THÉMA

ÉCONOMIE

Analyse

Politiques de tarification des transports et formes urbaines

NOVEMBRE 2016

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

sommaire

Politiques de tarification des transports et formes urbaines

5 - **Introduction**

7 - **Le modèle monocentrique : description théorique**
Le modèle monocentrique est un modèle théorique issu du champ de l'économie urbaine. Il représente l'influence des transports sur la formation et l'évolution des formes urbaines. Quel est son fonctionnement et quelles sont ses caractéristiques principales ?

25 - **Application à l'agglomération parisienne : calibration**
Le modèle est ici calibré sur l'agglomération parisienne à partir du modèle NEDUM-2D, développé au CIRED. Après une discussion des principaux choix de calibration à effectuer, les résultats du modèle sont comparés aux données de l'unité urbaine parisienne

51 - **Coûts des transports et étalement urbain**
Enfin, le modèle calibré précédemment est utilisé pour évaluer les conséquences de trois politiques tarifaires sur l'étalement urbain : le passage au tarif unique dans les transports en commun d'Île de France, la mise en place d'une taxe carbone et l'instauration d'un péage cordon autour de la ville de Paris.

65 - **Conclusion**

Document édité par :
Le service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable (SEEIDD)

L'auteur remercie Vincent Viguié pour son accueil au CIRED, ses conseils d'utilisation du modèle NEDUM-2D et de rédaction ainsi que Bruno Vermont pour son expertise informatique.

contributeur

BV

Bastien **Virely**
Chargé d'études économiques

bastien.virely@developpement-durable.gouv.fr

Bastien Virely est chargé d'études sur l'aménagement et les transports au sein de la sous-direction Mobilité et Aménagement du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable. Poste occupé au moment de la rédaction de ce rapport.

avant-propos

Ville étalée, diffuse, morcelée, ville dense, compacte, cohérente, ville optimisée, intelligente, verte, ou ville fragmentée, irrespirable, insoutenable, les qualificatifs désignant la ville crainte ou la ville rêvée sont nombreux et illustrent l'intensité des interrogations et des controverses que suscitent le devenir de nos espaces urbains. Dans le contexte d'une gouvernance urbaine en transition, de la poursuite du phénomène d'artificialisation des sols et de l'urgence de plus en plus grande à mettre tout en œuvre pour répondre au défi du changement climatique, il apparaît nécessaire d'améliorer la compréhension des facteurs d'évolution de ces espaces. Or, les avancées récentes dans le champ scientifique de l'économie géographique et urbaine, la disponibilité toujours plus grande d'informations statistiques géolocalisées ainsi que l'amélioration des capacités de traitement informatique de ces informations nous donnent l'opportunité d'expérimenter des modèles prospectifs représentant ces dynamiques. Cette étude, qui s'intéresse aux enseignements du modèle économique « monocentrique » pour la compréhension de l'influence des politiques de tarification des transports sur l'étalement urbain et qui a été réalisée dans le cadre d'un partenariat entre le Commissariat Général au Développement Durable et le Centre International de la Recherche sur l'Environnement et le Développement, s'inscrit dans cette voie et apporte une contribution aux réflexions visant à mieux anticiper la ville de demain pour penser la ville d'aujourd'hui.

Laurence Monnoyer-Smith
COMMISSAIRE GÉNÉRALE AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Introduction

Les politiques d'aménagement, d'environnement et de transports sont appelées à concilier différents objectifs, qui recouvrent schématiquement : la facilitation des déplacements des personnes et des biens, la préservation des espaces naturels, la limitation de la pollution et des émissions de gaz à effet de serre ainsi que l'inclusion et l'équité sociales.

La recherche d'un équilibre entre ces différents objectifs suppose au préalable de bien identifier l'influence effective du système de transport et des politiques qui l'encadrent. La mise en place de mesures poursuivant l'un des objectifs des politiques de transport s'accompagne souvent d'effets collatéraux non souhaités. Par exemple, les politiques de limitation des déplacements des véhicules polluants ou d'augmentation du coût des carburants, bénéfiques du point de vue de la lutte contre les émissions, posent la question de la précarité énergétique des ménages à faibles revenus dont la part des dépenses énergétiques dans le budget est déjà élevée. Les effets indirects des politiques de transport sont d'autant plus importants que les conditions et les coûts de déplacement jouent un rôle structurant dans l'organisation des territoires, les temps et les coûts de transport participant, parmi d'autres facteurs liés à la qualité de vie et aux interactions sociales et économiques, à la localisation des lieux de production, des lieux de consommation et des espaces d'habitation. À l'échelle interurbaine, l'ensemble de ces facteurs, ajoutés à la morphologie des territoires, influencent les relations entre les grandes villes, dont les aires d'influence se sont considérablement élargies. À l'échelle intra-urbaine, ils déterminent la morphologie des agglomérations : les villes motorisées ont succédé aux villes pédestres et sont caractérisées par une emprise au sol démultipliée, rendue possible par une diminution importante du temps d'accès aux différentes centralités de l'agglomération.

La relation entre transport et forme des villes, empiriquement évidente sur le long terme, pose également question à court terme. Si le coût des transports joue un rôle important dans l'organisation spatiale des agglomérations, alors les politiques de transport décidées à l'échelle de la ville ont des conséquences à la fois sur les choix de déplacements et sur les choix de localisation. Et, dans ce cas, les effets des politiques de transport sur les formes urbaines renforcent, ou au contraire atténuent, l'atteinte de l'objectif poursuivi. Ainsi, la mise en place de la taxe carbone conduit à une incitation à la fabrication et à l'achat de véhicules faiblement consommateurs en carburant, au report modal vers les transports collectifs, mais peut également inciter les ménages à ne pas s'installer dans des lieux habitations éloignés des espaces vers lesquels ils effectuent des déplacements réguliers et dénués d'alternative à la voiture. Les modifications des choix de localisation se traduisent ensuite sur le marché foncier et le marché du logement, avec une revalorisation des espaces les mieux desservis par les transports.

La problématique du lien entre coûts des transports et formes urbaines est également sensible dans le domaine de la tarification des transports collectifs. D'un côté, la diminution des tarifs permet

de réduire le budget transport des ménages et d'encourager le choix des transports en commun. D'un autre côté, cette diminution des coûts d'abonnement peut encourager des actifs travaillant au centre à s'installer dans la périphérie éloignée du centre ville. Les influences complexes entre transport et formes urbaines posent donc de manière générale la question de la conciliation des divers objectifs des politiques urbaines y compris en matière de transports.

L'influence des transports sur les formes urbaines peut être éclairée par différents outils de modélisation. Dans ce document, pour étudier cette question, un *modèle théorique monocentrique de l'économie urbaine* est utilisé pour l'analyse des effets de la tarification des transports sur le développement de l'agglomération parisienne. Ce type de modélisation vise à représenter le système urbain non pas en appliquant des corrélations statistiques, mais en postulant un certain nombre de relations structurelles supposées rendre compte des évolutions de la ville face aux changements de son environnement. Cette approche théorique permet de représenter les réactions des principaux agrégats étudiés face à l'introduction de changements et offre une méthode de mesure de l'influence des politiques publiques dans le champ de l'aménagement du territoire urbain.

Cette modélisation théorique utilise le modèle Nedum-2D, développé au Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (2012 [17]) pour la modélisation de scénarios d'évolution de long terme de l'agglomération parisienne, qui représente les comportements des ménages et du secteur de la construction de logements à partir d'un carroyage de l'agglomération parisienne. Nous appliquons ce modèle à la simulation des conséquences de trois politiques de tarification des transports individuels ou collectifs : le passage au tarif unique des abonnements de transport en commun d'Île-de-France, la montée en charge de la taxe carbone sur le carburant des véhicules individuels et la mise en place d'un péage urbain autour de la ville de Paris. Nous nous concentrons dans cet exercice sur l'effet des changements tarifaires sur la forme urbaine.

Partie 1

Le modèle monocentrique : description théorique

Le modèle monocentrique est un modèle d'économie urbaine représentant la concurrence entre les ménages pour l'acquisition ou la location de leur logement dans une agglomération. Il formalise, dans un cadre simple et schématique, le caractère structurant que peuvent avoir les coûts des déplacements domicile-travail sur la distribution des prix des logements ainsi que sur la répartition des populations au sein de l'agglomération.



Le modèle monocentrique représente la demande des ménages pour le logement en supposant que le facteur de variabilité principal de cette demande provient d'un arbitrage entre la quantité de service de logement demandé par les ménages et l'accessibilité du logement au centre de l'agglomération. Cette demande s'inscrit dans un contexte spatial : une plus ou moins grande disponibilité du sol pour la construction du logement, une concurrence plus ou moins forte avec d'autres usages. Le modèle peut être décomposé schématiquement en deux dimensions : le côté demande qui représente l'enchère logement des ménages et la quantité de service de logement qu'ils acquièrent, et le côté offre qui représente la production du service de logement. La rencontre de l'offre et de la demande de logement dans le cadre spatialisé conduit à la formation d'un équilibre urbain.

LE MODÈLE STANDARD ET SES VARIANTES

La notion de modèle monocentrique fait référence à une forme de modélisation des comportements de localisation des ménages et des entreprises dans une agglomération. Le point commun des modélisations dérivées de ce modèle repose sur l'intuition initiale de J.H. Von Thünen (1826 [18]) : la mise en évidence d'un arbitrage entre accessibilité et disponibilité du sol dans les choix de localisation. Appliquée par la suite aux entreprises comme aux ménages, cette formalisation s'est déclinée sous diverses versions. W. Alonso (1964 [1]), E.Mills (1967 [13]) et R.F. Muth (1969 [14]) ont formalisé un modèle monocentrique en articulant coûts de transport, usage des sols et choix de localisation des ménages. Dans les années 1980, J.K. Brueckner a présenté un mode d'exposition de la résolution du modèle éclairant dans un article synthétique de référence (1987 [6]) tandis que M. Fujita, dans un ouvrage de synthèse (1989 [11]), a proposé une représentation unifiée des contributions précédentes autour de la notion de *fonction d'enchère*.

Le terme « monocentrique » désigne le caractère schématique de l'agglomération modélisée. Le modèle suppose que celle-ci est caractérisée par un centre principal polarisant la majorité des déplacements des ménages. Autour de ce centre, les ménages choisissent leur lieu d'installation selon les coûts d'acquisition ou de location du logement et les coûts de transport. Le modèle monocentrique propose ainsi une schématisation des déterminants économiques de l'étalement urbain à partir des phénomènes contradictoires suivants. Plus les logements sont situés à proximité du centre de l'agglomération, plus la concurrence entre les acquéreurs est forte et plus les prix sont élevés. Loin du centre en revanche, la concurrence entre les acquéreurs est atténuée, l'espace disponible pour la construction de logements est moins rare, mais les coûts et les temps de transport supportés par les ménages augmentent. Plus les ménages s'éloignent du centre ville, moins ils sont disposés à payer pour le logement. La dispersion des agglomérations est encadrée par cette double contrainte. En se concentrant sur ce phénomène explicatif, le modèle monocentrique propose une méthode de chiffrage schématique de l'influence du transport sur l'usage des sols.

Dans ce type de formalisme, les prix immobiliers dans une agglomération sont directement influencés par les coûts des transports. Une augmentation du coût des transports conduit à une augmentation du gradient des prix immobiliers dans la ville, c'est-à-dire à une baisse plus importante

des prix immobiliers au fur et à mesure que les habitants s'éloignent du centre-ville. Ce phénomène est une conséquence directe du principe fondamental du modèle : les ménages n'acceptent d'aller habiter plus loin de leurs emplois que s'ils paient leur logement moins cher. S'il devient plus cher de se déplacer, alors le désagrément associé au fait d'habiter loin de son emploi augmente, et les ménages n'accepteront d'aller habiter loin de leurs emplois que s'ils paient moins cher qu'auparavant.

LES LIMITES DU MODÈLE

Comme le rappellent G. Duranton et D. Puga dans leur synthèse récente sur le modèle monocentrique (2015 [10]), de nombreuses extensions du modèle ont été développées de façon à ajouter des mécanismes économiques et à diminuer le caractère schématique de la modélisation. Dans la version simple du modèle monocentrique, l'arbitrage entre les coûts des transports et les coûts du logement est modélisé à partir d'une approximation des coûts de transport. La géographie de la ville modélisée est schématique. Il s'agit d'une ville caractérisée par un centre unique accueillant l'ensemble des emplois et seuls les coûts des transports pour le motif domicile-travail sont considérés.

En pratique, le motif domicile-travail ne rend compte que d'une partie des déplacements des ménages et la localisation des différentes destinations des ménages ne se situe pas uniquement dans le centre. Une extension du modèle consiste à considérer non pas seulement les coûts des transports vers le centre, mais un indicateur d'accessibilité représentant un ensemble de motifs et de destinations. Dans ce modèle avec accessibilité, les centres secondaires sont fixés de manière exogène. Des modèles plus complexes visent à endogénéiser les choix de localisation des entreprises. Ces dernières sont alors supposées bénéficier d'économies d'agglomération : leur productivité est considérée d'autant plus importante que l'agglomération est densément peuplée. Dans leur article pionnier, H. Ogawa et M. Fujita (1982 [15]) modélisent ainsi un processus de concurrence pour le sol entre les ménages et les entreprises conduisant à l'apparition d'une agglomération partagée entre espaces commerciaux, espaces résidentiels et espaces mixtes.

La question de l'hétérogénéité des ménages a également fait l'objet de nombreuses investigations. Si le modèle monocentrique représente l'équilibre urbain résultant de la concurrence de ménages considérés comme identiques, il apparaît en effet fondamental d'étudier l'influence des différences entre ménages telles que les inégalités de revenu et la diversité des structures familiales. En distinguant deux types de ménages caractérisés par des niveaux de revenu distincts et en conservant un cadre proche du modèle monocentrique simple, il est par exemple possible de montrer que, sous certaines conditions sur la forme des préférences, les ménages dont le revenu est le plus élevé se localisent en périphérie de l'agglomération, à condition que l'élasticité revenu des coûts de transport soit supérieure à l'élasticité revenu de la demande de logement. G. Becker (1965 [4]) montre en particulier que lorsque les coûts des transports sont considérés proportionnels au revenu, les ménages riches se localisent en banlieue si l'élasticité revenu de la demande de logement est supérieure à un. Dans une étude de cas sur l'agglomération parisienne, J.K. Brueckner, J.F. Thisse et Y. Zenou (1999 [5]) ajoutent une dimension supplémentaire d'analyse en considérant les aménités urbaines de l'agglomération. À proximité de celles-ci, la demande pour le logement

augmente si bien que les populations riches peuvent se localiser au centre ville si les aménités urbaines, architecturales ou culturelles par exemple, y sont importantes. L'introduction de plusieurs types de ménages donne souvent lieu à la modélisation d'un équilibre marqué par une ségrégation stricte entre les ménages aux caractéristiques distinctes. L'hétérogénéité des ménages ainsi que d'autres acteurs ou éléments de l'équilibre urbain (parcelles, bâtiments…) restent un champ ouvert en économie urbaine.

Les secteurs de la construction et du logement sont des secteurs fortement encadrés. À côté de la modélisation des mécanismes relevant de l'économie de marché, l'économie urbaine s'est aussi attachée à comprendre l'émergence de la régulation publique du foncier et son influence sur le comportement des prix et des agents. Les contraintes réglementaires peuvent être justifiées du point de vue économique par l'existence d'externalités non prises en compte par le marché ou par l'acteur individuel, telles que la congestion ou la pollution liées à l'usage des transports. Cependant, les politiques de restriction de la construction peuvent générer une augmentation locale du prix de l'immobilier et encourager des localisations de logements éloignés. C. Hilber et F. Robert-Nicoud (2013 [12]) montrent ainsi que les propriétaires de logements des espaces les plus valorisés peuvent avoir intérêt à contraindre la constructibilité dans leur quartier de façon à augmenter la valeur de leur propriété.

Enfin, un dernier axe de développement du modèle monocentrique réside dans l'introduction de facteurs dynamiques dans la formation de l'équilibre urbain. Dans le modèle monocentrique simple, l'équilibre urbain résulte implicitement d'une reconstruction complète de l'agglomération. En pratique, les bâtiments sont durables et les ménages réalisent des anticipations sur l'évolution des espaces urbains. Le fonctionnement de ces anticipations joue donc un rôle sur la valorisation du foncier et influence les caractéristiques des nouveaux développements, qu'elles soient adaptatives, comme l'a montré A. Anas (1978 [2]), ou qu'elles soient « parfaites », comme dans le modèle canonique de D.R. Capozza et R.W. Helsley (1989 [7]). L'introduction de composantes dynamiques dans le modèle permet de retrouver des phénomènes observés et non modélisés dans le cadre simple tels que l'urbanisation discontinue.

La palette des modèles monocentriques est extrêmement large selon le type d'extensions et de phénomènes que les théoriciens souhaitent appréhender. Dans de nombreux cas de figure, l'introduction d'une dimension supplémentaire du modèle (hétérogénéité des ménages, composantes dynamiques, aménités,…) conduit à l'apparition d'équilibres multiples, voire à l'absence d'équilibre en deux dimensions, et à la mise en valeur de paramètres jouant un rôle clé dans la forme des résultats. Il y a un arbitrage à réaliser entre le nombre de mécanismes représentés par le modèle et sa complexité de résolution.

De plus, le modèle ne tient pas compte d'autres attributs de la fonction d'utilité des ménages, pourtant déterminants dans les choix de localisation : présence ou accès à des aménités « naturelles » (espaces verts) ; exposition aux nuisances (bruit, pollution) ; inclusion, accès au lien social ; accès aux biens culturels et de loisirs.

La version du modèle utilisée dans cette étude ne permet pas de traiter les limites évoquées ci-dessus. Les résultats doivent donc être interprétés avec la plus grande prudence.

LA DEMANDE DES MÉNAGES

Un arbitrage entre logement et accessibilité

Le cœur du modèle monocentrique repose sur l'idée que la dispersion des habitations dans une ville provient essentiellement de l'arbitrage que les ménages doivent réaliser au moment de l'acquisition de leur logement entre sa qualité et sa proximité du centre-ville. Cet arbitrage est formalisé mathématiquement de la manière suivante.

Soit une ville caractérisée par un centre unique, et r la distance de chaque point de la ville à ce centre. La contrainte budgétaire d'un ménage se caractérise par son niveau de revenu Y, qui permet l'acquisition d'un bien dit composite Z, représentant le panier de consommation du ménage hors logement, au prix unitaire p_Z, et d'une quantité de service de logement H au prix unitaire $R_H(r)$, ce prix pouvant varier selon la distance au centre. Par ailleurs, le ménage fait face à des coûts de transport $T(r)$ plus ou moins élevés selon son éloignement par rapport au centre. Dans le cas le plus simple, les coûts de transport sont continus et croissants avec le paramètre de la distance. La contrainte budgétaire s'écrit :

$$Y = p_Z Z + R_H(r)H + T(r)$$

À distance r_0 fixée, la contrainte budgétaire permet d'exprimer le service de logement comme une fonction du volume de la consommation Z et de considérer l'arbitrage que doit réaliser le ménage entre logement et bien composite. Il s'agit d'un arbitrage classique de consommation entre deux biens :

$$H = \frac{Y - T(r_0)}{R_H(r_0)} - \frac{p_Z}{R_H(r_0)}Z$$

L'originalité du modèle monocentrique réside dans la prise en compte de la problématique de l'accessibilité. Le choix que le ménage doit réaliser entre accessibilité au centre et service de logement, pour un niveau de consommation fixe Z_0, s'exprime :

$$H = \frac{y - p_Z Z_0 - T(r)}{R_H(r)}$$

La relation entre la distance r et le service de logement H est médiatisée par le coût du transport $T(r)$ et le coût d'une unité de service de logement (dans le cas le plus simple le m^2 de surface habitable) $R_H(r)$. Dans le plan (H, r), la pente de la courbe dépend du signe de $(Y - p_Z Z_0 - T(r))(-R'_H(r)) - T'(r)R_H(r)$, c'est à dire des variations des coûts de logement et de transport avec la distance. En utilisant le fait que $Y - p_Z Z_0 - T(r) = R_H(r)H$, on en déduit qu'elle dépend du signe de $H(-R'_H(r)) - T'(r)$. L'arbitrage entre surface et accessibilité dans le modèle repose sur la comparaison des effets de l'éloignement par rapport au centre sur le coût du transport et sur celui du logement. La quantité de service de logement que le ménage peut acquérir augmente avec la distance et atteint un maximum lorsque $H(-R'_H(r)) = T'(r)$, c'est-à- dire lorsque le gain marginal réalisé sur le poste du budget logement égalise l'augmentation marginale du coût du transport. Cette

égalité, appelée *condition de Muth*, exprime une condition sous laquelle le ménage peut acquérir une superficie maximale pour un niveau de consommation fixé.

Le ménage choisit r, Z et H de façon à maximiser la fonction d'utilité $U(Z,H)$ sous la contrainte de budget. La fonction d'utilité est supposée continue, dérivable et croissante en Z et H. Elle est strictement concave et ne coupe pas les axes. La condition du premier ordre du problème de maximisation de l'utilité du ménage sous contrainte du budget conduit à l'égalité entre le prix du logement (fonction de la distance) et le rapport de l'utilité marginale du service de logement sur l'utilité marginale de la consommation des autres biens (bien composite).

$$R_H(r) = \frac{\frac{\partial U}{\partial H}}{\frac{\partial U}{\partial Z}}$$

Dans les modèles avec un seul type de ménages, ces derniers sont supposés atteindre le même niveau d'utilité à l'équilibre car ils sont identiques et parfaitement mobiles. L'équilibre est caractérisé par l'égalité de l'ensemble des fonctions d'utilité des ménages avec le niveau d'utilité d'équilibre.

$$\begin{aligned}
&U(Y - T(r) - R_H(r)H(r), H(r)) = \bar{U} \\
&\Rightarrow -\frac{\partial U(Z,H)}{\partial Z}\left(R_H(r)\frac{\partial H(r)}{\partial r} + T'(r) + H(r)\frac{\partial R_H(r)}{\partial r}\right) + \frac{\partial U(Z,H)}{\partial H}\frac{\partial H(r)}{\partial r} = 0 \\
&\Rightarrow -\frac{\partial U(Z,H)}{\partial Z}\left(\frac{\frac{\partial U}{\partial H}}{\frac{\partial U}{\partial Z}} \times \frac{\partial H(r)}{\partial r} + T'(r) + H(r)\frac{\partial R_H(r)}{\partial r}\right) + \frac{\partial U(Z,H)}{\partial H}\frac{\partial H(r)}{\partial r} = 0 \\
&\Rightarrow \frac{\partial R_H(r)}{\partial r} = -\frac{T'(r)}{H(r)}
\end{aligned}$$

À l'équilibre du modèle, la condition de Muth est vérifiée. Le coût marginal de transport lié à un plus fort éloignement est égal à la diminution du coût du logement. Dans la ville monocentrique, l'arbitrage entre disponibilité du logement et accessibilité se traduit par un gradient de prix du centre de l'agglomération vers la périphérie. Le prix d'une unité de service de logement décroît avec la distance au centre, tandis que la consommation de service de logement augmente.

Le modèle permet donc de représenter les conséquences de l'arbitrage entre qualité de l'accessibilité et qualité du logement sur la dispersion spatiale des prix dans l'agglomération. Même si, sur le versant empirique, la nature exacte des concepts de coûts du transport, d'accessibilité et de service de logement reste à préciser, il s'agit d'une propriété théoriquement intéressante du modèle. Elle suggère que les prix du logement sont marqués par une interdépendance spatiale très étroite au sein des agglomérations, qui transite par l'intermédiaire des coûts des déplacements. Elle précise cette interdépendance dans le cas schématique d'une ville caractérisée par un seul point d'attraction et des coûts de transport croissants avec la distance à ce point.

Un mécanisme d'enchère

Le modèle monocentrique est aussi intéressant en ce qu'il représente l'apparition d'un équilibre urbain comme le résultat d'un mécanisme d'enchères. L'utilisation de la notion de *fonction d'enchère*, développée en particulier par M. Fujita ([11]), permet de souligner cette propriété du modèle. La fonction d'enchère $\Psi(r,u)$ représente le comportement du ménage proposant une enchère pour l'obtention d'un logement. C'est le montant maximum de loyer par unité de service de logement (m^2 de surface habitable par exemple) que le ménage est prêt à payer pour résider à une distance r du centre de l'agglomération pour un niveau d'utilité fixé u.

$$\Psi(r,u) = \max_{Z,H} \left\{ \frac{Y - T(r) - Z}{H} \;\middle|\; U(Z,H) = u \right\}$$

La fonction d'enchère se place à un niveau d'utilité fixée, c'est-à-dire sur un ensemble de combinaisons de Z et H permettant d'atteindre le même niveau d'utilité u, formant une courbe d'indifférence $Z(H,u)$ dans le plan (H,Z). L'explicitation de cette fonction $Z(H,u)$ permet de proposer une formulation alternative.

$$\Psi(r,u) = \max_{H} \frac{Y - T(r) - Z(H,u)}{H}$$

La fonction d'enchère présente des propriétés graphiques intéressantes. La contrainte budgétaire implique que $Y = Z + R_H(r)H + T(r)$ et donc que $R_H(r)$ vérifie :

$$R_H(r) = \frac{Y - T(r) - Z(H,u)}{H}$$

Graphiquement, sur le plan (H,Z), cette contrainte se traduit par une droite $Z = Y - T(r) - R_H(r)H$, délimitée par le niveau maximal de consommation de bien composite $(H = 0, Z = Y - T(r))$, ne dépendant pas de R_H, et le niveau maximal de consommation de logement $(H = \frac{Y-T(r)}{R_H(r)}, Z = 0)$, qui lui dépend de R_H. Le loyer payé par le ménage définit la pente de la droite du budget représentée sur le plan (H,Z) à distance fixée. Pour atteindre un niveau d'utilité u, il faut que la contrainte budgétaire ait au moins un point d'intersection avec la courbe d'indifférence des combinaisons surface-consommation permettant d'atteindre l'utilité u. En faisant l'hypothèse que cette courbe est strictement convexe (utilité strictement concave), le montant maximum de loyer que le ménage est prêt à payer est le montant R_H tel que la contrainte budgétaire soit tangente à la courbe d'indifférence. Il est atteint lorsque :

$$\frac{-\partial Z(H,u)}{\partial H} = \frac{Y - T(r) - Z}{H} = \Psi(r,u)$$

La fonction d'enchère est donc égale au taux marginal de substitution entre H et Z. Le point défini par la fonction d'enchère dans le plan (H,Z) correspond à une quantité de service de logement

$H(r,u)$. C'est celle que le ménage peut acquérir lorsqu'il paye le loyer par m^2 maximal qu'il est prêt à consentir pour atteindre une certaine utilité u, à distance fixée du centre.

$$H(r,u) = \frac{Y - T(r) - z}{\Psi(r,u)}$$

La fonction d'enchère est liée à la fonction d'utilité indirecte :

$$V(R_H(r), Y - T(r)) = \max_{Z,H}\{U(Z,H) \mid Z + R_H H = Y - T(r)\}$$

Si les courbes d'indifférence entre bien Z et surface H sont strictement convexes, le niveau d'utilité maximum est celui pour lequel la courbe d'indifférence est tangente à la contrainte du budget. Au point d'intersection, la pente de la droite du budget est égale au taux marginal de substitution entre les deux biens :

$$R_H = -\frac{\partial Z(H,u)}{\partial H}$$

Lorsque $R_H = \Psi(r,u)$, $u = V(\Psi(r,u), Y - T(r))$. L'utilité maximale qu'un ménage peut atteindre lorsqu'il fait face à un loyer $\Psi(r,u_0)$ est l'utilité u_0. Le prix maximum de loyer au m^2 que le ménage est prêt à payer $\Psi(r,u_0)$ pour une utilité u_0 donnée est précisément le dernier prix qui lui permet d'atteindre cette utilité. Et s'il est soumis à ce prix, ce sera au maximum cette utilité u_0 qu'il pourra atteindre. De plus, du fait de la décroissance en R_H de la fonction d'utilité indirecte, on a, pour toute distance r, $V(R_H(r), Y - T(r)) \leq V(\Psi(r,u), Y - T(r))$ si $R_H(r) \geq \Psi(r,u)$ et, inversement, $V(R_H(r), Y - T(r)) \geq V(\Psi(r,u), Y - T(r))$ si $R_H(r) \leq \Psi(r,u)$:

$$V(R_H(r), Y - T(r)) \gtreqless V(\Psi(r,u), Y - T(r)) \text{ si } R_H(r) \lesseqgtr \Psi(r,u)$$

La distance optimale de localisation face à une courbe de loyer $R_H(r)$ est atteinte au point de tangence entre cette courbe et la fonction d'enchère. Inversement, à utilité donnée, la fonction d'enchère définit l'ensemble des loyers selon la distance tel que le ménage atteigne le même niveau d'utilité. Par conséquent, si l'on suppose que l'ensemble des ménages atteignent le même niveau d'utilité $\bar{U}$ quelle que soit la distance, cela signifie que les loyers $R_H(r,\bar{U})$ sont égaux à la fonction d'enchère définie pour ce niveau d'utilité $\Psi(r,\bar{U})$. Ainsi, la fonction d'enchère caractérise les prix d'équilibre et $H(r,\bar{U})$ est la demande Hicksienne de service de logement.

La fonction d'enchère permet d'expliciter le mécanisme d'enchères à l'œuvre dans la formation de l'équilibre tout en décrivant l'évolution des prix en fonction de la localisation. Une application du théorème de l'enveloppe par rapport à la distance permet de retrouver directement la condition de Muth :

$$\frac{\partial \Psi(r,\bar{U})}{\partial r} = -\frac{T'(r)}{H(r,\bar{U})}$$

Une nouvelle application du théorème de l'enveloppe par rapport à u permet d'exprimer la relation suivante :

$$\frac{\partial \Psi(r,u)}{\partial u} = -\frac{1}{H(r,u)} \frac{\partial Z(s,u)}{\partial u} < 0$$

La fonction d'enchère est ainsi plus petite lorsque l'on raisonne avec des utilités plus élevées. Lorsque l'on se place à une utilité fixée plus élevée alors que le revenu et les coûts de transport restent les mêmes, le loyer maximal que le ménage peut supporter pour atteindre ce niveau d'utilité est mécaniquement moins élevé. Donc dans le plan (r, Ψ), si $u_1 > u_0$, la fonction d'enchère $\Psi(r, u_1)$ sera en dessous de la courbe $\Psi(r, u_0)$. Il existe un continuum de fonctions d'enchère dans ce plan correspondant à des utilités d'autant plus basses que l'on s'éloignera de l'origine.

L'ÉQUILIBRE URBAIN

L'offre de logement : un intermédiaire entre la demande des ménages et l'espace disponible au sol

Une première approche théorique consiste à considérer que les ménages louent de l'espace au sol. La taille de la ville est dans ce cas le produit du nombre de ménages installés avec la surface qu'ils occupent, tandis que l'offre de surface n'est soumise à aucune contrainte, à l'exception de la frontière de la ville en concurrence avec l'activité agricole. L'introduction du secteur de la construction a permis d'améliorer le réalisme du modèle et de s'intéresser à une nouvelle dimension des espaces urbains. Le secteur de la construction a été introduit dans les modèles d'économie urbaine dans les années 1960 à l'initiative de R.F. Muth ([14]). Il est représenté comme un intermédiaire entre la demande des ménages pour le logement et l'espace disponible.

Dans le modèle proposé par Muth, les ménages sont supposés consommer une quantité de service de logement. Il s'agit d'un bien composite qui représente l'ensemble des caractéristiques intrinsèques que le ménage valorise dans son logement, comme le terrain, la superficie du logement, la qualité de la construction. Face à la demande des ménages, le secteur de la construction utilise deux types de facteurs pour produire du service de logement : le sol et le capital (qui représente l'ensemble des facteurs de production utilisés en dehors du sol). En notant $F(K, L)$ la fonction de production du secteur, R_H le prix unitaire du service de logement et R le prix du sol, la fonction de profit s'écrit :

$$\max_{L,K} R_H(r, \bar{U}) F(L, K) - R(r)L - K \quad \forall r$$

Les modèles d'économie urbaine décrivent par ailleurs les marchés fonciers comme des marchés d'enchère. Le sol est disponible en quantité limitée et ne peut être produit. Les propriétaires fonciers se trouvent donc en situation de monopole et vendent ou louent leur terrain au prix le plus élevé qui leur est proposé. Au contraire, le marché de la construction est considéré concurrentiel : le profit des entreprises du secteur est nul. Le prix des terrains, selon le mécanisme du compte à rebours,

est le prix maximum que le secteur de la production peut offrir dans le contexte d'une demande de logement des ménages donnée.

$$R(r) = \max_{L,K} \frac{R_H(r,\bar{U})F(L,K) - K}{L}$$

La fonction de production est supposée vérifier les hypothèses de rendements d'échelles constants, de concavité et être deux fois différentiable et continue. L'hypothèse de rendements d'échelle constants permet d'exprimer la fonction de production en fonction de l'intensité capitalistique k : $F(K,L) = LF(\frac{K}{L},1) = LF(k)$. $F(k)$ représente une densité de service de logement par unité de surface au sol. Lorsque la production considérée est le m² de surface habitable, $F(k)$ représente la densité de bâti. L'intensité capitalistique optimale du point de vue du constructeur varie avec la distance par l'intermédiaire de la disposition à payer des ménages.

$$\begin{aligned} F(k^*) &= F\left[(F')^{-1}\left(\frac{1}{R_H(r,\bar{U})}\right)\right] \\ &= G(R_H(r,\bar{U})) \end{aligned}$$

Lorsque l'enchère des ménages pour le service de logement R_H augmente, le secteur de la production est incité à augmenter l'intensité capitalistique k afin de produire davantage (plus dense). Dans un modèle monocentrique, la demande des ménages pour le service de logement est croissante lorsque l'on s'approche du centre ville dans lequel se localisent les emplois, si bien que l'intensité capitalistique est d'autant plus élevée que l'on s'approche du centre. De plus, d'après l'hypothèse de nullité des profits, les prix du sol en fonction de la distance vérifient :

$$\begin{aligned} R(r) &= R_H G(R_H(r,\bar{U})) - F^{-1}(G(R_H(r))) \\ R(r) &= J(R_H(r)) \\ \Rightarrow R'(r) &= \frac{\partial R_H}{\partial r}G(R_H) + R_H\frac{\partial G}{\partial R_H}\frac{\partial R_H}{\partial r} - \frac{\partial G}{\partial R_H}\frac{\partial R_H}{\partial r}(F^{-1})'[G(R_H)] \\ \Rightarrow R'(r) &= \frac{\partial R_H}{\partial r}G(R_H) + R_H\frac{\partial G}{\partial R_H}\frac{\partial R_H}{\partial r} - \frac{\partial G}{\partial R_H}\frac{\partial R_H}{\partial r}\frac{1}{F'(F^{-1}[G(R_H)])} \\ \Rightarrow R'(r) &= \frac{\partial R_H}{\partial r}G(R_H) + R_H\frac{\partial G}{\partial R_H}\frac{\partial R_H}{\partial r} - \frac{\partial G}{\partial R_H}\frac{\partial R_H}{\partial r}R_H \\ \Rightarrow R'(r) &= \frac{\partial R_H}{\partial r}G(R_H) \\ \Rightarrow R'(r) &= \frac{\partial R_H}{\partial r}F(k^*) \end{aligned}$$

Les prix du sol sont donc décroissants avec la distance au centre. La pression foncière diminue lorsque l'enchère des ménages diminue : la relation entre prix immobiliers et prix fonciers est une bijection qui dépend de la fonction de production de service de logement ($R(r) = J(R_H(r))$).

Les contraintes spatiales

La représentation de la dispersion spatiale de l'agglomération repose dans le modèle monocentrique sur un mécanisme de seuil. Les terrains ne sont urbanisés qu'à partir d'un certain seuil de rentabilité. Les propriétaires du sol sont supposés réaliser un arbitrage entre usage du sol pour le logement et usage du sol pour l'agriculture. Dans les modèles statiques, le prix du sol à usage agricole n'est pas influencé par l'agglomération. Ce prix est exogène, noté R_A. Dans les modèles de prix dynamiques, les prix du sol à proximité de l'agglomération sont influencés par les anticipations de changement d'usage et peuvent présenter un niveau supérieur à la rentabilité agricole du terrain. Ainsi, dans le modèle de D.R. Capozza et R.W. Helsley (1989 [7]), les prix des terrains agricoles dépendent du niveau de la rente agricole, mais également de leurs caractéristiques propres, du loyer résidentiel des espaces urbains voisins, des coûts de conversion du terrain et de la date anticipée de la conversion du terrain agricole en terrain constructible. Dans ce modèle, le propriétaire du terrain choisit la date de conversion permettant de maximiser le flux de revenu actualisé occasionné par la propriété du terrain. S'il anticipe une conversion de son terrain en terrain constructible à échéance de quelques années, il le valorise en prenant en compte les revenus futurs liés à l'usage logement. Plus l'agglomération s'agrandit, plus les revenus liés au logement de la parcelle augmenteront. Ce processus d'anticipations conduit à des niveaux de prix des terrains supérieurs à la rente agricole. Dans le cas statique, à toute distance du centre, les propriétaires du sol ne construisent un logement que si l'enchère des ménages leur permet de proposer une enchère pour le terrain supérieure à cette rente agricole. À la frontière de l'agglomération, il y a donc égalité du prix du sol utilisé pour la construction de logement et de la rente agricole : $R(f) = R_A$. Par conséquent, le loyer de frontière est le suivant :

$$R_H(f) = J^{-1}(R_A)$$

Il détermine un niveau de production à la frontière de l'agglomération :

$$\begin{aligned} F(k_f) &= G(J^{-1}(R_A)) \\ &= F\left[(F')^{-1}\left(\frac{1}{J^{-1}(R_A)}\right)\right] \end{aligned}$$

Le niveau du seuil de rentabilité des opérations de construction joue donc un rôle fondamental dans l'équilibre du modèle. Il influence la dispersion de l'agglomération et détermine le niveau de densité à la frontière. Il joue sur le niveau de l'équilibre, en complément des coûts de transport dont les variations conditionnent l'évolution avec la distance de la propension des ménages à payer pour le logement.

La frontière de l'agglomération est ensuite déterminée en définissant une contrainte spatiale sur la forme de l'agglomération. Elle est atteinte lorsque la construction de surface habitable et la demande de sol des ménages permet aux N ménages de la ville de s'installer dans l'espace destiné à la construction $L(r)$:

$$\int_0^f \frac{L(r)F(r,\bar{U})}{H(Y-T(r),\bar{U})}\mathrm{d}r = N$$

Deux types d'équilibre sont possibles. Dans le cas d'une ville fermée, la taille de la population N est exogène et le niveau d'utilité d'équilibre est endogène. La concurrence des N ménages pour la localisation dans l'agglomération conduit à un niveau d'utilité d'équilibre U^*. Dans le cas d'une ville ouverte, le niveau d'utilité d'équilibre est exogène, il dépend du niveau d'utilité de l'espace dans lequel s'inscrit l'agglomération, le cadre national par exemple. C'est la taille de la population de ville qui s'ajuste de sorte que le niveau d'utilité d'équilibre de la ville atteigne le niveau d'équilibre exogène.

Zoom sur : Le cas Cobb-Douglas

L'existence et l'unicité de l'équilibre reposent dans le modèle monocentrique sur des hypothèses générales portant sur les coûts de transport, la fonction d'utilité et la fonction de production de service de logement. Ces hypothèses générales permettent de mettre en valeur des liaisons entre les variations de l'accessibilité et les gradients de prix qui peuvent être précisées par des spécifications particulières des fonction d'utilité et de production. Les applications théoriques et empiriques du modèle monocentrique, dont le modèle NEDUM-2D, ont souvent recours à la forme Cobb-Douglas qui possède des propriétés intéressantes et a l'avantage de conduire à des équations comportementales relativement simples en comparaison avec le cas général.

L'équilibre des ménages

En supposant que les ménages maximisent la fonction d'utilité de forme Cobb-Douglas $U = Z^{\alpha} H^{\beta}$ sous la contrainte budgétaire $Y = Z + HR_H + T$, la relation reliant la quantité de service de logement H et le loyer R_H s'écrit :

$$H(r) = \frac{\beta(Y - T(r))}{R_H(r)}$$

Le comportement micro-économique d'arbitrage entre logement et autres consommations à distance donnée est caractérisé par une élasticité prix unitaire. Le budget logement $H(r)R_H(r)$ représente une part constante du revenu disponible après paiement des coûts de transport, égale au paramètre β. La *fonction d'utilité indirecte* s'écrit :

$$U(Z(r), q(r)) = U(Y - T(r) - HR_H(r), q(r)) = (1-\beta)^{1-\beta}\beta^{\beta}\frac{Y - T(r)}{R_H(r)^{\beta}}$$

À l'équilibre, l'ensemble des ménages atteint le même niveau d'utilité $\bar{U}$, l'utilité indirecte est la même pour toute distance r du centre de l'agglomération. En particulier, elle est identique à celle des ménages installés au point de frontière. Il existe donc une relation entre la disposition à payer des ménages en tout

point de l'agglomération et le prix du service de logement à la frontière de l'agglomération :

$$R_H(r,f) = \left((1-\beta)^{1-\beta}\beta^{\beta}\frac{Y-T(r)}{\bar{U}}\right)^{\frac{1}{\beta}} = R_H(f)\left(\frac{Y-T(r)}{Y-T(f)}\right)^{\frac{1}{\beta}}$$

D'après cette relation, l'enchère des ménages est, en supposant des coûts des transports continus et croissants, croissante avec le niveau du loyer de frontière et avec la proximité au centre. Elle est maximale au centre de l'agglomération et minimale à la frontière.

L'équilibre du secteur de la construction

La fonction de production est définie dans le cas Cobb-Douglas comme $F(L,K) = AL^aK^{1-a}$. Cette forme fonctionnelle implique une élasticité de substitution unitaire entre les facteurs de production. Le coefficient a représente la part du foncier dans les coûts de la construction, supposée stable quelque soit la localisation. La fonction de profit s'écrit :

$$\pi(r) = R_H(r,f)F(L(r),K(r)) - R(r)L(r) - \delta K(r)$$

L'hypothèse de rendements constants est vérifiée. Elle signifie que le constructeur applique le même raisonnement quelle que soit la superficie de sol qu'il a à disposition. Elle permet de s'intéresser à l'intensité capitalistique $k = \frac{K}{L}$. Le secteur de la production choisit l'intensité capitalistique k qui maximise son profit.

$$k^* = \left(A(1-a)\times\frac{1}{\delta}\times R_H(r,f)\right)^{\frac{1}{a}}$$

Cette intensité optimale varie avec la distance par l'intermédiaire de la disposition à payer des ménages. La production de service de logement par m^2 au sol s'écrit :

$$F(r) = A^{\frac{1}{a}}\left((1-a)\times\frac{1}{\delta}\times R_H(r,f)\right)^{\frac{1-a}{a}}$$

La densité de bâti est donc d'autant plus importante que le loyer que les ménages sont prêts à payer est élevé. En dehors de l'enchère des ménages, les paramètres influençant la densité de bâti sont exogènes et ne dépendent pas de la distance. Les variations de densité selon la distance sont donc déterminées par les changements de comportement d'enchères des ménages et par le loyer net perçu par le constructeur. À noter cependant, les loyers que les ménages sont disposés à payer dépendent du niveau d'utilité d'équilibre de l'agglomération, et ce dernier n'est pas indépendant des contraintes du secteur de la production de logement. Le paramètre A représente la productivité globale des facteurs. Le paramètre δ représente la somme du taux d'intérêt et du taux de dépréciation du capital. Il joue un rôle fondamental dans la mesure où il détermine le rapport entre le loyer et le prix d'achat du service de logement. L'hypothèse de nullité

des profits permet de plus d'expliciter la relation entre prix du sol et prix du bâti.

$$R_H(r,f) = \frac{1}{A}\left(\frac{\delta}{1-a}\right)^{1-a}\left(\frac{R(r,f)}{a}\right)^{a}$$

$$R(r,f) = a(AR_H(r,f))^{\frac{1}{a}}\left(\frac{1-a}{\delta}\right)^{\frac{1-a}{a}}$$

En introduisant la fonction caractérisant l'enchère des ménages dans la dernière équation, on obtient l'évolution des prix fonciers avec la distance.

$$R(r,f) = \left(\frac{Y-T(r)}{Y-T(f)}\right)^{\frac{1}{a(\beta)}} R_A$$

Le gradient de prix foncier apparait ainsi plus marqué que le gradient des prix immobiliers ($\frac{1}{a\times\beta} > \frac{1}{\beta}$).

La contrainte spatiale

À la frontière de l'agglomération, il y a égalité entre le prix du sol utilisé pour la construction de logement et et la rente agricole : $R(f) = R_A$. En ce point de frontière, d'après la spécification retenue pour la fonction de production, le loyer unitaire du service de logement s'écrit :

$$R_H(f) = \frac{1}{A}\left(\frac{\delta}{1-a}\right)^{1-a}\left(\frac{R_A}{a}\right)^{a}$$

La densité de bâti à la frontière s'écrit :

$$F(f) = A^{\frac{1}{a}}\left(\frac{1}{\delta}(1-a)\left(\frac{1}{A}\left(\frac{\delta}{1-a}\right)^{1-a}\left(\frac{R_A}{a}\right)^{a}\right)\right)^{\frac{1-a}{a}}$$

Le paramètre R_A apparaît ainsi important pour la caractérisation de l'équilibre urbain en niveau. L'équilibre est enfin défini implicitement par l'équation d'équilibre spatial.

$$\int_0^f \frac{L(r)F(r)}{H(r,f)}\mathrm{d}r = N$$

LA REPRÉSENTATION DES INTERACTIONS ENTRE TRANSPORT ET ÉTALEMENT URBAIN

Dans le modèle, le gradient d'accessibilité (la croissance du coût du transport lorsque l'on s'éloigne du centre de l'agglomération) joue un rôle structurant dans la détermination de la forme urbaine. Il explique l'apparition de gradients de prix, immobiliers et fonciers, et de gradients de densité, de construction et de population. La croissance des coûts de transport avec l'éloignement du centre entraîne la décroissance des prix et des densités de population.

À partir d'un nombre réduit d'équations structurelles, le modèle monocentrique illustre le conditionnement de l'usage des sols par les infrastructures de transport. Il propose ainsi un schéma d'explication de la relation entre les infrastructures de transport et la forme des villes. Il illustre l'importance de la prise en compte de cette relation en amont de l'installation de nouvelles infrastructures de transport : baisser le prix des transports, augmenter leur vitesse ou améliorer la desserte de certains espaces conduit à un étalement de l'espace urbain ; inversement, contraindre les déplacements conduit à un renforcement de la concurrence sur les marchés fonciers et immobiliers.

La variation des coûts de transport : des modèles unidimensionnels aux modèles carroyés

Dans la version la plus simple du modèle, les coûts de transport apparaissent dans la contrainte du budget et sont linéairement croissants avec la distance au centre. Selon cette spécification, la relation entre coûts de transport et forme urbaine dépend uniquement de l'éloignement au centre-ville et les espaces urbains sont modélisés comme une succession continue d'anneaux concentriques de moins en moins denses. Des différences par rapport à ce schéma théorique simplifié peuvent apparaître en fonction des contraintes naturelles et des réseaux de transport urbain. Le paramètre θ, représentant la part disponible au sol pour la construction, permet de prendre en compte des géométries spécifiques telles que celle des villes côtières, qui ne peuvent se développer que sur un demi disque. La formalisation reste néanmoins isotrope avec une variation des données du modèle pouvant être représentée de manière unidimensionnelle.

De manière à augmenter le réalisme empirique du modèle, de nombreux travaux ont proposé une description plus précise des variations de coûts de transport en fonction de la localisation dans la ville en complexifiant la forme fonctionnelle des coûts de transport. L'emplacement des routes et les vitesses autorisées sur le réseau conduisent notamment à des différences d'accessibilité entre des espaces pourtant situés à des distances comparables du centre. Dans son étude sur la relation entre la construction de voies rapides et l'étalement urbain dans les villes américaines [3], Nathaniel Baum-Snow prend par exemple en compte les différentiels de vitesse selon le type de route emprunté en ajoutant au modèle un paramètre indiquant la position des espaces par rapport à la voie rapide la plus proche. Chaque point du modèle est alors caractérisé par deux coordonnées. L'auteur montre ainsi les déformations de la tâche urbaine entrainées par les différentiels de vitesses entre voies rapides et voies normales. Les couloirs autoroutiers permettent un éloignement plus conséquent des ménages travaillant au centre des agglomérations en leur permettant de parcourir une distance plus longue en un temps plus court. Le modèle développé par l'auteur permet d'établir

un lien entre la construction des voies rapides dans les villes américaines et la baisse de la densité de population des centre-villes au profit des banlieues.

Le modèle NEDUM-2D, utilisé dans la suite de cette étude et développé au Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED) [17], s'appuie sur un carroyage de l'agglomération parisienne. Chaque carreau est caractérisé par un coût de transport vers le centre de l'agglomération qui lui est propre et conditionne les prix des logements ainsi que la densité des constructions. L'introduction d'une seconde dimension dans la formalisation de l'espace permet de modéliser plus finement les différentiels d'accessibilité selon le réseau routier et le réseau de transport en commun et donc de s'adapter aux différentes villes pour l'application empirique. Il autorise notamment la représentation de zones ponctuelles de meilleure accessibilité, liée par exemple à une gare du réseau régional, à l'origine d'une zone d'urbanisation localisée.

Les coûts de transport : des coûts monétaires et non monétaires

Les coûts des transports supportés par les ménages et pris en considération lors du choix du logement relèvent à la fois de dimensions monétaires et de dimensions non monétaires. En complément du coût des véhicules individuels et de celui des transports en commun, les ménages sont en particulier fortement contraints par les temps des différents modes de transport. Théoriquement, cette dimension non monétaire du transport peut être intégrée dans la contrainte du budget des ménages. Dans ce cadre, les coûts non monétaires tels que le temps des trajets sont monétarisés et influencent l'étalement urbain.

Certaines variantes du modèle proposent d'intégrer le transport non pas seulement dans la contrainte budgétaire mais dans la fonction d'utilité. En considérant que la contrainte principale liée au transport relève du temps passé dans les déplacements, certains auteurs incluent en effet les transports en ajoutant une fonction de la distance ou du temps de déplacement au dénominateur de la fonction d'utilité. Le fonction d'utilité peut s'écrire par exemple dans le cas Cobb-Douglas en ajoutant une fonction de la distance au dénominateur de la fonction d'utilité :

$$U(Z,H,r) = \frac{Z^{\alpha}(r)H^{\beta}(r)}{v(r)}$$

Ainsi, dans leur travail d'estimation des coûts d'agglomérations [8], Pierre-Philippe Combes, Gilles Duranton et Laurent Gobillon proposent par exemple la fonction $v(r) = (a+r)^{\tau}$ et n'ajoutent pas de coûts monétaires du transport dans la contrainte du budget. Dans cette spécification, la *condition de Muth* ne s'exprime plus sous une forme uniquement monétaire. Elle intègre la valorisation

de l'accessibilité au centre sous forme d'utilité.

$$
\begin{aligned}
& U(Y - R_H(r)H(r), H(r), r) = \bar{U} \\
& \Rightarrow -\frac{\partial U(Z,H)}{\partial Z}\left(R_H(r)\frac{\partial H(r)}{\partial r} + H(r)\frac{\partial R_H(r)}{\partial r}\right) + \frac{\partial U(Z,H)}{\partial H}\frac{\partial H(r)}{\partial r} + \frac{\partial U(Z,H)}{\partial r} = 0 \\
& \Rightarrow \frac{\partial R_H(r)}{\partial r} \times \frac{\partial U(Z,H)}{\partial Z} \times H(r) = \frac{\partial U(Z,H)}{\partial r}
\end{aligned}
$$

Cette condition de Muth modifiée indique que la valorisation en utilité des économies réalisées sur le poste logement en cas d'un éloignement supplémentaire du centre ville est égale à la perte d'utilité associée à cet éloignement. Il s'agit d'une alternative de spécification permettant de décomposer coûts monétaires et coûts non monétaires en intégrant la question des transports du côté des préférences des ménages. Dans le cas Cobb-Douglas, insérer les coûts de transport dans la fonction d'utilité signifie que le budget logement constitue une part constante du revenu βY (et non plus du revenu après paiement des coûts de transport $\beta(Y - T(r))$).

Sur le plan empirique, le caractère pluriel des coûts de transport invite à intégrer dans la calibration du modèle le fait que le coût monétaire des transports n'est pas le seul élément pris en compte dans le choix de localisation des ménages. Il semble indispensable en particulier de prendre en compte, dans la contrainte du budget ou dans la fonction d'utilité, le temps des déplacements des ménages. La calibration des coûts de transport dans le modèle monocentrique relève ainsi d'un double enjeu. D'une part, il s'agit d'évaluer dans quelle mesure les coûts des transports dimensionnent la forme des agglomérations. D'autre part, il s'agit d'identifier, parmi ces coûts de transport, quelle est la part de coût monétaire supporté par les ménages et quelle est la part de coût non monétaire tels que la durée ou le confort du trajet. En pratique, si les coûts de transport pèsent d'abord en tant que coût monétaire dans le budget des ménages, les conséquences des politiques tarifaires sur les choix de localisation seront importantes. À l'inverse, si les composantes non monétaires des transports s'avèrent dominantes dans le choix de localisation, l'effet des politiques tarifaires sera modéré tandis que les conséquences de politiques non tarifaires telles que l'amélioration de la vitesse ou de la fréquence du réseau de transport en commun pourra avoir un effet déterminant.

Partie 1 : Le modèle monocentrique : description théorique

Partie 2

Application à l'agglomération parisienne : calibration

Le modèle monocentrique présenté en première partie est ici calibré à partir du modèle carroyé NEDUM-2D sur l'unité urbaine de Paris. Il représente donc une agglomération de la taille de l'unité urbaine de Paris et disposant de son système de transport, mais dont tous les emplois seraient localisés au centre. Les données retenues pour les coûts de transport ainsi que les coûts de la construction constituent des paramètres clés du modèle. La comparaison des simulations avec les données de l'agglomération parisienne montre que cette représentation simplifiée permet de reconstituer à grands traits les variations spaciales des prix immobiliers et des densités de population de l'agglomération parisienne.



Le modèle monocentrique est un modèle schématique construit autour d'un fait stylisé : l'interrelation entre le système de transport et la dispersion spatiale des agglomérations. Il propose une réduction des comportements des acteurs de la ville en un ensemble minimal de relations structurelles, avec d'un côté des ménages qui arbitrent entre accessibilité et qualité du logement et d'un autre côté des constructeurs de logements qui bâtissent d'autant plus dense que la disposition à payer des ménages est élevée. De plus ces comportements prennent place au sein d'un cadre géographique minimaliste. La question de l'accessibilité est ramenée à un point, le centre de la ville, et la ville s'arrête à partir du moment où la rentabilité de la construction devient inférieure à celle de l'exploitation agricole de la terre. La calibration suppose donc d'adapter le modèle aux spécificités de l'agglomération modélisée tout en conservant au maximum la simplicité du modèle. Dans cette partie, le travail de calibration est réalisé à partir du modèle NEDUM-2D développé au CIRED (2012 [17]) pour l'agglomération parisienne. Ce modèle conserve le cadre simple du modèle présenté précédemment en proposant une adaptation plus fine aux contraintes géographiques spécifiques de l'agglomération parisienne grâce à l'ajout d'une deuxième dimension dans la représentation de l'espace.

LE MODÈLE NEDUM-2D : UN MODÈLE MONOCENTRIQUE CARROYÉ

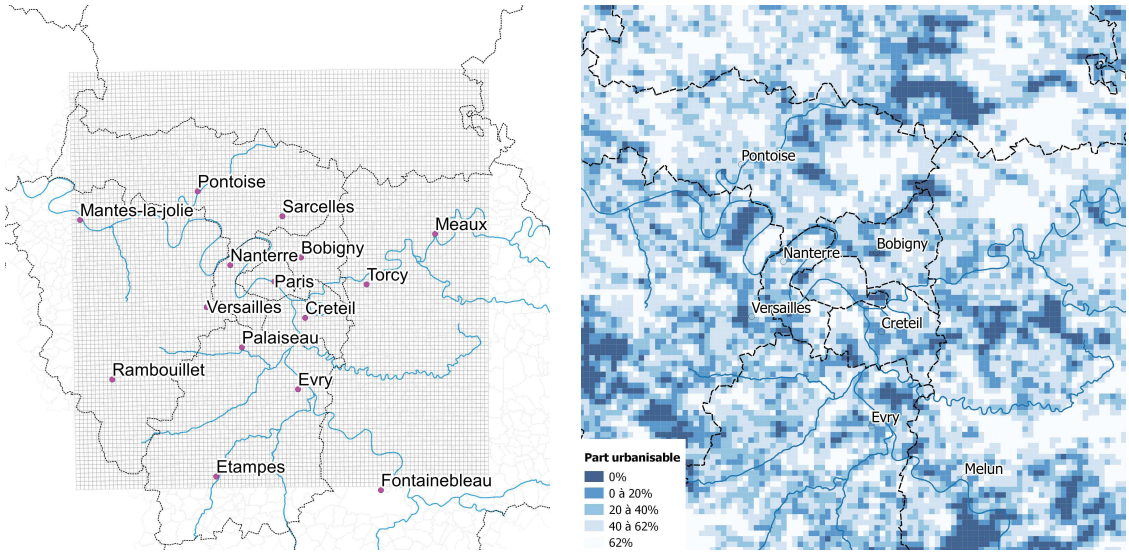
Le NEDUM-2D constitue une application du modèle monocentrique à l'agglomération parisienne développé au sein du CIRED. Il modélise la demande des ménages comme un arbitrage entre logement et accessibilité au centre de l'agglomération parisienne tandis que le secteur de la construction réalise ses choix d'investissement en fonction de la disposition à payer des ménages. À partir de ces relations économiques schématiques, le modèle NEDUM utilise un carroyage de l'agglomération parisienne. Les variables du modèle sont calibrées pour un ensemble de 10 000 carrés de 1 km de côté et centrés autour de la ville de Paris. L'équilibre du modèle est estimé selon ce carroyage. L'introduction de ce carroyage présente deux principaux avantages en comparaison avec le modèle unidimensionnel. D'une part, il permet de calibrer un coût de transport dans chacun des espaces modélisés et d'autre part, de s'adapter aux contraintes géographiques de l'agglomération en définissant une part urbanisable par carreau.

Un carreau i est ainsi caractérisé par un coût de transport $T(i)$. La contrainte budgétaire des ménages s'écrit dans ce cadre :

$$Y = p_Z Z + R_H(i)H + T(i)$$

Les ménages sont supposés maximiser leur fonction d'utilité sous cette contrainte spatialisée. En comparaison avec le modèle théorique présenté ci-dessus, la représentation du comportement des ménages n'est pas modifiée. Les ménages sont considérés identiques : ils font face à des coûts de transport équivalents s'ils habitent dans le même espace, perçoivent le même niveau de revenu, et sont caractérisés par la même fonction d'utilité. Le revenu des ménages est fixé ici à 33 000 euros annuels, ce qui correspond au revenu disponible des ménages de l'unité urbaine parisienne par

Figure 1 – Carroyage de l'agglomération parisienne et proportion de l'espace constructible dans chaque carreau



unité de consommation (UC) multipliée par le nombre d'UC par ménage (22 000 $\times$ 1,5), tandis que la part du budget logement dans le revenu du ménage est fixée à 30 %. Même si elle ne s'exprime plus en fonction du paramètre de la distance au centre de l'agglomération à vol d'oiseau, la relation de Muth est vérifiée à l'équilibre. Dans le cas Cobb-Douglas, la demande des ménages au point i s'écrit :

$$R_H(i,\bar{U}) = \beta\left((1-\beta)^{1-\beta}\frac{Y-T(i)}{\bar{U}}\right)^{\frac{1}{\beta}}$$

Elle correspond à une quantité de service de logement :

$$H(i,\bar{U}) = \beta\left(\frac{Y-T(i)}{R_H(i,\bar{U})}\right)$$

La demande des ménages conditionne les choix réalisés par le secteur de la construction au point i. Dans un cas Cobb-Douglas, le secteur de la production choisit la densité de bâti :

$$F(i,\bar{U}) = A^{\frac{1}{a}}\left(\frac{1}{\delta}(1-a)R_H(i,\bar{U})\right)^{\frac{1-a}{a}}$$

Les décisions du secteur de la construction sont réalisées dans le contexte de propriétaires fonciers en situation de monopole sur les terres dotées d'une certaine accessibilité. Le secteur réalise

un profit nul et propose l'enchère la plus élevée pour le sol. Les propriétaires du sol ne sont supposés par ailleurs vendre ou louer qu'à partir d'un certain montant au m^2 car la construction de logements entre en concurrence avec d'autres usages que le logement. Empiriquement, il est difficile de déterminer ce niveau de prix plancher à partir de l'observation des prix du sol. Les prix agricoles en Île-de-France sont variables et apparaissent moins élevés que le prix des terrains constructibles. Dans les communes rurales d'Île-de-France éloignées des grands axes de transport, le prix moyen au m² des terrains agricoles et naturels non bâtis enregistrés par la Société d'Aménagement Foncier et d'Établissement Rural (SAFER) pour les années 2009 à 2012 est souvent inférieur à 1 €/m². À proximité de la petite couronne et dans les vallées en revanche, il dépasse fréquemment les 100 €/m². Le prix des terres agricoles apparaît donc fortement influencé par l'importance de la demande résidentielle, et n'est pas seulement déterminé par les contraintes économiques du secteur primaire. Dans le modèle NEDUM-2D, le seuil de rentabilité est donc déterminé en fonction des prix du m² de logement : le seuil de rentabilité à partir duquel l'espace est utilisé pour la construction de logement est fixé à un loyer de 12 € par mois et par m^2 de surface de logement. Par conséquent, la densité de construction choisie par les constructeurs est soumise à un prix de vente plancher de 240 euros par m² de terrain. La densité de bâti au sein d'un carreau i s'écrit ainsi :

$$F(i,\bar{U}) = \left[A^{\frac{1}{a}} \left(\frac{1}{\delta}(1-a) R_H(i,\bar{U}) \right)^{\frac{1-a}{a}} \right] \mathbb{1}_{R_H(i,\bar{U}) > \bar{R_H}}$$

L'hypothèse de loyer fixé à la frontière de l'agglomération garantit une cohérence empirique des résultats du modèle sur le point des loyers payés par les ménages pour le service du logement. Elle laisse en revanche ouverte la question théorique de la conversion des terres agricoles en terrains construits.

Le paramètre a, qui correspond à la part des coûts fonciers dans les projets de construction, est fixé ici à 0,33. La productivité globale des facteurs A est fixée à 0,004. La calibration de la fonction de production constitue un aspect sujet à discussion dans le modèle. Les paramètres de cette fonction jouent un rôle déterminant dans les résultats du modèle mais les données empiriques font défaut pour réaliser une calibration à partir des données observées en Île-de-France. Les paramètres choisis renvoient à ce qui est habituellement retenu dans la littérature économique qui part généralement d'une proportion des coûts fonciers dans les coûts totaux d'un tiers. Le paramètre A ainsi que la forme fonctionnelle retenue sont en revanche calibrés par souci de cohérence avec les coûts de la construction au m² et les simulations du modèle. Il pourrait constituer un axe de recherche pour l'amélioration du modèle.

Dans le modèle Nedum, le paramètre de la part du sol consacrée au logement est fixé pour chacun des carreaux de la grille d'analyse. Ce degré de liberté supplémentaire permet une prise en compte des contraintes naturelles, telles que les cours d'eau, et réglementaires, telles que les espaces naturels protégés. Les carreaux sont définis à partir de la base de données Corine Land Cover 2006. En notant G l'aire des carreaux définis par le modèle, l'espace disponible au sol s'écrit :

$$L(i) = \theta(i) G$$

Dans la carte de la figure 1, les contraintes ou interdictions de construire sont représentées en bleu et correspondent aux principaux parcs, forêts et cours d'eau de l'agglomération. Des contraintes supplémentaires peuvent être définies dans des espaces délimités. Il est possible de simuler l'action de contraintes d'urbanisme dans certains espaces en y limitant la superficie de logement potentiellement constructible. Dans la ville de Paris, la superficie de logements disponible est encadrée par des limitations de hauteurs et des recommandations sur la forme des bâtiments. Dans le modèle, une borne est fixée à la superficie construite dans Paris de façon à contraindre les opportunités des constructeurs. La contrainte spatiale de localisation des N ménages dans l'agglomération s'écrit :

$$\sum_{i=1}^{I} \frac{L(i)F(i,\bar{U})}{H(Y-T(i),\bar{U})} = N$$

À partir d'une taille de population N exogène, l'équilibre du modèle est résolu par le calcul du niveau d'utilité $\bar{U}$ d'équilibre permettant d'égaliser la somme des populations par carreau, terme de gauche de l'équation au nombre de ménages N. La taille de la population correspond au nombre de ménages de l'agglomération, puisqu'il s'agit par définition d'un ensemble de personnes vivant dans le même logement et partageant le même budget. Dans l'unité urbaine de Paris, le nombre de ménages s'élevait selon l'Insee à environ 4 500 000 en 2012, pour une population de 10 500 000 personnes, soit 2,3 personnes par ménage. Le nombre d'actifs occupés était durant cette même année de 5 300 000 pour un ratio d'actifs occupés sur nombre de ménages de 1,18. L'hypothèse d'unicité des ménages constitue ici une hypothèse importante puisqu'elle signifie notamment que le nombre de personnes par ménage reste stable selon la distance. En pratique, un tri spatial s'observe. Les prix élevés des centre-villes conduisent les ménages valorisant relativement plus la superficie de leur logement à s'éloigner vers la périphérie de l'agglomération. Ainsi, les ménages avec enfants sont plus nombreux en petite couronne et en grande couronne que dans la ville de Paris.

LES COÛTS DE TRANSPORT : COÛTS MONÉTAIRES ET TEMPS DE DÉPLACEMENT EN ÎLE-DE-FRANCE

Les coûts de transport jouent un rôle clé dans le modèle puisqu'ils déterminent la variation des autres paramètres selon la localisation des ménages. Ils sont d'autant plus importants pour l'analyse de l'influence de la tarification des transports, qui implique une calibration précise des coûts selon le mode emprunté par les ménages ainsi qu'une représentation du choix modal. La calibration des coûts de transport nécessite de réaliser plusieurs hypothèses fondamentales pour le fonctionnement du modèle. Elle suppose au préalable de déterminer la forme fonctionnelle retenue dans le modèle (coûts de transport dans la fonction d'utilité ou dans la contrainte du budget). Elle suppose ensuite de sélectionner les déplacements à intégrer dans l'arbitrage logement transport (déplacements domicile-travail, ensemble des déplacements courtes distances…). Les modèles d'économie urbaine retiennent généralement les déplacements domicile-travail qui sont considérés en priorité au moment du choix de localisation des ménages et dont le nombre reste relativement stable. Elle suppose enfin de calculer les coûts des déplacements retenus.

Le modèle monocentrique repose sur une hypothèse simplificatrice centrale. Il se concentre sur les coûts de transport vers le centre de l'agglomération. Plusieurs possibilités sont envisageables pour traduire cette hypothèse empiriquement. Il est possible de considérer les déplacements effectivement réalisés par les ménages et de mesurer leurs coûts ou alternativement de considérer les coûts de transport vers un point fixé. La première option a l'avantage de partir de coûts observés pour les déplacements mais rend problématique la considération de changements dans le système de transport. Au contraire, la seconde option repose sur des coûts partiellement virtuels. En Île-de-France, la proportion des actifs travaillant dans la ville de Paris s'élève à 68,8 %, à environ 30 % en petite couronne et environ 15 % en grande couronne (figure 2). L'hypothèse de déplacements dirigés vers le centre facilite cependant la modélisation de modifications de coûts ou d'évolution du système de transport. Elle est donc retenue ici pour l'étude des conséquences de la tarification des transports en commun sur l'agglomération parisienne. Pour le calcul des coûts de transport, le centre de l'agglomération est fixé au quartier de Châtelet - Les Halles qui constitue un nœud central de la ville de Paris.

Figure 2 – Parts modales des actifs en Île-de-France selon le département de résidence

Département	75	77	78	91	92	93	94	95	IdF
Part modale des actifs pour le motif domicile-travail									
Pas de transports	5.5	3.4	3.5	3.2	3.8	3.2	3.4	3.1	3.8
Marche	9.8	5.3	6.2	5.3	10	6.7	7	5.3	7.3
Deux roues	7.7	2.1	3.5	2.9	6.5	3.4	4.5	3.0	4.6
Voiture	12.9	63.0	55.9	60.8	34.5	36.7	39.6	54.1	41.3
Transports en commun	64.1	26.2	30.9	27.8	45.1	50.0	45.5	34.6	43.0
Part des actifs travaillant à Paris	68.8	14.8	14.2	15.3	28.2	29.4	29.2	18.1	31.3
Part modale des actifs travaillant à Paris pour le motif domicile-travail									
Pas de transports	7.7	0.4	0.3	0.3	0.4	0.8	0.5	0.4	3.7
Marche	13.5	0.8	0.8	0.9	2.0	1.4	1.2	0.8	6.8
Deux roues	8.5	1.5	3.4	2.5	8.0	3.8	5.5	2.6	6.4
Voiture	8.3	19.2	19.4	20.8	19.5	16.9	19.1	19.0	14.2
Transports en commun	62.0	78.1	76.1	75.5	70.1	77.1	73.7	77.2	69.0

Source : Mobilités professionnelles, Recensement 2012, Insee

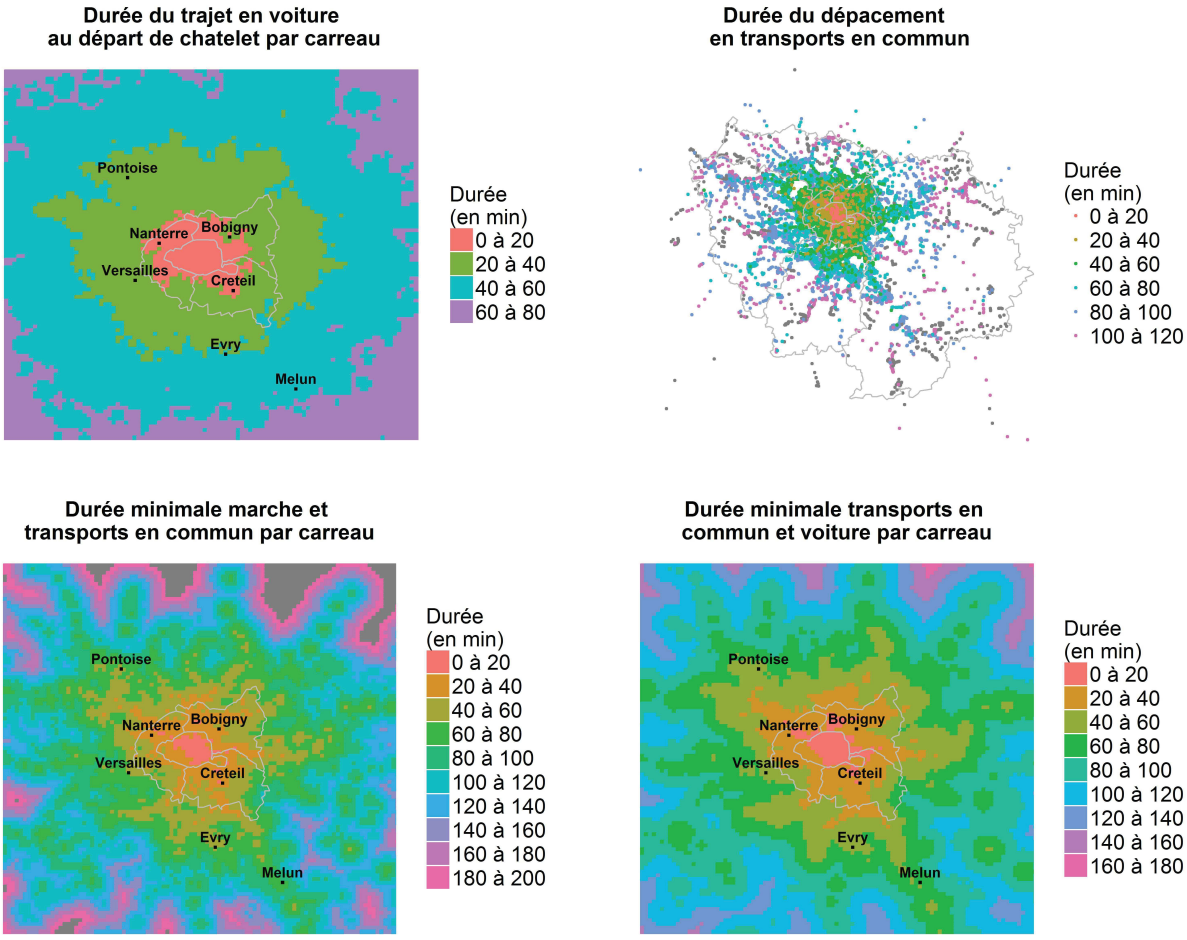
Lecture : 64 % des actifs résidant à Paris et 69 % des actifs résidant en Île-de-France et travaillant dans la ville de Paris utilisaient les transports en commun pour se rendre au travail en 2012.

Les coûts et les temps de transport au départ et vers le centre : données retenues

Les coûts des transports ne relèvent pas uniquement de coûts monétaires. Ils dépendent également de coûts liés à la durée des déplacements et au confort du mode emprunté. Ces deux grands types de coût (monétaires et non monétaires) influencent le nombre de déplacements réalisés par les voyageurs et le mode retenu pour effectuer ces déplacements (modes doux, transports individuels et/ou transports collectifs). En Île-de-France, les temps de parcours au départ et vers le centre-ville de Paris varient selon le mode utilisé. L'usage d'un véhicule particulier correspond à des temps de transport croissant avec la distance au centre. En appliquant les vitesses et le réseau routier du modèle MODEV, modèle de trafic du CGDD [16], les temps de parcours pour rejoindre le centre de Paris au départ du centre de chacun des carreaux composant la grille du modèle NEDUM sont calculés à partir de l'algorithme de Dijkstra (figure 3). Ils sont logiquement croissants avec la distance et n'apparaissent que faiblement modifiés par les axes routiers. Les isochrones sont ainsi relativement circulaires autour du centre. Les durées modélisées semblent basses, aux alentours immédiats de Paris notamment, suggérant des vitesses théoriques plus importantes que les vitesses observées dans ces espaces. Les vitesses retenues correspondent à des vitesses moyennes et non pas à des contextes de congestion importante. Par ailleurs, les durées représentées correspondent au temps du déplacement du point de départ au point d'arrivée sans prise en compte des temps de recherche de stationnement et des temps d'acheminement au véhicule.

La structure du réseau de transport en commun déforme davantage l'accessibilité selon la distance au centre. Le calcul des temps de parcours en transport en commun est réalisable à partir des données « Offre de transport » rendues publiques par le Syndicat des Transports d'Île-de-France (STIF) sous le format *general transit feed specification*. Ces données permettent de calculer des temps de parcours au départ de l'arrêt Châtelet - Les Halles vers l'ensemble des arrêts connectés en s'appuyant sur la grille d'horaires effective des transports en commun et donc en prenant en compte les temps d'attente. Les temps de correspondances entre arrêts sont en outre renseignés. L'algorithme *Raptor* [9] (encadré 2) est utilisé pour réaliser ce calcul. Les temps de parcours au départ de Châtelet - Les Halles sont globalement croissants avec la distance (figure 3). Les arrêts du Réseau Express Régional, du réseau Transilien et Intercités forment des zones ponctuelles à partir desquelles l'accessibilité au centre est améliorée. L'ensemble des espaces accessibles à moins d'une certaine durée au départ de Châtelet - Les Halles n'apparaît donc pas circulaire. Il est déformé par ces lignes qui permettent un éloignement plus important pour un même temps de transport. La durée de trajet est davantage variable selon les espaces lorsque l'on s'éloigne du centre de l'agglomération. En supposant une vitesse de marche de 4,2 km/h, les durées de trajet alliant la marche à l'usage des transports en commun sont ainsi fortement variables entre les espaces desservis par le réseau régional ou inter-régional et les autres espaces. La quasi totalité de la petite couronne apparaît accessible en moins d'une heure. Les préfectures de la petite couronne (Nanterre, Bobigny et Créteil) sont joignables en moins de 40 minutes, celles de la grande couronne en moins d'une heure. L'utilisation de la voiture comme moyen de rabattement vers les arrêts de transport en commun élargit les périmètres des espaces bénéficiant d'une meilleure accessibilité grâce à la présence d'une gare. En supposant une vitesse en voiture de 9,6 km/h, du centre des carreaux vers les arrêts de transport en commun, la carte des durées de déplacement vers le centre de l'agglomération affiche ainsi une forme d'étoile de mer dont les bras sont représentés par les axes ferroviaires.

Figure 3 – Temps de trajet en provenance de Paris en voiture et/ou en transport en commun



Source : MODEV, CGDD et Offre de transport, Stif, calculs CGDD
Note de lecture : les temps de transport en commun sont calculés à partir de la grille de transport en commun d'Île-de-France diffusée par le Stif

Zoom sur : L'algorithme *RAPTOR*

L'algorithme *Raptor* développé par Daniel Delling, Thomas Pajor et Renato F. Werneck [9] constitue une alternative à l'utilisation de dérivés de l'algorithme de Dijkstra pour le calcul d'itinéraires en transport en commun. Il permet notamment d'identifier les voyages permettant d'atteindre un ensemble d'arrêts le plus rapidement possible en partant d'un autre arrêt du réseau à un horaire donné. Les données utilisées pour le fonctionnement de l'algorithme sont les données du STIF sous le format *general transit feed specification*. Le STIF collecte des données auprès des opérateurs de transport en commun d'Île-de-France (SNCF, RATP et réseau OPTILE), puis vérifie, consolide ces informations et les met en ligne.

Les trajets d'un arrêt vers un autre sont calculés pour une période de service fixée. Dans les calculs utilisés ici, la période retenue est la plage horaire du lundi de 18 h à la fin du service quotidien, de façon à calculer les temps de trajet à l'horaire du retour d'un jour ouvré. Les données sont par ailleurs organisées en groupe d'*arrêts*, de *voyages*, de *routes* et de *transferts*. Chaque *arrêt* correspond à un lieu du réseau à partir duquel il est possible de rentrer ou de sortir d'un véhicule. Les *voyages* désignent les séquences d'*arrêts* réalisés par un véhicule à un moment donné de la grille horaire. Ils correspondent aux trajets effectués par la flotte de véhicules de transport en commun. À chaque *arrêt* réalisé par le véhicule, les voyageurs peuvent sortir ou entrer dans le véhicule et l'*arrêt* est caractérisé par un horaire d'arrivée et un horaire de départ. Les *routes* constituent un concept plus générique. Elles regroupent les *voyages* caractérisés par les mêmes séquences d'*arrêts*. Elles se rapprochent du concept commercial et usuel des lignes de transport en commun sans s'y confondre entièrement. Ainsi, une même ligne de transport du point de vue de l'usager, peut renvoyer à plusieurs séquences d'*arrêts* si certains véhicules sont omnibus et d'autres non, ou encore si la ligne se scindent en plusieurs sous branches. Enfin, les *transferts* renseignent les connexions entre les *arrêts* ainsi que le temps de trajet à pied d'un arrêt à l'autre.

À partir de ces données d'entrée et de la définition d'un horaire et d'un ou plusieurs *arrêts* de départ, l'algorithme fonctionne par itération, chaque itération représentant une correspondance. Son architecture générale est la suivante. Pour chaque itération k, l'algorithme calcule la façon la plus rapide d'atteindre chaque *arrêt* du réseau en au plus $k-1$ correspondances. Ainsi, pour chaque *arrêt*, l'algorithme calcule progressivement l'heure minimale d'arrivée selon le nombre de correspondances. À chaque itération, trois étapes sont réalisées. Dans un premier temps, l'heure minimale d'arrivée pour chaque *arrêt* en $k+1$ correspondances est fixée à l'heure minimale d'arrivée en k correspondances. Dans un second temps, chacune des *routes* est considérée. Pour chaque *arrêt* de la *route*, les *voyages* partant le plus tôt qu'il est possible de prendre à chaque *arrêt* selon l'itération précédente sont sélectionnés et utilisés pour améliorer les horaires d'arrivée aux *arrêts* de la *route* ou pour atteindre de nouveaux *arrêts*. Enfin, pour chaque *arrêt*, la dernière étape retient l'heure minimum d'arrivée entre l'heure d'arrivée à partir d'un *voyage* et l'heure d'arrivée à partir d'une correspondance. Cette architecture générale permet de trouver la solution optimale pour chaque nombre de correspondances. Les auteurs proposent en outre un ensemble de techniques permettant de réduire les possibilités considérées par l'algorithme au strict nécessaire. Il est notamment superflu de considérer l'ensemble des *routes* possibles à chaque étape ce qui permet de se limiter aux *routes* dont l'heure minimale pour l'un des *arrêts* a été améliorée à l'étape précédente ou dont l'un des *arrêts* a été atteint par correspondance. Dans les calculs réalisés ici, les *arrêts* de départ selectionnés sont l'ensemble des *arrêts* de la gare de Châtelet - Les Halles (figure 3).

Les coûts monétaires des différents modes de transport correspondent aux coûts de la voiture et aux coûts du déplacement en transport en commun (tickets ou abonnements). Des choix de calibration doivent donc être effectués dans la mesure où, d'un côté, le coût annuel des déplacements domicile-travail dépend dans le cas des trajets en voiture particulière du nombre de déplacements effectués alors qu'il n'en dépend pas dans le cas d'un abonnement aux transports en commun et d'un autre côté, les coûts des déplacements en véhicules individuels comprennent des coûts kilométriques mais aussi des coûts fixes liés à l'achat du véhicule.

Le choix d'acquérir une voiture dépend à la fois des trajets effectués pour le motif domicile travail et des trajets effectués pour l'ensemble des autres motifs si bien qu'il n'est pas évident de considérer qu'il relève de l'arbitrage formalisé dans le modèle monocentrique. Parallèlement, en région parisienne, la localisation en grande couronne rend l'acquisition d'une voiture quasiment indispensable pour les déplacements quotidiens alors que la localisation à Paris peut être compatible avec l'absence de voiture ou de deux-roues motorisées. Dans cette version du modèle, nous faisons le choix de calibration de ne considérer que les coûts variables liées à l'utilisation des véhicules individuels. Les coûts représentés dans la figure 4 reflètent par conséquent les différences de distances routières au centre-ville dans le cas de la voiture. Le coût kilométrique est fixé à partir de l'hypothèse d'un coût du carburant de 1,2 euro par litre et d'une efficacité énergétique des véhicules de 6 litres pour 100 kilomètres parcourus.

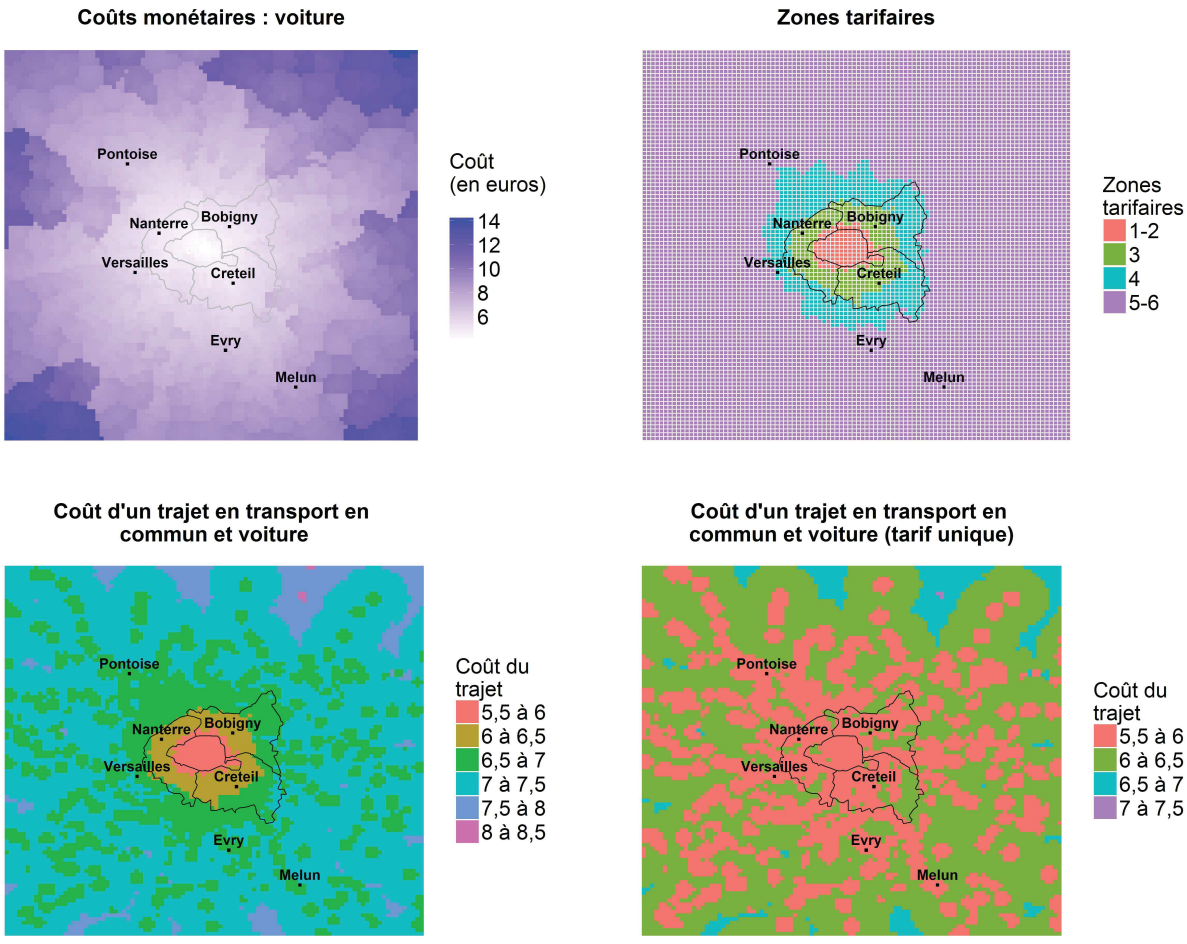
Les coûts d'abonnement des transports en commun sont rapportés au coût d'un trajet en divisant le montant de l'abonnement de chacune des zones tarifaires par le nombre de jours ouvrés, fixé ici à 210, et par le nombre de trajets domicile-travail par jour, fixé ici à deux. Ils dépendent des zones tarifaires dans laquelle se trouve la gare ou la station de départ utilisée pour le déplacement. Ils s'élevaient, avant le passage au tarif unique, à 731,5 euros par an en zones 1-2, à 927,3 euros en zones 1-3, à 1 125,3 euros en zones 1-4 et à 1 204,5 euros en zones 1-5. Rapportés au trajet, ils s'élevaient respectivement à 1,74, 2,21, 2,68 et 2,87 euros. Ils sont passés au 1er septembre 2015 au tarif de 770 euros par an pour les zones 1-5, soit 1,83 euros par trajet.

Les coûts des transports calculés pour une personne doivent ensuite être rapportés au coût par ménage. Dans ce document, le ratio d'actifs occupés sur le nombre de ménages observé dans l'unité urbaine de Paris est utilisé. Il s'élevait à 1,18 en 2012 selon l'Insee. La fixation de ce ratio unique à toute l'agglomération constitue une hypothèse importante du modèle à relier avec l'hypothèse d'unicité des ménages.

Part du prix et part du temps dans le coût de transport perçu par les ménages dans l'agglomération parisienne

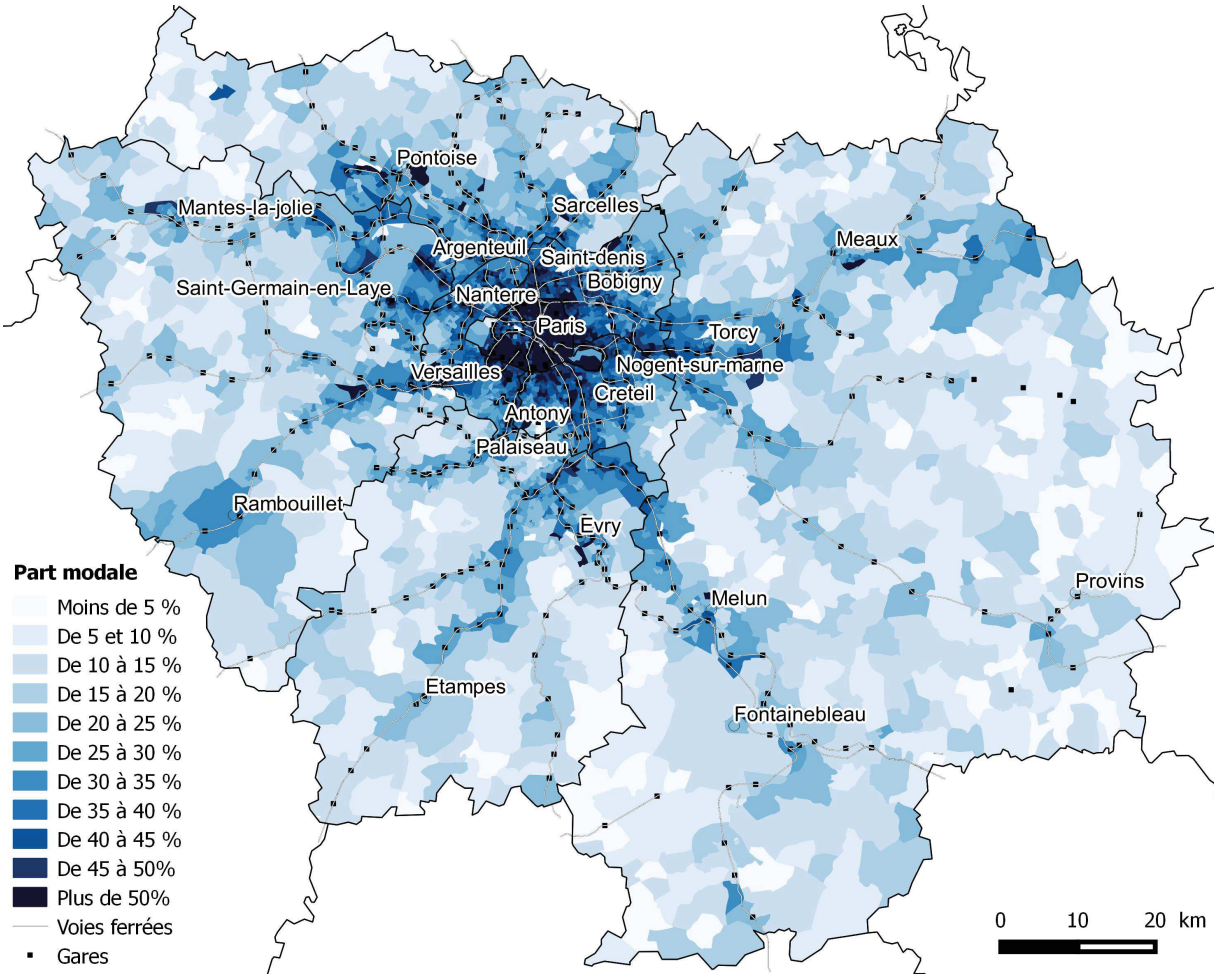
Les ménages réalisent un arbitrage entre la rapidité et le coût de chaque mode possible pour leurs déplacements. Ainsi, les modes doux (marche et vélo principalement) sont peu coûteux mais lents tandis que l'utilisation d'un véhicule personnel permet une vitesse plus importante en contrepartie d'un investissement au moment de l'achat du véhicule et d'un coût d'usage (entretien, carburant et péage) en fonction du nombre de kilomètres parcourus. Minimiser uniquement le coût monétaire

Figure 4 – Coûts du trajet domicile-travail en agglomération parisienne retenus comme paramètres du modèle



Source : MODEV, CGDD et données Île-de-France, calculs CGDD

Figure 5 – Part modale des transports en commun pour les trajets domicile-travail dans l'agglomération parisienne



Source : Mobilités professionnelles, Recensement 2012, Insee

conduirait à retenir uniquement la marche comme mode de déplacement et, à l'inverse, minimiser uniquement le temps du déplacement conduirait à privilégier l'usage de véhicules personnels ou des transports en commun. Il est donc nécessaire de trouver une métrique permettant de comparer les coûts monétaires aux autres coûts liés au transport.

Dans le cas de l'analyse de la tarification des transports, un enjeu important de calibration consiste à s'approcher des parts modales observées en Île-de-France (figure 5). D'après les données du recensement 2012, la part modale du transport en commun pour les déplacements domicile-travail des actifs est supérieure à 50 % dans la plupart des quartiers de la ville de Paris. Elle diminue ensuite avec la distance au centre de l'agglomération. Elle reste supérieure à 30 % dans de nombreux espaces de la petite couronne et à proximité immédiate des gares du RER et du Transilien. Hors de ces espaces desservis par les transports en commun, la part modale de la voiture augmente. La voiture est le mode majoritairement retenu par les actifs résidant en grande couronne : 63 % en Seine-et-Marne, 60,8 % en Essonne, 55,9 % dans les Yvelines et 54,1 % dans le Val d'Oise. Elle est utilisée par environ un tiers des actifs résidant en petite couronne et 12,9 % des actifs résidant à Paris. À Paris, l'usage du deux roues est néanmoins significatif et porte la part modale du véhicule individuelle à 20,6 %. La part modale des transports en commun est plus importante pour les franciliens travaillant à Paris (figure 2). Pour ce sous-échantillon, la part modale du transport en commun augmente en moyenne avec la distance au centre de Paris. Elle oscille de 62 % pour les habitants de la ville de Paris à 78 % pour les habitants du département de la Seine-et-Marne. La part modale du véhicule individuel est minimale à Paris, où elle s'élève à 16,8 %, et maximale dans les Hauts-de-Seine, à 27,5 % (avec une part modale des deux-roues dans ce département de 8 % pour les actifs travaillant à Paris).

La calibration des coûts du transport effectuée ci-dessus et la connaissance des parts modales des actifs franciliens constituent une piste intéressante pour doser les parts monétaires et non monétaires dans les coûts de transport. En effet, ces deux éléments permettent l'application d'un modèle de choix modal selon une spécification *logit* et donc l'étude de la valorisation relative des différentes variables influençant leur choix. Les ménages sont supposés choisir leur mode de transport en fonction de son coût et de la durée du déplacement associée. Les ménages sont supposés maximiser l'utilité comportant cette composante déterministe et un terme aléatoire non observable, suivant une loi de Gumbel dont le facteur d'échelle vaut λ. En notant ϕ le rapport entre le paramètre des coûts monétaires et celui du temps de trajet, la probabilité, pour un ménage habitant dans la cellule i, de choisir la combinaison de mode m vaut :

$$P_i(m) = \frac{exp\left[\frac{-C_i(m)-\phi t_i(m)}{\lambda}\right]}{\sum_{j=1}^{M} exp\left[\frac{-C_i(m)-\phi t_i(m)}{\lambda}\right]}$$

Les données du recensement 2012 sont utilisées pour calculer la valorisation relative (notée ϕ) du temps de trajet par rapport aux coûts. Les temps et les coûts sont affectés en fonction de la commune de résidence des individus interrogés. L'application du modèle *logit* à la population se rendant au travail dans la commune de Paris à pied, en mode motorisé (voiture et deux roues) et en voiture conduit à une valeur du temps $\phi = 0,16$ (euros par minutes), soit 9,6 euros par heure, et à un facteur d'échelle $\lambda = 5,9$. La valeur du temps ainsi calculée est ensuite utilisée dans le calcul des coûts de transport du modèle NEDUM pour les quatre combinaisons de mode suivantes :

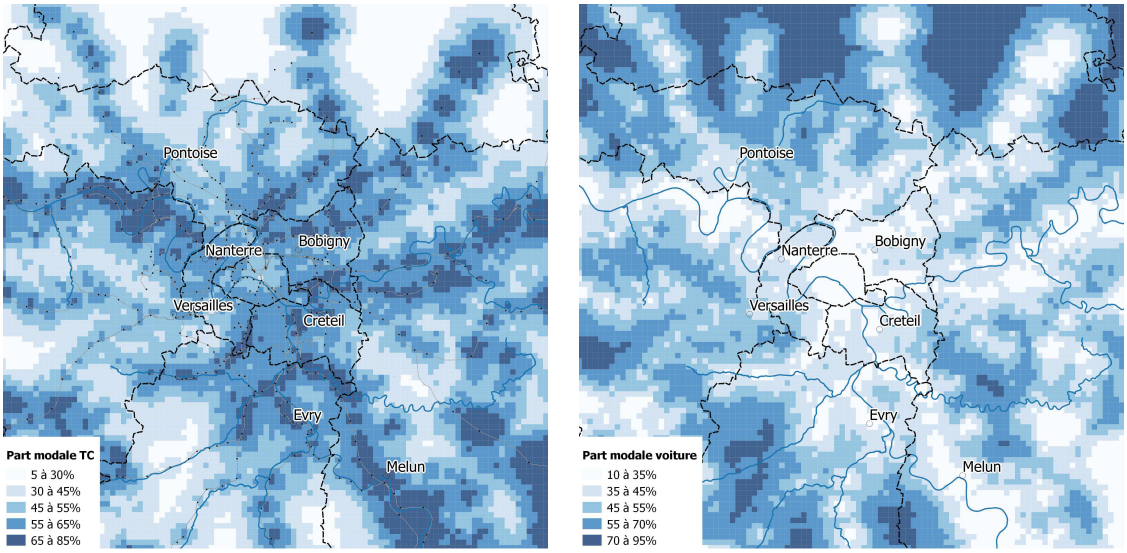
— marche ;
— marche et transports en commun ;

— mode motorisé et transports en commun ;
— mode motorisé.

La part modale des transports en commun (rabattement à pied ou en voiture) modélisée à partir de ces paramètres et des coûts et temps de transport observés par carreau oscillent de 5 à 85 %. Elle se situe entre 30 et 45 % à proximité immédiate de Châtelet-Les Halles, espace dans lequel les transports en commun sont supplantés par la marche. Elle augmente ensuite avec la distance dans les espaces desservis par un arrêt de transport en commun qui permet de rejoindre le centre-ville relativement rapidement. Elle atteint plus de 80 % dans les espaces éloignés de Paris mais situés à proximité des gares de RER ou de Transilien. Elle est enfin faible dans les espaces périphériques non desservis par les transports en commun. À l'inverse, la part modale de la voiture et des deux-roues est élevée dans ces espaces éloignés du centre et dénués d'alternatives à l'utilisation du véhicule individuel. Elle y atteint jusqu'à 95 %. Elle est plus faible à proximité des gares et au centre de Paris. L'utilisation du *logit* permet ainsi de retrouver les mécanismes principaux de choix modal autour de l'agglomération parisienne. Par construction, les choix modaux simulés reposent sur des déplacements orientés vers le centre-ville et représentent donc plus particulièrement ce type particulier de déplacement dans l'agglomération parisienne. L'arbitrage entre les modes doux et les autres modes est par ailleurs dépendant du centre retenu pour l'agglomération. Enfin, utiliser les valeurs du temps calibrées à partir du modèle de choix modal implique l'hypothèse implicite selon laquelle la valeur du temps considérée pour le choix modal coïncide avec la valeur du temps considérée par les ménages dans leur choix de localisation. Or, il s'agit ici d'une hypothèse simplificatrice dans la mesure où ces deux valeurs du temps font appel à des fonction d'utilité différentes. Dans le modèle monocentrique, il s'agit de la fonction d'utilité Cobb-Douglas composée de la consommation de logements et de bien composite. Dans le modèle logit, il s'agit d'une fonction d'utilité ad hoc estimée à partir des données. Une cohérence microéconomique plus forte serait obtenue en calibrant un modèle dans lequel le temps de transport serait intégré directement à la fonction d'utilité mais dans ce cas, la question de la représentation du choix modal subsisterait. Une autre possibilité de calibration consiste à conserver une spécification *logit* mais en calibrant la valeur du temps utilisée à partir des résultats du modèle monocentrique. Cette solution a l'avantage de s'approcher des variations de prix observés mais ne correspond pas nécessairement aux comportements de choix modal observés. Dans le cas de l'étude des effets de la tarification des transports sur les choix de localisation, nous faisons ici le choix d'utiliser une spécification logit calibrée à partir des parts modales observées.

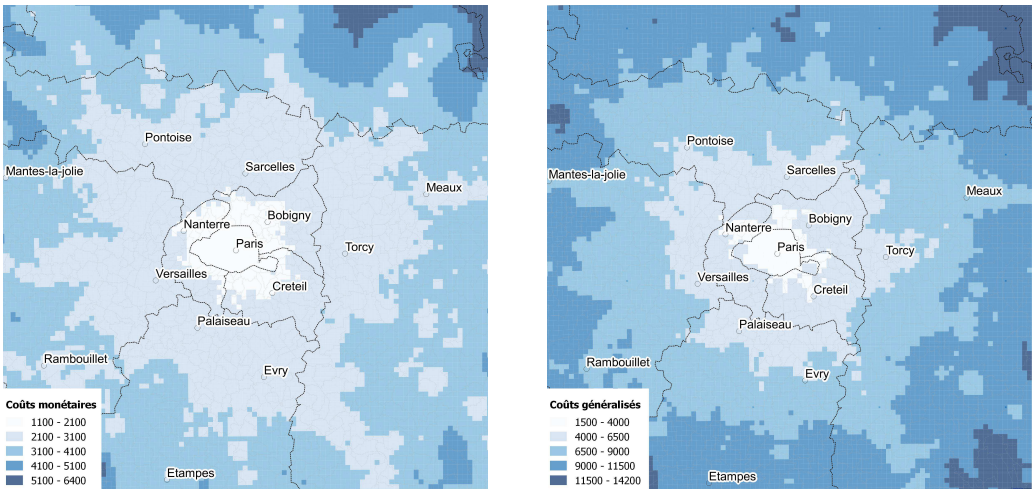
Le calcul des temps et coûts de transport, la détermination d'une valeur du temps et la simulation des parts modales en chaque carreau de la grille de modélisation permettent de calculer les coûts généralisés du modèle. Ces derniers sont en moyenne croissants avec la distance au centre. Ils sont faibles au centre de Paris grâce à des faibles coûts (part non négligeable des modes doux, coût d'abonnement aux transports en commun minimum ou courtes distances en véhicule individuel), avec un minimum par actif de 1 296 euros apr an (1 527 euros par ménage selon le ratio nombre d'actifs sur nombre de ménages retenu). Ils sont environ dix fois plus élevés en périphérie de la grille du modèle dans les espaces non desservis par les transports en commun, avec un maximum par actif de 12 017 euros par an (14 154 euros par ménage). Les gares de RER ou de Transilien permettent d'atteindre le centre-ville pour un coût faible relativement à leur distance. Elles conduisent à la formation d'axes radiaux voire d'îlots de meilleure accessibilité. Les coûts du temps représentent

Figure 6 – Parts modales transports en commun et voiture modélisées pour les trajets domicile-travail dans l'agglomération parisienne



Lecture : les proportions représentées représentent la part des actifs utilisant chacun des modes pour se rendre au centre de Paris selon les coûts de transport et les paramètres du modèle logit estimés

Figure 7 – Coûts monétaires et coûts généralisés annuels des transports dans l'agglomération parisienne



Lecture : Les coûts monétaires représentent les coûts de chaque mode pondérés par la part modale dans chaque carreau

une part importante du coût généralisé et cette part apparaît d'autant plus grande que l'espace considéré est éloigné de Paris. Ils forment moins de la moitié du coût généralisé à Paris et dans de nombreux espaces de la petite couronne. Ils représentent en revanche jusqu'à 70 % du coût généralisé dans les espaces éloignés du centre.

Dans la suite du modèle, les coûts du temps sont pris en compte dans la fonction d'enchère mais ne sont pas retirés du revenu du ménage car ils ne sont pas réellement payés par celui-ci. L'enchère des ménages au point i s'écrit :

$$R_H(i,\bar{U}) = \beta \left((1-\beta)^{1-\beta} \frac{Y - C(i) - \phi t(i)}{\bar{U}} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

Elle correspond à la quantité de service de logement suivante :

$$H(i,\bar{U}) = \beta \left(\frac{Y - C(i)}{R_H(i,\bar{U})} \right)$$

Dans ce cadre modifié, en comparaison avec le modèle théorique, l'utilité d'équilibre solution du modèle est amendée.

$$\bar{U} = (1-\beta)^{1-\beta} \times \frac{Y - C(i) - \phi t(i)}{(Y - C(i))^{\beta}} \times H^{\beta}$$

L'utilité d'équilibre serait égale à l'utilité du modèle théorique dans le cas où $\phi = 0$. Avec des coûts du temps positifs, deux solutions apparaissent possibles. Soit les coûts du temps sont considérés comme payés par le ménage, soit ils sont restitués sous la forme d'un revenu complémentaire. C'est ce dernier choix qui est effectué ici. Il est plus réaliste du point de vue de la contrainte budgétaire des ménages mais correspond à une fonction d'utilité modifiée au niveau de la consommation de service de logement et de bien composite.

$$\begin{aligned} \bar{U} &= [(1-\beta)(Y - C(i))]^{1-\beta} \times H^{\beta} \times \left(\frac{Y - C(i) - \phi t(i)}{Y - C(i)} \right)^{\beta} \\ &= \underbrace{(1-\beta)(Y - C(i))]^{1-\beta} \times H^{\beta}}_{\text{Utilité hors coûts du temps}} \times \underbrace{\left(1 - \frac{\phi t(i)}{Y - C(i)} \right)^{\beta}}_{\text{Terme correctif}} \end{aligned}$$

RÉSULTATS PRINCIPAUX DU MODÈLE STATIQUE

Les données de transport ainsi que les autres paramètres de calibration du modèle (population, fonction d'utilité des ménages, revenu des ménages, nombre d'actifs par ménage, fonction de production de logement et seuil de constructibilité, part de la surface au sol constructible) permettent de déterminer les résultats de l'équilibre urbain : densité de population, densité de bâti, prix immobiliers, surface des logements et budget logement des ménages. Parmi ces résultats, les enchères des ménages pour le logement jouent un rôle central. Elles résultent des coûts du transport et du niveau d'utilité d'équilibre et déterminent la densité des logements.

Variabilité des prix du logement observée et variabilité prédite

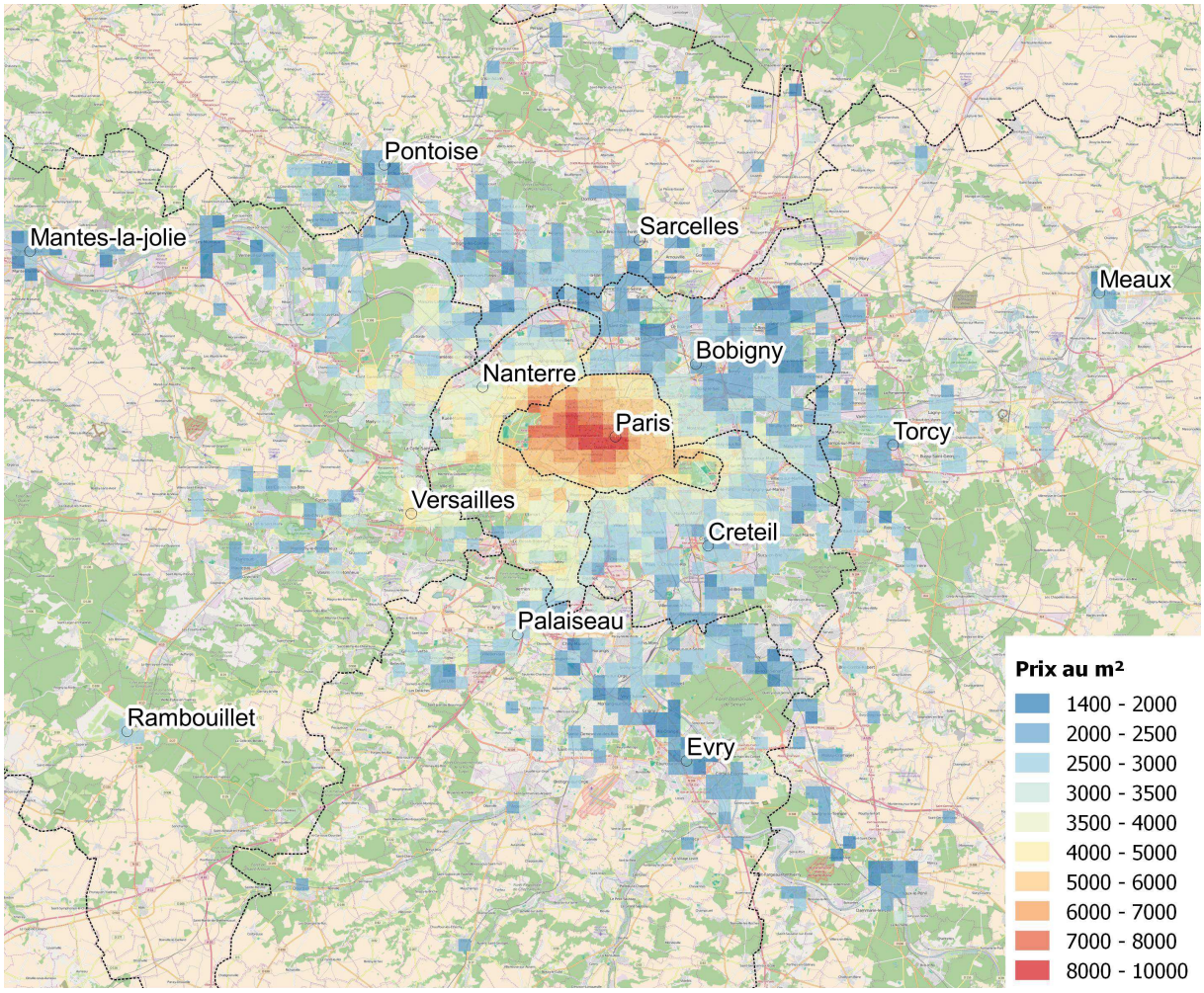
Les bases notariales constituent une source de données sur les prix de vente des logements en Île-de-France intéressante pour analyser les données de prix du modèle. Enregistrées par les notaires (base Bien), elles contiennent des informations sur les prix, la date de mutation, la localisation et les caractéristiques des logements. La base Bien, alimentée sur la base du volontariat, n'est pas exhaustive. Les moyennes calculées à partir de cette base ne sont pas représentatives de l'ensemble des transactions. En Île-de-France, le taux de couverture de la base de données s'élèvait cependant à 82 % selon l'Insee, donnant ainsi la possibilité de calculer des ordres de grandeur réalistes. Dans la figure 8, les prix moyens au m² des logements sont calculés pour l'ensemble des carreaux du modèle dans lesquels plus de 20 transactions ont eu lieu en 2010. Une forte décroissance des prix apparaît entre les prix moyens du centre de Paris, compris entre 8 000 et 10 000 euros, et les prix des espaces éloignés du centre, inférieurs pour la plupart à 3 000 euros. Au delà de cette décroissance des prix en moyenne en fonction de la distance, d'autres disparités existent, notamment entre le département des Hauts-de-Seine, dans lequel les prix moyens sont majoritairement compris dans une fourchette de 3 000 à 6 000 euros, et le département de Seine-Saint-Denis, dans lequel les prix moyens sont compris entre 1 400 et 3 000 euros. Des spécificités plus ponctuelles apparaissent aussi avec des espaces marqués par des prix sensiblement plus élevés ou moins élevés que leurs voisins, dans le complexe autour du parc d'attractions de Disneyland par exemple.

Avant de commenter les résultats en valeur absolue du modèle monocentrique, il est intéressant d'étudier la variabilité des prix produite par le modèle. Le modèle implique la relation suivante entre les prix de l'immobilier et le revenu après paiement des coûts de transport.

$$\ln(R_H(r,\bar{U})) = \frac{1}{\beta} \times \ln\left(\frac{\alpha^\alpha \beta^\beta}{\bar{U}}\right) + \frac{1}{\beta} \times \ln(Y - T(r))$$

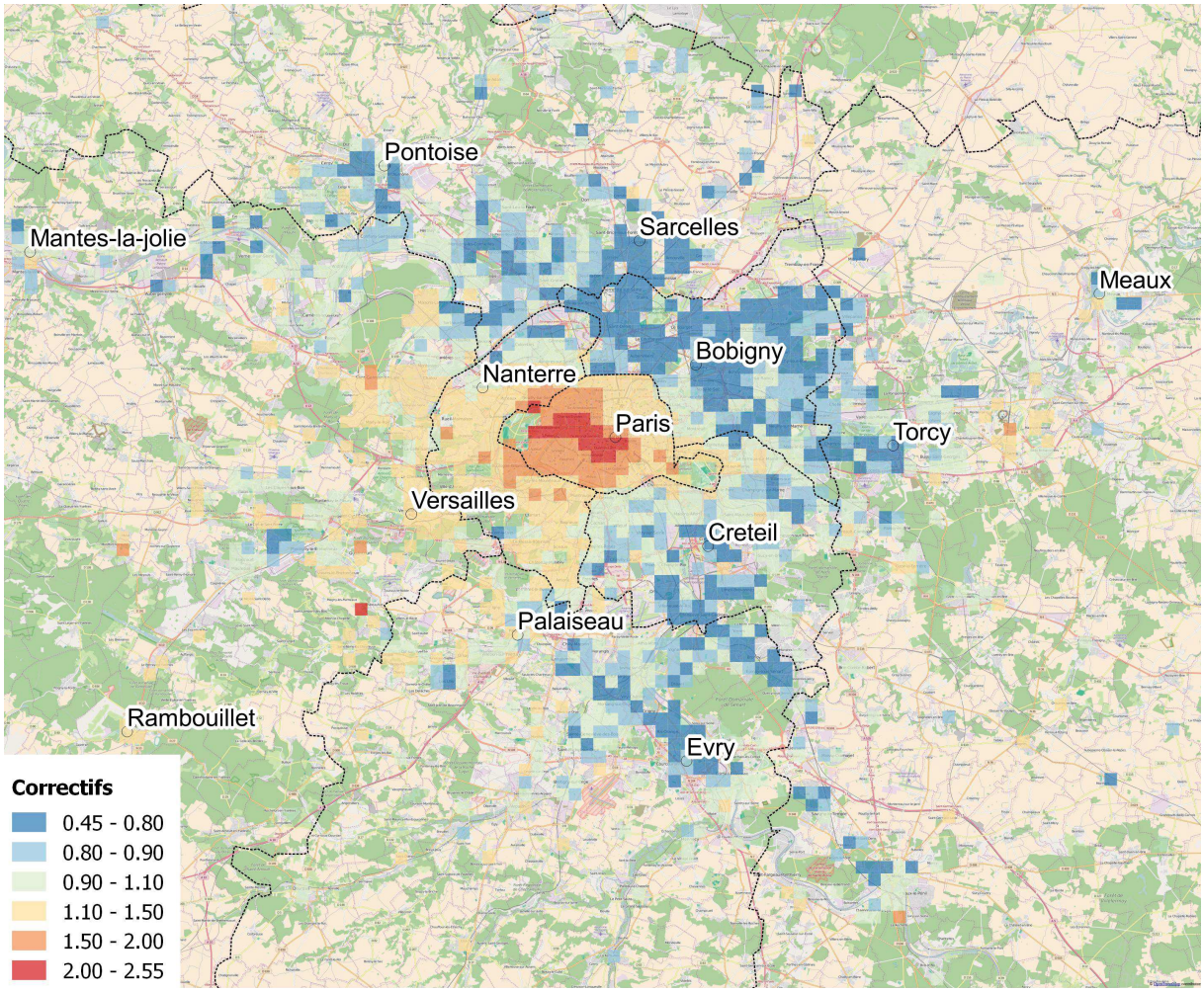
À une date donnée, les sources de variabilité spatiales des prix dans le modèle proviennent uniquement de la variabilité du revenu restant après paiement des coûts de transport. Les autres termes de l'équation sont les paramètres de la fonction d'utilité des ménages (les paramètres α et β décrivent la part du budget consacré au bien composite et au logements) et le niveau d'utilité

Figure 8 – Prix au m² moyens des logements dans l'agglomération parisienne par carreau de 1 km²



Fond de carte : Open Street Map
Source : base Bien 2010

Figure 9 – Facteur correctifs : rapports entre les prix des logements observés dans l'agglomération parisienne et les prix modélisés



Fond de carte : Open Street Map
Source : base Bien 2010
Lecture : En supposant les fondements microéconomiques du modèle vérifiés dans l'agglomération parisienne, les prix de l'immobilier modélisés selon les paramètres caractérisant le ménage calibrés (fonction d'utilité, revenu et coûts de transport) devraient être multipliés par 2,55 dans les espaces les plus chers de l'agglomération et par 0,45 dans les espaces les moins chers pour retrouver la variabilité des prix effectivement observée.

d'équilibre $\bar{U}$ qui ne varient pas selon la localisation dans l'agglomération. Les facteurs d'hétérogénéité des prix non pris en compte dans le modèle peuvent être capturés en introduisant un terme supplémentaire dans l'équation d'enchère des ménages, un effet fixe local pour chaque carreau de la grille Nedum. La propension à payer du ménage est affectée positivement ou négativement par ce terme.

$$R_H(i,\bar{U}) = \epsilon_i \times \left((1-\beta)^{1-\beta}\beta^{\beta}\frac{Y-T(r)}{\bar{U}}\right)^{\frac{1}{\beta}}$$

$$\Rightarrow \ln(R_H(r,\bar{U})) = \frac{1}{\beta} \times \ln\left(\epsilon_i^{\beta} \times \frac{\alpha^{\alpha}\beta^{\beta}}{\bar{U}}\right) + \frac{1}{\beta} \times \ln(Y-T(r))$$

Le terme ϵ_i peut être interprété dans la fonction d'utilité comme un terme multiplicateur de la quantité de services de logement donnant lieu à une perte ou un gain d'utilité lié à la localisation du logement dans le carré i de la grille : $U(Z,H,i) = Z^{\alpha}(\epsilon_i \times H)^{\beta}$. Il peut être identifié à partir de la base Bien en étudiant l'équation suivante :

$$\ln(R_H(r,\bar{U})) - \frac{1}{\beta} \times \ln(Y-T(r)) = \frac{1}{\beta} \times \ln\left(\epsilon_i^{\beta} \times \frac{\alpha^{\alpha}\beta^{\beta}}{\bar{U}}\right)$$

Le terme de droite de la dernière équation correspond à la variabilité spatiale entre les carreaux de la grille géographique inexpliquée par le modèle. Il peut être estimé pour chaque carreau dans lequel un nombre suffisant de transactions a lieu sous l'hypothèse d'un facteur multiplicateur entre le niveau de revenu net des coûts de transport annuel et le revenu à prendre en compte pour la capacité d'achat d'un ménage. Ce facteur correspond par construction du modèle à l'inverse du taux d'intérêt qui s'applique également au secteur de la construction et qui est fixé ici à 5 %. L'estimation de ces termes pour chaque carreau permet ensuite de déduire des facteurs d'hétérogénéité spatiale $\frac{\epsilon_i}{\bar{\epsilon}}$, qui représentent la correction qu'il faudrait apporter aux enchères simulées par le modèle pour retrouver la variabilité spatiale observée dans l'agglomération parisienne.

Ces correctifs (figure 9) montrent que le modèle capture une partie de la décroissance des prix du centre vers la périphérie. Le modèle sous estime cependant l'écart entre le centre ville parisien, auquel il faut appliquer un facteur 2, et la majorité des espaces situés en petite et grande couronne, auxquels il faut appliquer un facteur correctif allant de 0,45 à 0,90 pour retrouver les prix observés. De manière logique, le modèle ne rend pas compte de la différence de prix observée entre des espaces peu différents sous l'angle de l'accessibilité au centre ville de l'agglomération mais pourtant marqués par des niveaux moyens de prix au m² sensiblement différents. L'opposition entre le sud-ouest et le nord-est de l'agglomération parisienne ressort ainsi à nouveau car les facteurs qui influencent les différences de prix entre ces espaces ne sont pas pris en compte dans le modèle. Les facteurs d'hétérogénéité spatiale mettent ainsi en valeur les espaces pour lesquels un niveau relativement élevé du prix des logements provient de facteurs extérieurs aux différences de coûts de transport vers le centre ville imputés ici : différences de revenu des ménages, aménités locales urbaines ou naturelles, centralités économiques secondaires…Théoriquement, il serait pertinent d'ajouter ces termes correctifs lorsqu'ils reflètent des différences d'aménités entre les espaces car

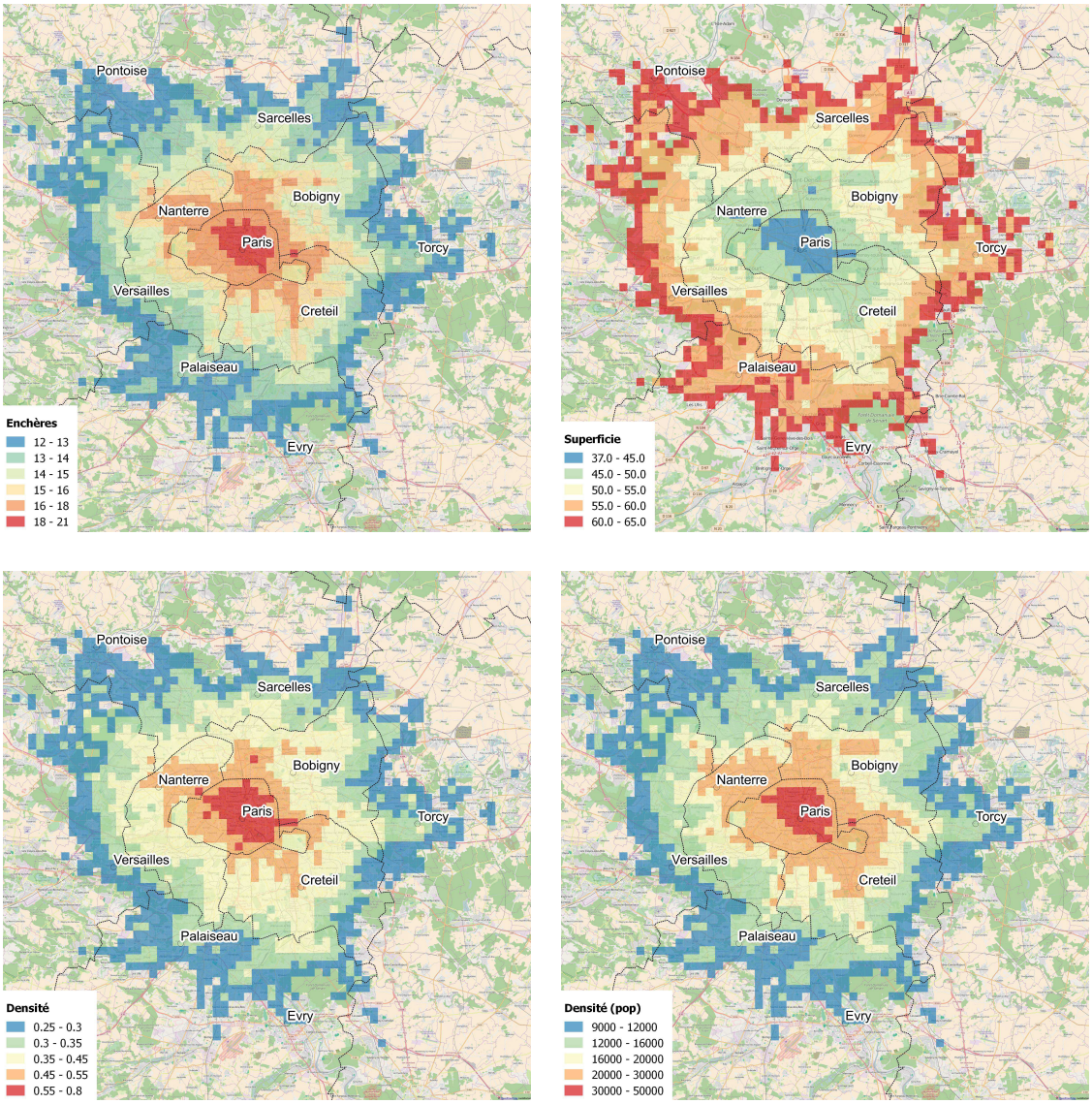
cela correspond à la spécification micro-économique sous-jacente : les termes ϵ_i modifient en effet l'appréciation du service de logement par les ménages et augmentent l'utilité retirée d'une unité de service de logement en fonction de sa localisation. En revanche, les différences de prix liées aux différences de revenu ou d'autres caractéristiques des ménages sont extérieures à la spécification retenue ici qui repose sur une hypothèse de constance du revenu moyen selon les espaces. Appliquer les coefficients ϵ_i dans des espaces dans lesquels le niveau de prix élevé du logement est lié au niveau de revenu ou de patrimoine de ses habitants conduirait à augmenter les prix modélisés dans ces espaces sans modifier le niveau de revenu retenu par hypothèse. Dans les estimations du modèle, cela donnerait lieu à une augmentation de la densité de construction dans ces espaces et à une diminution de la superficie de logement par ménage non représentatives des données observées.

Résultats du modèle

L'application du modèle Nedum conduit aux estimations représentées en figure 10. Ces dernières sont structurées selon une forme concentrique légèrement déformée par les différentiels de temps de transport des cellules vers le centre.

Les loyers mensuels des ménages, qui correspondent dans le modèle à la courbe d'enchères, s'échelonne de 12 euros, seuil retenu par hypothèse aux extrémités de l'agglomération, à 21 euros au centre. Ils sont croissants avec la proximité au centre et sont ponctuellement plus élevés à proximité des axes de transport. À ces données de prix correspondent des données de densité. La densité de bâti varie dans le modèle de 0,25 à 0,8, il s'agit du rapport des surfaces habitables construites calculées par le modèle à la superficie urbanisable (à distinguer du nombre d'étages des habitations). Elles sont d'un ordre de grandeur cohérent avec les données de densité de la base Sit@del2 qui indiquent que, dans la majorité des communes de la petite couronne de l'agglomération parisienne, les médianes de densité de bâti des logements construits de 2006 à 2014 sont comprises entre 0,2 et 0,8. Elles apparaissent cependant sous-estimées dans le centre-ville. Par ailleurs, elles correspondent théoriquement à un optimum du point de vue des constructeurs de logement entre la demande des ménages pour le m² de surface habitable et le coût de la densité. Les constructeurs ne prennent pas en considération dans le modèle l'éventuelle demande pour des espaces de jardin privatifs alors que celle-ci influence vraisemblablement la densité des habitations dans les espaces périphériques de l'agglomération parisienne. Les résultats du modèle sur cet aspect sont donc à considérer avec précaution. Les densités de population varient de 9 000 à 50 000 personnes par km^2 dans les espaces consacrés à la construction de logements. En considérant l'ensemble de la superficie au sol, la densité de population atteint un maximum de 30 600 habitants au km² au centre de Paris et s'élève à 6 300 habitants au km² en moyenne dans l'agglomération. Elle est supérieure à la densité de population observée de l'unité urbaine parisienne, qui s'élevait à 3 700 habitants au km² en 2012 selon l'Insee, en raison d'une superficie de l'agglomération modélisée inférieure à la superficie de l'unité urbaine parisienne.

Figure 10 – Résultats de la calibration du modèle Nedum sur l'agglomération parisienne : loyers mensuels par m², superficie des logements, densité de bâti et densité de population



Fond de carte : Open Street Map
Modèle Nedum-2D, calibration et calculs CGDD

Le modèle représente en effet un espace urbanisé d'une superficie de 1 660 km², inférieure au 2 800 km² de l'unité urbaine parisienne. Cet espace s'étend à l'ouest légèrement au-delà des communes de Saint-Germain en Laye et de Poissy, à l'est au delà de Torcy, au sud jusqu'à Évry et au nord jusqu'à Pontoise. La sous-estimation de l'étalement de l'unité urbaine provient en partie d'une sous-estimation des superficies des logements. Dans le modèle, celles-ci varient de 37 m² au centre Paris à 65 m² en périphérie, alors que la superficie moyenne des logements était en 2013 de 74,6 m² en Île-de-France, de 69,3 m² en petite couronne et de 58,7 m² à Paris (Insee, Enquête Logement 2013). Par ailleurs, monocentrique par hypothèse, le modèle ne représente pas les pôles locaux situés en dehors du centre de l'agglomération, tels que la ville d'Évry représentée comme un espace peu dense. Le développement urbain se réalise majoritairement dans la continuité du bâti, à l'exception de quelques espaces périphériques isolés dont le développement dans le modèle s'explique par la présence d'un arrêt de transport en commun, à Savigny le Temple par exemple, commune desservie par le RER D. Par construction, le modèle ne rend pas compte du développement de bourgs périurbains marqués par une discontinuité du bâti malgré l'absence de gare de transport en commun. Le comportement des ménages modélisé ici ne prend pas en considération la préférence pour les espaces ouverts dans l'environnement de l'habitation ni pour les jardins privatifs. Les activités économiques ne sont pas représentées et celles-ci occupent un espace croissant à mesure que l'on s'éloigne du centre ville de l'agglomération, avec notamment quelques grands complexes tels que les aéroports ou les espaces logistiques. Enfin, le modèle ne représente pas la régulation de l'usage des sols décidée par les collectivités locales. En dehors des parcs et des zones naturelles dont la constructibilité est empêchée par l'intermédiaire des paramètres θ_i, les espaces deviennent par hypothèse constructibles à partir du moment où l'enchère des ménages pour la location dépasse 12 euros par m² et par mois.

Tests de sensibilité

Au-delà des résultats statiques du modèle, il est important d'étudier le comportement dynamique de l'équilibre urbain en identifiant les variables pouvant jouer un rôle important dans le niveau des variables d'équilibre du modèle. Dans la figure 11, l'équilibre du modèle est calculé en augmentant de 10 % les paramètres définissant la demande de logements (part du revenu net des coûts de transport consacrée au budget logement, revenu, nombre de ménages, ratio nombre d'actifs sur nombre de ménages) et le secteur de la construction (productivité globale des facteurs, part des facteurs de production autres que le foncier dans les coûts de construction, taux d'intérêt et seuil minimal du loyer au m² de surface habitable à partir duquel la construction devient rentable).

Du côté de la demande, l'augmentation de la part du logement dans le budget ou l'augmentation du revenu des ménages conduisent à des effets similaires. Dans le premier cas, la superficie des logements augmente de 13 %, dans le second de 14 %. Ceci résulte du budget plus élevé accordé à ce poste de consommation. L'augmentation du budget logement et l'augmentation des superficies des logements entrainent une extension de l'unité urbaine d'un même ordre de grandeur. La croissance des superficies de logement se réalise grâce à la construction de logements plus éloignés du centre et non pas par élévation des bâtiments existants. Les loyers au centre diminuent

légèrement et les densités de population chutent significativement. L'augmentation de la population a des répercussions légèrement différentes. La croissance du nombre de ménages lorsque ceux-ci restent identiques provoque une intensification de la concurrence pour le logement. Les nouveaux ménages se répartissent en partie dans les espaces déjà urbanisés, conduisant au centre de la ville à une augmentation des loyers de 2 %, une diminution des superficies de logements de -2 % et une croissance de la densité de population de 5 %; et en partie vers nouveaux espaces périphériques avec une croissance de la superficie urbanisée de 8 %. L'ensemble des variations des paramètres suite à l'augmentation de 10 % du nombre de ménages sont inférieures à 10 %. L'absorption de la population partiellement dans l'espace urbanisé et partiellement dans de nouveaux espaces contribue à répartir l'effet de la croissance démographique.

Figure 11 – Tests de sensibilité : variations en % des résultats du modèle pour une variation des paramètres de +10 %

	Demande de logements				Secteur de la construction			
	β	Revenu	Population	Ratio actifs	A	b	Taux d'intérêt	$\bar{R}_h$
Superficie urbanisée	13	14	8	-6	-20	-80	16	-20
Au centre :								
Loyer au m²	-3	-3	2	5	-5	-22	4	5
Surface	13	14	-2	-5	5	29	-3	-5
Densité	-5	- 6	4	11	21	381	-11	10
Densité de population	-16	- 17	5	16	15	274	-8	15
À la frontière :								
Loyer au m²	-	-	-	-	-	-	-	10
Surface	10	11	0	-1	0	2	0	-9
Densité	-	-	-	-	33	533	-18	21
Densité de population	-9	-10	0	1	33	522	-18	33

Lecture : Lorsque le paramètre du revenu des ménage est augmenté de 10 %, la superficie urbanisée pour le logement prédire par le modèle augmente de 13 %.

La modification du ratio nombre d'actifs sur nombre de ménages, bien qu'affectant une donnée démographique, revient concrètement, du fait de la construction du modèle, à augmenter d'un même pourcentage de variation les coûts de transport supportés par les ménages. En effet, il s'agit du multiplicateur utilisé pour convertir les coûts de transport individuel en un coût de transport à l'échelle du ménage. Augmenter ce multiplicateur équivaut donc à augmenter les coûts de transport. Cette augmentation a pour conséquence un renchérissement des localisations éloignées, une intensification de la concurrence pour les espaces centraux et un recentrage de l'agglomération. Au centre de la ville, les loyers augmentent de 5 %, les superficies diminuent de -5 % et les densités de population

augmentent de 16 %.

Du côté du secteur de la construction, la forme fonctionnelle Cobb-Douglas est très sensible à la valeur des paramètres A et b. L'augmentation de ces paramètres de productivité globale des facteurs et de part du capital dans le coût de la construction conduit au même type de phénomènes. La productivité du secteur est améliorée et donc l'est aussi sa capacité à produire des bâtiments denses et à proposer de la superficie habitable aux ménages. Dans le cas d'une augmentation de 10 % du paramètre A, la densité de bâti au centre augmente de 20 %, les superficies de logement de 5 % et les densités de population de 15 %. À la frontière de l'agglomération, les densités des logements et de population augmentent de 33 %. Le paramètre b est davantage sensible. Une variation de sa valeur de +10 % entraîne une multiplication de la densité au centre par 4,8 et une multiplication de la densité de population par 3,7. À la frontière, densité de bâti et densité de population sont multipliées respectivement par 6,3 et 6,2. Logiquement, ces niveaux de variation entraînent un bouleversement de l'équilibre spatial avec une emprise de l'espace urbanisée diminuée de 80 %. Le paramètre du niveau de loyer du m² de surface habitable minimal à partir duquel il devient rentable de construire des logements joue aussi un rôle important. Son augmentation revient à une augmentation de la contrainte pesant à la frontière de l'agglomération sur la construction de logements. Elle conduit à une augmentation de la densité de bâti à la frontière de 21 % et à une diminution de -20 % de la superficie de l'agglomération, caractérisée par des loyers et des densités plus élevés et des superficies de logement plus faibles. La variation du taux d'intérêt enfin entraîne des conséquences opposées à celles liées à la variation du paramètre A. L'augmentation du taux d'intérêt renchérit le coût du capital et diminue la capacité à payer des ménages. Elle conduit donc à une baisse des densités de bâti et de la population ainsi qu'à une extension de l'espace urbain.

Ainsi, il semble que les chocs affectant le côté demande du modèle sont bien absorbés dans le sens où ils conduisent à des effets attendus et d'un ordre de grandeur inférieur ou du même ordre que la variation du modèle. Côté offre de logements, une sensibilité importante apparaît en revanche à des paramètres qu'il reste difficile selon les données disponibles de calibrer précisément. En particulier, la sensibilité du modèle au paramètre b de la fonction Cobb-Douglas de production de service de logement apparaît problématique dans la mesure où la part d'incertitude autour de son niveau n'est pas inférieure à 10 %. Il serait par conséquent intéressant d'approfondir plus précisément le côté production de logements du modèle. De même, le paramètre $\bar{R}_h$ exerce une influence significative sur les résultats du modèle alors que la calibration de ce paramètre n'apparaît pas évidente au regard des données de prix fonciers et immobiliers observés en Île-de-France.

Les résultats du modèle en écart par rapport à une situation de référence semblent moins sensibles. Ainsi, les variations consécutives à une hausse des coûts des transport de 10 % sont peu modifiées lorsque les paramètres retenus par hypothèse augmentent (figure 12). Les résultats du modèle forment donc un scénario de référence à partir duquel il est possible d'étudier les variations liées aux politiques publiques, en particulier les conséquences de modifications de la tarification des transports sur le développement urbain.

Figure 12 – Tests de sensibilité des écarts à un scénario de référence : variations des résultats du modèle suite à une augmentation du coûts de transport de 10 %

		Demande de logements			Secteur de la construction			
	Référence	β	Revenu	Population	A	b	Taux d'intérêt	$\bar{R}_h$
Superficie urbanisée	-6	-6	-6	-6	-5	-3	-6	-5
Au centre :								
Loyer au m²	5	5	5	5	5	3	5	5
Surface	-5	-5	-5	-5	-5	-3	-5	-5
Densité	11	10	10	10	10	8	11	10
Densité de population	16	16	16	17	16	12	18	16
À la frontière :								
Loyer au m²	-	-						
Surface	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1
Densité	-							
Densité de population	1	1	1	1	1	0	1	1

Lecture : Selon les paramètres du modèle (colonne "Référence"), une hausse de 10 % des coûts de transport diminue la superficie urbanisée de 6 %. Si le paramètre β est augmenté de 10 % (colonne "β"), la hausse des coûts de transport de 10 % conduit également à une diminution de superficie urbanisée de 6 %. Lorsque le paramètre b est augmenté de 10 % (colonne "b"), la hausse de 10 % des coûts de transport conduit à une diminution de la superficie urbanisée de 3 %.

Partie 3

Coûts des transports et étalement urbain

Selon le modèle monocentrique calibré précédemment sur l'agglomération parisienne, le tarif unique, la mise en place d'une taxe carbone d'un montant de deux cents euros par tonne de carbone et l'instauration d'un péage urbain d'un coût par jour ouvrable et par actif de 10 euros conduisent à la formation d'un nouvel équilibre urbain et à une variation des superficies artificialisées pour la fonction logement s'élevant respectivement à + 6, - 4 et - 7 %.

Quels sont les conséquences, d'après le modèle monocentrique calibré ci-dessus, de modifications des coûts des transports particuliers et collectifs ? Trois politiques tarifaires sont étudiées plus particulièrement ici : le passage au tarif unique dans les transports en commun en Île-de-France, l'augmentation du montant de la taxe carbone dans le prix du carburant des véhicules individuels et la mise en place d'un péage cordon autour de Paris.

LE TARIF UNIQUE DANS LES TRANSPORTS EN COMMUN

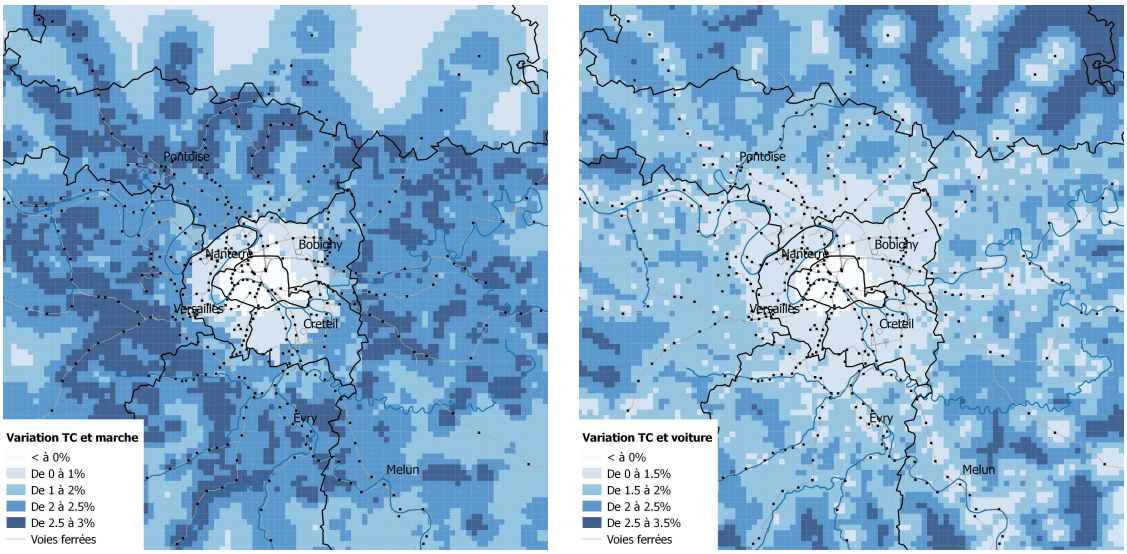
Le passage au tarif unique en Île-de-France a diminué le coût d'abonnement aux transports en commun payé par les ménages effectuant des longs trajets de la banlieue parisienne au centre-ville ou de banlieue à banlieue en passant par les zones centrales de l'agglomération. Depuis le mois de septembre 2015, les abonnements aux transports en commun en Île-de-France sont proposés à un tarif unique de 770 euros par an ou 70 euros par mois, entrainant une baisse importante du prix de l'abonnement pour les ménages habitant dans les zones 3, 4 ou 5 et travaillant au centre de l'agglomération. En diminuant le coût de l'utilisation des transports en commun, cette évolution est à même de favoriser le report modal de la voiture vers les transports collectifs seuls ou vers des combinaisons véhicules individuels et transports en commun. Cependant, en parallèle de ces effets positifs sur le coût des déplacements et sur les pollutions liées aux transports individuels, le passage au tarif unique s'est accompagné d'un débat au sujet de ses conséquences potentielles sur l'étalement urbain. En diminuant le coût des transports, le tarif unique conduit-il à augmenter à terme l'étalement urbain en Île-de-France ? Un modèle monocentrique tel que calibré ici permet de proposer un chiffrage de cet effet collatéral. Selon le modèle, la diminution du coût du transport favorise les choix de localisation vers les zones dans lesquelles le coût du transport a diminué. Quel est plus précisément le diagnostic du modèle sur le lien entre le passage au tarif unique et l'étalement urbain ?

Augmentation de la part modale des transports en commun

Les effets du passage au tarif unique dans les transports en commun proviennent de la modification des coûts généralisés pour se rendre au centre de l'agglomération. La variation des coûts généralisés dépend, d'une part, de la baisse des coûts du transport en commun dans les zones 3, 4 et 5 et de l'augmentation des coûts de transport dans les zones 1-2, et d'autre part, de la variation de part modale de chaque zone. Le coût de l'abonnement aux transports en commun a été augmenté de 5 % dans les zones 1-2 et a à l'inverse été diminué de respectivement 17 %, 32 % et 36 % en zones1-3, 1-4 et 1-5. Le coût des combinaisons modales marche et transport en commun ou véhicule individuel et transports en commun vers le centre de Paris est donc diminué dans la petite couronne et la périphérie de l'agglomération. Dans les espaces situés en zone 3 à 5, les transports en commun deviennent relativement plus attractifs pour les ménages. Les paramètres du modèle *logit* estimés conduisent à un report modal vers le transport en commun avec rabattement en mode doux ou en voiture (figure 13). Le report modal vers la combinaison marche et transport en commun

atteint environ 3 % en grande couronne à proximité des gares. Le report modal vers la combinaison voiture et transport en commun se situe dans ce même ordre de grandeur à distance importante du centre de l'agglomération dans les zones qui ne sont pas directement desservies par le réseau de transports en commun. Au contraire, les zones 1 et 2 se distinguent par une très légère baisse de la part modale du transport en commun au profit des modes doux et des modes motorisés suite à l'augmentation du tarif de l'abonnement. Au total, la part modale du transport en commun augmente de 2,8 % dans l'agglomération modélisée et s'élève à 62,8%. Le modèle monocentrique suppose que tous les déplacements des ménages se font vers le centre de Paris, on retrouve donc une part modale proche de celle observée pour les actifs d'Île-de-France travaillant à Paris (cf. la figure 2).

Figure 13 – Différences estimées des parts modales transports en commun dans l'agglomération parisienne dans l'hypothèse de l'introduction du tarif unique (rabattement à pied à gauche, en mode motorisé à droite)

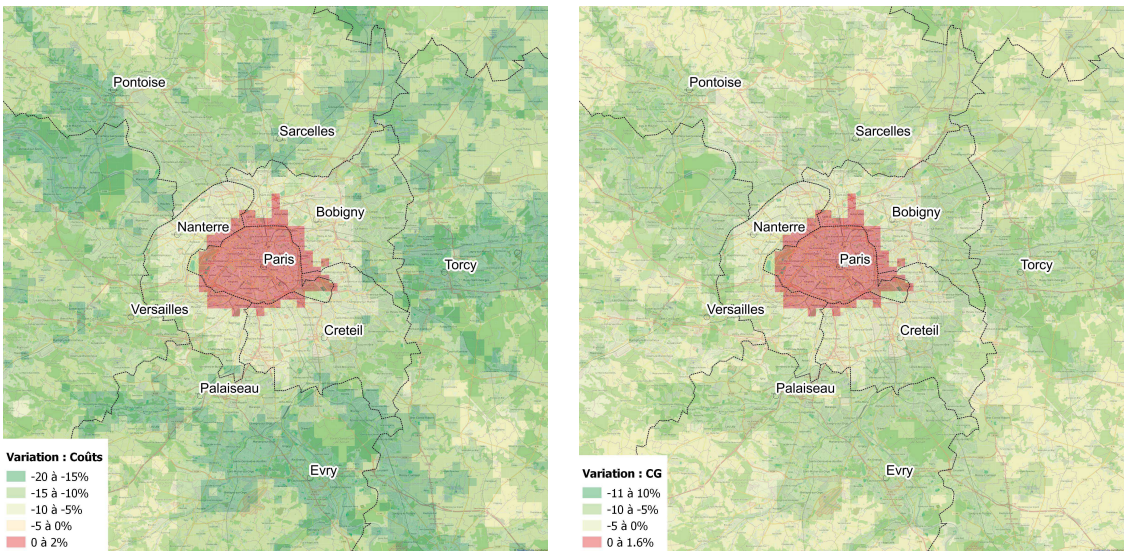


Note de lecture : La différence de part modale représente dans chaque carreau la différence entre la part modale estimée avec tarif unique et la part modale estimée sans tarif unique.

Les coûts monétaires moyens du transport, tous modes confondus, augmentent au centre de l'agglomération dans les zones 1 et 2 (figure 14) et diminuent en périphérie. L'augmentation est de l'ordre de 2 % tandis que la diminution atteint 20 % dans les espaces situés en zone 4-5 et dont la part modale transports en commun est élevée. En considérant également le coût du temps, les variations de coûts de transport sont mécaniquement moins importantes. Le passage au tarif unique se traduit par une augmentation atteignant au maximum 1,6 % et une diminution inférieure à 10 % pour la plupart des espaces. Les coûts de transports collectifs payés annuellement par les ménages pour les trajets domicile-travail s'élèvent à 2,2 milliards d'euros, contre 2,9 milliards d'euros dans le scénario de référence. La perte de recettes de 0,7 milliard d'euros estimée par le modèle est proche

de l'estimation fournie par le Stif de 0,5 milliard d'euros, la surestimation de la perte par le modèle s'expliquant par l'hypothèse de localisation de tous les emplois au centre de l'agglomération.

Figure 14 – Variations estimées des coûts de transport monétaires (à gauche) et généralisés (à droite) dans l'hypothèse de l'introduction du tarif unique



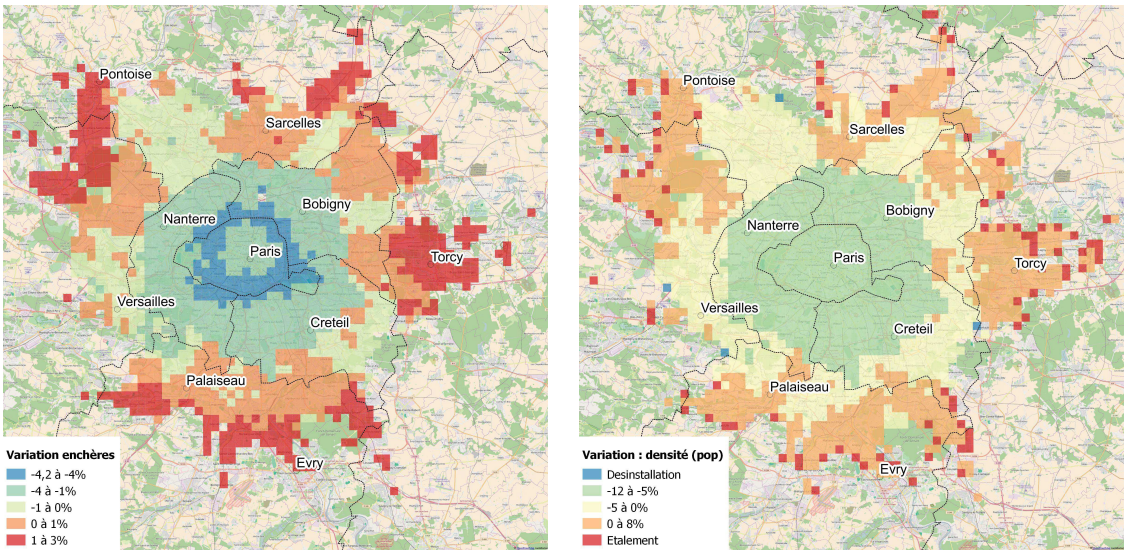
Diffusion de la pression foncière

Selon le modèle, le passage au tarif unique se traduit par une diffusion de la pression foncière dans les espaces desservis par les transports en commun. La diminution du coût de transport conduit à une modification des propensions à payer des ménages selon leur localisation. Au centre ville, l'augmentation des coûts de transport moyens diminuent l'enchère que les ménages sont prêts à payer pour leur logement. À l'inverse, les diminutions des coûts de transport en périphérie de l'agglomération provoquent une revalorisation des prix de l'immobilier dans ces espaces. La variation d'utilité des ménages est positive : la diminution des coûts de transport permet aux ménages de s'éloigner légèrement du centre et diminue la pression foncière.

Ce phénomène de diffusion de la pression foncière a pour conséquence une augmentation de la superficie urbaine modélisée. L'augmentation des loyers que les ménages sont disposés à payer pour l'installation dans les espaces éloignés du centre conduit à l'apparition de nouveaux espaces sur lesquels il est rentable de construire du point de vue des constructeurs de logements. Le modèle estime que espaces urbanisés pour la construction de logements augmentent ainsi globalement de 6 %. Les nouveaux espaces urbanisés apparaissent, dans le modèle, à proximité des lignes de trans-

port en commun : au nord à proximité de Goussainville autour des stations de RER D (Survilliers-Fosses, Orry-la-Ville - Coye-la-Forêt ; à l'ouest le long du RER A (Cergy-Le Haut) et de la ligne de Transilien J (Vaux-sur-Seine, Vernouillet-Verneuil) notamment ; au sud le long des axes formés par le RER B, le RER C et le RER D ; et enfin à l'est à proximité du RER A. En revanche, l'impact sur les émisssions de gaz à effet de serre associées aux activités de transport est légèrement positif, les distances parcourures en véhicule personnel diminuant de 3 % dans le scénario tarif unique par rapport au scénario de référence.

Figure 15 – Modifications estimées des loyers et de l'emprise de l'agglomération dans l'hypothèse de l'introduction du tarif unique en IDF



Modèle Nedum-2D, calibration et calculs CGDD

L'augmentation de l'étalement urbain a pour corolaire une diminution de la densité de population au centre de l'agglomération en comparaison avec le scénario sans tarif unique. À l'intérieur de la ville de Paris et dans une part importante de la petite couronne, la densité de population diminue de -12 à -5 % selon le modèle. Ici, il faut noter que le modèle ne rend compte de l'attractivité du centre que dans la mesure où il constitue le lieu des emplois. Or, dans le centre de l'agglomération parisienne, les données de prix montrent que le coût des déplacements domicile-travail ne rend compte que d'une partie de la variabilité des coûts des logements. Les ménages valorisent la localisation au centre-ville pour d'autres motifs si bien que l'effet de dé-densification est probablement surestimé par le modèle.

Le modèle monocentrique représente donc les conséquences du tarif unique sur la forme urbaine comme un redéploiement de l'agglomération vers les grands axes de transport en commun, avec

d'un côté une diminution de la pression foncière du centre-ville et d'un autre côté une extension des espaces urbanisés. Ce redéploiement est indissociable de l'hypothèse centrale du modèle : l'ensemble des ménages sont supposés travailler au centre de Paris. Selon les données du recensement 2012 (figure 2), la part des actifs travaillant à Paris s'élève à moins de 30 % dans les départements de la Petite Couronne. Du fait de la nature des mécanismes modélisés, la mesure de l'étalement urbain de 6 % proposée par le modèle monocentrique surestime fortement l'impact réel du tarif unique qui est probablement plus proche de 2 % à long terme.

LA TAXE CARBONE

La taxe carbone constitue un outil économique central pour l'orientation des comportements économiques vers une économie moins intensive en émissions de gaz à effet de serre. La loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte de 2015 a déterminé sa trajectoire future d'évolution. Fixée en 2016 à 22 euros, la valeur de la tonne de CO_2 s'élevera à 56 euros en 2020 puis à 100 euros d'ici 2030. La taxe carbone conduit à un renchérissement du carburant à même de provoquer une modification des comportements de déplacement avec notamment un report modal de la voiture vers les transports en commun. En parallèle de ces effets directs, la modification du coût de transport pour les déplacements domicile-travail peut également conduire à des changements de choix de localisation. Contrairement au cas du tarif unique, les coûts de transport au km seront en moyenne augmentés, ce qui pourrait participer à contraindre l'extension spatiale de l'agglomération et à limiter l'étalement urbain, renforçant ainsi la baisse du nombre de kilomètres parcourus par les ménages. Mais s'agit-il d'un effet de premier ou de second ordre ?

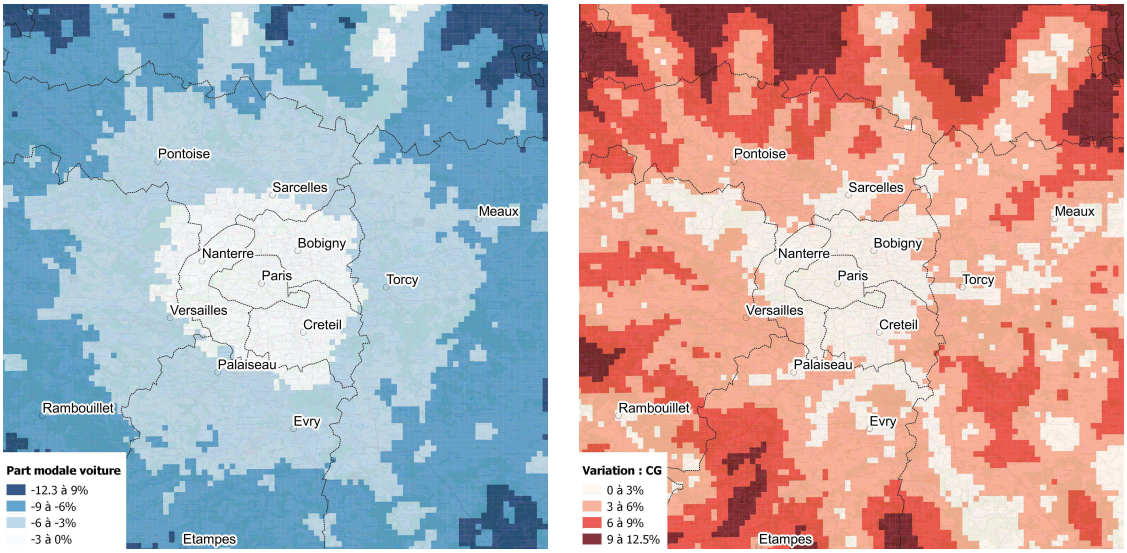
Augmentation de la part modale du transport en commun

La mise en place de la taxe carbone affectant le prix des carburants conduit à une revalorisation du coût économique influant le choix modal et le choix de localisation. Elle influence aussi d'autres choix économiques tels que le choix du type de carburant et de l'efficacité énergétique du véhicule. Dans les simulations ci-dessous cependant, seules les variations de choix modal et de localisation de l'habitat sont considérées. Une hypothèse unique de performance énergétique du véhicule de 6 litres pour 100 km [1] parcourus est réalisée. Le coût du carburant est fixé à 1,2 euro par litre [2]. Une taxe carbone correspondant à un coût de 5, 25 et 50 centimes par litre est ensuite introduite dans les coûts de transport du modèle. Ces niveaux de taxe sont supposés affecter uniquement le coût kilométrique de l'usage d'un véhicule particulier. En supposant un contenu carbone de 2,5 kilogrammes par litre de carburant [3], ces niveaux de taxe correspondent respectivement à un prix de

1. La consommation de carburants pour 100 kilomètres des véhicules particuliers diesel et essence du parc français s'élevait respectivement à 6,2 et 7,4 litres en 2015 selon les données de la Commission des Comptes des Transports de la Nation.
2. Le coût toutes taxes comprises du litre de gasoil s'est élevé en 2015 en moyenne à 1,15 euros par litre, celui de l'essence Super sans plomb 95 à 1,35 (Source : Pégase, SOeS).
3. Le contenu carbone est fixé à 2,24 kg par litre pour l'essence, 2,49 kg par litre pour le gasoil (Arrêté du 10 avril 2012 pris pour l'application des articles 5, 6 et 8 du décret n° 2011-1336 du 24 octobre 2011 relatif à l'information sur la quantité de dioxyde de

la tonne de carbone de 20, 100 et 200 euros. Compte tenu des hypothèses retenues, le coût pour 100 kilomètres des taxes carbone simulées s'élève à 0,3, 1,5 et 3 euros.

Figure 16 – Différence de part modale voiture et variation du coût généralisé dans l'agglomération parisienne dans le cas de l'introduction d'une taxe sur les carburants de 50 centimes par litre

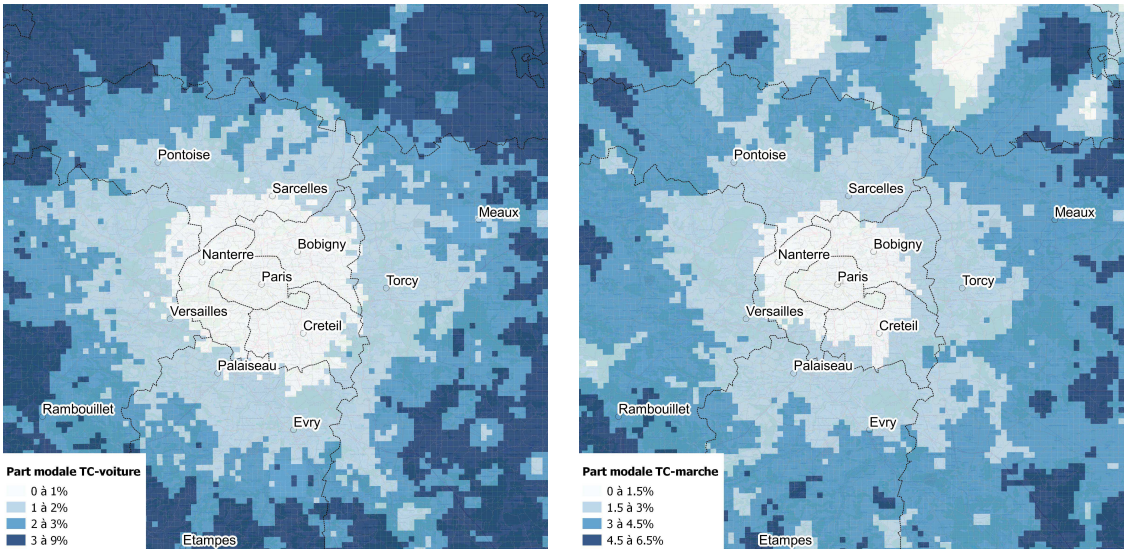


Note de lecture : La différence de part modale représente dans chaque carreau la différence entre la part modale estimée avec une taxe additionnelle sur les carburants de 50 centimes par litre et la part modale estimée sans taxe additionnelle.

L'augmentation du coût kilométrique des trajets en voiture incite à un report modal vers le transport en commun et à une augmentation du coût de transport généralisé moyen des actifs occupés (figures 16 et 17). La part modale de la voiture diminue dans l'ensemble des espaces de la grille du modèle. Dans le cas extrême d'une taxe de 50 centimes par litre, la part modale de la voiture diminue de 12 points de pourcentage dans les espaces les plus éloignés du centre-ville de l'agglomération. A l'équilibre, la distance domicile-travail la plus grande s'élève à 54 km par déplacement ou 108 km par jour et par actif, soit un coût d'environ 3 euros par jour et par actif. La diminution de la part modale de la voiture est contrebalancée par une augmentation de la part modale des transports en commun avec rabattement à pied et en voiture. Les modifications de parts modales apparaissent modérées dans les espaces occupés par l'unité urbaine de Paris. La diminution de la part modale voiture est ainsi majoritairement inférieure à 3 points de pourcentage et ne dépasse pas 6 % dans l'unité urbaine modélisée. Ces variations de prix des modes utilisant le véhicule particulier et de parts modales conduisent à une augmentation du coût généralisé des transports dans l'ensemble des espaces, d'autant plus élevée que l'on s'éloigne du centre ville et des grands axes de transport

carbone émise à l'occasion d'une prestation de transport).

Figure 17 – Différence de part modale transports en commun dans l'agglomération parisienne (rabattement en mode motorisé à gauche, à pied à droite) dans le cas de l'introduction d'une taxe sur les carburants de 50 centimes par litre



Note de lecture : La différence de part modale représente dans chaque carreau la différence entre la part modale estimée avec une taxe additionnelle sur les carburants de 50 centimes par litre et la part modale estimée sans taxe additionnelle.

en commun. La variation de coûts généralisés de transport est inférieure à 3 % dans la majorité des espaces de la petite couronne et autour des axes RER ou de Transilien. Elle atteint au maximum 12,5 % dans des espaces éloignés à l'extérieur de l'espace urbanisé modélisé.

Resserrement de l'agglomération autour des gares

L'augmentation du coût de transport dans les zones relativement mal desservies par les transports en commun conduit à une diminution de la propension à payer des ménages pour se loger dans ces espaces (figure 18). Le niveau des loyers que les ménages sont disposés à payer selon le modèle de 1 à 2 % en périphérie de l'agglomération et en dehors des grands axes de transport en commun. Au contraire, le montant des loyers augmente au centre de l'agglomération et à proximité des gares de transport en commun. Les loyers augmentent de 1 à 2 % à Paris ainsi que le long des lignes de RER. Par conséquent, la densité de population augmente autour des grands axes ferroviaires et diminue ailleurs. La variation de densité de population atteint 7 % au centre de l'agglomération. En périphérie de l'unité urbaine, le modèle prédit une désinstallation des ménages en comparaison avec

le scénario de référence sans taxe. Les espaces concernés sont situés à la limite de l'agglomération, à Noisy-le-Roi par exemple, commune située à l'ouest de Paris, reliée à la ligne de Transilien L mais nécessitant un changement pour se rendre à Paris. À l'inverse, des espaces situés à proximité des gares de transport en commun deviennent rentables du point de vue du choix de localisation des actifs occupés à Paris, au nord à Orry-la-Ville au nord sur la ligne de RER D ou Vaux-sur-Seine à l'ouest sur la ligne de Transilien J par exemple. Au total, la surface artificialisée pour l'usage logement diminue de -4 % dans le cas d'une taxe carbone à 200 euros par tonne CO_2 en comparaison avec le scénario sans taxe.

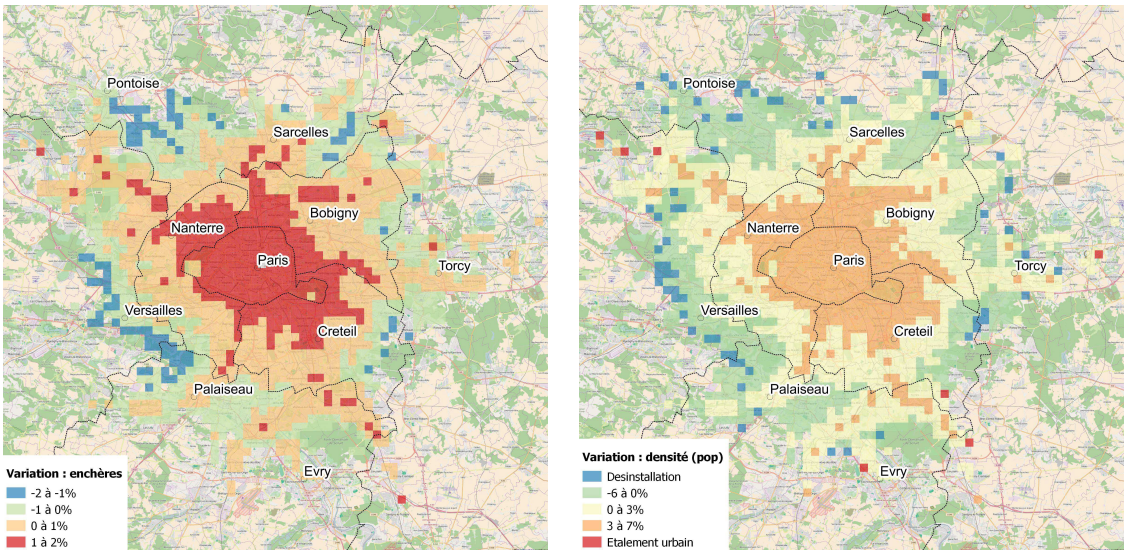
La contribution de l'évolution de la morphologie urbaine à la diminution des émissions de gaz à effet de serre par les véhicules particuliers semble donc, d'après le modèle, limitée y compris dans le scénario d'une taxe carbone d'un niveau élevé. D'une part, le report modal est limité par l'importance de la dimension temps dans les coûts de transport pris en compte par les ménages. La part modale de la voiture ne diminue ainsi que de -2,7 points de pourcentage dans l'agglomération. D'autre part, l'augmentation des coûts de transport ne provoque pas une réorganisation majeure de l'agglomération. Au total le nombre de kilomètres parcourus en véhicule particulier par les actifs pour leur trajet domicile-travail de leur logement vers le centre de Paris diminue de -10 % par rapport au scénario de référence [4] et s'élève à 77 millions de kilomètres par jour. À performance énergétique des véhicules constante, cette diminution implique une baisse équivalente des émissions de gaz à effet de serre liés aux déplacements en véhicules individuels pour le motif domicile-travail. Selon le modèle calibré ici, les effets de morphologie urbaine apparaissent donc de second ordre en comparaison avec les effets potentiels de l'amélioration de la performance énergétique des véhicules. Les recettes de la taxe carbone, non redistribuées dans le modèle utilisé ici, s'élève au total à 480 millions d'euros par an.

PÉAGE URBAIN

La mise en place d'un péage urbain vise à limiter la congestion et la pollution liés aux déplacements en véhicules particuliers dans les agglomérations. Théoriquement, les péages de type kilométriques, pour lesquels le montant à payer est lié à la distance parcourue, apparaissent les plus pertinents pour lutter contre les externalités. Cependant, les péages kilométriques sont techniquement difficiles à mettre en place et les villes ont davantage recours au péage de type cordon. Du point de vue de la modélisation, le péage cordon constitue une application du modèle complémentaire des politiques précédentes. La forme généralement circulaire des péages urbains affecte en particulier les déplacements de la périphérie vers le centre et conduit à l'apparition d'une discontinuité des coûts de transport supportés par les ménages selon leur localisation.

4. Le scénario de référence est marqué par une estimation haute du nombre de kilomètres parcourus en voiture pour le motif domicile-travail (85 millions de kilomètres par jour) du fait de l'hypothèse de localisation au centre des emplois. En Île-de-France, selon l'Enquête Globale Transport 2010, le nombre de kilomètres parcourus en voiture pour tous motifs s'élevait à 95 millions de kilomètres par jour ouvrable.

Figure 18 – Modifications estimées des loyers et de l'emprise de l'agglomération dans le cas de l'introduction d'une taxe sur les carburants de 50 centimes par litre



Modèle Nedum-2D, calibration et calculs CGDD

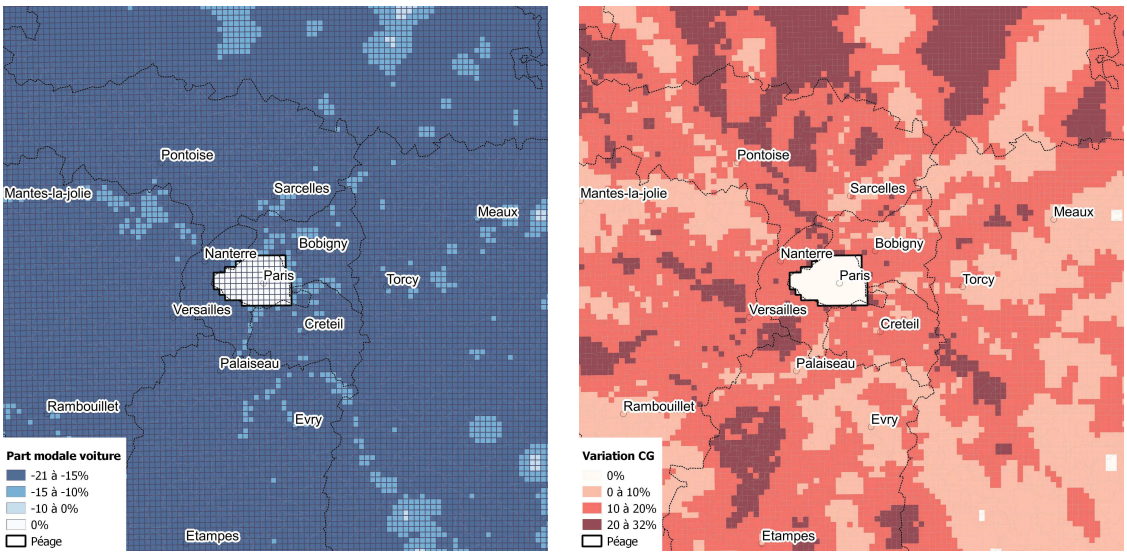
Augmentation de la part modale du transport en commun

La mise en place d'un péage cordon autour de Paris [5] caractérisé à titre illustratif par un tarif de 10 euros pour effectuer un aller retour de l'extérieur du cordon vers Paris conduirait mécaniquement à une augmentation substantielle de coût des transports pour l'ensemble des actifs occupés habitant à l'extérieur de Paris. À titre de comparaison, le montant du péage urbain londonien s'élève à 11,50 £ par jour et est dû par les automobilistes souhaitant se déplacer dans le centre ville londonien entre 7 h et 18 h un jour de semaine, les résidents de l'espace compris à l'intérieur du péage bénéficiant d'une réduction de 90 %. La superficie de l'espace soumis à la taxation, de 21 km², est inférieure à celle de la ville de Paris (105 km²) retenue ici pour la simulation. Avec les paramètres du modèle, un montant de péage d'un montant de 10 euros à Paris provoque une augmentation du coût généralisé des transports de 0 à 32 % (figure 19). À proximité des gares, le report modal de la voiture vers les transports en commun permet d'atténuer le surcoût lié au péage. La part modale de la voiture diminue de plus de 15 points dans la plupart des espaces situés à l'extérieur de Paris, au profit de la part modale des transports en commun (figure 20). La part modale des transports en commun avec rabattement en véhicule individuel augmente dans tous les espaces à l'extérieur du péage à

5. Compte tenu du carroyage du modèle, le péage modélisé ne suit pas strictement les frontières de la commune de Paris mais est modélisé à la frontière des carreaux de la grille Nedum situé dans Paris. De façon à simplifier la géométrie du péage, le bois de Vincennes n'est pas intégré à l'intérieur du péage.

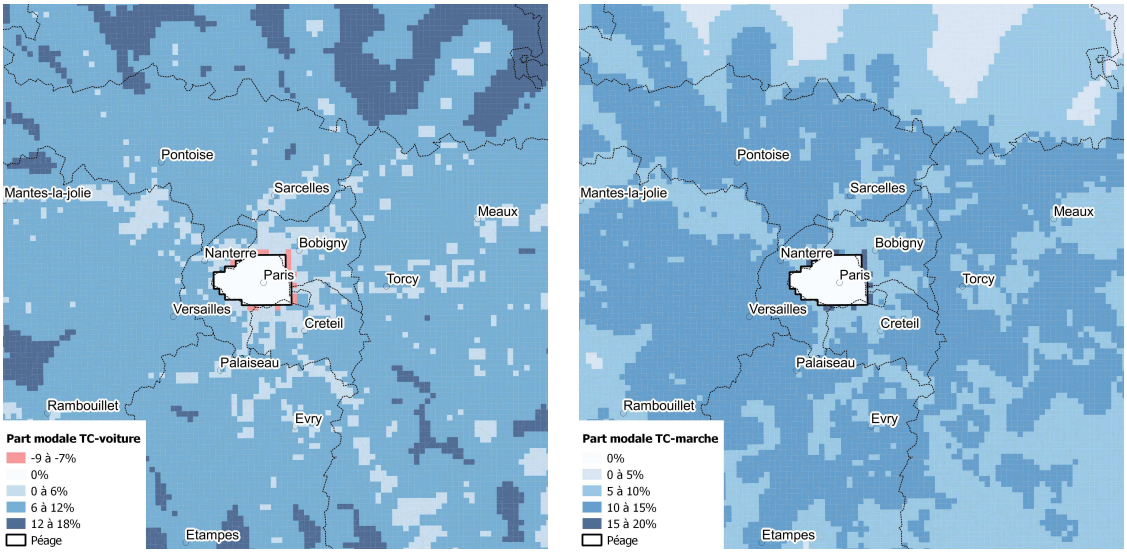
l'exception de quelques espaces à proximité immédiate de celui-ci dans lesquels les ménages se rendaient en voiture dans une gare située à l'intérieur de Paris. En dehors des espaces desservis par les transports en commun, l'augmentation des coûts d'utilisation du véhicule individuel conduit à des hausses importantes de coûts de transport. Contrairement au cas de la taxe carbone, l'influence du péage sur les coûts des transports n'est pas croissante avec la distance. Les augmentations importantes de coûts touchent ainsi également des espaces situés en petite couronne. La part modale de la voiture diminue de 15,3 points dans l'agglomération modélisée en comparaison avec le cas sans péage.

Figure 19 – Différence de part modale voiture et variation du coût généralisé du transport pour les trajets domicile-travail dans le cas de la mise en place d'un péage cordon autour de Paris



Note de lecture : La différence de part modale représente dans chaque carreau la différence entre la part modale estimée avec un péage cordon au tarif de 10 euros par jour et la part modale estimée sans péage.

Figure 20 – Différence de part modale transports en commun dans l'agglomération parisienne (rabattement en mode motorisé à gauche, à pied à droite) dans le cas de la mise en place d'un péage cordon autour de Paris



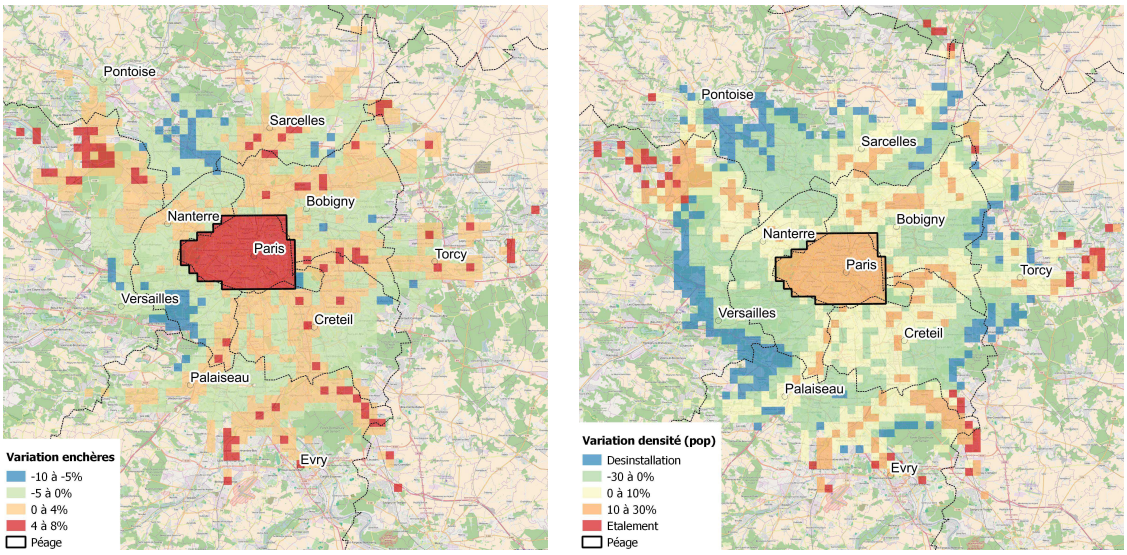
Note de lecture : La différence de part modale représente dans chaque carreau la différence entre la part modale estimée avec un péage cordon au tarif de 10 euros par jour et la part modale estimée sans péage.

Resserrement à l'intérieur du péage et autour des axes ferroviaires

Aux changements de coûts de transport correspondent d'importantes variations de la demande des ménages pour les différents espaces de l'agglomération. Le niveau élevé de la variation de coût conduit à des baisses d'enchères des ménages jusqu'à 10 % en comparaison avec le scénario sans péage et inversement à des hausses dans la zone située à l'intérieur du péage et à proximité immédiate des gares de RER et de Transilien bien reliées à Paris (figure 21). L'augmentation des enchères des ménages se situe entre 4 et 8 % dans ces espaces.

La surface artificialisée pour l'usage logement diminue de 7 % selon ces simulations. Elle diminue en particulier au sud-ouest de l'agglomération au-delà de Versailles ainsi qu'autour de la commune de Pontoise. Les ménages se relocalisent à Paris, dont la densité augmente de 10 à 30 % et autour des gares de RER et de Transilien. L'effet du péage est comparable qualitativement à l'effet de la taxe carbone avec un renforcement de la centralité parisienne et une augmentation de la densité autours des axes formés par les RER et Transilien. Il est cependant moins progressif avec une forte discontinuité de tarif à la frontière parisienne affectant l'extérieur de l'agglomération alors que l'effet de taxe carbone dépend des distances parcourues pour se rendre au lieu de travail situé, ici, au centre de Paris. La contrainte économique du péage est presque dix fois plus importante que celle

Figure 21 – Modifications estimées des loyers et de l'emprise de l'agglomération parisienne dans le cas de la mise en place d'un péage cordon autour de Paris



Modèle Nedum-2D, calibration et calculs CGDD

liée à une taxe carbone de 200 euros par tonne, avec des recettes annuelles totales du péage de 4,9 milliards d'euros représentant 3,3 % des revenus des ménages de l'agglomération. La contrainte que constitue le péage sur le coût des déplacements est maximale dans la mesure où le modèle suppose que l'ensemble des actifs effectuent leur trajet domicile-travail vers le centre. L'apparition de ce coût de transport pourrait conduire à modifier les choix de localisation des entreprises au-delà de la ceinture du péage. Comme en réalité moins de 30 % des actifs résidant en dehors de Paris travaillent à Paris, les recettes effectives de péage seraient plus proches de 1,5 milliard d'euros. Pour la même raison, le modèle surestime fortement l'impact réel en matière de densification d'une telle mesure si elle était mise en oeuvre dans l'agglomération parisienne.

Conclusion

Le modèle théorique monocentrique permet d'illustrer le rôle systémique que peut jouer le système de transport sur la forme des villes, à partir d'hypothèses simplificatrices sur les déterminants des choix des ménages et le fonctionnement des marchés immobiliers. Il montre ainsi que, si les ménages prennent en considération les coûts de transport qu'ils supportent pour se rendre au travail au moment du choix de l'emplacement de leur logement, alors les coûts de transport sont à même d'influencer le niveau d'étalement de l'agglomération. Dans les versions les plus simples du modèle, un seul type de ménage est considéré et donc un seul niveau de revenu et un seul type de préférence pour le logement, et la ville est caractérisée par un seul centre d'emploi, lieu unique des déplacements. La calibration d'un tel modèle est donc nécessairement schématique. Cette approche simplificatrice suppose de définir les caractéristiques d'un ménage « représentatif » des ménages de l'agglomération, de faire le choix des déplacements considérés et de la nature des coûts de transport.

La calibration réalisée ici sur l'unité urbaine de Paris à partir du modèle carroyé NEDUM-2D, développé par le CIRED [17], a été utilisée pour représenter les conséquences des politiques de tarification des transports sur les formes urbaines. À ce titre, l'analyse réalisée ici de l'influence sur l'étalement urbain du passage au tarif unique dans les transports en commun, de la fiscalité portant sur les émissions de dioxyde de carbone et de la mise en place d'un péage cordon délivre quelques enseignements utiles. On peut voir d'abord que la question du temps de transport apparaît plus contraignante que les seuls coûts monétaires du transport lorsque l'on s'éloigne du centre d'emploi. Ce poids du temps conduit à limiter l'influence des changements de tarif sur les choix d'installation des franciliens. Ainsi, la fixation d'une taxe carbone de 50 centimes par litre de carburant, qui correspond d'après les caractéristiques actuelles du parc à des niveaux de taxation de la tonne de carbone élevés, d'un ordre de grandeur de 200 euros, conduit à une réorganisation urbaine limitée. Le nombre de kilomètres parcourus en voiture par les actifs de l'unité urbaine de Paris pour leur trajet domicile travail diminuerait dans ce scénario de -10 % en comparaison avec le scénario de référence, tandis que la superficie artificialisée pour l'usage logement diminuerait de -4 %. L'élasticité à long terme des kilomètres parcourus en voiture pour le motif domicile-travail au prix du carburant liée à cette réorganisation urbaine s'élèverait à -0,3.

L'ensemble des politiques tarifaires considérées ici correspondent à un renchérissement du coût relatif de l'utilisation d'un véhicule individuel pour le motif domicile-travail. Par conséquent, ces politiques conduisent à un resserrement de l'agglomération autour des gares de transport en commun. Le développement urbain est relocalisé en priorité autour des grands axes ferroviaires du RER et du Transilien. La mise en place d'un péage cordon autour de la ville de Paris serait, selon les estimations du modèle monocentrique, susceptible de favoriser à long terme une contraction des

superficies urbanisées de l'ordre de 7 %. Cette valeur serait beaucoup plus faible si la mesure était mise en oeuvre du fait de la faible part des actifs domiciliés hors de Paris et y travaillant, qui seraient les seuls touchés par cette mesure. Avec le passage au tarif unique au contraire, la baisse du coût du transport collectif pour de nombreux ménages serait à même de favoriser à long terme une extension des superficies artificialisées de l'ordre de 6 %, selon le modèle, beaucoup moins dans la réalité, pour la même raison. Dans le cas du péage et de la tarification des transports en commun, les modifications de l'équilibre urbain sont marqués par des discontinuités liées à l'emplacement respectivement du péage et des anciennes zones de tarification. Dans le cas de la taxe carbone au contraire, les changements de forme urbaine se réalisent suivant une logique continue du fait d'un coût de la taxation proportionnel au nombre de kilomètres parcourus. L'effet sur l'étalement urbain de cette forme de taxation croissante avec la distance est plus important que celui lié au péage lorsque l'on ramène la politique tarifaire à l'ampleur des redistributions économiques qu'elle occasionne. Malgré un coût pour les usagers plus de dix fois supérieur, le péage cordon conduit à un resserrement de l'agglomération moins de deux fois plus prononcé que dans le cas de la mise en place d'une taxe de 200 euros par tonne de carbone.

Les estimations effectuées ici restent toutefois dépendantes de deux hypothèses réductrices. La première est l'hypothèse sur la structure des déplacements dans l'agglomération, qui seraient dirigés exclusivement vers le centre. Les estimations que nous faisons ici sont donc à considérer en gardant à l'esprit la part des actifs de l'agglomération parisienne effectivement caractérisés par des trajets domicile-travail vers le centre de Paris et plus généralement l'ensemble des facteurs potentiellement oubliés par construction de la modélisation. Dans le cas du tarif unique par exemple, un enjeu important consiste à évaluer l'importance de ce changement tarifaire sur les déplacements du centre vers la banlieue et de banlieue à banlieue, ce qui ne peut être fait avec le modèle monocentrique.

Les politiques tarifaires dans le domaine des transports ayant, de plus, des conséquences sur les entreprises et leur choix de localisation, il est nécessaire de considérer, en parallèle de l'approche monocentrique, ce type d'influence. Dans le cas du péage, on peut ainsi supposer que si les déplacements vers Paris intra-muros venaient à constituer une contrainte budgétaire trop élevée pour les actif franciliens, les entreprises seraient incitées à se déplacer à l'extérieur du péage cordon.

La deuxième hypothèse est le fait de supposer que la ville est en équilibre. Si les variations sur les prix immobiliers peuvent être relativement rapides, les variations de densité de population, liées à la construction de nouveaux bâtiments, sont généralement plus lentes et plus contraintes. Les estimations que nous faisons doivent ainsi être considérées comme une borne supérieure de ce qu'il pourrait advenir à long terme. Cela renforce encore nos conclusions sur les impacts potentiels du tarif unique et de la taxe carbone sur la morphologie urbaine : si la théorie économique prédit que ces politiques peuvent avoir un impact sur cette morphologie, les évaluations quantitatives que nous avons effectuées, même avec des hypothèses optimistes, ne semblent indiquer que des effets en pratique relativement faibles.

Les pistes de développement et d'amélioration du modèle apparaissent ainsi nombreuses. D'un côté, les fondements micro-économiques des comportements des ménages et du secteur de la

construction de logement doivent être précisés et davantage confrontés aux données disponibles. D'un autre côté, la formulation théorique du modèle doit pouvoir être à même de rendre compte à la fois de la diversité des déplacements des ménages et de la diversité de leurs caractéristiques et préférences. Avec la disponibilité grandissante de données sur la ville et l'urbain, ces développement paraissent prometteurs pour la construction d'outils d'accompagnement de la planification et de l'aménagement des territoires.

Références

[1] W. Alonso. *Location and land use. Toward a general theory of land rent.* Cambridge, Massachussets. Harvard University Press, 1964.

[2] Alex Anas. Dynamics of urban residential growth. *Journal of Urban Economics*, 5, 1978.

[3] Nathaniel Baum-Snow. Suburbanization and transportation in the monocentric model. *Journal of Urban Economics*, 62, 2007.

[4] Gary S Becker. A theory of the allocation of time. *The economic journal*, 1965.

[5] Jan K Brueckner, Jacques-Francois Thisse, and Yves Zenou. Why is central paris rich and downtown detroit poor ?: An amenity-based theory. *European economic review*, 43, 1999.

[6] J.K. Brueckner. The structure of urban equilibria : A unified treatment of the muth-mills model. 1987.

[7] Dennis R Capozza and Robert W Helsley. The fundamentals of land prices and urban growth. *Journal of urban economics*, 26, 1989.

[8] Pierre-Philippe Combes, Gilles Duranton, and Laurent Gobillon. The costs of agglomeration : Land prices in french cities. 2012.

[9] Daniel Delling, Thomas Pajor, and Renato F Werneck. Round-based public transit routing. *Transportation Science*, 49, 2014.

[10] G. Duranton, V. Henderson, and W. Strange. *Handbook of Regional and Urban Economics, vol. 5B*. Elsevier, 2015.

[11] M. Fujita. *Urban economic theory : land use and city size*. Cambridge university press, 1989.

[12] Christian AL Hilber and Frédéric Robert-Nicoud. On the origins of land use regulations : Theory and evidence from us metro areas. *Journal of Urban Economics*, 75, 2013.

[13] E. Mills. An aggregative model of resource allocation in a metropolitan area. 1967.

[14] R. F. Muth. Cities and housing, the spatial pattern of urban residential land use. 1969.

[15] Hideaki Ogawa and Masahisa Fujita. Equilibrium land use patterns in a nonmonocentric city. *Journal of regional science*, 20, 1980.

[16] Rémi Pochez, Nicolas Wagner, and Isabelle Cabanne. Projections de la demande de transport sur le long terme. *CGDD - Théma - Analyse*, 2016.

[17] Vincent Viguié, Stéphane Hallegatte, and Julie Rozenberg. Downscaling long term socio-economic scenarios at city scale : a case study on paris. *Technological Forecasting and Social Change*, 87, 2014.

[18] J.H. Von Thünen. *Der Isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Natinoalökonomie*. Hamburg, 1826.

Références

Conditions générales d'utilisation
Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille — 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifque ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 1er juillet 1992 — art. L.122-4 et L.122-5 et Code pénal art. 425).

Dépôt légal : Novembre 2016
ISSN : en cours





Cette étude applique le modèle d'économie urbaine « monocentrique » à l'analyse des conséquences des politiques de tarification des transports sur les formes urbaines. Le modèle est ici calibré sur l'agglomération parisienne et utilisé pour l'analyse des conséquences de trois politiques tarifaires sur l'étalement de l'agglomération : le passage au tarif unique des abonnements de transport en commun en Île-de-France, l'introduction d'une taxe carbone et la mise en place d'un péage cordon autour de Paris. La taxe carbone aurait l'effet le plus important sur la limitation de l'étalement urbain à pression fiscale comparable. Cependant, les effets des politiques tarifaires sur le choix de localisation des ménages sont limités par le poids que représentent les temps des trajets dans les coûts de transport supportés par les ménages.

Politiques de tarification des transports et formes urbaines





commissariat général au développement durable

Sous-direction Mobilité et Aménagement
Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable
Tour Sequoia
92055 La Défense cedex
courriel : ma.seei.cgdd@developpement-durable.gouv.fr

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

www.developpement-durable.gouv.fr