

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées –
Centre International de Recherche sur l'Environnement
et le Développement

Rapport de projet

L'inertie des choix de localisation dans l'évaluation des
politiques climatiques : modélisation en équilibre
général statique

Encadrants : Emmanuel Combet, Henri Waisman

SOMMAIRE

Introduction	3
1. Un outil hybride de modélisation : Imaclim-S.....	4
1.1. Imaclim-S	4
1.2. La modélisation de l'équilibre.....	6
1.3. Ce qu'il faut ajouter	6
2. La représentation spécifique de l'inertie dans un modèle d'équilibre général calculable	8
2.1. Les choix passés contraignent les arbitrages futurs.....	8
2.2. La modélisation des anticipations des ménages dans un modèle statique	9
2.3. L'équilibre du modèle	10
3 Simulation des choix de localisation dans un modèle hybride	12
3.1. Formulaire : les équations clés	12
3.2. Calibrage : paramètres calibrés sur données statistiques et paramètres endogènes	15
3.3. Traitement des données : la description spécifique du secteur des transports contraints.	17
Conclusion.....	18
Notations du modèle	19
Bibliographie	21
Annexes	22
Annexe 1 Spécification des fonctions de demande en pK_{m_v} et $pK_{m_{TC}}$	22
Annexe 2 Calibrage du secteur des transports	24

INTRODUCTION

Dans le cadre de la discussion mondiale sur le changement climatique l'objectif est fixé à une limitation de 2°C de la hausse de la température moyenne. Cela sous entend une réduction drastique des émissions de gaz à effets de serre (GES) au cours du siècle à venir. L'Union Européenne a ainsi chiffré son objectif, indiquant qu'il faut diviser par 4 les émissions de GES¹ d'ici 2050. Il s'agit du facteur 4, repris en France dans le cadre des engagements du Grenelle de l'Environnement.

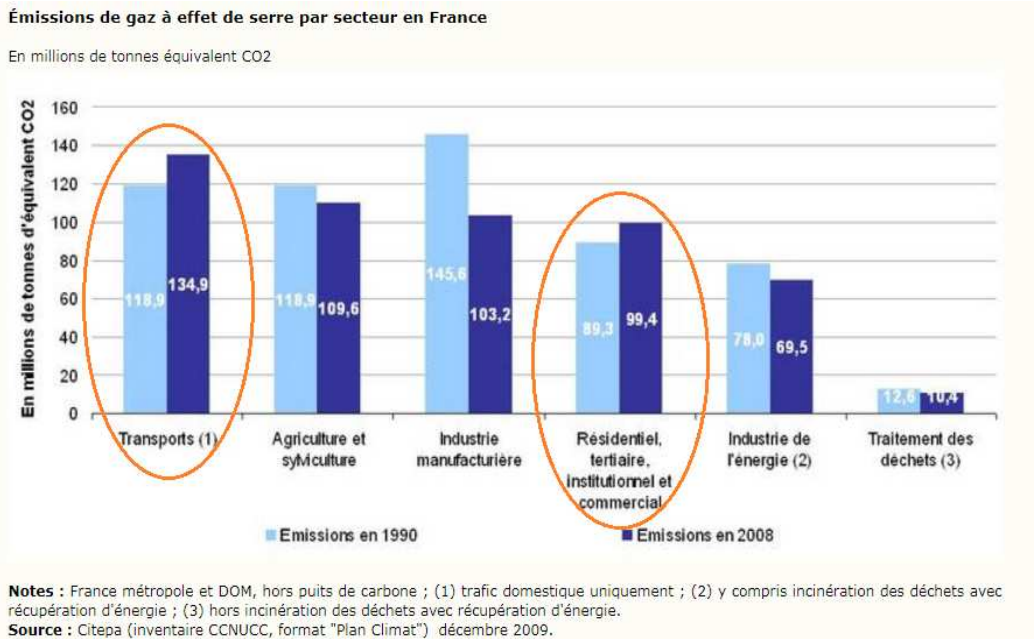


Figure 1: Le secteur résidentiel et les transports parmi les secteurs pour lesquels les émissions sont en augmentation

Ces objectifs extrêmement ambitieux ne seront pas atteints sans une politique énergétique motivée. Les premières études menées dans ce but s'accordent sur le fait que les secteurs les plus émetteurs sont les transports et le bâtiment (cf. figure 1 et 2). Elles soulignent par ailleurs qu'il s'agit de secteurs pour lesquels non seulement les volumes de GES émis sont importants, mais pour lesquels de plus, les tendances de long terme sont à la hausse. On peut alors s'étonner que la ville, centre névralgique de ce type d'activité, ait été aussi peu prise en compte dans les analyses effectuées jusqu'ici. Plusieurs raisons sont avancées [Gusdorf, 2008] qui soulignent combien la ville, par sa dimension intersectorielle, est difficilement intégrable aux actuels modèles de prospective économique. Ainsi elle n'a que très rarement fait l'objet d'un traitement spécifique et encore le plus souvent au prix d'hypothèses de modélisation extrêmement fortes. Les travaux du CIRED s'attachent à souligner son poids et à analyser l'impact des politiques urbaines dans la lutte contre le changement climatique. L'enjeu majeur du traitement de la ville réside dans la modélisation de l'inertie qui caractérise son évolution. Le système urbain est en effet complexe, ses évolutions sont lentes et mal maîtrisées. Si dans ce domaine l'inertie technique, due aux infrastructures de réseau, à la structure des quartiers, est pour une grande part responsable², l'inertie due aux comportements des ménages ne doit pas non plus être négligée [Coulombel, 2011].

¹ En prenant les émissions de 1990 comme seuil de référence.

² En France, la durée de vie typique d'un immeuble est de 100 à 150 ans.

Afin d'aborder cette problématique, ce projet se focalise sur le lien entre choix de localisation des ménages, en prenant en compte la seule inertie inhérente à ces décisions, et politique de transports urbains. Il s'agit ainsi d'étoffer la représentation de la ville en tant qu'entité unique en développant spécifiquement la représentation du secteur des transports et celui des logements.

L'intérêt en termes de politiques publiques est double. Il s'agit ainsi de questionner l'efficacité et la complémentarité des instruments de politiques publiques sous la contrainte d'une forte inertie des choix des ménages en termes de localisation. D'une part dans les précédentes analyses de la fiscalité carbone, l'inertie des choix des ménages n'a pas été modélisée, alors qu'elle représente un argument clé du débat public sur l'opportunité d'une taxe carbone. D'autre part, dans la modélisation des conséquences économiques du changement climatique et les moyens de s'y adapter, les interactions entre logement et transport contraint ne sont que très grossièrement modélisées. La prise en compte des phénomènes d'inertie serait à même de permettre de construire des politiques de développement urbain plus adéquates [Gusdorf, 2008].

1. UN OUTIL HYBRIDE DE MODELISATION : IMACLIM-S

1.1. IMACLIM-S

Le modèle Imaclim-S, développé par le CIREN, a pour vocation de représenter les effets de politiques publiques liées aux questions énergétiques sur l'économie. Il s'agit ainsi d'un modèle d'aide à la décision politique. Le principe fondamental qui le distingue des autres modèles qui ont la même vocation repose sur la prise en compte d'un équilibre de second rang, s'attachant à modéliser les imperfections institutionnelles, techniques ou encore comportementales observées dans la réalité.

Il s'agit d'un modèle de statique comparative. A partir d'une perturbation exogène de la situation de référence, il calcule le nouvel équilibre résultant, à long terme, de l'adaptation de l'économie. Les analyses qu'on en tire permettent de structurer la discussion économique. Elles soulignent les paramètres clés qui influent sur les interactions ou qui sont concernés par la perturbation. Elles sont muettes, en revanche, sur les différentes étapes de la transition.

"The method of *comparative statics* [...] the investigation of changes in a system from one position of equilibrium to another without regard to the transitional process involved in the adjustment. By equilibrium is meant here only the values of variables determined by a set of conditions, and no normative connotation is attached to the term [...] [This] concept of equilibrium system [...] is applicable as well as in the case of a single variable as to so-called *general equilibrium* involving thousands of variables. [...] In every case *ceteris paribus* assumptions must be made. The only difference lies in the fact that [in] the general equilibrium analysis of, let us say, Walras, [...] the things which are taken as data for that system happen to be matters which economists have traditionally chosen not to consider as within their province. Among these data may be mentioned tastes, technology, the governmental and institutional framework, and many others. It is clear, however, that logically there is nothing fundamental about the traditional boundaries of economic science."

“Within the framework of any system the relationships between our variables are strictly those of mutual interdependence. It is sterile and misleading to speak of one variable as causing or determining another. Once the conditions of equilibrium are imposed, all variables are simultaneously determined. [...] The only sense in which the use of the term causation is admissible is in respect to changes in external data and parameters. As a figure of speech, it may be said that changes in these cause changes in the variables of our system.”

P. Samuelson, *Foundations of Economic Analysis*, 1983 (p. 8-9)

IMACLIM-S est un modèle d'équilibre général calculable [Gherzi et al. 2009]. Les impacts macroéconomiques des politiques climatiques s'inscrivent dans un cadre équilibré à la fois d'un point de vue comptable (flux économiques) et physique (flux de biens et en particulier bilan énergétique). Deux caractéristiques essentielles le distinguent d'un modèle néoclassique traditionnel : (i) la modélisation d'un déséquilibre sur le marché du travail ; (ii) la modélisation de préférences des ménages et d'arbitrages dans la production spécifiquement pensés pour permettre l'articulation avec une expertise *bottom-up*³, dans un souci de garantir le réalisme technique de ses simulations même pour des déviations importantes par rapport à l'équilibre de référence. L'évolution des systèmes techniques résulte également d'un progrès technologique induit.

Imaclim-S représente une économie française ouverte [Combet et al. 2010], désagrégée en quatre catégories d'agents (ménages, entreprises, administrations publiques et 'reste du monde') et quatre produits (pétrole brut, carburants, autres énergies, et un bien composite agrégeant l'ensemble des biens et services non énergétiques). Enfin, il s'agit d'un modèle hybride⁴ [Hourcade et al., 2006] en ce sens que les volumes d'énergie échangés ne sont pas déduits des transactions monétaires, mais résultent d'un effort d'harmonisation des bilans énergétiques et des données de la comptabilité nationale à l'année de référence. Cette hybridation de l'équilibre de base facilite le dialogue avec les expertises d'ingénieur pour cerner les marges de manœuvre techniques à l'horizon considéré.

Agents	Ménages Etat Entreprises « Reste du monde”
Biens	Pétrole brut, Carburant, (consommé pour les déplacements en voiture) Autres énergies, (consommées dans le cadre du logement) Composite, (qui regroupe le reste de l'économie)

³ Expertise qui met l'accent sur une description détaillée des technologies disponibles et sur les caractéristiques qu'elles pourraient acquérir dans le futur, par opposition à l'expertise top-down, la plus fréquente, fondée sur un ECG, qui représente l'économie comme un ensemble de marchés parfaitement compétitifs.

⁴ Réalise la synthèse entre les deux courants de modélisation cités précédemment : top-down et bottom-up.

1.2. LA MODELISATION DE L'EQUILIBRE

Le circuit des revenus associé au flux des biens débute par la rémunération des facteurs de production à laquelle s'ajoute le solde des revenus échangés avec l'extérieur pour donner le revenu disponible. Il se poursuit par les opérations de répartition entre les quatre catégories d'agents : prélèvements obligatoires (cotisations sociales, TVA, TIPP, IS, IR, *etc.*) et transferts sociaux (chômage, retraite, autres). Une fois prises leurs décisions de consommation et d'investissement, les agents prêtent ou empruntent sur les marchés financiers selon que leur épargne est positive ou négative. Cela modifie leur position financière nette et les flux de revenu qui y sont associés, [Combet et al. 2010]. Le modèle est calibré sur les données de 2004 (INSEE, 2004 ; AIE, 2007).

La modélisation des décisions de consommation et d'investissement des ménages reste à un niveau macroéconomique agrégé et ne décrit ainsi pas les mécanismes d'inertie qui pèsent sur les changements de consommation pour certains biens comme l'habitat. Par ailleurs, compte tenu du niveau sectoriel très agrégé, les secteurs spécifiques du logement ou des transports publics font partie intégrante du composite.

1.3. CE QU'IL FAUT AJOUTER

Il s'agit donc d'étoffer ce modèle avec une description plus fine du comportement des ménages dans les secteurs qui nous intéressent, à savoir l'habitat et les transports urbains. Il s'agit par ailleurs d'intégrer aux décisions de consommation et d'investissement des ménages la prise en compte de l'incertitude qui pèse sur certains de ces choix ainsi que l'inertie qui caractérise leurs conséquences.

L'ajout des secteurs transports « contraints » et logement

L'ajout du secteur logement a déjà été réalisé dans le travail d'Olivier Froment [Froment, 2010]. Pour ce qui est du secteur des transports contraints, nous avons fait le choix, compte-tenu de l'objectif de modélisation, de ne représenter que le secteur des transports urbains contraints et réguliers. Il s'agit des transports réalisés soit en véhicule privé –voitures- soit en transport en commun, dans le cadre des déplacements pendulaires⁵ (domicile-travail). Ils sont désignés, dans les enquêtes statistiques des déplacements, sous l'étiquette de « mobilité urbaine et interurbaine régulière ». Ces transports correspondent bien aux transports contraints par le lieu de l'habitat : domicile-travail, domicile-lieu de garde des enfants, ou encore domicile-ravitaillement [SOeS, 2010].

La modélisation de l'inertie des comportements

L'objectif est de réussir à modéliser les choix de décisions des ménages au plus proche de ce qu'ils sont en réalité. Le mécanisme général de décision sous incertitude sera représenté selon le schéma suivant :

⁵ Désignés en anglais par le terme « commuting »

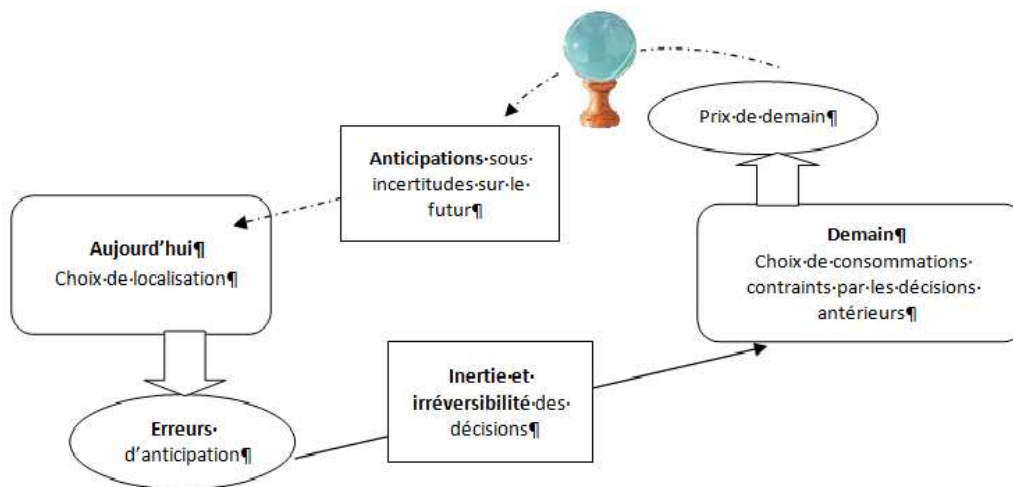


Figure 2: La décision sous incertitude

Ainsi, le ménage au moment de réaliser son choix de localisation, évalue ce que seront, de son point de vue, les prix de demain pour le logement, l'énergie, ou encore les transports. Cela lui permet d'estimer les montants de dépenses sur lesquels il s'engage en choisissant aujourd'hui sa localisation. Le ménage est obligé d'anticiper les prix de demain. Cela se fait sous de nombreuses incertitudes qui sont d'autant plus importantes que la durée pour laquelle le ménage fait son choix de localisation est longue. Cela induit des erreurs d'anticipations sur des choix dont les conséquences ont une très forte inertie. L'arbitrage pour la consommation quotidienne, tout au long des années pendant lesquelles le ménage ne remettra pas en question son choix de localisation⁶, seront donc contraintes de façon non optimale par les erreurs d'anticipation du ménage.

L'inertie des décisions de localisation peut être due, de façon non exhaustive, à plusieurs facteurs, auxquels on peut ajouter le fait que globalement, les ménages peuvent présenter une certaine aversion au risque, à l'incertain d'un déménagement :

- Coûts financiers du déménagement, des frais de mutation
- Coût du temps de recherche du logement, du déménagement, de la réinstallation
- Coûts social, nécessité de faire de nouvelles connaissances, trouver une nouvelle école, de nouveaux commerçants, satisfaire tous les membres du foyer⁷.

⁶ Les ménages passent en moyenne 14 ans dans un logement [Jacquot, 2003].

⁷ [Coulombel, 2011]

2. LA REPRESENTATION SPECIFIQUE DE L'INERTIE DANS UN MODELE D'EQUILIBRE GENERAL CALCULABLE

Notations⁸

Le modèle comporte déjà le secteur du bien composite dont la consommation est C_c . On note b_n le besoin minimal en consommation de composite. Les secteurs énergétiques sont eux aussi déjà modélisés. On désigne l'énergie consommée pour le chauffage du logement par la notation $C_{e,H}$ et l'énergie consommée par les voitures individuelles C_{carbu} . Pour ce secteur spécifique, on introduit la notation C_{carbu}^{locale} qui désigne la part de la consommation de carburant exclusivement destinée aux transports contraints.

De plus, afin de comparer les technologies à l'œuvre et les stratégies des ménages, il nous faut introduire la notion de service rendu équivalent. En effet, ce n'est qu'en comparant les résultats, en termes de satisfaction apportée au ménage que différentes politiques et stratégies peuvent être confrontées. De ce fait on introduit la notion de *service énergétique rendu par le logement*, $S_{e,H}$, en mtep, qui correspond au confort thermique du logement et la notion de service de mobilité $S_{mobilité}$ qui correspond au temps et aux conditions dans lesquels la distance contrainte est parcourue.

On intègre par ailleurs au modèle existant les deux secteurs:

- les transports en commun contraints, dont les quantités sont mesurées en passagers-km (pKm) et qui comprennent les transports en voiture (pKm_v) et les transports en commun (pKm_{TC}). On néglige pour ce secteur la prise en compte des modes « doux » comme le vélo et la marche à pied.
- le logement dont les quantités sont mesurées en m² (H).

On se restreint donc à modéliser les décisions de consommation des ménages à ces 5 biens (logement, consommation de carburant pour la voiture, consommation de transport en commun, consommation d'énergie pour le logement et consommation de bien composite).

2.1. LES CHOIX PASSES CONTRAignent LES ARBITRAGES FUTURS

Le raisonnement général que l'on cherche à modéliser est le suivant : un ménage choisit un logement, en prenant en compte plusieurs attributs : sa surface, son efficacité énergétique (qui augure des dépenses de chauffage, de climatisation...) et sa situation géographique par rapport à son emploi. Ce choix de logement implique alors des contraintes sur le budget ultérieur du ménage : les parts destinées au loyer et au financement des coûts de transport deviennent incompressibles. Dans les choix de consommation de court terme, le ménage ne peut plus qu'arbitrer sur le service énergétique qu'il souhaite, par rapport à sa consommation de composite. De ce fait on sépare initialement les décisions de consommation en deux : le ménage choisit la part de son budget qu'il accepte de contraindre pour les années au cours duquel il va se fixer à une localisation. Ensuite, d'une part il réalise une fois pour toute son arbitrage sur la localisation, compte tenu du coût de la surface, et des valeurs anticipées du coût du transport ou de celui de l'énergie, d'autre part il réalise chaque année ses choix de consommations de court terme sur la part de budget non contraint qu'il s'est réservée.

⁸ Toutes les notations du modèle sont également regroupées à la fin du rapport.

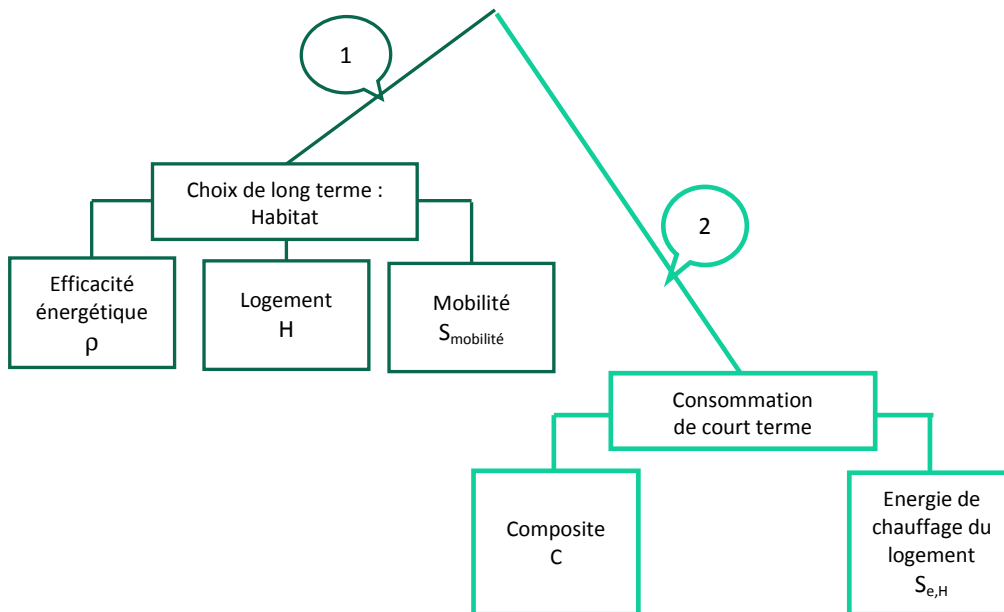
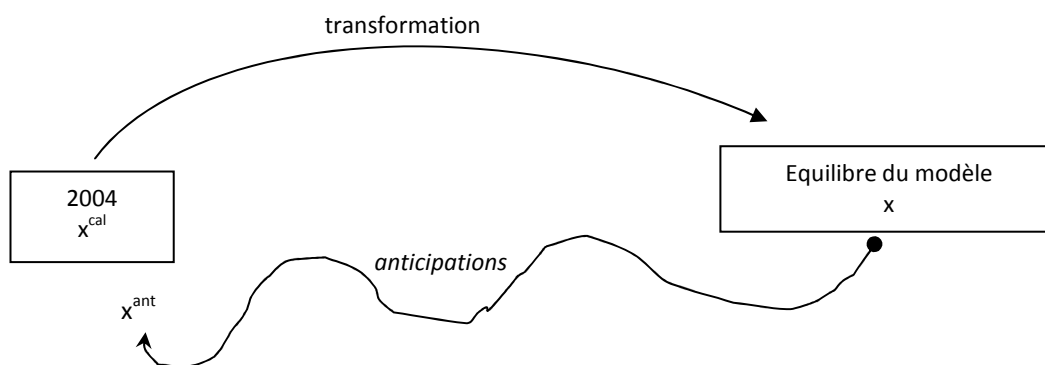


Figure 3: La modélisation de l'inertie des choix de localisation: la prise en compte des anticipations des ménages

2.2. LA MODELISATION DES ANTICIPATIONS DES MENAGES DANS UN MODELE STATIQUE

Nous proposons, compte tenu de la structure générale de Imaclim-S, de modéliser les anticipations des ménages comme suit :

soit x une variable quelconque à l'équilibre du modèle, x^{cal} représente la valeur de cette variable à l'année du calibrage, ici en 2004 et x^{ant} représente la valeur anticipée de cette variable, c'est-à-dire la valeur que l'on suppose en 2004 que la variable prendra à l'équilibre.



Il est en effet délicat du point de vue conceptuel de modéliser des anticipations dans un modèle de statique comparative. Cependant, en restant dans la logique globale du modèle, on peut considérer que l'anticipation correspond pour une part (α) à la situation lors du calibrage, situation que les ménages connaissent, et pour une part à une déviation ($1-\alpha$) induite par le

comportement macroéconomique des agents (tant l'Etat qui peut imposer des normes, influencer sur les taxes, que les ménages qui peuvent réaliser des investissements ou encore l'équilibre du « Reste du monde » qui peut influencer sur les prix de marché).

On a ainsi $x^{ant} = \alpha \cdot x^{cal} + (1 - \alpha) \cdot x$ où $\alpha \in [0; 1]$

En faisant varier le paramètre α on peut ainsi influencer sur l'exactitude des anticipations des ménages.

2.3. L'EQUILIBRE DU MODELE

La demande en habitat des ménages : programme de long terme

Il s'agit de la demande en surface de logement et en localisation par rapport au lieu d'emploi qui résulte des décisions de long terme effectuées par les ménages. Dans ces décisions de long terme, les ménages souhaitent minimiser⁹ les coûts contraints par la localisation –les coûts de l'habitat-, sous une contrainte d'utilité, que l'on prend temporelle ici.

$$(S1) \begin{cases} \min_H & p_H^{ant}(H) \cdot H + p_{mobilité}^{ant}(H) \cdot S_{mobilité}(H) + p_e^{ant} \cdot C_{e,H}(H) \quad (1) \\ s. t. & T_0 = temps_{mobilité}(H) \quad (2) \end{cases}$$

Les coûts contraints par la localisation correspondent à des prix anticipés et comprennent :

- Les coûts de la surface habitée
- Les coûts de la mobilité induite par le choix de localisation
- Les dépenses d'énergie pour le chauffage du logement induites par le choix du logement qui dépendent de l'efficacité énergétique (ρ) du logement et du service énergétique (σ) que le ménage attend de son logement (préférences particulières pour chaque ménage selon qu'il apprécie être très chauffé ou non...)

$$p_e^{ant} \cdot C_{e,H}(H) = p_e^{ant} \cdot \frac{1}{\rho^{ant}(H)} \cdot \sigma_0 \cdot H \quad (3)$$

L'arbitrage de court-terme : demande en service énergétique du logement

Dans le deuxième temps, les ménages consomment du bien composite et chauffent leur logement. Il s'agit de maximiser leur utilité sous la contrainte budgétaire de revenu disponible. Le revenu disponible correspond au revenu auquel on soustrait la part épargnée et les dépenses engagées par le choix de long terme : le loyer et les dépenses de mobilité. La contrainte budgétaire s'exprime alors :

$$(S2) \begin{cases} \max_{C, S_{e,H}} & U(C, S_{e,H}) \quad (4) \\ s. t. & Y - p_H \cdot H - p_{mobilité} \cdot S_{mobilité} = p_C \cdot C + p_e \cdot C_{e,H} \quad (5) \end{cases}$$

⁹ On s'inspire du modèle monocentrique, (Fujita, 1989) propose de maximiser l'utilité des ménages sous une contrainte de budget ou de temps. Ici, on utilise l'approche duale de minimisation des coûts sous une contrainte temporelle.

L'arbitrage de court-terme : le choix des moyens de transport

Pour la question spécifique de la mobilité, on pose les trois relations suivantes, valables que les prix, les vitesses et la répartition modales soient ou non anticipés :

$$p_{mobilité} \cdot S_{mobilité}(H) = p_{carbu} \cdot C_{carbu}^{locale} + p_{TC} \cdot pKm_{TC} \quad (6)$$

$$pKm(H) = pKm_v + pKm_{TC} \quad (7)$$

$$T_0 = \frac{pKm_v}{v_v(H)} + \frac{pKm_{TC}}{v_{TC}(H)} \quad (8)$$

L'offre des entreprises et la spécificité du marché du logement

Une entreprise pour la production d'un bien Y a une fonction de production CES :

$$Y = (\lambda_l \cdot L^{\frac{\mu-1}{\mu}} + \lambda_k \cdot K^{\frac{\mu-1}{\mu}} + \sum_j \lambda_{Cl,j} \cdot Cl_j^{\frac{\mu-1}{\mu}})^{\frac{\mu}{\mu-1}} \quad (9)$$

La minimisation des coûts unitaires de production permet d'en déduire les consommations unitaires en facteurs secondaires α_j , en travail l , et en capital k .

L'offre des entreprises s'exprime alors via le prix des biens selon :

$$p_Y = \sum_j p_{Cl,j} \cdot \alpha_j + p_l \cdot l + p_k \cdot k + \tau_{impot} \cdot p_Y + \tau_{ENE} \cdot p_Y \quad (10)$$

Où τ_{ENE} correspond à la marge que dégage l'entreprise.

Pour le secteur spécifique du marché du logement, le fort pouvoir de marché des producteurs, propriétaires, est modélisé via une autre équation d'offre. Elle traduit le fait que pour ce secteur le prix est avant tout déterminé par la localisation¹⁰ :

$$p_H = \text{fonction décroissante}(pKm(H)) = \text{fonction décroissante}(H) \quad (11)$$

$$pKm(H) = \text{fonction croissante de } H \quad (12)$$

L'hypothèse sous jacente est que plus le ménage s'éloigne du centre ville plus le prix au m² diminue et donc plus le ménage peut se permettre une grande surface.

L'équilibre

- **Sur le marché du logement : H et pKm(H)**

La quantité de logement choisie par les ménages résulte de la confrontation entre la demande de logement et le prix offert par les propriétaires. La résolution du système S1, en intégrant l'équation (11) permet d'obtenir cette quantité de logement H. L'équation (12) permet alors de connaître la distance de mobilité pKm.

¹⁰ On ne peut que citer le *leitmotiv* des professionnels de l'immobilier « Localisation, localisation, localisation »...

Pour ce secteur spécifique, l'équation (10) permet de connaître le taux de marge, endogène, des propriétaires de logement.

- **La répartition modale des transports : pKm_{TC} et pKm_V**

Bien que la distance totale de mobilité soit fixée par la décision de localisation, de long terme, le ménage peut arbitrer à court terme sur la part de transport réalisée en voiture et celle réalisée en transport en commun, c'est-à-dire la répartition modale de sa mobilité. La résolution du système suivant, avec les vitesses réelles, donne la répartition modale de la mobilité :

$$(S3) \begin{cases} pKm(H) = pKm_V + pKm_{TC} \\ T_0 = \frac{pKm_V}{v_V(H)} + \frac{pKm_{TC}}{v_{TC}(H)} \end{cases}$$

On notera que les prix du carburant ou du transport en commun n'entrent pas en compte dans cet arbitrage. Seuls les prix anticipés entrent en compte via la détermination de $pKm(H)$. Cela concorde avec les très faibles élasticités prix du carburant observées usuellement (-0,40 en moyenne entre 1985 et 2006) [Calvet, 2011]. On notera par ailleurs que les vitesses des modes jouent un rôle majeur dans la répartition modale.

- **Les consommations d'énergie : logement et carburant**

Les ménages peuvent arbitrer à court terme sur le service énergétique dont ils décident de se satisfaire et donc sur leur consommation d'énergie, en fonction du prix de l'énergie. On a en effet la relation $C_{e,H} = 1/\rho \cdot S_{e,H}$. On ajoute aussi la relation $C_{carbu}^{locale} = \kappa_V \cdot pKm_V$, afin de connaître la consommation de carburant.

La résolution du système S2 en prenant en compte les prix déterminés par l'équation¹¹ (10) permet d'établir quelles seront les consommations d'énergie et de composite.

3 SIMULATION DES CHOIX DE LOCALISATION DANS UN MODELE HYBRIDE

3.1. FORMULAIRE : LES EQUATIONS CLES

Les différentes hypothèses de simplification du modèle sont présentées ci-après. Elles permettent d'exprimer analytiquement une majeure partie des résultats recherchés.

La demande de logement et de mobilité

On ne considère pas la dépendance de p avec la surface du logement (équation 3). Celle-ci mérite cependant d'être modélisée dans la mesure où elle permettra à l'avenir d'intégrer les questions d'efficacité énergétique de l'habitat au modèle.

On considère que les vitesses anticipées ne dépendent pas du choix de H (équations 1 et 8). Cela revient à considérer qu'elles sont identiques sur l'ensemble du territoire. Dans le cas de vitesses qui sont anticipées par les ménages une telle approximation semble naturelle.

¹¹ Où les taux de marges sont ici exogènes.

Enfin, on spécifie les dépendances entre prix au m², distance de mobilité et surface de logement abordable selon :

$$p_H = p_H^0 \cdot e^{-\pi(H-H_0)} \quad (11) \quad \text{et} \quad pKm(H) = e^{\delta H} \quad (12)^{12}$$

Alors la résolution de l'équilibre sur le marché du logement en prenant en compte la dépendance explicite des équations 11 et 12 (cf. section précédente, partie équilibre) donne la valeur implicite de H, dont on déduit la valeur de la distance de mobilité :

$$0 = e^{-\pi H} (1 - \pi \cdot H) + \delta \cdot e^{\delta H} \cdot \frac{p_{carbu}^{ant} \cdot v_V^{ant} - p_{TC}^{ant} \cdot v_{TC}^{ant}}{v_V^{ant} - v_{TC}^{ant}} + p_e^{ant} \cdot \frac{1}{\rho^{ant}} \cdot \sigma_0 \quad (13)$$

$$pKm(H) = e^{\delta H}$$

La demande en mobilité: répartition modale des moyens de transport

Comme mentionné ci-dessus, la répartition modale dépend fortement des vitesses de chaque mode (équation 8). Afin de modéliser ces vitesses, nous avons fixé trois exigences :

- Les vitesses dépendent négativement du nombre de passagers qui utilisent ce mode : cela modélise le phénomène de congestion.
- La vitesse du transport en commun en 2004 est beaucoup plus faible que celle de la voiture la même année.
- Elles dépendent positivement de la qualité des infrastructures¹³ (cap) mises en œuvre. Cet aspect de la modélisation est déterminant afin de mesurer l'impact sur les ménages de politiques urbaines d'investissement dans des infrastructures de transport par rapport à celui d'une politique fiscale de taxe carbone.

De ce fait, les vitesses sont de la forme suivante :

$$v_V = \frac{v_V^0}{f\left(\frac{pKm_V}{cap_V}\right)} \quad (14) \quad \text{et} \quad v_{TC} = \frac{v_{TC}^0}{f\left(\frac{pKm_{TC}}{cap_{TC}}\right)}, \text{ avec } f \text{ croissante} \quad (14)$$

On spécifie alors f à partir de la répartition de la mobilité selon les moyens de transport en 2004 et des exigences présentées¹⁴. Ceci nous permet finalement de formuler la dépendance des vitesses selon :

$$v_V = \frac{v_V^0}{1 + \left(\frac{v_V^0}{vlim} - 1\right) \frac{pKm_V}{cap_V}} \quad \text{et} \quad v_{TC} = \frac{v_{TC}^0}{1 + \left(\frac{v_{TC}^0}{vlim} - 1\right) \frac{pKm_{TC}}{cap_{TC}}}$$

¹² On a en fait $pKm(H)=K \cdot e^{\delta H}$ avec $K=1$ pKm.

¹³ Le taux d'occupation désigne le rapport entre le nombre de passagers-kilomètres qui utilisent le mode et les infrastructures présentes : pKm/cap.

¹⁴ Cf. annexe 1 « Spécification des fonctions de demande en pKm_V et pKm_{TC} » ainsi que le fichier excel « Détermination de la forme des vitesses ».

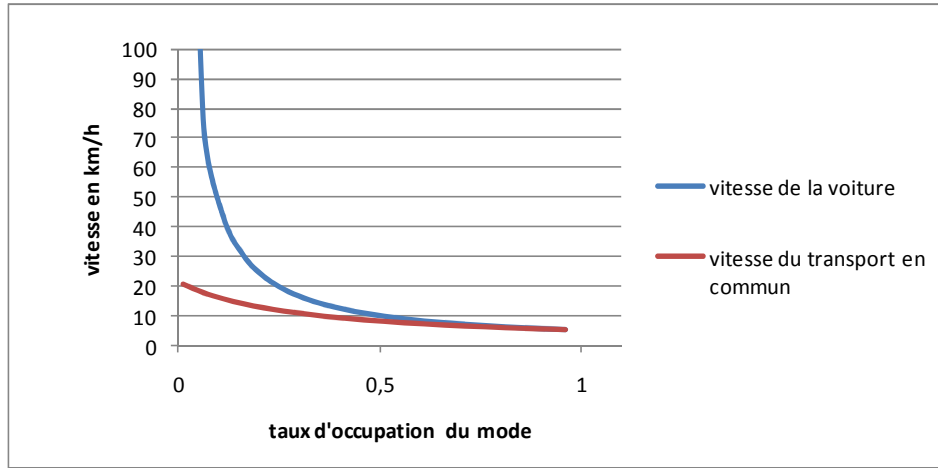


Figure 4: La variation de la vitesse en fonction du taux d'occupation du mode de transport

La résolution du système S3, avec la forme explicite des vitesses exposée ci-dessus sera faite numériquement.

$$(S3) \left\{ \begin{array}{l} pKm(H) = pKm_v + pKm_{TC} \\ T_0 = \frac{pKm_v}{v_v^0} + \frac{pKm_{TC}}{v_{TC}^0} \\ \frac{pKm_v}{1 + (\frac{v_v^0}{v_{lim}} - 1) \frac{pKm_v}{cap_v}} \quad \frac{pKm_{TC}}{1 + (\frac{v_{TC}^0}{v_{lim}} - 1) \frac{pKm_{TC}}{cap_{TC}}} \end{array} \right.$$

La demande en énergie pour le logement et en bien composite

Après avoir étudié les séries temporelles longues de l'INSEE on observe que la part du budget des ménages dédiée au chauffage du logement est relativement stable dans le temps. De ce fait, on choisit une fonction d'utilité Cobb-Douglas :

$$U = (C - bn)^{\xi^C} \cdot S_{e,H}^{\xi^H} \quad (15)$$

Où ξ^H désigne justement la part du budget des ménages dédiée au chauffage du logement.

La détermination de l'équilibre avec l'utilité explicitée de l'équation (15) permet de déduire les demandes en chauffage et en bien composite :

$$(1-s)Y - p_H \cdot H - p_{carbu} \cdot C_{carbu}^{locale} - p_{TC} \cdot pKm_{TC} + p_{carbu} \cdot \frac{\xi^H}{\xi^C} \cdot bn = (p_c + p_{carbu} \cdot \frac{\xi^H}{\xi^C}) \cdot C$$

$$(1-s)Y - p_H \cdot H - p_{carbu} \cdot C_{carbu}^{locale} - p_{TC} \cdot pKm_{TC} - p_c \cdot bn = p_e \left(1 + \frac{p_c \xi^C}{p_{carbu} \xi^H}\right) \cdot C_{e,H}$$

3.2. CALIBRAGE : PARAMETRES CALIBRES SUR DONNEES STATISTIQUES ET PARAMETRES ENDOGENES

Dans le modèle proposé dans ce rapport de nombreux paramètres de dépendance, d'ajustement, ont été introduits. Il faut maintenant attribuer des valeurs à ces paramètres, afin que lorsque la perturbation appliquée au modèle est nulle, la situation de référence soit le résultat du modèle, l'équilibre. Les grandeurs tirées des comptes réels équilibrés à l'année de référence doivent être liées entre elles via les équations que nous avons introduites.

Le calibrage consiste donc à donner un jeu de valeurs à l'ensemble des variables puis à résoudre le système pour déterminer les valeurs que doivent prendre les paramètres introduits afin que les équations soient respectées¹⁵. Tous les paramètres du modèle ne sont cependant pas évalués par les opérations de calibrage. On a ainsi fait le choix d'utiliser les valeurs de la littérature pour évaluer le service énergétique unitaire ainsi que la part occupée par l'énergie destinée au chauffage du logement dans le budget des ménages.

Le service énergétique unitaire désigne le confort thermique de l'habitat, selon les attentes individuelles de chaque ménage. Il s'exprime donc en °C/m². Cependant, la notion de confort thermique est très difficile à établir, et dépend de beaucoup de paramètres. De ce fait, on considérera comme proxy de ces variables σ' (en kWh/m²) la consommation énergétique usuelle d'un logement et ρ' (sans unité) l'efficacité énergétique du logement, dans l'attente d'une meilleure information sur ces données. En 2004, on prend par exemple une valeur de 245kWh/m² pour σ .

Paramètres calibrés sur données statistiques

ξ^H	Part du budget des ménages dédiée au chauffage du logement	0,035 ¹⁶
σ_0	Proxy du service énergétique unitaire	245 kWh/m ² ¹⁷

¹⁵ Cf. fichier excel « Valeur calibrage en 2004 » où les équations du système d'équations inversé sont codées

¹⁶ Coefficient budgétaire de l'énergie domestique en 2002 publié dans Consommation d'énergie : autant de dépenses en carburants qu'en énergie domestique par Danielle Besson, division Synthèses des biens et services, Insee, 2007. On trouve aussi 6% dans la note *Le budget « énergie du logement » : les déterminants des écarts entre les ménages* du Commissariat général au Développement Durable, juin 2010.

¹⁷ Consommation totale d'énergie par unité de surface pour le chauffage du logement, en 2004. Source : Ademe, 2004, présentée dans la note « Macro économie de la lutte contre l'effet de serre dans l'habitat existant », dirigée par Eric Lagandré, de l'ANAH, octobre 2005.

Paramètres endogènes

ξ^C	Elasticité de l'utilité par rapport à la consommation de bien composite	0,07
b_n	Besoin minimal en consommation de bien composite	923 pseudo quantités
π	Dépendance du prix du logement avec la surface du logement	$4,9 \cdot 10^{-4}$ par millions de m^2
δ	Dépendance de la distance au centre ville avec la surface du logement	$2,4 \cdot 10^{-3}$ par millions de m^2
ρ	Efficacité énergétique réelle du logement	$7 \cdot 10^5$
ρ^{ant}	Efficacité énergétique anticipée du logement	$7 \cdot 10^5$
σ	Proxy du service énergétique unitaire réel du logement	245 kWh/ m^2
$S_{e,H}$	Service énergétique rendu par le logement	$2,7 \cdot 10^7$ mtep
C_{carbu}^{locale}	Consommation de carburant pour les transports en automobiles contraints	11 mtep
κ_v	Consommation unitaire des moteurs automobiles sur trajets contraints	$4 \cdot 10^{-11}$ mtep/ ρKm

Résolution spécifique des paramètres introduits dans la modélisation des transports

Comme indiqué plus haut, la répartition modale des moyens de transport se fait de façon autonome, compte-tenu des spécificités techniques de ces modes. De plus, la résolution du système S3 ne peut se faire analytiquement. Les paramètres de ce système ont donc été calibrés, à partir de simulations numériques. On propose, dans l'état actuel de la modélisation, les valeurs suivantes¹⁸ :

v_V^0	Vitesse à vide	860 km/h
v_{lim}	Vitesse limite	5 km/h
cap_v	Capital en infrastructures	2 551 milliards de pKm

v_{TC}^0	Vitesse à vide	21 km/h
v_{lim}	Vitesse limite	5 km/h
cap_{TC}	Capital en infrastructures	435 milliards de pKm

La valeur particulière de la vitesse à vide de la voiture laisse bien sûr à désirer. Il est évident que cette étape nécessiterait une plus ample étude. Cependant, les simulations ont été menées de telle sorte que pour le domaine d'utilisation du modèle (et non pour un hypothétique taux nul d'utilisation dans le cas de la vitesse à vide), les valeurs des vitesses de la voiture et du transport en commun soient cohérentes avec ce que l'on peut observer dans la réalité.

¹⁸ Cf. annexe 2 « Calibrage du secteur des transports – ratios de désagrégation et d'agrégation »

3.3. TRAITEMENT DES DONNEES : LA DESCRIPTION SPECIFIQUE DU SECTEUR DES TRANSPORTS CONTRAINTS

Il s'agit donc de décrire deux secteurs supplémentaires dans le modèle, le secteur du logement et celui des transports en commun contraints. Le secteur du logement a été décrit dans les travaux d'Olivier Froment [Froment, 2010]. L'énergie consommée dans les logements a quant à elle été décrite dans la version initiale du modèle [Gherzi et al. 2009], ainsi que l'énergie consommée par les transports en voiture. Il a donc fallu ajouter la description du secteur des transports en commun. Il était par ailleurs nécessaire d'établir, tant par le secteur des transports en commun que pour celui du carburant consommé par les voitures, quelles étaient les parts spécifiques représentées par les trajets contraints.

Le secteur des transports contraints

Compte tenu des précisions des statistiques et des enquêtes nationales sur la question, j'ai choisi de considérer que cette mobilité représentait la mobilité urbaine, ainsi que la mobilité interurbaine, dans un rayon de 80 km, pour des transports réguliers. Le champ retenu précisément dans les statistiques nationales pour la mobilité régulière est constitué des individus partant de leur résidence principale et allant au moins trois fois par semaine sur leur lieu de travail fixe (d'études ou de garde), celui-ci étant dans un rayon de moins de 80 km ou nécessitant un trajet de moins de 20 min.

Pour le secteur des transports en commun, puisqu'il s'agit de mobilité locale et régulière, la totalité de la consommation est affectée aux ménages (c'est-à-dire que le gouvernement n'en consomme pas, et il n'y a ni importation ni exportation). Il s'agit donc de connaître la valeur totale, en milliards d'euros, de la consommation de transport en commun. Le Tableau Entrée Sortie France en 2004 de l'INSEE donne les valeurs consommées dans chaque secteur de l'économie. Parmi les secteurs spécifiques du transport de voyageurs par route et par rail, il reste à isoler la part correspondant à la mobilité locale et régulière.

Détermination de la part des transports en commun correspondant à la mobilité locale et régulière

Seules des informations sur les volumes de voyageurs permettent de distinguer la mobilité locale de la mobilité globale. Aussi ces parts sont établies à partir de ratios sur le nombre de voyageurs transportés pour des trajets locaux sur le nombre de voyageurs totaux transportés. Deux sources d'informations sont exploitées : le compte des transports de l'INSEE et les fiches d'analyse spécifique du Ministère des Transports (cf annexe). Il est intéressant de mentionner également que la distinction réalisée entre mobilité locale et mobilité globale correspond exactement à celle effectuée par le cabinet Enerdata pour son rapport Efficacité énergétique des modes de transport [Enerdata, 2004]. Les chiffres obtenus présentés sont ainsi tout à fait comparables aux chiffres annoncés par Enerdata.

Détermination de la part de la consommation de carburant automobile correspondant à la mobilité locale et régulière

Pour le secteur particulier du transport en voiture, la consommation globale de carburant des ménages est connue (elle n'a vocation qu'au transport en voiture) ainsi que la quantité de transports contraints réalisés en voiture. La part destinée aux déplacements locaux est déduite

en ayant recours à la consommation unitaire des moteurs automobiles sur les trajets contraints, selon la relation $C_{carbu}^{locale} = \kappa_V \cdot pKm_V$.

CONCLUSION

Cette première proposition de modèle atteste de la possibilité de prendre en compte l'impact de l'inertie des choix de localisation des ménages sur l'équilibre macro-économique général. Bien que les simulations n'aient pu être menées à bout, par faute de temps, on comprend d'ors et déjà plusieurs mécanismes majeurs à l'œuvre.

Compte-tenu du faible impact des prix sur les consommations de mobilité des ménages, une taxe carbone fera accroître leur dépense sans modifier leur comportement. Au contraire, investir dans des infrastructures de transport est à même d'influer sur le comportement des ménages, à la fois dans son choix de répartition modal et dans son choix de localisation.

La politique du logement, en favorisant une ville plus dense est, elle aussi, à même de faire diminuer les consommations destinées à la mobilité et donc les émissions correspondantes. Cependant, compte-tenu de l'impact de la forme urbaine sur les choix de localisation des ménages, on comprend l'importance de communiquer de façon anticipée, claire et crédible sur de telles politiques.

Afin de vérifier ces premières intuitions, il s'agirait d'obtenir des simulations afin d'analyser les impacts relatifs d'une taxe carbone ou d'un investissement en infrastructure de logement sur les comportements des ménages.

Enfin, ce modèle est bien sûr perfectible. Il pourrait entre autre bénéficier d'une réflexion plus poussée au niveau de la représentation de l'investissement des ménages. En s'inspirant des travaux d'Olivier Froment, il s'agirait d'étoffer la représentation de l'efficacité des logements et de l'impact d'investissement dans des technologies d'économies d'énergie sur la consommation d'énergie globale. L'observation du mode de vie actuel et des aspirations des ménages souligne combien le logement en habitat pavillonnaire est plébiscité. Un véritable défi, au-delà de l'inertie de la ville, pour la maîtrise de la forme urbaine réside donc dans la proposition d'une forme urbaine dense mais attractive.

A titre personnel, je suis ravie de cette expérience de recherche. Les problématiques spécifiques à la ville, abordées au CIREC, m'ont permis d'augmenter ma vision des questions urbaines et de préciser mes centres d'intérêts sur la ville. Par ailleurs, je remercie mes deux encadrants, Emmanuel Combet et Henri Waisman, pour la patience, l'intérêt et la rigueur qu'ils m'ont témoignés. Cela m'a permis d'avancer relativement vite dans mon projet tout en étant, sur le plan intellectuel très formateur.

NOTATIONS DU MODELE

Biens consommés

C	Composite	pseudo quantités
bn	Quantité minimale de composite nécessaire	pseudo quantités
C_{carbu}	Consommation de carburant dans les voitures	mtep
$C_{\text{carbu}}^{\text{locale}}$	Consommation de carburant pour les trajets contraints	mtep
$C_{e,H}$	Consommation d'énergie dans le logement	mtep
ρK_{mTC}	Distance contrainte parcourue en transport en commun	passagers-km
ρK_{mV}	Distance contrainte parcourue en voiture	passagers-km
ρK_m	Distance totale contrainte	passagers-km
H	Surface de logement habitée	m ²

Prix

P_x	Prix de x au moment de la consommation	€/unité de x
p_x^{ant}	Prix de x anticipé quand le choix n'est pas simultané avec la dépense	€/unité de x
p_H^0	Prix du m ² en 2004	€/m ²

Utilité

$S_{e,H}$	Service énergétique du logement	mtep/m ²
$S_{\text{mobilité}}$	Service énergétique de la mobilité	passagers-km
ξ^C	Élasticité du composite dans l'utilité	/
ξ^H	Élasticité du logement dans l'utilité	/
Y	Revenu du ménage	€
s	Taux d'épargne des ménages	/

Part modale des transports

T_0	Temps de transport quotidien (sur une année, pour tous les ménages)	heures
v_V^0	Vitesse à vide de la voiture	km/h
v_{lim}	Vitesse minimale en voiture ou en transport en commun	km/h
cap_V	Capital en infrastructure destiné aux transports en voitures	passagers-km
v_{TC}^0	Vitesse à vide du transport en commun	km/h
cap_{TC}	Capital en infrastructures destiné aux transports en commun	passagers-km
v_V	Vitesse moyenne de la voiture	km/h
v_{TC}	Vitesse moyenne du transport en commun	km/h

Production des entreprises

λ_l	Part du travail dans la production	/
λ_k	Part du capital dans la production	/
$\lambda_{Cl,j}$	Part des consommations intermédiaires dans la production	/
L	Facteur travail	heures
K	Facteur capital	€
Cl_j	Consommations intermédiaires	
μ	Élasticité de la fonction de production	/
l	Consommation unitaire de travail dans la production	/
k	Consommation unitaire de capital dans la production	/
α_j	Consommation unitaire de biens intermédiaires dans la production	/
$\sigma_{\text{impôt}}$	Taux d'imposition des entreprises	/
σ_{ENE}	Taux de marge dégagé par les entreprises	/

Paramètres de modélisation

ρ	Efficacité énergétique réelle du logement	/
ρ^{ant}	Efficacité énergétique du logement, à priori	/
σ	Service énergétique attendu par le ménage	kWh/m ²
σ^0	Service énergétique moyen	kWh/m ²
π	Dépendance du prix du logement avec la surface du logement	m ⁻²
δ	Dépendance de la distance de mobilité avec la surface du logement	m ⁻²

BIBLIOGRAPHIE

[Calvet, 2011] Calvet et Marical, *Consommation de carburant : effets des prix à court et à long termes par type de population*, Collection « Études et documents » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), avril 2011.

[Combet et al., 2010] *La fiscalité carbone au risque des enjeux d'équité*, Emmanuel Combet, Frédéric Gherzi, Jean-Charles Hourcade, Camille Thubin, CIREN, juin 2010.

[Coulombel, 2011] Coulombel, N., Residential choice and household behavior: State of the Art, *SustainCity Working Paper*, 2.2a, ENS Cachan, (2011).

[Enerdata, 2004] *Efficacité énergétique des modes de transport*, juin 2004.

[Froment, 2010], Olivier Froment, *Modelling Energy Efficiency in Residential Buildings with Closed Housing Markets: A Static CGE Approach*, ENPC, CIREN, juin 2010.

[Gherzi et al., 2009] *Le modèle Imacim-S, Version 2.3*, F. Gherzi, C. Thubin, E. Combet, J-C. Hourcade, CIREN, octobre 2009.

[Gusdorf, 2008] *L'inertie des systèmes urbains et le tempo des politiques publiques face au risques énergétiques et climatiques*, François Gusdorf, Thèse de doctorat à l'École Nationale des Ponts et Chaussées, CIREN.

[Hourcade et al., 2006] *Hybrid modeling : New Answers to old challenges*, Jean-Charles Hourcade, Mark Jaccard, Chris Bataille, Frédéric Gherzi, CIREN, Reprint from The Energy Journal special issue Hybrid Modeling of Energy Environment Policies : 1-12, 2006.

[Jacquot, 2003] Jacquot, *De plus en plus de maisons individuelles*, Alain Jacquot, INSEE Première n°885 février 2003.

[SOeS, 2010] *Définitions et concepts de la mobilité régulière et locale, l'Enquête Nationale Transports et Déplacements 2008*, SOeS, 2010.

ANNEXES

J'ai choisi d'ajouter ces deux annexes au rapport comme document de travail pour un usage ultérieur de ces travaux.

ANNEXE 1 SPECIFICATION DES FONCTIONS DE DEMANDE EN PKM_v ET PKM_{TC}

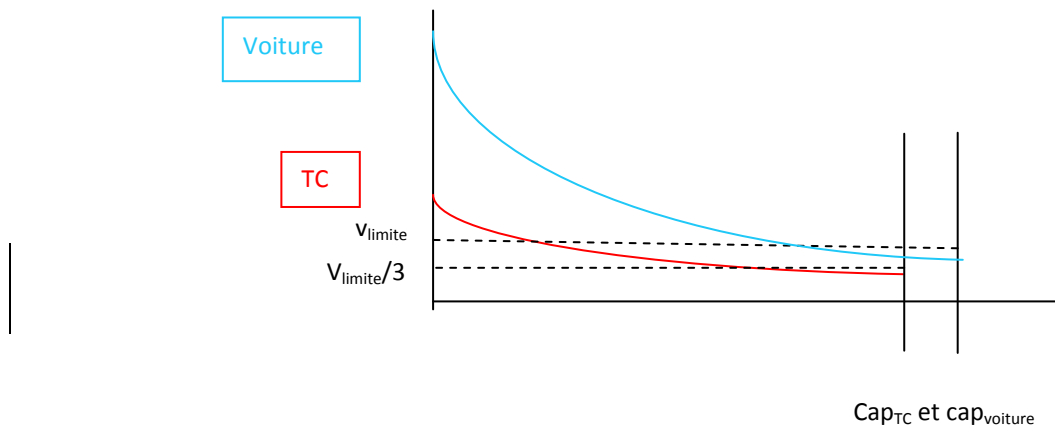
Le système d'équations imposé par le modèle est :

$$x + y = pKm(H)$$

$$T_0 = \frac{x}{f(x)} + \frac{y}{g(y)}$$

Avec $pKm_v = x$ et $pKm_{TC} = y$ et aussi $v_v = f(x)$ et $v_{TC} = g(y)$.

On cherche la répartition des pKm totaux entre x et y. Pour cela, il faut tout d'abord faire des hypothèses sur f et g. Ce sont des fonctions qui modélisent la vitesse permise par le moyen de transport, en fonction du nombre de pKm effectués via ce mode de transport. Il s'agit ainsi de modéliser l'influence de la congestion sur la vitesse des moyens de transport. On prend par hypothèse deux fonctions décroissantes, similaires, telles que :



On prend ainsi $f(x) = \frac{v_0}{1 + \left(\frac{v_0}{5} - 1\right) \cdot \frac{x}{cap_x}} = v_x(0)$ de sorte que la vitesse à vide vaille v_0 et la vitesse au maximum de l'utilisation, c'est-à-dire quand $x = cap_x$, vaille 5 km/h.

On prend $g(y) = f(y)/K = v_y$ en faisant l'hypothèse que la vitesse du transport en commun est trois fois moins importante que la vitesse de la voiture, avec une vitesse limite de 5 km/h pour la voiture environ. Enfin, on supposera que le temps moyen passé dans les transports, par jour et par personne est d'environ 1 heure. On testera par ailleurs la validité de ces hypothèses numériques.

Afin de tester simplement le choix de la forme fonctionnelle, on étudie sa validité compte tenu de la répartition connue des pKm en 2004.

On établit le rapport des pKm :

$$\frac{y}{x} = \frac{\frac{pKm}{v_x} - T_0}{T_0 - \frac{pKm}{v_y}} \quad (1)$$

On pose l'hypothèse que $v_y = v_x/K$. Ceci permet d'établir les expressions explicites de v_x et v_y au moment du calibrage (2004, le rapport y/x désigne ici exclusivement la valeur en 2004):

$$v_x^{2004} = \frac{pKm \cdot (K \cdot \frac{y}{x} + 1)}{T_0 + T_0 \frac{y}{x}} \text{ et } v_y^{2004} = \frac{pKm \cdot (\frac{y}{x} + \frac{1}{K})}{T_0 + T_0 \frac{y}{x}} \quad (3)$$

On déduit par ailleurs les valeurs des vitesses à vide à partir de l'expression fonctionnelle (0) : (où c désigne le taux de charge en 2004 et v_{lim} la vitesse limite vers laquelle tend la vitesse du moyen de transport quand celui-ci est utilisé au max de ses capacités)

$$v_0^x = \frac{v_x^{2004} \cdot (1 - c)}{1 - \frac{c}{v_{limx}} \cdot v_x^{2004}} \text{ et } v_0^y = \frac{v_y^{2004} \cdot (1 - c)}{1 - \frac{c}{v_{limy}} \cdot v_y^{2004}} \quad (4)$$

On voit dans l'expression 4 que les facteurs c (identique pour les deux modes) et K sont à ajuster avec les évaluations numériques au mieux afin d'obtenir des vitesses à vide cohérentes. (on prend des v_{lim} identiques pour les deux modes à 5 km/h). On observe tout d'abord que le taux de charge devrait être calibré à 0,1078, soit 10,8%. **On travaille ensuite sur la valeur du paramètre K.**

On définit par ailleurs les cap en 2004 de chacun des moyens de transport de telle sorte que :

$$cap_x^{2004} = \frac{x(2004)}{c} \text{ et } cap_y^{2004} = \frac{y(2004)}{c}$$

Une fois les différents paramètres du calibrage établis, on peut faire soit varier les pKm totaux et regarder l'influence sur la distribution des pKm entre TC et voiture et/ou faire varier l'investissement dans les cap.

Finalement, après cette opération de calibrage, on en déduit que pour la suite du modèle, les fonctions de demande en pKm_v réalisés en voiture et pKm_{TC} réalisés en transports en commun définies par le système suivant :

$$pKm_v + pKm_{TC} = pKm \text{ et } T_0 = \frac{\frac{pKm_v}{v_0^x}}{1 + (\frac{v_0^x}{v_{lim}} - 1) \frac{pKm_v}{cap_x}} + \frac{\frac{pKm_{TC}}{v_0^y}}{1 + (\frac{v_0^y}{v_{lim}} - 1) \frac{pKm_{TC}}{cap_y}}$$

Où $v_0^x = 860 \text{ km/h}$ et $v_0^y = 21 \text{ km/h}$ avec $v_{lim}=5 \text{ km/h}$ et $T_0=1\text{h/jour}$.

ANNEXE 2 CALIBRAGE DU SECTEUR DES TRANSPORTS¹⁹

ETABLISSEMENT DES DIFFERENTS RATIOS DE DESAGREGATION/AGREGATION

On travaille à partir du fichier TES INSEE 2004.

Pour fixer les ordres de grandeurs :

Transports intérieurs de voyageurs par mode

en milliards de voyageurs-kilomètres

2004	
Voitures particulières	736,9
Autobus, cars	44,0
Transports ferrés	86,6
SNCF	74,3
<i>dont :</i>	
TGV	41,4
Réseau principal hors TGV	23,0
<i>dont TER</i>	9,6
RATP (métro + RER)	11,5
Métro de province	0,8
Transports aériens	12,7
Total	880,3

r : données révisées.

Champ : France.

Source : SOeS, comptes des transports en 2009.

INSEE 2004 /// http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=0&ref_id=NATTEF13627

1. Ratios en quantités physiques

QUANTITÉS TRANSPORTÉES EN FRANCE MÉTROPOLITAINE				
Par route : bus et autocars			Par rail	
/			Marchandise 26,6 milliards de pKm ¹	
Ménages 44 milliards de pKm ²			Ménages 86,6 milliards de pKm ²	
Autocar 42,4 milliards pKm ³		Bus urbain 1,6 milliards pKm ⁵		
Longue distance 18,4 Mds pKm ⁶	Locaux 23,8 Mds pKm ⁴	Locaux 1,6 Mds pKm ⁵	Locaux TER, RATP (métro, RER), métro de province 21,9 milliards de pKm ²	Longue distance TGV et réseau principal hors TGV 64,4 milliards de pKm ²
Longue distance 18,4 Mds pKm ⁶	Locaux 25,4 milliards de pKm ⁷			

Sources

1. Tonnes-kilomètres réalisés par voie ferrée en 2004
Evolution du transport national de marchandises de 2001 à 2009. Source SOeS, SitraM
www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=223
2. Transport ferré intérieur de voyageurs par mode en 2004
Transport intérieur de voyageurs par mode de 2003 à 2009. Source SOeS, Compte des transports 2009
http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=0&ref_id=NATTEF13627

¹⁹ Voir le fichier excel « TES FRA 07Mai08_désagrégation TC et Lgmt_juin11 »

3. Nombre total de voyageurs kilomètres en 2004
Ensemble du transport par autocar en France métropolitaine.
Source DAEI-SESP, enquête permanente sur l'utilisation des véhicules de transports en commun de voyageurs.
Les transports par autocar en 2004, Note « SES infos rapides » publiée par le Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer en janvier 2006.
http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/TRV_276_cle257bbb.pdf
4. Transport régulier en 2004
Ensemble du transport par autocar en France métropolitaine.
Source DAEI-SESP, enquête permanente sur l'utilisation des véhicules de transports en commun de voyageurs.
Les transports par autocar en 2004, Note « SES infos rapides » publiée par le Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer en janvier 2006.
http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/TRV_276_cle257bbb.pdf
5. Chiffre obtenu comme le reste des transports de ménages non réalisé par autocar : (2) – (3)
6. Chiffre obtenu comme le reste des transports en autocar, non locaux : (3) – (4)
7. Chiffre obtenu en sommant les transports locaux en bus et en autocar : (4) + (5)

Bilan pour les ratios en volumes transportés

$$\text{Ratio volume}_{\text{ménages/total}}^{\text{rail}} = \frac{Q_{\text{ménages}}^{\text{rail}}}{Q_{\text{ménages}+\text{marchandises}}^{\text{rail}}} = 0,77$$

$$\text{Ratio volume}_{\text{local/total}}^{\text{rail,ménages}} = \frac{Q_{\text{local}}^{\text{rail,ménages}}}{Q_{\text{local}+\text{longue distance}}^{\text{rail,ménages}}} = 0,25$$

$$\text{Ratio volume}_{\text{local/total}}^{\text{route,ménages}} = \frac{Q_{\text{local}}^{\text{route,ménages}}}{Q_{\text{local}+\text{longue distance}}^{\text{route,ménages}}} = 0,58$$

2. Ratios en carburants

CARBURANT CONSOMMÉ en millions TEP ¹						
Transport routier de voyageurs total (autocar) 0,54 (gazole) ²		Transport urbain (=local) de voyageurs total 0,38 ³ Gazole : 0,25 Électricité : 0,10 Gaz naturel : 0,03		Transport ferré total 1,14 ⁴		
Longue distance 0,27 ¹⁰	Local 0,27 ⁹	Local 0,38 ⁵ Gazole : 0,25 Électricité : 0,10 Gaz naturel : 0,03		Voyageurs, Local : 0,22 ⁶	Longue distance : 0,92 ¹⁴	
		Route (bus) 0,28 ⁷	Ferré (métro, RER...) 0,10 ⁷	Voyageurs, Local : 0,22 ⁶	Ménages 0,58 électricité 0,05 gazole ¹²	Marchandises 0,29 ¹³ Dont 0,20 élec 0,09 gazole
Longue distance 0,27 ¹⁰	Transport routier local de voyageurs (carburant) 0,55 ¹¹		Transport ferré de voyageurs, local 0,32 ¹¹ Dont 0,24 électricité et 0,08 gazole ¹¹	Ménages Longue Dist 0,63 dont 0,58 élec 0,05 gazole ¹²	Marchandises Longue Dist 0,29 ¹³ Dont 0,20 élec 0,09 gazole	

- Ventilation par mode des consommations d'énergie de traction des transports sur le territoire métropolitain. Source CPDP, DAEI-SESP.
Bilan de la circulation, des consommations de carburant et d'énergie publié dans le Compte national des transports, 2004.
http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=307
- Transport routier de voyageurs
- Transport urbain de voyageurs
- Chiffre obtenu en sommant la consommation pour les trajets locaux et la consommation pour les trajets de longue distance : (6) + (14)
- Les transports urbains sont du transport de voyageurs uniquement, de dimension locale.
- On fait l'hypothèse que les transports ferroviaires au carburant sont des transports locaux, de voyageurs
- On fait l'hypothèse que seuls les transports ferrés urbains sont alimentés à l'électricité.
- On agrège les transports ferrés urbains et les transports locaux via la SNCF : (6) + (7)
- Consommation totale en ktep du transport régulier, urbain et régional
Efficacité énergétique des modes de transport
Rapport final Enerdata, 26 janvier 2004
- Chiffre obtenu comme le reste de la consommation du transport routier, hors local : (2) – (9)
- Consommation totale (SNCF 1999) pour le fer urbain et régional en tep (équivalence énergie finale et primaire 1Mh=0,086 tep)
Efficacité énergétique des modes de transport
Rapport final Enerdata, 26 janvier 2004
- Consommation totale (SNCF 1999) pour le fer TGV, TRN et interrégional
Efficacité énergétique des modes de transport

Rapport final Enerdata, 26 janvier 2004

13. Consommation totale (SNCF 1999) en énergie finale pour le transport ferroviaire de marchandises

Efficacité énergétique des modes de transport

Rapport final Enerdata, 26 janvier 2004

14. Chiffre obtenu en sommant la consommation par le transport de ménages et de marchandises sur longue distance : (12) + (13)

Bilan pour les consommations de carburant (chiffres en millions de TEP)

$$\text{Ratio carburant}_{\text{local/total}}^{\text{rail,ménages}} = \frac{\text{Carburant}_{\text{local}}^{\text{rail,ménages}}}{\text{carburant}_{\text{local+longue distance}}^{\text{rail,ménages}}} = \frac{0,08}{0,08 + 0,05} = 0,6$$

$$\text{Ratio carburant}_{\text{local/total}}^{\text{route,ménages}} = \frac{\text{Carburant}_{\text{local}}^{\text{route,ménages}}}{\text{carburant}_{\text{local+longue distance}}^{\text{route,ménages}}} = \frac{0,55}{0,27 + 0,55} = 0,7$$

$$\text{Ratio électricité}_{\text{local/total}}^{\text{rail,ménages}} = \frac{\text{Electricité}_{\text{local}}^{\text{rail,ménages}}}{\text{Electricité}_{\text{local+longue distance}}^{\text{rail,ménages}}} = \frac{0,24}{0,24 + 0,58} = 0,3$$

$$\text{Ratio électricité}_{\text{local/total}}^{\text{route,ménages}} = \frac{\text{Electricité}_{\text{local}}^{\text{route,ménages}}}{\text{Electricité}_{\text{local+longue distance}}^{\text{route,ménages}}} = 0$$

Pour ce dernier ratio on considère que le transport routier ne se fait qu'à partir du gazole.

On note par ailleurs, pour l'ensemble des transports routiers de voyageurs, 210 milliers équivalent temps plein d'emploi pour l'année 2003 (compte national des transports 2004). Sous hypothèse de constance entre 2003 et 2004, et avec le rapport des pkm locaux/totaux, on en déduit que 76 milliers correspondent à l'emploi en 2004 dans les TC.