

## MUST-B : un modèle LUTI multidisciplinaire au service de la complexité du phénomène urbain

Seghir Zerguini et Nathalie Gaussier

Volume 43, numéro 2, 2020

Accès au logement et à la mobilité

Soumis : 2 décembre 2019

Accepté : 6 janvier 2020

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1083293ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1083293ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Canadian Regional Science Association / Association canadienne des sciences régionales

ISSN

0705-4580 (imprimé)

1925-2218 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Zerguini, S. & Gaussier, N. (2020). MUST-B : un modèle LUTI multidisciplinaire au service de la complexité du phénomène urbain. *Canadian Journal of Regional Science / Revue canadienne des sciences régionales*, 43(2), 50–59. <https://doi.org/10.7202/1083293ar>

Résumé de l'article

Le modèle LUTI MUST-B s'inscrit dans la double problématique de croissance urbaine et de développement durable. Il vise à répondre aux préoccupations croissantes concernant le développement urbain durable avec l'enjeu d'évaluation prospective dans le domaine du transport et de l'aménagement du territoire. Il est conçu pour intervenir dans une démarche d'aide à la décision (aide à la définition et l'élaboration de politiques publiques) pour orienter la « trajectoire » d'un territoire vers plus de durabilité.

L'article ne vise pas ici à montrer ou illustrer la capacité du modèle MUST-B à simuler l'impact des choix d'aménagement. Il pose les bases d'une modélisation permettant d'appréhender la complexité du phénomène urbain. L'objectif de cet article est de montrer comment construire un modèle LUTI qui intègre la complexité du phénomène urbain en modélisant l'ensemble des mécanismes fondamentaux liés à l'occupation de l'espace (compte à rebours, endogénéité de certaines variables...). Notre modélisation se nourrit à la fois d'une approche multidisciplinaire (économie, aménagement de l'espace et urbanisme, géographie, transport) et de la disponibilité des données. Nous montrons que le modèle n'est pas sensible aux hypothèses de départ : le prix d'équilibre à l'issue de la simulation est indépendant du prix initial et que, sans être encore calibré sur un territoire, le modèle est capable à partir de comportements individuels de retrouver des résultats théoriques connus en économie urbaine. Il permet donc de disposer d'une structure stable qui permettra par la suite, et après avoir été calibré, de tester différents partis d'aménagement.

# MUST-B : UN MODÈLE LUTI MULTIDISCIPLINAIRE AU SERVICE DE LA COMPLEXITÉ DU PHÉNOMÈNE URBAIN

Seghir Zerguini, Nathalie Gaussier

**Seghir ZERGUINI**

GREThA – UMR CNRS 5113 - Université de Bordeaux

**Nathalie GAUSSIER**

GREThA – UMR CNRS 5113 - Université de Bordeaux

Soumis: 2 décembre 2019

Accepté: 6 janvier 2020

## Résumé :

Le modèle LUTI MUST-B s'inscrit dans la double problématique de croissance urbaine et de développement durable. Il vise à répondre aux préoccupations croissantes concernant le développement urbain durable avec l'enjeu d'évaluation prospective dans le domaine du transport et de l'aménagement du territoire. Il est conçu pour intervenir dans une démarche d'aide à la décision (aide à la définition et l'élaboration de politiques publiques) pour orienter la « trajectoire » d'un territoire vers plus de durabilité.

L'article ne vise pas ici à montrer ou illustrer la capacité du modèle MUST-B à simuler l'impact des choix d'aménagement. Il pose les bases d'une modélisation permettant d'appréhender la complexité du phénomène urbain. L'objectif de cet article est de montrer comment construire un modèle LUTI qui intègre la complexité du phénomène urbain en modélisant l'ensemble des mécanismes fondamentaux liés à l'occupation de l'espace (compte à rebours, endogénéité de certaines variables...). Notre modélisation se nourrit à la fois d'une approche multidisciplinaire (économie, aménagement de l'espace et urbanisme, géographie, transport) et de la disponibilité des données. Nous montrons que le modèle n'est pas sensible aux hypothèses de départ : le prix d'équilibre à l'issue de la simulation est indépendant du prix initial et que, sans être encore calibré sur un territoire, le modèle est capable à partir de comportements individuels de retrouver des résultats théoriques connus en économie urbaine. Il permet donc de disposer d'une structure stable qui permettra par la suite, et après avoir été calibré, de tester différents partis d'aménagement.

**Mots clés :** Localisation résidentielle, Emission de GES, Coût résidentiel, Modèle LUTI

## Remerciements :

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des chercheurs impliqués dans le projet MUST-B pour leurs remarques et commentaires tout au long des discussions que nous avons eues : Anne Bretagnolle de Géographie-cités (Université Paris 1 / Paris 7 / CNRS), Sonia Guelton de Lab'Urba (Université Paris-Est), Moez Kilani du LEM (Université de Lille / CNRS), Nicolas Coulombel du LVMT (Université Paris-Est), Laurent Guimas de Explain Consultancy et Ouassim Manout de ForCity. Nos remerciements vont également à la Région Nouvelle Aquitaine pour le co-financement accordé au projet STRATEGIE ainsi qu'à la MSHA pour la gestion financière du projet et son accueil dans ses locaux.

## 1. INTRODUCTION

Afin de parvenir à limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES) et atteindre les engagements internationaux de la France en matière de lutte contre le réchauffement climatique, le gouvernement français a mis en œuvre une série de plans (Stratégie bas-carbone, Programmation pluriannuelle de l'énergie...) et de lois comme l'adoption du Plan Climat-Air-Energie Territorial (PCAET). Par exemple, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte impose à l'ensemble des territoires regroupant plus de 20 000 habitants d'adopter un PCAET au plus tard le 31 décembre 2018 et de le renouveler avec une fréquence de 6 ans. Les enjeux les plus importants de la transition énergétique se situent au niveau des territoires urbains qui participent à hauteur de 60 % à la production des émissions de GES.

La métropole de Bordeaux s'inscrit dans cette dynamique, comptant plus de 760 934 habitants en 2014 (INSEE, 2014), elle constitue le territoire le plus peuplé de la Nouvelle Aquitaine. Le diagnostic actuel des émissions de GES est effectué d'une manière fine et précise par secteurs (mobilité, bâtiment...). Toutefois, à l'instar des autres collectivités territoriales, elle ne dispose pas d'outils capables d'évaluer les effets prospectifs des PCAET sur son territoire. Les prévisions futures restent basées sur des approches mono-sectorielles ignorant les interactions intersectorielles (Zerguini et al, 2012). À titre d'exemple, la réalisation d'une ligne de tramway n'a pas seulement un impact sur les émissions de GES liées à la mobilité (réduction des émissions par le mécanisme de report des flux de déplacements de l'automobile vers un transport collectif) mais également un impact sur les émissions de GES liées à l'urbanisme (par le mécanisme d'urbanisation du territoire rendu plus accessible par la ligne de tramway). Il est devenu aujourd'hui nécessaire de s'intéresser aux outils de modélisation complexe des dynamiques urbaines.

De nombreux travaux se sont ainsi confrontés à la complexité des dynamiques urbaines pour proposer des modèles intégrant l'interaction entre transport et urbanisation et proposer des applications dans le cadre des grandes agglomérations étrangères et françaises. Désignés par l'acronyme LUTI à partir de la terminologie anglaise « Land Use – Transport Interactio », ils mobilisent une représentation complexe du système urbain en intégrant les problématiques temporelles d'étalement urbain. En effet, à coût égal, avec des moyens de transport, infrastructures, systèmes et véhicules de plus en plus performants, il est possible d'habiter de plus en plus loin du centre-ville, pour rechercher des aménités environnementales ou accéder à la propriété. L'étalement urbain produit ainsi une explosion des déplacements domicile-travail qui se traduit par la congestion de plus en plus importante des infrastructures de transport, de la pollution atmosphérique aux heures de pointe ou encore par la dépendance à l'automobile (Newman & Kenworthy, 1998). Si l'usage des modèles LUTI est obligatoire aux États-Unis depuis trente ans (lois ISTEA, 1991 et TEA 21, 1998), quelques collectivités locales en France (Ile-de-France, Lyon, Lille, Grenoble, Besançon) commencent à s'y intéresser pour explorer des scénarii d'urbanisation liés aux investissements et aux politiques publiques.

Le modèle LUTI MUST-B s'inscrit dans cette double problématique de croissance urbaine et de développement durable. Il vise à répondre aux préoccupations croissantes concernant le développement urbain durable avec l'enjeu d'évaluation prospective dans le domaine du transport et de l'aménagement du territoire. Il est conçu pour intervenir dans une démarche d'aide à la décision (aide à la définition et l'élaboration de politiques publiques) pour orienter la « trajectoire » d'un territoire vers plus de durabilité. Il a pour ambition de permettre, notamment dans le cadre de l'agglomération de Bordeaux, l'évaluation prospective de l'impact de son PCAET en fonction des actions qui peuvent être mises en place au regard de sa politique Energie-Climat. Le modèle MUST-B pourrait ainsi apporter un éclairage intéressant pour accompagner des décideurs institutionnels de l'agglomération bordelaise et relever le défi de l'urbanisation durable.

L'article ne vise pas ici à montrer ou illustrer la capacité du modèle MUST-B à simuler l'impact des choix d'aménagement. Il pose les bases d'une modélisation permettant d'appréhender la complexité du phénomène urbain. L'objectif de cet article est de montrer comment construire un modèle LUTI qui intègre la complexité du phénomène urbain en modélisant l'ensemble des mécanismes fondamentaux liés à l'occupation de l'espace (compte à rebours, endogénéité de certaines variables...). Notre modélisation se nourrit à la fois d'une approche multidisciplinaire (économie, aménagement de l'espace et urbanisme, géographie, transport) et de la disponibilité des données. Nous montrons que le modèle n'est pas sensible aux hypothèses de départ : le prix d'équilibre à l'issue de la simulation est indépendant du prix initial et que, sans être encore calibré sur un territoire, le modèle est capable à partir de comportements individuels de retrouver des résultats théoriques connus en économie urbaine. Il permet donc de disposer d'une structure stable qui permettra par la suite, et après avoir été calibré, de tester différents partis d'aménagement.

Cet article expose en premier lieu l'état de l'art de la modélisation LUTI et le positionnement du modèle MUST-B par rapport aux modèles LUTI existants. Il présente, en second lieu, les principes d'élaboration du modèle MUST-B et son fonctionnement pour un horizon futur donné, notamment nous montrons comment il intègre des variables clés des politiques d'aménagement du territoire. La troisième partie décrit les choix théoriques et méthodologiques pour modéliser la fonction d'utilité, les mécanismes de localisation des ménages et des emplois ainsi que les interactions systémiques entre les ménages et les emplois. La dernière partie s'appuie sur les données de l'aire urbaine de Bordeaux pour tester la stabilité et la cohérence des résultats issus des simulations. La conclusion discute les prolongements en terme de calibration et de choix de modélisation et le regard renouvelé qu'ils peuvent apporter sur la prise en compte de la complexité du phénomène urbain.

## 2. MUST-B: UN MODÈLE LUTI MULTIDISCIPLINAIRE

Il existe une littérature très riche sur les modèles LUTI (Wegener, 2004) qui remonte aux années 50 aux Etats-Unis pour étudier l'interaction entre transport et développement urbain. Celle-ci vise à mieux « ouvrir » la boîte noire des interactions transport – urbanisation avec la volonté de proposer des applications dans le cadre des grandes agglomérations. Elle soulève de nombreuses questions notamment sur la représentation et l'articulation des systèmes qui composent ces modèles. Wegener (2004) recense ainsi une vingtaine de modèles qu'il compare selon une grille de lecture articulée sur neuf caractéristiques : 1. leur structure unifiée ou composite, faite de sous-systèmes ordonnés hiérarchiquement, 2. l'intégration complète ou partielle du système de transport, 3. les fondements théoriques (modèles à base d'enchères, théorie de l'utilité espérée, équilibre, ...), 4. les techniques de modélisation selon leur prise en compte de l'espace et du temps, 5. la dynamique simulée, 6. les données nécessaires, 7. l'exercice de paramétrage et de validation du modèle, 8. l'opérationnalité et 9. l'applicabilité du modèle.

Généralement, l'ensemble des modèles LUTI existants ont été développés à partir d'une seule discipline : urbanisme (URBANSIM, Wadell), économiste (RELU-TRAN, Anas), ingénierie (PIRANDELLO, Vinci), géographie (MOBISIM, Antoni). Partant du constat de la complexité du phénomène urbain, nous avons plutôt choisi de travailler sur la base d'une approche multidisciplinaire (géographie, aménagement, urbanisme, économie, ingénierie) permettant de décrire les principaux mécanismes des phénomènes d'urbanisation mobilisés dans la modélisation LUTI. Fort du contexte actuel des progrès de l'informatique et de la puissance de calcul des ordinateurs, nous avons choisi aussi de travailler à partir d'une approche multi agents, qui jusqu'alors n'était techniquement pas accessible aux modèles

développés jusqu'au milieu des années 2000. Notre approche présente donc l'originalité de développer une approche multi agents dans un contexte multidisciplinaire.

Dans MUST-B, le mécanisme de choix de localisation des ménages et des établissements est basé sur la théorie de la maximisation de l'utilité que procure pour le consommateur (ménage et établissement) sa localisation dans un bien immobilier à un lieu donné. Nous nous intéressons à l'équilibre des marchés immobilier et foncier qui émerge à l'issue de la simulation de la concurrence intra-agents (concurrence des ménages entre eux sur l'offre résidentielle et des établissements entre eux sur l'offre en locaux d'activités) et inter-agents (concurrence entre les ménages et les établissements sur le foncier constructible). Plus généralement, MUST-B prend en compte le comportement d'un grand nombre d'agents et d'acteurs urbains et leurs interactions mutuelles : ménages, entreprises, promoteurs, aménageurs, politiques publiques. Pour rendre compte de la complexité du phénomène urbain, nous travaillons à partir d'une simulation multi-agents et nous avons pris le parti d'endogénéiser la plupart des mécanismes qui régissent l'occupation de l'espace comme la formation du prix de l'immobilier, l'occupation du potentiel constructible, l'accessibilité aux emplois et à la main d'œuvre.

MUST-B propose une approche novatrice par rapport aux autres travaux de modélisation LUTI, à la fois du point de vue des choix de modélisation que de la volonté de rendre compte d'un phénomène complexe par une approche multidisciplinaire.

Notre apport par rapport aux modèles LUTI existants est d'abord, la simulation multi-agents qui permet d'appréhender la complexité du système-ville à partir des comportements individuels (Encadré 1). Elle offre la possibilité de faire émerger des comportements collectifs peu accessibles tant par l'intuition que par le calcul analytique (Lemoy et al., 2011). Elle articule de façon systémique les marchés foncier et immobilier (aménageur/promoteur/occupant-ménages, établissements) pour prendre en compte le mécanisme du compte-à-rebours selon lequel le prix du foncier est déduit des autres coûts d'une opération et du prix de vente de l'immobilier. Elle intègre aussi la prise en compte du logement social qui représente le quart du parc résidentiel à l'échelle nationale.

Ensuite, l'association de chercheurs pluridisciplinaires (économie, urbanisme, géographie, transport, informatique...) permet de

#### Encadré 1 :

La modélisation à base d'agents est définie comme une technique de modélisation et de simulation qui fonctionne au niveau des micro-unités en tant qu'établissements, ménages, etc. Chaque micro-unité contient plusieurs attributs et suit un ensemble de règles comportementales. Cette technique simule les processus décisionnels des individus en fonction des attributs hétérogènes des agents et de leurs interactions avec l'environnement et d'autres agents. L'approche de la modélisation à base d'agents a récemment émergé et gagné en popularité dans la communauté scientifique liée à l'urbanisme. Ces modèles utilisent les liens agents (ménages ou établissements) – usage du foncier comme objets d'analyse et de simulations, et accordent une attention particulière aux interactions entre ces « agents ». Plusieurs caractéristiques définissent les agents : ils sont autonomes, ils partagent un environnement par la communication et l'interaction, et ils prennent des décisions qui lient leur comportement à l'environnement. Les agents font des choix inductifs et évolutifs qui les conduisent vers la réalisation d'objectifs de bien-être.

prendre en compte les spécificités des différents champs disciplinaires en lien avec le phénomène urbain. Qui plus est, l'équipe projet a été construite de sorte à être mixte (chercheurs et consultants) pour élaborer un outil opérationnel et compatible avec les besoins des collectivités territoriales. La confrontation des approches théoriques aux acteurs opérationnels (promoteur, institutionnels...) a permis d'entériner les mécanismes modélisés.

Enfin, MUST-B rend compte de la complexité du phénomène urbain au travers de différents indicateurs, notamment ceux liés à la simulation d'une politique publique. Il permet de rendre compte d'indicateurs par zone tels que l'urbanisation à travers le nombre de logements/ménages/populations, le nombre établissements/emplois, la mixité et ségrégation sociale, la mixité fonctionnelle, le prix de l'immobilier résidentiel, l'immobilier d'activités, le prix du foncier. Il peut rendre compte aussi d'indicateurs liés au développement durable comme la consommation de l'énergie (mobilité Domicile-Travail, logement), les émissions de GES (mobilité Domicile-Travail, logement) et l'artificialisation des sols (ratio surface bâtie / total surface de la zone).

## 3. MUST-B: MÉTHODE ET FONDEMENTS THÉORIQUES

### 3.1 Fonctionnement et architecture du modèle MUST-B

Dans son fonctionnement, MUST-B s'apparente à un modèle de transport « quatre étapes » dans la mesure où, pour un horizon donné (Bonnef, 2001), l'équilibre résulte de la confrontation entre l'offre (réseaux de transport) et la demande (matrice des flux). Ainsi MUST-B peut être considéré comme un modèle offre/demande où interagissent des entités spatiales (foncier, logements, locaux d'activités) avec des entités sociales (ménages, établissements). Les ménages se concurrencent entre eux sur l'immobilier et concurrencent les établissements pour l'occupation du sol du foncier constructible en fonction de la définition dans les documents d'urbanisme des zones à urbaniser pour usage résidentiel ou mixte pour usage d'activités.

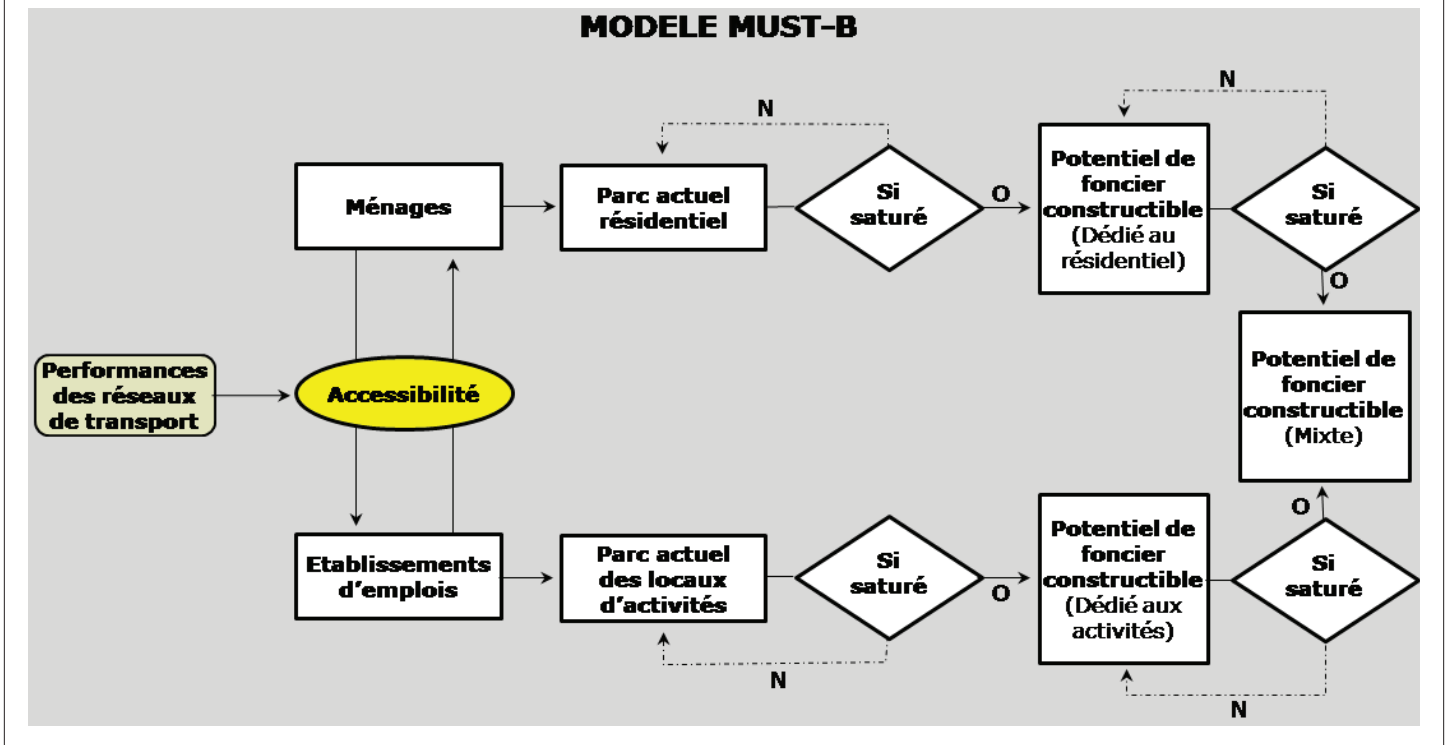
L'occupation du sol par les ménages et les établissements au niveau des différentes zones d'une agglomération à un horizon futur donné est basée sur le processus suivant (figure 1) :

- La demande exogène à l'horizon futur est définie en distinguant les ménages (population) et les établissements (emplois).
- À l'initialisation, les agents sont affectés arbitrairement dans les parcs actuels respectifs tout en respectant les contraintes de capacité. Pour ce faire, une procédure est développée dans MUST-B qui permet d'effectuer le pré-chargement automatique des agents dans les zones du territoire considéré.
- Les ménages vont commencer par occuper le parc actuel de logements et, une fois que ce dernier est saturé, ils vont occuper le potentiel de foncier constructible (PFC) dédié au logement sous contrainte de rentabilité pour le promoteur. La localisation des établissements suit le même processus.
- Dans le cas où le PFC dédié est saturé, les ménages et/ou les établissements vont être localisés dans le PFC mixte jusqu'à ce qu'il soit saturé à son tour.

Le modèle MUST-B est ainsi capable de rendre compte de l'étalement ou du resserrement urbain : en dehors du parc actuel qui est exogène, l'offre devient endogène, plafonnée par le PFC, sous contrainte de la demande des agents (ménages et établissements) et de la rentabilité financière pour le promoteur.

MUST-B procède à la localisation de chaque agent tiré aléatoirement. On considère que le territoire modélisé est celui d'une ville fermée, à horizon donné, où les nombres totaux d'agents (population, emplois) sont fixés par avance. Ainsi, un grand nombre de tirages

Figure 1. Fonctionnement du modèle MUST-B pour un horizon futur



(plusieurs millions) est effectué dans une simulation afin d'atteindre une situation d'équilibre. L'équilibre se construit à partir de la dynamique simulée des choix de localisation des ménages et des établissements. On considère que l'équilibre est atteint lorsque les agents n'améliorent plus l'utilité que peut leur procurer une nouvelle localisation. Cet équilibre urbain dynamique par opposition à l'équilibre statique calculable dans les modèles urbains, s'apparente à l'équilibre de Wardrop utilisé dans les modèles d'affectation des flux de trafic. L'équilibre de Wardrop est atteint dans l'affectation de trafic sur un réseau routier lorsqu'aucun usager ne peut changer d'itinéraire sans détériorer son temps de trajet.

Concrètement dans le modèle MUST-B, l'utilité agrégée d'un type d'agents donné (ménage ou établissement) converge vers un niveau  $U^*$  au bout d'un nombre  $I^*$  d'itérations. On peut donc considérer qu'au bout d'un nombre  $I^*$  d'itérations, l'utilité agrégée des ménages ne progresse plus et qu'aucun ménage ne peut augmenter son utilité à être dans une zone donnée sans diminuer au moins celle d'un autre ménage. À l'image de l'optimum de Pareto, rien ne dit que tous les ménages soient satisfaits de leur localisation. Il en va de même pour les établissements.

#### Encadré 2:

Le modèle MUST-B est implémenté sous VLE - Virtual Laboratory Environment (Quesnel et al., 2009). VLE est une plate-forme de multi-modélisation et de simulation de systèmes dynamiques basée sur le formalisme à événements discrets DEVS (Zeigler et al., 2000). VLE permet de spécifier des systèmes complexes en termes d'objets et d'agent réactifs, de simuler la dynamique du système et d'analyser les résultats des simulations. Les bibliothèques fournies permettent également le développement de programmes personnalisés. MUST-B est développé en utilisant le concept de la programmation orientée objets en particulier le langage C++.

## 3.2 Principes théoriques et modélisation

### 3.2.1 Fonctions d'utilité

L'approche proposée consiste à construire une fonction d'utilité résidentielle, qui intègre les comportements des ménages dans leurs choix de localisation résidentielle. Elle permet d'affecter les ménages dans les différents logements selon une procédure d'enchères. La fonction d'utilité résidentielle traduit le bien-être économique que peut tirer le ménage d'une localisation et d'un type de logement donnés. Elle est fonction de plusieurs paramètres en lien avec le logement et l'espace tels que l'accessibilité et la notoriété de la zone, la surface du logement ou le prix de l'immobilier...

La fonction d'utilité du ménage  $m$  résidant dans la zone  $z$  peut être exprimée de cette manière :

$$U_{m,z} = \alpha_1 AC_z + \alpha_2 NO_z + \alpha_3 SL_m - FE_z * SL_m - P_z * SL_m \quad (1)$$

- $AC$ : accessibilité de la zone considérée (traduit l'accès à l'emploi)
- $NO$ : notoriété de la zone considérée (traduit l'image et l'agrément d'une zone que l'on peut qualifier par divers paramètres tels que l'ambiance, le style, la spécificité et la diversité des commerces qui sont présents)
- $SL$ : surface désirée du logement
- $FE$ : facture énergétique au  $m^2$  (traduit les dépenses énergétiques liées à l'usage du logement comme le chauffage, la climatisation, l'éclairage, ...)
- $P$ : prix de l'immobilier au  $m^2$  de la zone considérée
- $\alpha_i$ : paramètres à estimer en fonction de la CSP du ménage

Seules la notoriété et la facture énergétique sont des variables exogènes au modèle. Les autres variables, de nature endogène, sont discutées par la suite.

Il convient de noter que les effets de voisinage, de quartier ou clubs ne sont pas des variables d'entrée du modèle mais attendus comme

résultats à travers les prix de l'immobilier qui se forment et la valorisation par les différentes catégories de ménages de la notoriété.

Afin de tenir compte de l'hétérogénéité des ménages au sein d'une même catégorie (taille x CSP), on introduit une distribution statistique au sein de chaque catégorie. Cette distribution concerne les paramètres  $\alpha_j$  de la fonction d'utilité résidentielle. La distribution statistique considérée est la loi normale de moyenne la valeur de  $\alpha_j$  et l'écart type est supposé égal à 10% de la moyenne.

La méthode proposée pour simuler les choix de localisation des établissements est similaire à celle des ménages. Elle consiste à construire une fonction de localisation des emplois qui intègre les comportements des entreprises dans les choix de localisation de leurs établissements et qui permet d'affecter les emplois aux locaux selon une procédure d'enchères. Cette fonction traduit l'utilité que peut tirer l'entreprise d'une localisation et d'un type de local donné. Elle est fonction de plusieurs paramètres tels que l'accessibilité et la notoriété (image) de la zone; la surface du local, le prix de l'immobilier, les taxes, impôts, aides financières...

Au même titre qu'un ménage, l'entreprise cherche ainsi à acquérir le local qu'elle considère le plus utile pour son activité en tenant compte de la taille de son établissement.

La fonction d'utilité de l'établissement  $e$  (caractérisé par sa taille et le secteur d'activité auquel il est rattaché) localisé dans la zone  $z$  peut être exprimée de cette manière :

$$U_{e,z} = (\lambda_1 AC_z + \lambda_2 NO_z + \lambda_3 RE_z - TT_z * SL_{ea} - P_z * SL_{ea}) * T_e \quad (2)$$

- $AC$ : accessibilité de la zone considérée (traduit l'accès à la main d'œuvre)
- $NO$ : notoriété de la zone considérée (traduit l'image et la spécificité d'une zone)
- $SL_{ea}$ : surface d'un emploi par type d'activité
- $RE$ : ratio des établissements de la même activité de l'établissement considéré sur l'ensemble des établissements présents dans la zone (traduit les effets d'agglomérations)
- $TT$ : niveau de taxes et impôts de la zone considérée
- $P$ : prix au m<sup>2</sup> de l'immobilier des locaux d'activités de la zone considérée
- $T_e$ : taille de l'établissement
- $\lambda_j$ : paramètres à estimer en fonction de l'activité de l'établissement

Seules les variables notoriété et niveau des taxes sont des variables exogènes au modèle. Les autres variables, de nature endogène, sont discutées par la suite.

Nous avons délibérément choisi d'exprimer une fonction d'utilité pour un établissement selon une catégorie donnée à une localisation donnée. Il ne s'agit pas directement d'une fonction de profit spatialisée dans la mesure où nous n'abordons pas ici les mécanismes qui prévalent en économie industrielle ou qui transiteraient dans le cadre de la financiarisation de l'économie.

### 3.2.2 Mécanisme de choix de localisation

Le mécanisme de choix de localisation des ménages est le même que celui des établissements, il est fondé sur la maximisation de l'utilité que procure une localisation à l'agent (ménage/établissement).

L'affectation des agents sur les différentes zones qui constituent l'agglomération est basée sur un mécanisme d'enchères pour l'acquisition des logements/locaux. Le principe est que chaque agent se localise dans une zone donnée en cherchant à maximiser son utilité. L'enchère faite par l'agent candidat à déménager est composée du

prix de sa zone d'origine et du gain d'utilité procuré par son éventuel déménagement.

Concrètement à l'itération<sup>1</sup>  $n$  de la simulation, l'enchère que va faire l'agent  $a$  pour emménager dans la zone  $j$  dépend du prix du logement dans sa zone d'origine  $i$  à l'itération  $n-1$ , et de la différence des utilités entre les zones  $i$  et  $j$  à l'itération  $n-1$ . Elle a pour expression :

$$\pi_{j,n}^a = P_{i,n-1} + \varepsilon(U_{j,n-1}^a - U_{i,n-1}^a) \quad (3)$$

où  $\varepsilon$ , amplitude de l'enchère, détermine le gain d'utilité transformé en un prix additif du prix qu'il avait initialement dans sa zone d'origine.

Avec le mécanisme ci-dessus (3), les prix simulés des différentes zones vont croître au fur-et-à-mesure que ces dernières attirent des agents. Pour simuler le mécanisme inverse, de décroissance ou de stabilité des prix, on suppose que l'agent peut renoncer à déménager s'il obtient un rabais sur le prix de l'immobilier dans sa zone d'origine  $i$ . L'expression de l'enchère que fait l'agent pour rester dans sa zone d'origine est :

$$\pi_{i,n}^a = (1 - \beta)P_{i,n-1} \quad (4)$$

avec  $\beta$  le rabais sur le prix de l'immobilier. L'agent  $a$  choisit de se localiser dans la zone où il a la plus grande utilité.

Si  $U(\pi_{j,n}^a) > U(\pi_{i,n}^a)$ , l'agent  $a$  choisit de se localiser dans la zone  $j$  sinon il reste dans la zone  $i$ .

Dans le cas où l'utilité d'aller dans la zone  $j$  est supérieure à celle obtenue dans la zone d'origine  $i$  et que le zone  $j$  est déjà saturée (la zone a atteint sa capacité totale) alors l'agent  $a$  est relocalisé tout de même dans la zone  $j$  et c'est l'agent  $a'$  qui a la plus faible utilité dans la zone  $j$  qui est relocalisé dans une zone de destination  $k$  tirée au sort.

À l'issue du processus de localisation de l'agent tiré au sort dans une zone, le prix de cette dernière est actualisé et mis égal à l'enchère effectuée par le dernier agent. Ainsi, à chaque itération, il y a forcément une zone qui verra son prix modifié à la hausse ou à la baisse.

L'équilibre est atteint quand pour un type d'agent le niveau d'utilité est le même quelle que soit sa localisation. L'agent ne peut plus améliorer son utilité en changeant de zone.

### 3.2.3 Mécanisme de l'offre endogène (Promoteur)

Pour un horizon futur, le modèle MUST-B localise les ménages et les établissements respectivement dans une zone, connaissant les parcs actuels respectifs. Une fois que chacun de ces parcs est saturé, il va puiser dans le PFC (foncier qui peut être construit au regard de la réglementation). La consommation du PFC est activée par le mécanisme du compte à rebours : à savoir, le prix du foncier est déduit de l'ensemble des autres coûts d'une opération immobilière. Lorsque le promoteur souhaite connaître le prix maximum dont il dispose pour acheter du foncier et déclencher une opération immobilière, il va déduire du chiffre des ventes attendues (fonction des prix des logements neufs et de sa connaissance du marché local), les coûts de construction, frais financiers, honoraires, taxes et marge (Vilmin, 2015). La marge conditionnant l'obtention de prêts et de garanties par la banque, le seul poste qui conditionne au final la décision d'investir et la rentabilité du projet est le foncier. La différence entre les recettes attendues et les dépenses correspond donc à la charge foncière maximale que le promoteur peut supporter. Le mécanisme de capacité endogène va donc être activé au regard de la confrontation entre prix immobilier et charge foncière.

<sup>1</sup> Une itération correspond à un tirage aléatoire d'un agent soumis au processus de choix de localisation.

### Mécanisme décisionnel d'investissement

Soient pour un mètre carré :

- $\pi$  : Prix de l'enchère que fait l'agent à l'itération  $n$  (par rapport à la surface cessible)
- $C_F$  : Coût du foncier (par rapport à la surface constructible)
- $p$  : Poids du coût du foncier dans le prix de l'immobilier ( $p = C_F / \pi$ )
- $C_R$  : Coût de revient / coût de production (coût du foncier + coût de construction + marge)
- $C_C$  : Coût de construction
- $M$  : Marge minimale du promoteur ( $M = x * C_R$ )

On a :

$$C_R = C_F + C_C + M \quad (5)$$

$$C_R = p\pi + C_C + xC_R \quad (6)$$

On déduit :

$$C_R = \frac{p\pi + C_C}{1 - x} \quad (7)$$

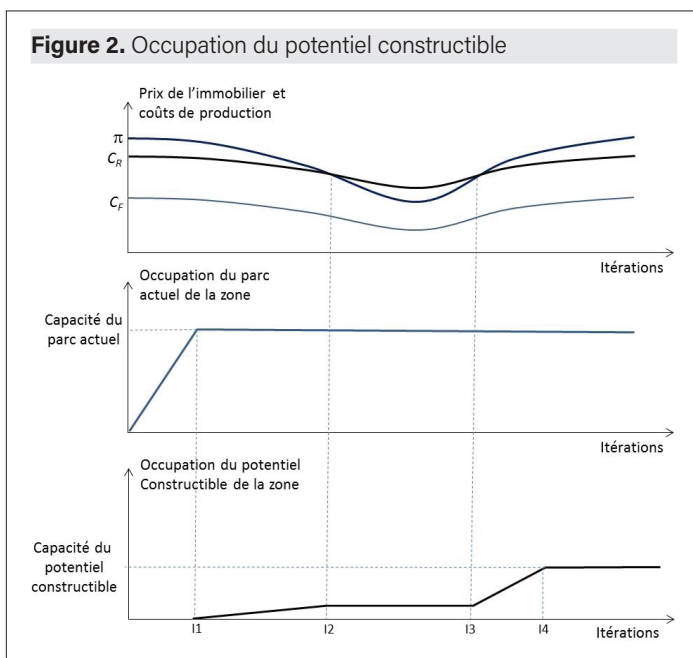
La condition de rentabilité du promoteur s'exprime de cette manière :

$$\pi > C_R \quad (8)$$

On a finalement :

$$\pi > \frac{C_C}{1 - x - p} \quad (9)$$

Comme illustré par la figure 2, le mécanisme d'occupation du PFC d'une zone est conditionné par une double contrainte : la saturation du parc actuel et la rentabilité attendue pour le promoteur de construire dans cette zone (équation 9).



Suivant la figure 2, on peut distinguer 4 configurations :

- 1. Entre le début de la simulation et l'itération I1, les agents se localisent dans le parc actuel.

- 2. Entre l'itération I1 et l'itération I2, les agents se localisent dans le PFC car, d'une part, le parc actuel considéré est saturé et, d'autre part, le prix de l'immobilier formé permet la rentabilité au promoteur (l'enchère est supérieure au coût de revient).
- 3. Entre l'itération I2 et l'itération I3, la zone est toujours considérée saturée mais le PFC n'est pas mobilisé car la condition de rentabilité pour le promoteur n'est pas respectée dans cet intervalle
- 4. Entre l'itération I3 et l'itération I4, les agents se localisent dans le PFC car de nouveau la condition rentabilité de l'investissement immobilier est respectée.
- 5. À partir de l'itération I4, la zone est considérée définitivement saturée (capacités du parc actuel et du PFC atteintes).

### Processus d'occupation spatiale du potentiel constructible

Soient :

- $SI$  : Surface habitable de l'immobilier désirée par l'agent (demande immobilière)
- $ES$  : Emprise au sol du bâtiment
- $SC$  : Surface au sol du foncier consommé (PFC)
- $NE_{max}$  : Nombre d'étages maximal de la zone
- $Coef_1$  : coefficient de majoration de la surface occupée tenant compte des murs extérieurs du bâtiment
- $Coef_2$  : coefficient de majoration tenant compte des réseaux (routier, eau, assainissement, éclairage public...) et des servitudes d'urbanisme (vue, droit de passage...)

L'emprise au sol du bâtiment satisfaisant la demande immobilière  $SI$  a pour expression :

$$ES = Coef_1 * \frac{SI}{NE_{max}} \quad (10)$$

La surface du foncier consommée par cette demande immobilière est égale à :

$$SC = Coef_2 * ES \quad (11)$$

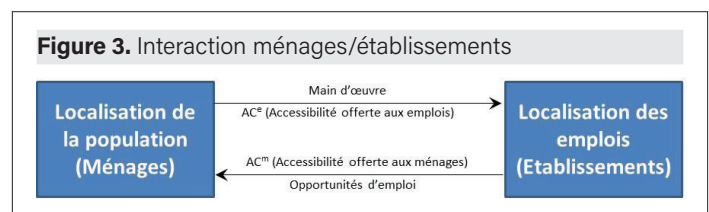
On en déduit finalement :

$$SC = \frac{Coef_1 * Coef_2 * SI}{NE_{max}} \quad (12)$$

À chaque fois qu'un agent (ménage ou établissement) est localisé dans cette zone, on retranche à la surface du PFC, la surface au sol consommée par cette demande jusqu'à la consommation totale de la surface du PFC de la zone considérée.

### 3.2.4 Mécanisme de l'accessibilité endogène

Les ménages et les établissements sont en interaction via la variable accessibilité (Cf. figure 1). En effet, l'accessibilité des ménages doit tenir compte de l'offre de transport mais aussi de la localisation des établissements (opportunités d'emploi) d'une part, et d'autre part l'accessibilité des établissements doit tenir compte de l'offre de transport et de la localisation des ménages (main d'œuvre). Il existe alors, dans le système, une rétroaction entre les 2 types d'agents (figure 3).



L'accessibilité d'une zone comprend deux composantes: l'une exogène qui traduit les performances du réseau de transport desservant la zone considérée et l'autre endogène qui traduit la répartition spatiale de la population et des emplois évoluant au cours de la simulation.

À ce stade de développement de MUST-B, deux hypothèses simplificatrices sont introduites dans la prise en compte de l'accessibilité:

On réduit l'accessibilité des ménages seulement à l'accès aux emplois alors qu'il y a d'autres dimensions comme l'accès aux services, aux équipements, aux commerces, aux établissements scolaires, .... Ces éléments présents dans la fonction d'utilité des ménages, ne participent pas au calcul de l'accessibilité endogène.

On suppose que l'accessibilité liée aux performances des réseaux de transport est complètement exogène alors qu'une partie de cette composante pourrait être endogénéisée à travers la prise en compte de la congestion des réseaux de transport résultant de l'attractivité de certaines zones à certains moments au cours de la simulation.

La détermination de l'accessibilité pour les deux types d'agents (ménages et établissements) est basée sur l'approche suivante:

- Détermination de la matrice du coût généralisé des déplacements interzones pour les modes VP (Véhicules Particuliers) et TC (Transports en Communs)
- Détermination des vecteurs d'accessibilité des modes VP et TC
- Agrégation tous modes en un seul vecteur d'accessibilité

#### Coût généralisé de déplacement

Le coût généralisé en véhicule particulier (VP) entre les zones  $i$  et  $j$  a pour expression:

$$C_{ij}^{VP} = V_i * tt_{ij}^{VP} + (CC+CK) * d_{ij}^{VP} + C_j^{Stat} \quad (13)$$

Avec:

- $V_i$ : Valeur du temps (€/h)
- $tt_{ij}^{VP}$ : Temps de trajet VP entre les zones  $i$  et  $j$  (h)
- $d_{ij}^{VP}$ : Distance parcourue en VP entre les zones  $i$  et  $j$  (km)
- $CC$ : Coût kilométrique de carburant (€/km)
- $CK$ : Coût kilométrique d'usage du véhicule hors carburant (€/km)
- $C_j^{Stat}$ : Coût de stationnement dans la zone  $j$  (€)

Le coût généralisé en transport en commun (TC) entre les zones  $i$  et  $j$  a pour expression:

$$C_{ij}^{TC} = V_i * tt_{ij}^{TC} + Tarif^{TC} + \eta * N_{ij}^{Corres} \quad (14)$$

Avec:

- $tt_{ij}^{TC}$ : Temps de trajet TC entre les zones  $i$  et  $j$  (h)
- $Tarif^{TC}$ : Tarif du voyage en TC
- $N_{ij}^{Corres}$ : Nombre de correspondances durant le voyage
- $\eta$ : Paramètre à estimer qui traduit la pénalité liée à la rupture de charge

#### Accessibilité par mode

L'accessibilité offerte pour le ménage  $m$  de la zone  $i$  à l'itération  $n$ , composée d'une partie exogène (premier terme de l'équation) et d'une partie endogène (deuxième terme de l'équation), a pour expression:

$$AC_{i,n}^{m,VP} = \theta \sum_j e^{-C_{ij}^{VP}} + \mu \sum_j \sum_k \frac{t^k e_{j,n-1}^k}{(C_{ij}^{VP})^2} \quad (15)$$

$$AC_{i,n}^{m,TC} = \theta \sum_j e^{-C_{ij}^{TC}} + \mu \sum_j \sum_k \frac{t^k e_{j,n-1}^k}{(C_{ij}^{TC})^2} \quad (16)$$

L'accessibilité offerte pour l'établissement  $e$  de la zone  $i$  à l'itération  $n$ , composée d'une partie exogène et d'une partie endogène, a pour expression:

$$AC_{i,n}^{e,VP} = \theta' \sum_j e^{-C_{ij}^{VP}} + \mu' \sum_j \sum_k \frac{t^k m_{j,n-1}^k}{(C_{ij}^{VP})^2} \quad (17)$$

$$AC_{i,n}^{e,TC} = \theta' \sum_j e^{-C_{ij}^{TC}} + \mu' \sum_j \sum_k \frac{t^k m_{j,n-1}^k}{(C_{ij}^{TC})^2} \quad (18)$$

Avec:

- $t^l$ : Taille du ménage (nombre de personnes)
- $m_{i,n-1}^l$ : Nombre de ménages de taille  $t^l$  dans la zone  $i$  à l'itération  $n-1$
- $t^k$ : Taille de l'établissement (nombre d'emplois)
- $t_{j,n-1}^k$ : Nombre d'établissements de taille  $t^k$  dans la zone  $j$  à l'itération  $n-1$
- $\theta, \theta', \mu$  et  $\mu'$ : Paramètres à estimer

#### Accessibilité agrégée

Afin d'estimer l'accessibilité tous modes d'une zone donnée, on pondère l'accessibilité de chaque mode par sa part modale ( $PM$ ) selon ces expressions:

$$AC_{i,n+1}^m = PM_{i,n}^{VP} * AC_{i,n}^{m,VP} + PM_{i,n}^{TC} * AC_{i,n}^{m,TC} \quad (19)$$

$$AC_{i,n+1}^e = PM_{i,n}^{VP} * AC_{i,n}^{e,VP} + PM_{i,n}^{TC} * AC_{i,n}^{e,TC} \quad (20)$$

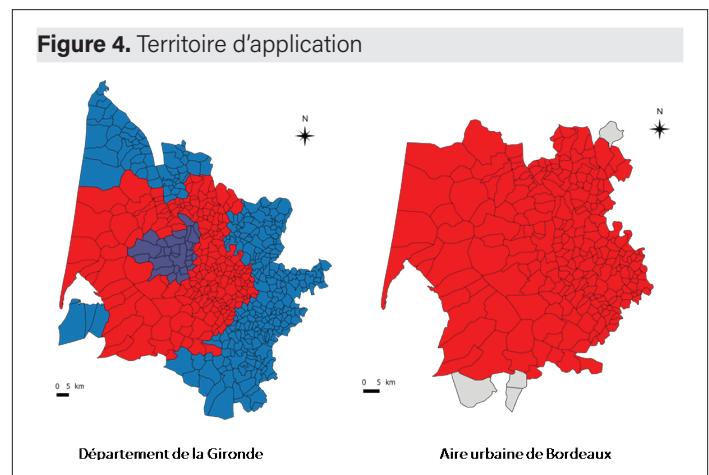
Les parts modales sont estimées au cours de la simulation selon l'approche séquentielle: génération, distribution et choix modal. Les étapes de génération et de distribution sont fondées sur le modèle gravitaire et la localisation des ménages et des établissements. L'étape de choix modal s'appuie sur un modèle logit et les coûts généralisés des 2 modes concurrents (VP et TC).

## 4. APPLICATION DE MUST-B SUR L'AIRE URBAINE DE BORDEAUX

Afin d'illustrer le fonctionnement de MUST-B, vérifier la disponibilité et le traitement des données nécessaires, nous proposons son application sur l'Aire Urbaine de Bordeaux (AUB) (Figure 4).

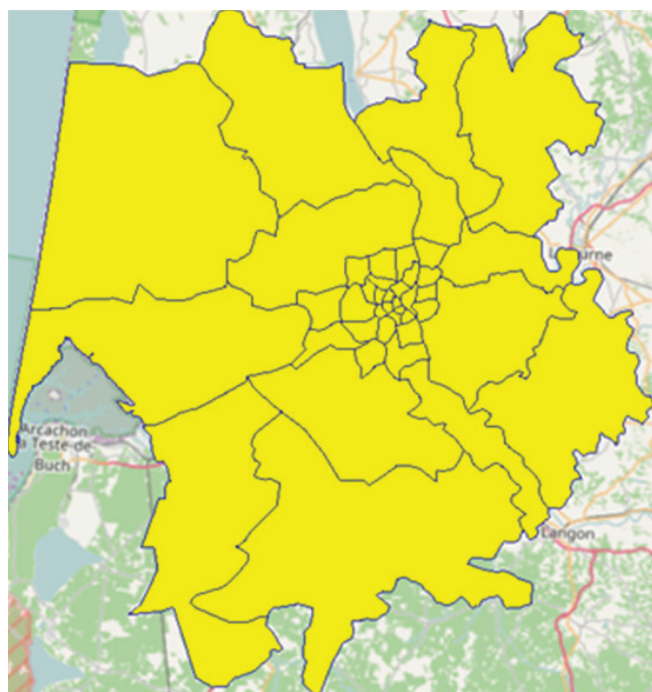
Le territoire de l'AUB s'étend sur une grande partie du département de la Gironde et regroupe, en 2012, 1158431 habitants (523310 ménages) et 467211 emplois (34676 établissements).

Figure 4. Territoire d'application





**Figure 5.** Découpage de l'AUB en zones



#### 4.1 Découpage du territoire en zones

À partir de la connaissance des IRIS<sup>2</sup>, l'AUB est découpée en 42 zones en tenant compte d'un seuil minimal de population et d'emplois par zone et des contraintes géographiques représentant des effets de coupure (cours d'eau, voies ferrées, autoroutes, rocade...). On obtient le découpage de 42 zones illustré par la figure 5 (14 zones pour la commune de Bordeaux, 2 zones pour la commune de Mérignac,

2 zones pour la commune de Pessac, chaque commune frontalière avec Bordeaux est considérée comme une zone, le reste des zones est constitué par agrégation de plusieurs communes adjacentes).

#### 4.2 Population et emplois

La population est considérée en terme de ménages dont la taille varie de 1 à 5 & + personnes. Nous avons également considéré 2 types de ménages selon la catégorie socio-professionnelle (CSP) : CSP- (ménages modestes à faibles revenus) et CSP+ (ménages à hauts revenus). Les CSP permettent ainsi d'intégrer la contrainte budgétaire des ménages, en mobilisant des bases de données disponibles

Le tableau 1 présente, pour les données de l'INSEE (2012), la reconstitution des ménages de l'AUB en 10 catégories (5 tailles X 2 CSP).

Les emplois sont considérés en termes d'établissements en distinguant 8 tailles : 3, 7, 15, 35, 75, 150, 350 et 750 employés. Nous considérons aussi 4 types d'activités : Bureaux, Services, Usines et Agriculture/Entrepôts.

Le croisement des 8 tailles et des 4 types d'activités nous donne 32 catégories d'établissements qui sont présentées dans le tableau 2.

#### 4.3 Parcs immobiliers

Le parc résidentiel privé et social de l'AUB est décrit dans le tableau 3 selon le nombre de pièces du logement. Il convient de noter, que nous avons considéré seulement les résidences principales, autrement dit le nombre de logements est égal au nombre de ménages.

Le parc des locaux d'activités de l'AUB est décrit dans le tableau 4 selon le nombre d'emplois. Par exemple, il y a sur l'AUB 3640 établissements de taille T3 (15 postes d'emplois).

Le modèle ne prend pas en compte la notion d'espace vacant, qu'elle concerne les logements ou les locaux d'activités. Tous les locaux sont supposés occupés : il s'agit là d'une hypothèse du modèle qui permet à l'équilibre que chaque ménage ait un logement et que chaque établissement ait un local d'activités.

#### 4.4 Autres données

##### 4.4.1 Facture énergétique du logement

La facture énergétique liée au logement utilisée dans la fonction d'utilité des ménages est estimée à partir des consommations unitaires (€/an.m<sup>2</sup>) déterminées sur la base de l'âge du bâtiment et de l'étiquetage énergétique DPE (Diagnostic de Performance Energétique). Le DPE renseigne sur la performance énergétique d'un loge-

**Tableau 1.** Nombres et catégories de ménages sur l'AUB

1 personne		2 personnes		3 personnes		4 personnes		5 personnes & +	
CSP +	CSP -	CSP +	CSP -	CSP +	CSP -	CSP +	CSP -	CSP +	CSP -
95 856	95 257	88 704	81 275	43 309	33 415	36 784	24 817	13 693	10 201

Source : données INSEE 2012

**Tableau 2.** Nombres et catégories d'établissements sur l'AUB

Bureau								Services								Usines								Agriculture/Entrepôts							
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
3	7	15	35	75	150	350	750	3	7	15	35	75	150	350	750	3	7	15	35	75	150	350	750	3	7	15	35	75	150	350	750
7434	2145	1576	1065	455	206	104	47	8412	2531	1126	621	157	51	22	2	1051	502	348	214	73	35	17	12	4095	1121	590	418	163	54	13	3

Source : données INSEE 2012

**Tableau 3.** Résidences principales sur l'AUB

	1 pièce	2 pièces	3 pièces	4 pièces	5 pièces & +
Parc privé	36 232	59 831	85 322	116 882	156 017
Parc social	4 241	9 460	17 824	18 921	17 222

Source : données INSEE 2012

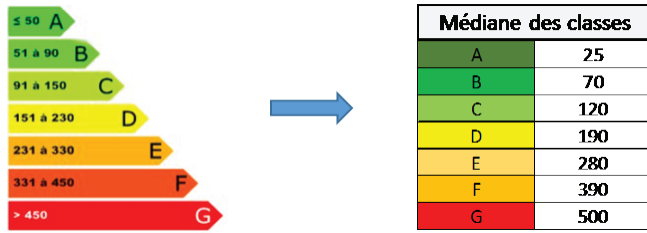
**Tableau 4.** Locaux d'activités sur l'AUB

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
3	7	15	35	75	150	350	750
20 992	6 299	3 640	2 318	848	346	156	64

Source : données reconstituées

2 Un IRIS est le découpage infra communal adopté par l'INSEE qui constitue une partition du territoire des communes en «quartiers» dont la population est de l'ordre de 2 000 habitants.

**Figure 6.** Classification des performances énergétiques du bâti résidentiel (kWh/m<sup>2</sup>.an)



**Tableau 5.** Hypothèses d'étiquetage selon l'âge du bâti

Avant 1945	B	50%
	G	50%
1946-1990	C	70%
	F	30%
1991-2009	B	60%
	E	40%
2010-2012	B	70%
	D	30%

**Tableau 6.** Consommation unitaire selon l'âge du bâti

	kWh/m <sup>2</sup> .an	c <sub>p</sub> (€/m <sup>2</sup> .an)
Avant 1946	285	40,5
1946-1990	201	28,5
1991-2009	154	21,9
2010-2012	106	15,1

ment ou d'un bâtiment, en évaluant sa consommation d'énergie et son impact en termes d'émission de GES.

Dans le DPE, il existe 7 classes de performances énergétiques présentées dans la figure 6.

La répartition par étiquette selon l'âge du bâtiment est présentée dans le tableau 5. Cette répartition est basée sur des hypothèses, à dire d'experts, qui tiennent compte de l'âge du bâtiment, des normes thermiques, du renouvellement urbain et de l'isolation thermique du parc immobilier. On suppose par exemple, que 50% des bâtiments construits avant 1945 sont très énergivores, alors que l'autre moitié (50%) est considérée comme plus performante, ayant été rénovée.

On en déduit finalement la consommation unitaire selon l'année de construction du logement. Cette consommation annuelle par m<sup>2</sup> présentée dans le tableau 6 est exprimée en kWh et en euro en prenant comme hypothèse un prix moyen de l'énergie de 0,14 € par kWh.

En fonction de la structure du parc résidentiel de chaque zone (âge du bâti et surface de l'immobilier), on détermine la facture énergétique moyenne annuelle (€/m<sup>2</sup>) de la zone considérée.

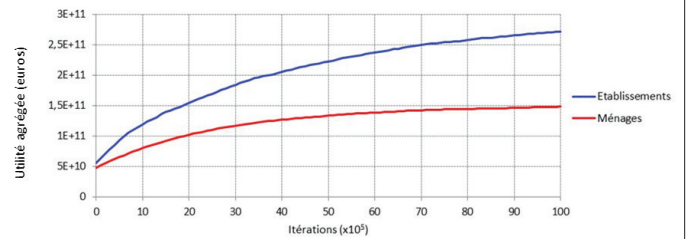
#### 4.4.2 Notoriété

La notoriété utilisée dans la fonction d'utilité des ménages traduit l'image et l'agrément d'une zone qui peuvent être qualifiés par diverses aménités urbaines tels que les espaces verts, l'ambiance, le style, la spécificité et la diversité des commerces qui sont présents

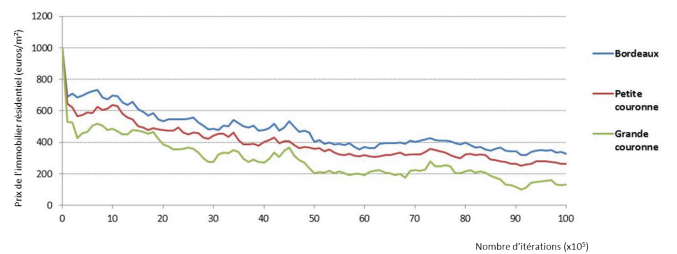
dans la zone considérée. La notoriété est estimée à partir de la base permanente des équipements (BPE) de l'INSEE qui fournit le niveau d'équipements et de services rendus à la population sur un territoire.

Les équipements de la BPE géolocalisés sont pondérés selon l'intérêt qu'ils peuvent représenter. Ainsi, par exemple, une salle de cinéma est pondérée par un coefficient de 4, une boulangerie a un poids de 3, etc. À partir des poids attribués aux équipements et leurs géolocalisations, nous avons déterminé une note de notoriété pour chaque zone de l'AUB. Afin de tenir compte de la taille des zones, nous avons calculé un indice de notoriété en divisant la note par la superficie de la zone.

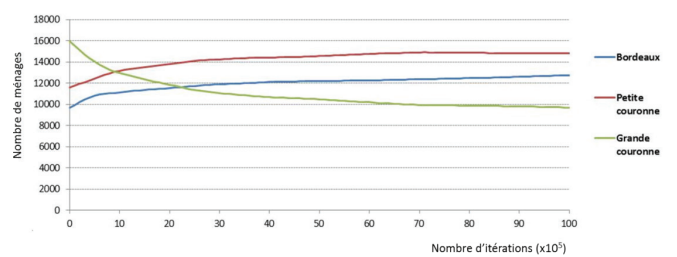
**Figure 7.** Utilité cumulée à l'échelle de l'AUB



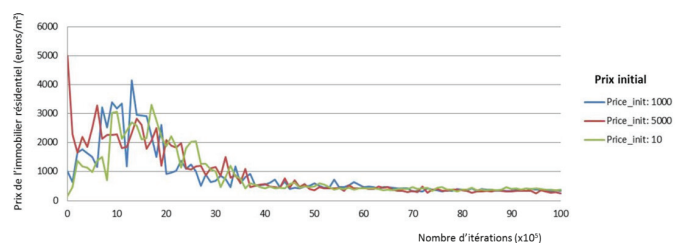
**Figure 8.** Évolution du prix de l'immobilier résidentiel



**Figure 9.** Évolution de l'occupation de l'espace par les ménages



**Figure 10.** Évolution du prix de l'immobilier selon le prix initial de la simulation



## 5. PRINCIPAUX RÉSULTATS

Les résultats ci-dessous sont présentés dans le but d'illustrer le fonctionnement du modèle. La figure 7 montre, en fonction du nombre de tirages aléatoires des ménages et des établissements, l'évolution de leurs utilités agrégées (en euros) au cours de la simulation. On constate que l'équilibre est atteint pour les ménages alors que pour les établissements l'utilité agrégée continue de croître à la fin de la simulation.

L'agrégation spatiale et le lissage (moyenne mobile) des prix de l'immobilier résidentiel sur la commune de Bordeaux, la petite couronne (communes limitrophes) et la grande couronne (communes rurales) sont présentés sur la figure 8. On peut noter la reconstitution de la hiérarchie des prix entre les macro-zones en constatant que le prix immobilier augmente en se rapprochant du centre de l'agglomération.

La figure 9 montre l'évolution du nombre de ménages sur les 3 macro-zones. On constate au fur-et-à-mesure des itérations, une migration des ménages de la grande couronne vers la petite couronne et la ville-centre.

Le graphique de la figure 10 montre l'évolution du prix de l'immobilier moyen à l'échelle de l'AUB selon 3 simulations distinguant le prix initial à 10, 1000 et 5000. On constate que le prix d'équilibre est indépendant du prix initial.

## 6. CONCLUSION

L'interdisciplinarité dans la conception et le développement de MUST-B est une caractéristique originale et déterminante où l'association de chercheurs pluridisciplinaires (économie, urbanisme, géographie, transport, informatique, ...) a permis de prendre en compte les spécificités des différents champs disciplinaires en lien avec le phénomène urbain. La modélisation et la simulation multi-agents ont permis d'appréhender la complexité du système-ville à partir des comportements individuels faisant émerger des comportements collectifs peu accessibles tant par l'intuition que par le calcul analytique.

Grâce à son application sur le territoire de l'Aire Urbaine de Bordeaux, MUST-B peut être considéré comme un outil à visée opérationnelle d'aide à la décision en matière de planification du développement urbain intégrant les effets des différents secteurs caractéristiques de la ville (mobilité, logement, activités économiques, ...) sur le climat et la pollution atmosphérique. En effet, MUST-B est conçu pour intervenir dans une démarche d'aide à la décision (aide à la définition et l'élaboration de politiques publiques), il permettra ainsi, à terme et une fois calibré, d'orienter la « trajectoire » d'un territoire vers plus « de durabilité » en discutant des effets de différents scénarios et de politiques dédiées.

La simulation à l'aide de MUST-B permettra donc d'évaluer par la suite certains effets des politiques urbaines et des actions que pourraient prendre les collectivités locales et ainsi de les aider à prioriser ces actions en fonction de leurs moyens financiers et objectifs, et à les articuler dans des politiques locales cohérentes en faveur de la transition écologique. MUST-B peut ainsi contribuer fortement dans l'identification des conditions et leviers d'action qui feront émerger des territoires urbains durables.

## 7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bonnel, P. (2001). *Prévision de la demande de transport*. Rapport HDR, Université Lumière Lyon 2, 409p.

Cambien, A. (2011). « La modélisation urbaine: une approche historique ». Dans *Modéliser la ville – Formes urbaines et politiques de transports*, Economica, Paris, p. 19-49.

Crozet, Y., & Joly, I. (2004). Budgets temps de transport: les sociétés tertiaires confrontées à la gestion paradoxale du « bien le plus rare », *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 45: 27-48.

Lemoy R., Raux, C., & Jensen, P. (2011). « ILOT: un modèle multi-agents de structuration sociale de la ville ». Dans *Modéliser la ville – Formes urbaines et politiques de transports*, Economica, Paris, p. 333-364.

Newman, P.W.G., & Kenworthy, J.R. (1998). *Overcoming Automobile Dependence*. Island Press, Washington D.C.

Ollivier, G., Geniaux, G., Napoleone, C., & Paoli, J-P. (2012). Mesurer la notoriété touristique communale: contribution méthodologique à l'aide de l'analyse textuelle de guides touristiques, *Cybergeo: European Journal of Geography*, <http://cybergeo.revues.org/25187>; DOI: 10.4000/cybergeo.25187 (page consultée le 10/06/16).

Quesnel, G., Duboz, R., & Ramat, É. (2009). The Virtual Laboratory Environment—An Operational Framework for Multi-Modelling, Simulation and Analysis of Complex Dynamical Systems, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(4): 641-653.

Wegener, M. (2004). "Overview of land use transport models". In: *Handbook of transport geography and spatial systems*, Emerald Group Publishing Limited, p. 127-146.

Vilmin, T. (2015). *L'aménagement urbain. Acteurs et système*. Editions Parenthèses, Marseille, 141 p.

Zeigler, B. P., Praehofer H., & Kim T. G. (2000). "Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems". Academic Press.

Zerguini, S., & Gaussier, N. (2019). MUST-B an Agent-based Model of Urban Land-use Development: Simulating Households' and Firms' Location Choices in Urban Area of Bordeaux", 45<sup>th</sup> Annual Conference - Eastern Economic Association, Feb. 28 – Mar. 3, 2019, New York, USA.

Zerguini, S., & Gaussier, N. (2019). Dépenses énergétiques contraintes et localisation résidentielle: Le cas de l'aire urbaine de Bordeaux, 2emes Rencontres Francophones Transport Mobilité – RFTM 2019, 11-13 juin 2019, Montreal, Canada.

Zerguini, S., & Gaussier, N. (2016). De nouveaux enjeux pour les modèles LUTI: L'exemple du modèle Must-B et son application sur l'agglomération bordelaise, 53<sup>e</sup> colloque ASRDLF, 7-9 juillet, Gatineau, Canada, 23 p.

Zerguini, S., Laterrasse, J., Le Nechet, F., Aulagnier, S., Heyder, M., & Peter, M. (2012). PROSPEG: modèle de Prévision de l'Occupation du Sol pour la Prospective Énergétique et les émissions des GES à l'échelle de l'agglomération. 11<sup>e</sup> séminaire francophone est-ouest de socio-économie des transports, 23-27 mai, Karlsruhe, 15 p.