}{\sum_{i=1}^n p_{C_{i_0}} C_i}} \tag{80}$$

$$IPI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_{I_i} I_{i_0}}{\sum_{i=1}^n p_{I_{i_0}} I_{i_0}} \frac{\sum_{i=1}^n p_{I_i} I_i}{\sum_{i=1}^n p_{I_{i_0}} I_i}} \tag{81}$$

Bibliographie

- ADEME. 2014, «Alléger l’empreinte environnementale de la consommation des Français en 2030», URL http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe-alleger-empreinte-environnement-2030_rapport_28112014.pdf.
- Agénor, P.-R., D. H. C. Chen et M. Grimm. 2004, *Linking Representative Household Models with Household Surveys for Poverty Analysis : A Comparison of Alternative Methodologies*, The World Bank, doi :10.1596/1813-9450-3343. URL <http://elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/1813-9450-3343>.
- Aguiar, A., B. Narayanan et R. McDougall. 2016, «An overview of the GTAP 9 data base», *Journal of Global Economic Analysis*, vol. 1, n° 1, p. 181–208.
- AMORCE. 2012, «Le prix de vente de la chaleur en 2010», URL http://reseaux-chaleur.cerema.fr/wp-content/uploads/130805_enquete_prix_de_vente_chaleur_2010_amorce_cle5b915a.pdf, page 15.
- Armington, P. S. 1969, «A theory of demand for products distinguished by place of production», *IMF Economic Review*, vol. 16, n° 1, p. 159–178.
- Association négaWatt. 2013, «Scénario négawatt 2011 - dossier de synthèse (mise à jour juillet 2013)», URL https://negawatt.org/IMG/pdf/scenario-negawatt-2011_dossier-de-synthese.pdf.
- Association négaWatt. 2014, «Scénario négawatt 2011-2050 : Hypothèses et méthode», URL <https://negawatt.org/Rapport-technique-du-scenario-negaWatt-2011-2050>.
- Association négaWatt. 2017, «Scénario négawatt 2017–2050. dossier de synthèse», URL https://negawatt.org/IMG/pdf/synthese_scenario-negawatt_2017-2050.pdf.
- Baiocchi, G., J. Minx et K. Hubacek. 2010, «The impact of social factors and consumer behavior on carbon dioxide emissions in the United Kingdom», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 14, n° 1, p. 50–72.
- Baldwin, C., N. Wilberforce et A. Kapur. 2011, «Restaurant and food service life cycle assessment and development of a sustainability standard», *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 16, p. 40–49.

- Becker, G. S. 1965, «A theory of the allocation of time», *The Economic Journal*, vol. 75, n° 299, p. 493–517.
- Benders, R. M., H. C. Moll et D. S. Nijdam. 2012, «From energy to environmental analysis. Improving the resolution of the environmental impact of Dutch private consumption with hybrid analysis», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, n° 2, p. 163–175.
- Biesiot, W. et K. J. Noorman. 1999, «Energy requirements of household consumption : a case study of the Netherlands», *Ecological Economics*, vol. 28, p. 367–383.
- Bin, S. et H. Dowlatabadi. 2005, «Consumer lifestyle approach to US energy use and the related CO₂ emissions», *Energy Policy*, vol. 33, n° 2, p. 197–208.
- Binswanger, M. 2001, «Technological progress and sustainable development : what about the rebound effect?», *Ecological economics*, vol. 36, n° 1, p. 119–132.
- Binswanger, M. 2004, «Time-saving innovations and their impact on energy use : some lessons from a household-production-function approach», *International Journal of Energy Technology and Policy*, vol. 2, n° 3, p. 209–218.
- Böhringer, C. 2002, «Climate politics from Kyoto to Bonn : from little to nothing?», *The Energy Journal*, vol. 23, n° 2, p. 51–71.
- Brenčić, V. et D. Young. 2009, «Time-saving innovations, time allocation, and energy use : evidence from Canadian households», *Ecological Economics*, vol. 68, p. 2859–2867.
- Bullard, C. W. I. et R. A. Herendeen. 1975, «The energy cost of goods and services», *Energy Policy*, vol. 3, n° 4, p. 268–278.
- Cairns, S. 1997, «Potential traffic reduction from home delivery services : some initial calculations», *TSU Working Paper 97/45*.
- Cairns, S. 2005, «Delivering supermarket shopping : more or less traffic?», *Transport Reviews*, vol. 25, n° 1, p. 51–84.
- Calderón, L. A., L. Iglesias, A. Laca, M. Herrero et M. Díaz. 2010, «The utility of life cycle assessment in the ready meal food industry», *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, n° 12, p. 1196–1207.
- Cayla, J.-M. et N. Maïzi. 2015, «Integrating household behavior and heterogeneity into the TIMES-Households model», *Applied Energy*, vol. 139, p. 56–67.
- Chen, T. D. et K. M. Kockelman. 2016, «Carsharing's life-cycle impacts on energy use and greenhouse gas emissions», *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, vol. 47, p. 276–284.

- CLIP. 2010, «Habitat facteur 4. Étude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050», *Les cahiers du Club d'Ingénierie Prospective Énergie et Environnement*, n. 20.
- CLIP. 2012, «Modes de vie et empreinte carbone. Prospective des modes de vie en France à l'horizon 2050 et empreinte carbone», *Les cahiers du Club d'Ingénierie Prospective Énergie et Environnement*, n. 21.
- Cohen, C., M. Lenzen et R. Schaeffer. 2005, «Energy requirements of households in Brazil», *Energy Policy*, vol. 33, p. 555–562.
- COR. 2012, «Retraites : perspectives 2020, 2040 et 2060», cahier de recherche, onzième rapport, décembre 2012. Données consolidées (mars 2013). URL <http://www.cor-retraites.fr/IMG/pdf/doc-1995.pdf>.
- Cragg, J. G. 1971, «Some statistical models for limited dependent variables with application to the demand for durable goods», *Econometrica*, vol. 39, n° 5, p. 829–844.
- DGE, CGDD et PIPAME. 2016, «Usages novateurs de la voiture et nouvelles mobilités», URL <http://www.entreprises.gouv.fr/etudes-et-statistiques/usages-novateurs-la-voiture-et-nouvelles-mobilites>.
- Druckman, A., I. Buck, B. Hayward et T. Jackson. 2012, «Time, gender and carbon : a study of the carbon implications of British adults' use of time», *Ecological Economics*, vol. 84, p. 153–163.
- Druckman, A. et T. Jackson. 2008, «Household energy consumption in the UK : a highly geographically and socio-economically disaggregated model», *Energy Policy*, vol. 36, p. 3177–3192.
- Druckman, A. et T. Jackson. 2009, «The carbon footprint of UK households 1990–2004 : a socio-economically disaggregated, quasi-multi-regional input-output model», *Ecological Economics*, vol. 68, p. 2066–2077.
- Duarte, R., K. Feng, K. Hubacek, J. Sánchez-Chóliz, C. Sarasa et L. Sun. 2016, «Modeling the carbon consequences of pro-environmental consumer behavior», *Applied Energy*, vol. 184, p. 1207–1216.
- Duarte, R., A. Mainar et J. Sánchez-Chóliz. 2010, «The impact of household consumption patterns on emissions in Spain», *Energy Economics*, vol. 32, p. 176–185.
- Duchin, F. 2003, «Household lifestyles : ideas for a research program», Rensselaer working papers in economics, number 0310. URL <http://www.economics.rpi.edu/workingpapers/rpi0310.pdf>.
- Duchin, F. 2005, «Sustainable consumption of food : a framework for analyzing scenarios about changes in diets», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 9, n° 1–2, p. 99–114.

- Dutilh, C. E. et K. J. Kramer. 2000, «Energy consumption in the food chain : comparing alternative options in food production and consumption», *Ambio*, vol. 29, n° 2, p. 98–101.
- Feng, Z.-H., L.-L. Zou et Y.-M. Wei. 2011, «The impact of household consumption on energy use and CO₂ emissions in China», *Energy*, vol. 36, p. 656–670.
- Ferguson, T. M. et H. L. MacLean. 2011, «Trade-linked Canada–United States household environmental impact analysis of energy use and greenhouse gas emissions», *Energy Policy*, vol. 39, p. 8011–8021.
- Firnkorn, J. et M. Müller. 2011, «What will be the environmental effects of new free-floating car-sharing systems? The case of car2go in Ulm», *Ecological Economics*, vol. 70, p. 1519–1528.
- Foster, G. et C. Kalenkoski. 2013, «Tobit or OLS? an empirical evaluation under different diary window lengths.», *Applied Economics*, vol. 45, p. 2994–3010.
- Frazis, H. et J. Stewart. 2012, «How to think about time-use data : what inferences can we make about long- and short-run time use from time diaries?», *Annals of Economics and Statistics*, , n° 105/106, p. 231–245.
- Gardes, F. 2014, «Full price elasticities and the value of time : a tribute to the beckerian model of the allocation of time», *w.p. CES, Paris School of Economics, University Paris I Panthéon-Sorbonne*.
- Gershuny, J. 2012, «Too many zeros : a method for estimating long-term time-use from short diaries», *Annals of Economics and Statistics*, vol. 105/106, p. 247–270.
- Gherzi, F. 2015, «Hybrid bottom-up/top-down energy and economy outlooks : a review of IMACLIM-S experiments», *Frontiers in Environmental Science*, vol. 3, n° 74, p. 1–18.
- Gherzi, F. et J.-C. Hourcade. 2006, «Macroeconomic consistency issues in E3 modeling : the continued fable of the elephant and the rabbit», *The Energy Journal*, vol. 27, p. 39–61.
- GIEC. 2014, «Changements climatiques 2014. Rapport de synthèse», URL http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf.
- Girod, B. et P. de Haan. 2010, «More or better? A model for changes in household greenhouse gas emissions due to higher income», *Journal of industrial ecology*, vol. 14, n° 1, p. 31–49.
- Greening, L. A., D. L. Greene et C. Difiglio. 2000, «Energy efficiency and consumption — the rebound effect — a survey», *Energy Policy*, vol. 28, n° 6–7, p. 389–401.

- Grischkat, S., M. Hunecke, S. Böhler et S. Haustein. 2014, «Potential for the reduction of greenhouse gas emissions through the use of mobility services», *Transport Policy*, vol. 35, p. 295–303.
- Gronau, R. et D. S. Hamermesh. 2006, «Time vs. goods : the value of measuring household production technologies», *Review of Income and Wealth*, vol. 52, n° 1, p. 1–16.
- Hamermesh, D. S. 2007, «Time to eat : household production under increasing income inequality», *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 89, n° 4, p. 852–863.
- Herendeen, R. et J. Tanaka. 1976, «Energy cost of living», *Energy*, vol. 1, n° 2, p. 165–178.
- Hertel, T. W. et D. van der Mensbrugghe. 2016, «GTAP 9 Data Base Documentation, chapter 14. Behavioral parameters», URL https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=5138.
- INSEE. 1993, «La macro CALMAR. redressement d'un échantillon par calage sur marges», URL <https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/2021902/doccalmar.pdf>.
- INSEE. 2006, «Enquête logement 2006», URL <http://cmh.ens.fr/greco/enquetes/XML/lil.php?lil=lil-0410>.
- INSEE. 2006, «Projection de ménages pour la France métropolitaine à l'horizon 2030», URL <https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/1280856/ip1106.xls>.
- INSEE. 2010, «Emploi du temps, (EDT) 2009-2010», URL <https://www.cmh.ens.fr/greco/enquetes/XML/lil.php?lil=lil-0695>.
- INSEE. 2010, «Projections de population à l'horizon 2060», URL <https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/1281151/ip1320.xls>.
- INSEE. 2011, «Budget de famille (BDF) 2011», URL <https://www.cmh.ens.fr/greco/enquetes/XML/lil.php?lil=lil-0831>.
- INSEE. 2011, «Projection de population active en moyenne annuelle selon le scénario central», URL <https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/1281165/ip1345.xls>.
- INSEE. 2013, «Consommations des ménages par produit (séries annuelles)», .
- INSEE. 2014, «Enquête Budget De Famille 2011. Dictionnaire des codes», .
- INSEE. 2016, «Définitions, enfant (au sens des enquêtes auprès des ménages)», URL <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/enfant-enq-menages.htm>, consulté le 18/10/2016.
- International Energy Agency. 2015, «World Energy Outlook 2015», .

- IPCC. 2006, «2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 2 : energy. Chapter 2 : stationary combustion», URL http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf.
- Jaccard, M. et M. Dennis. 2006, «Estimating home energy decision parameters for a hybrid energy-economy policy model», *Environmental Modeling and Assessment*, vol. 11, p. 91–100.
- Jackson, T. 2009, *Prosperity Without Growth : Economics for a Finite Planet.*, Earthscan.
- Jalas, M. 2002, «A time use perspective on the materials intensity of consumption», *Ecological Economics*, vol. 41, n° 1, p. 109–123.
- Jalas, M. 2005, «The everyday life context of increasing energy demands : time use survey data in a decomposition analysis», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 9, n° 1-2, p. 129–145.
- Jalas, M. et J. K. Juntunen. 2015, «Energy intensive lifestyles : time use, the activity patterns of consumers, and related energy demands in Finland», *Ecological Economics*, vol. 113, p. 51–59.
- Jenkins, S. P. et N. C. O’Leary. 1996, «Household income plus household production : the distribution of extended income in the U.K.», *Review of Income and Wealth*, vol. 42, n° 4.
- Kerkhof, A. C., S. Nonhebel et H. C. Moll. 2009, «Relating the environmental impact of consumption to household expenditures : an input-output analysis», *Ecological Economics*, vol. 68, p. 1160–1170.
- Khazzoom, J. D. 1980, «Economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances», *The Energy Journal*, vol. 1, n° 4, p. 21–40.
- Klepper, G., S. Peterson et K. Springer. 2003, «DART97 : a description of the multi-regional, multi-sectoral trade model for the analysis of climate policies», *Kieler Arbeitspapiere*, , n° 1149.
- Kletzan, D., A. Köppl, K. Kratena, S. Schleicher et M. Wüger. 2006, «Towards sustainable consumption : economic modelling of mobility and heating for Austria», *Ecological Economics*, vol. 57, n° 4, p. 608–626.
- Koesler, S. et M. Schymura. 2015, «Substitution elasticities in a constant elasticity of substitution framework – empirical estimates using nonlinear least squares», *Economic Systems Research*, vol. 27, n° 1, p. 101–121.
- Kok, R., R. M. Benders et H. C. Moll. 2006, «Measuring the environmental load of household consumption using some methods based on Input-Output energy analysis : a comparison of methods and a discussion of results», *Energy Policy*, vol. 34, p. 2744–2761.

- Le Gallic, T., N. Maïzi, E. Assoumou et P. Strosser. 2014, «Les exercices de prospective énergétique à l'épreuve des mutations des modes de vie», *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol. 14, n° 3.
- Le Treut, G., E. Combet, F. Ghersi et J. Lefevre. 2014, «Construction of hybrid Input-Output tables for E3 CGE model calibration and consequences on energy policy analysis», URL <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/6988.pdf>.
- Lenzen, M., M. Wier, C. Cohen, H. Hayami, S. Pachauri et R. Schaeffer. 2006, «A comparative multivariate analysis of household energy requirements in Australia, Brazil, Denmark, India and Japan», *Energy*, vol. 31, p. 181–207.
- Lutzenhiser, L. 1992, «A cultural model of household energy consumption», *Energy*, vol. 17, n° 1, p. 47–60.
- Lutzenhiser, L. 1993, «Social and behavioral aspects of energy use», *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 18, p. 247–289.
- Maresca, B. et A. Dujin. 2014, «La transition énergétique à l'épreuve du mode de vie», *Flux*, vol. 2, n° 96, p. 10–23.
- Martin, E. W. et S. A. Shaheen. 2011, «Greenhouse gas emission impacts of carsharing in North America», *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, n° 4, p. 1074–1086.
- MEEM. «Base de données Pégase (Pétrole, Électricité, Gaz et Autres Statistiques de l'Énergie)», URL <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/r/pegase.html>.
- MEEM. 2008, «Enquête Nationale Transports et Déplacements (ENTD) 2008», URL <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sources-methodes/enquete-nomenclature/1543/139/enquete-nationale-transports-deplacements-entd-2008.html>.
- MEEM. 2013, «Enquête Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et Usages de l'énergie (Phébus)», URL <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sources-methodes/enquete-nomenclature/1541/0/enquete-performance-lhabitat-equipements-besoins-usages.html>.
- MEEM. 2016, «Projections de la demande de transport sur le long terme», URL <http://www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Projections%20de%20la%20demande%20de%20transport%20sur%20le%20long%20terme.pdf>.
- Meijkamp, R. 1998, «Changing consumer behaviour through eco-efficient services : an empirical study of car sharing in the Netherlands», *Business Strategy and the Environment*, vol. 7, n° 4, p. 234–244.

- Moll, H. C., K. J. Noorman, R. Kok, R. Engström, H. Throne-Holst et C. Clark. 2005, «Pursuing more sustainable consumption by analyzing household metabolism in European countries and cities», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 9, n° 1–2, p. 259–275.
- Moriarty, P. et D. Honnery. 2010, «A human needs approach to reducing atmospheric carbon», *Energy Policy*, vol. 38, p. 695–700.
- Nässén, J. 2014, «Determinants of greenhouse gas emissions from Swedish private consumption : time-series and cross-sectional analyses», *Energy*, vol. 66, p. 98–106.
- Nässén, J., J. Larsson et J. Holmberg. 2009, «The effect of work hours on energy use. A micro-analysis of time and income effects», dans *ECEEE Summer Study*.
- Nations Unies. 1992, «Conférence des nations unies sur l'environnement et le développement : Agenda 21», URL <http://www.un.org/french/ga/special/sids/agenda21/action0.htm>.
- Nations Unies. 2002, «Rapport du Sommet mondial pour le développement durable», URL <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N02/636/94/PDF/N0263694.pdf?OpenElement>.
- Nijland, H. et J. van Meerkerk. 2017, «Mobility and environmental impacts of car sharing in the Netherlands», *Environmental Innovation and Societal Transitions*.
- Odegard, I. Y. et E. van der Voet. 2014, «The future of food – scenarios and the effect on natural resource use in agriculture in 2050», *Ecological Economics*, vol. 97, p. 51–59.
- Pachauri, S. 2004, «An analysis of cross-sectional variations in total household energy requirements in India using micro survey data», *Energy Policy*, vol. 32, p. 1723–1735.
- Paltsev, S., J. M. Reilly, H. D. Jacoby, R. S. Eckaus, J. R. McFarland, M. C. Sarofim, M. O. Asadoorian et M. H. Babiker. 2005, «The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model : version 4», URL <http://hdl.handle.net/1721.1/29790>.
- Räty, R. et A. Carlsson-Kanyama. 2010, «Energy consumption by gender in some European countries», *Energy Policy*, vol. 38, p. 646–649.
- Reinders, A., K. Vringer et K. Blok. 2003, «The direct and indirect energy requirement of households in the European Union», *Energy Policy*, vol. 31, p. 139–153.
- Reynolds, C. J., J. Piantadosi, J. D. Buckley, P. Weinstein et J. Boland. 2015, «Evaluation of the environmental impact of weekly food consumption in different socio-economic households in Australia using environmentally extended Input–Output analysis», *Ecological Economics*, vol. 111, p. 58–64.
- Rokeach, M. 1973, *The Nature of Human Values*, The Free Press, New York.
- Røpke, I. 2009, «Theories of practice – new inspiration for ecological economic studies on consumption», *Ecological Economics*, vol. 68, p. 2490–2497.

- Rotem-Mindali, O. et J. W. J. Weltevreden. 2013, «Transport effects of e-commerce : what can be learned after years of research?», *Transportation*, vol. 40, n° 5, p. 867–885.
- Sassi, O., R. Crassous, J.-C. Hourcade, V. Gitz, H. Waisman et C. Guivarch. 2010, «IMACLIM-R : a modelling framework to simulate sustainable development pathways», *International Journal of Global Environmental Issues*, vol. 10, n° 1–2, p. 5–24.
- Schipper, L., S. Bartlett, D. Hawk et E. Vine. 1989, «Linking life-styles and energy use : a matter of time?», *Annual review of energy*, vol. 14, n° 1, p. 273–320.
- Schmidt Rivera, X. C., N. Espinoza Orias et A. Azapagic. 2014, «Life cycle environmental impacts of convenience food : comparison of ready and home-made meals», *Journal of Cleaner Production*, vol. 73, p. 294–309.
- Shaheen, S. A. et T. E. Lipman. 2007, «Reducing greenhouse emissions and fuel consumption : sustainable approaches for surface transportation», *IATSS Research*, vol. 31, n° 1, p. 6–20.
- Siikavirta, H., M. Punakivi, M. Kärkkäinen et L. Linnanen. 2002, «Effects of E-commerce on greenhouse gas emissions : a case study of grocery home delivery in Finland», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 6, n° 2, p. 83–97.
- Sioui, L., C. Morency et M. Trépanier. 2013, «How carsharing affects the travel behavior of households : a case study of Montréal, Canada», *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 7, n° 1, p. 52–69.
- SOeS. 2011, «Les comptes des transports en 2010, tome 1», URL <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/1811/873/comptes-transports-2010.html>.
- Sorrell, S. et J. Dimitropoulos. 2008, «The rebound effect : microeconomic definitions, limitations and extensions», *Ecological Economics*, vol. 65, n° 3, p. 636–649.
- Stewart, J. 2009, «Tobit or not Tobit?», *BLS Working paper 432*.
- The Shift Project. 2017, «Décarboner la mobilité dans les zones de moyenne densité (version intermédiaire – 30 mars 2017)», cahier de recherche.
- Thomas, M.-P. 2012, «La prise en compte du mode de vie dans l’analyse des consommations d’énergie des domaines transports et domestique : analyse empirique», cahier de recherche, EDF R&D.
- Tobin, J. 1958, «Estimation of relationships for limited dependent variables», *Econometrica*, vol. 26, n° 1, p. 24–36.
- Tukker, A., R. A. Goldbohm, A. de Koning, M. Verheijden, R. Kleijn, O. Wolf, I. Pérez-Domínguez et J. M. Rueda-Cantuche. 2011, «Environmental impacts of changes to healthier diets in Europe», *Ecological Economics*, vol. 70, p. 1776–1788.

- UFE. 2012, «Électricité 2030 : quels choix pour la France?», URL <http://ufe-electricite.fr/publications/etudes/article/electricite-2030-quels-choix-pour>.
- Victor, D. G., D. Zhou, E. H. M. Ahmed, P. K. Dadhich, J. G. J. Olivier, H.-H. Rogner, K. Sheikho et M. Yamaguchi. 2014, *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, chap. Introductory Chapter, Cambridge University Press.
- Vringer, K., T. Aalbers et K. Blok. 2007, «Household energy requirement and value patterns», *Energy Policy*, vol. 35, p. 553–566.
- Vringer, K., R. Benders, H. Wilting, C. Brink, E. Drissen, D. Nijdam et N. Hoogervorst. 2010, «A hybrid multi-region method (HMR) for assessing the environmental impact of private consumption», *Ecological Economics*, vol. 69, p. 2510–2516.
- Vringer, K. et K. Blok. 1995, «The direct and indirect energy requirements of households in the Netherlands», *Energy Policy*, vol. 23, n° 10, p. 893–910.
- Weber, C. et A. Perrels. 2000, «Modelling lifestyle effects on energy demand and related emissions», *Energy Policy*, vol. 28, n° 8, p. 549–566.
- Wei, Y.-M., L.-C. Liu, Y. Fan et G. Wu. 2007, «The impact of lifestyle on energy use and CO₂ emission : an empirical analysis of China's residents», *Energy Policy*, vol. 35, n° 1, p. 247–257.
- Welsch, H. 2008, «Armington elasticities for energy policy modeling : evidence from four European countries», *Energy Economics*, vol. 30, p. 2252–2264.
- Wiedmann, T. 2009, «A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting», *Ecological Economics*, vol. 69, p. 211–222.
- Wing, I. S., K. Daenzer, K. Fisher-Vanden et K. Calvin. 2011, «Phoenix model documentation. Joint Global Change Research Institute, Pacific Northwest National Laboratory», URL http://www.globalchange.umd.edu/data/models/phx_documentation_august_2011.pdf.
- Wooldridge, J. M. 2010, *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*, seconde éd., The MIT Press.
- Wright, D. J. 1974, «Goods and services : an input-output analysis», *Energy Policy*, vol. 2, n° 4, p. 307–315.
- Wygonik, E. et A. Goodchild. 2012, «Evaluating the efficacy of shared-use vehicles for reducing greenhouse gas emissions : a US case study of grocery delivery», *Journal of the Transportation Research Forum*, vol. 51, n° 2, p. 111–126.

Titre : Modélisation des impacts énergie/carbone de changements des modes de vie. Une prospective macro-micro fondée sur les emplois du temps.

Mots clés : mode de vie ; prospective ; emploi du temps ; énergie ; émissions

Résumé : Les ménages sont responsables d'une part significative des consommations d'énergie et des émissions de CO₂, en particulier si l'on tient compte des consommations d'énergie et des émissions indirectes liées aux processus de production des biens et services consommés. Plusieurs travaux scientifiques et recommandations d'organisations gouvernementales et d'associations non-gouvernementales soulignent que des modifications des modes de consommations seront sans doute nécessaires pour atteindre les objectifs climatiques fixés aujourd'hui. Notre thèse propose une méthode d'analyse prospective de changements de mode de vie, qui permet d'en estimer les impacts macro-économiques ainsi que ceux sur les consommations d'énergie et les émissions de CO₂, tout en tenant compte de l'hétérogénéité des ménages en matière de comportements et de consommations d'énergie. Notre méthode explore les modes de consommation des ménages de manière fine, en prenant en considération le

lien entre emplois du temps et consommations.

En effet, les choix de consommation sont soumis non seulement à des contraintes de budget, mais également à des contraintes qui dérivent du temps à disposition et qui ne sont jamais prises en compte dans la prospective macro-économique. Nous construisons une base de données détaillant emplois du temps, dépenses et consommations d'énergie des ménages français et nous l'articulons à un modèle de prospective économique énergie-émissions par un processus de repondération itératif. Nous illustrons la portée de cet outil à travers l'analyse de trois scénarios, centrés respectivement sur la diffusion de nouvelles formes de mobilité (covoiturage et autopartage), la généralisation des achats en ligne et le retour vers le faire soi-même en matière d'alimentation. Pour les trois scénarios nous observons des réductions des consommations d'énergie et des émissions de CO₂. Par exemple, les émissions totales diminuent de 2,3% en 2050 dans le scénario sur la mobilité.

Title : Modelling energy demand and CO₂ emissions associated with changes in household consumption patterns. A macro-micro long-term analysis based on time use.

Keywords : lifestyle ; scenario analysis ; time use ; energy use ; emissions

Abstract : Household energy consumption represents a significant share of final energy use, especially when both direct and embodied energy are taken into account. Several academic studies, as well as the recommendations of the United Nations and of non-governmental organisations, suggest that a shift in consumption patterns will be necessary to achieve sustainable development. The aim of our research is to analyse long-term scenarios of changes in lifestyle. We propose a methodology that allows to analyse the macro-economic impacts of these changes, as well as the impacts on energy use and CO₂ emissions, while taking into account the heterogeneity of behaviours and energy consumptions among households. Consumption choices do not derive solely from monetary considerations but they are influenced by several factors.

One binding constraint, never taken into account in macro-economic energy modelling, is the available time. For this reason, our analysis considers time use data in addition to expenditure and energy use data. We build a data base that combines time use, expenditure and energy consumption data for French households, which provides detailed information about household consumption patterns. Then, for scenario analyses, we link the data base with an Energy-Economy-Emissions model, using an iteration process based on a reweighting technique. We illustrate the methodology by exploring three areas of change in consumption patterns: cooking habits, e-commerce and shared transport (carpooling and car sharing). We obtain CO₂ emissions reductions in all scenarios. As an example, emissions decrease by 2.3% by 2050 in the scenario focusing on transport.

