UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ
ÉCOLE DOCTORALE « LANGAGES, ESPACES, TEMPS, SOCIÉTÉS »

Thèse en vue de l'obtention du titre de docteur en
GÉOGRAPHIE ET AMÉNAGEMENT

EXPLORATION PROSPECTIVE DES MOBILITÉS RÉSIDENTIELLES DANS UNE AGGLOMÉRATION URBAINE AU MOYEN D'UN MODÈLE DE SIMULATION MULTI-AGENTS (MOBISIM)

Présentée et soutenue publiquement par
Joanne HIRTZEL
le 9 février 2015

Sous la direction de Cécile TANNIER, Chargée de Recherche au CNRS
et Pierre FRANKHAUSER, Professeur de Géographie

Membres du jury :

Arnaud BANOS, Directeur de Recherche CNRS, UMR Géographie-cités, Paris
Éric CORNELIS, Maître de Conférence en Mathématiques, université de Namur
Françoise DUREAU, Directrice de Recherche Honoraire IRD, UMR MIGRINTER, Poitiers
Pierre FRANKHAUSER, Professeur de Géographie, université de Franche-Comté
Lena SANDERS, Directrice de Recherche CNRS, UMR Géographie-cités, Paris
Cécile TANNIER, Chargée de Recherche CNRS, UMR ThéMA, Besançon

"[...] all models are approximations.
Essentially, all models are wrong,
but some are useful"

George E.P. Box

"What are the two words that will
open lots of doors in your life ?

Push and pull."

Merci...

« On ne termine pas une thèse dans le même état qu'on l'a commencée » m'a-t-on avertie quand j'ai débuté ce travail. J'avais entendu ces mots en 2010, j'en comprends pleinement le sens aujourd'hui. Cette thèse est à présent terminée, et je dois cet aboutissement à l'encadrement et aux nombreux soutiens dont j'ai bénéficié pendant ces 4 années.

Je remercie très chaleureusement Cécile, qui a accepté de m'encadrer dans cette thèse. Notre collaboration a été des plus enrichissantes pour moi, tant sur le plan professionnel que personnel. Merci de m'avoir transmis cette passion de la recherche, dans ces moments partagés au labo et ailleurs. Merci pour ta patience, tes conseils et ta disponibilité, et surtout, merci d'avoir cru en moi.

Je remercie également Pierre pour son œil bienveillant, sa disponibilité et la générosité dont il fait preuve dans la transmission de son savoir. Merci aussi pour toutes les discussions, scientifiques ou culturelles, que nous avons pu avoir.

Merci à Françoise Dureau et Arnaud Banos qui ont accepté d'être rapporteurs de cette thèse, ainsi qu'à Lena Sanders et Éric Cornélis, pour l'intérêt porté à mon travail en participant à ce jury.

Qui dit Mobisim dit Mobiwizard, et j'adresse à Gilles cette énième requête, pour son aide et sa patience dans mes balbutiements informatiques : Select *mot* From *champ_lexical* Where *id = 'Merci'* ! Avec et sans « h », je remercie Jean-Philippe pour la Mobiteam et Guy van de Marchand, modélisateur à ses heures : « Destinie, nous étions tous destinie ».

Merci à FP, qui m'a accompagnée dans mes débuts de géographe, et encouragée dans cette voie où je ne serai peut-être pas allée toute seule. Merci chaleureusement à Armelle, magicienne de la représentation graphique, et à Hélène pour leur soutien. Merci à Jérôme, Odile, Françoise, Brigitte et tous les membres du laboratoire. C'est une chance inouïe et un réel confort matériel, intellectuel et humain de faire sa thèse à ThéMA. On y rencontre toujours un sourire, un mot bienveillant au détour d'un couloir et j'ai été riche de cela. Merci à tous ceux que j'ai croisé quotidiennement, pour votre disponibilité et votre gentillesse.

J'ai eu le plaisir de partager mon bureau avec des collègues dont la concentration au travail n'a d'égal que la gentillesse et cette folie de l'esprit qui fait de petits riens devenir de bons fou-rires et des grands souvenirs. Merci à Kawtar : avant, on était saines d'esprit, mais ça c'était avant ! Un "Big up" à Nico, traileur-baroudeur-bombineur : MQ / MR, même combat, toutes choses égales par ailleurs. Merci pour ton soutien, et sache aussi que pour cette voie de la thèse, tu as tout le matos qu'il faut ! À Max, et à la famille tortue, pour cette synchronisation depuis le Master dans les terres du nord et dans l'adversité, et pour m'avoir fait rire quand j'en avais besoin : merci tout plein (et Moien !). Enfin, une pensée pour Caro en souvenir de ces fabuleuses premières années sous le signe du bureau-poulailler.

Un grand merci aux compagnons de route, de couloirs, et de pauses (bien que pas trop longues) pour un quotidien plus sôvâge pendant ces quatre années. À Samy, Chedi-géographe, pour sa passion du modèle *push-pull* et pour son aide, l'R de rien. À Éric, pour sa précieuse présence au labo pendant les vacances universitaires et ses tentations peau-de-phoquiennes, à Romain-leCouz' au biseau, à Alain Jánošík pour l'âge de glace et le grand méchant loup, sans oublier Thomas, pour sa bienveillance et sa zen-attitude communicative, et Céline pour le coaching moral intensif et tenace, you rock. À Clem, dear representative binôme, etpuis-mercibeaucoupàYannpoursonsoutientoutça. Aux prochains, et aux ex- : Val., Vincent, Yohan, Marc, Émilie, Sophie, Medhi, Pierline, Hélène, Camille et les autres. Le chemin du doctorant est moins menaçant quand on est plusieurs, et ça, ça ne se simule pas !

Je tiens également à remercier tous ceux que j'ai croisé lors de formations, séminaires, *summer-school* (Le Havre, si tu me reçois.. !), ou pendant le projet Vilmodes, parce que c'est certain, votre rencontre et les discussions que nous avons eu m'ont fait avancer dans mon travail, d'une manière ou d'une autre.

Je décerne la palme des anges gardiens à celles qui m'ont soutenue intensément au quotidien en dehors du labo, fidèles au poste jusqu'au bout. À ma flamboyante Séverine, pour tout le monde et l'univers, merci « beautoup ». *Anda alejo alejo*, et plus que jamais, à tes souhaits ! À Célia, mon Ironwoman des couloirs de Jules Haag aux chemins de trail, des mercis pour les Paris-Brest, la lutte anti-boulets et pour tout le reste. Māuruuru roa à Anne-de-Bretagne, la plus badass des substituts au pied levé et compagne de la dernière ligne droite rédactionnelle *stricto sensu*. Merci à Cocci-Laure et Antoine, qui avalent des mouches quand ils roulent sur leur vélo, pour ces si précieuses parenthèses strasbourgeoises, et à Clémence, la meilleure des B.I.Woman.

Un merci bonus à ceux qui ont accepté de (re)lire cette thèse pour y dénicher les intrus, et merci encore aux "figurants", qui n'en sont pas.

À tous les autres, "et al., (2010-2014)", que je ne n'oublierais pour rien au monde, d'amicaux remerciements. Vous qui avez patienté, demandé, montré de l'intérêt, encouragé, compris et prononcé ces attentionnés « Tu t'en sors ? Tu finis quand ? ». Et bien voilà, on y est ! Merci infiniment d'avoir été là, même quand je ne l'étais pas vraiment notamment ces derniers mois. Je vous en dois une bonne !

J'embrasse très fort Camille-le-Roublon, mon ptit bonheur, et Eli-le-Champi, dont les sourires et la joie de vivre m'ont régulièrement offert de précieuses bouffées d'air frais, et un peu d'insouciance.

Tusen takk à Bruno, sans l'impulsion de qui faire une thèse ne me serait sans doute pas venu à l'esprit. Merci pour ton soutien lors des moments de doute dans mon parcours, et merci pour tout, aussi.

Merci à mes parents, pour le soutien indéfectible pendant toutes ces années : c'est aussi grâce à vous si je suis arrivée jusqu'ici. Merci (et bravo !) à mes frangines, pour cette belle trilogie qui va du ch'nord à l'hémisphère sud, en passant par le Jura !

Je voudrais enfin tâcher de signifier mon attachement à celui qui aime les taches (pistache !) sans en être une. À mon alter ego version paysagiste, Xavier, des mercis gros comme ça pour avoir tacheté ce quotidien thésard de soutiens mutuels, de fou-rires et d'un bluetooth sans faille. La borne incendie du deuxième va me manquer, mais en-théorie-normalement-si-tout-se-passe-bien, ça ne s'arrête pas là, n'est-ce pas ?

Résumé

Proposer une offre en logements adaptée aux différents besoins et préférences des ménages représente un enjeu important pour les acteurs publics de l'aménagement. Ces besoins et préférences dépendent des caractéristiques des ménages et des changements qu'ils peuvent connaître dans leur cycle de vie (mise en couple, naissance, séparation...). Les facteurs participant aux choix résidentiels sont nombreux (attributs du logement, caractéristiques de l'environnement résidentiel) et interviennent différemment selon les types de ménages. Les dynamiques résidentielles impliquent ainsi une grande variété d'éléments, en interaction les uns avec les autres, et les relations de cause à effet sont difficiles à identifier. Par conséquent, il n'est pas possible de prévoir le comportement résidentiel des ménages pas plus que leurs évolutions possibles sans outil adapté.

Pour étudier les dynamiques résidentielles intra-urbaines, nous utilisons dans cette thèse un modèle de simulation des mobilités résidentielles (Mobisim-MR) intégré dans une plateforme de simulation LUTI individu-centrée : Mobisim. Mobisim-MR permet de déterminer, pour chaque année de simulation, les ménages qui déménagent et leur nouvelle localisation résidentielle. En amont de Mobisim-MR, un modèle de simulation des évolutions démographiques (Mobisim-Démo) a été créé au sein de la plateforme Mobisim. Il permet de reproduire de manière dynamique et individu-centrée l'évolution des ménages dans leur cycle de vie. Une partie de la thèse est dédiée au paramétrage de ces deux modèles, étape préalable nécessaire à la simulation de scénarios.

Un autre volet de la thèse concerne l'exploration du comportement du modèle Mobisim-MR pour évaluer la stabilité des résultats de simulation et leur cohérence (analyse de sensibilité). L'utilisation de modèles individu-centrés est relativement récente en géographie, d'où l'absence de protocole standard pour l'exploration de tels modèles. Un protocole spécifique a été conçu pour explorer le comportement de Mobisim-MR. Ce protocole tient compte de la nature des paramètres du modèle, des contraintes techniques de simulation et de l'objectif pour lequel le modèle a été conçu.

Le dernier volet de la thèse consiste en des analyses thématiques visant à étudier l'impact de deux scénarios de politiques de construction de logements sur l'agglomération du Grand Besançon. Ces analyses montrent la capacité de Mobisim-MR à répondre à des questions concrètes d'aménagement et à apporter des éléments de discussion aux acteurs publics en charge des politiques de logement.

Abstract

To ensure that housing supply is suitable to households' needs and preferences represents a major planning concern. These needs and preferences depend on the households' characteristics and on their lifecycle changes (union, birth, divorce...). Residential choice factors are numerous (housing and residential environment characteristics) and their role is often different according to the types of households. Residential dynamics involve a great variety of elements, in interaction with each other, and the causal relationships are difficult to identify. Thus, it is not possible to predict the households' residential behaviour, nor their possible evolutions, without a suitable tool.

To study intra-urban residential dynamics, we use a residential mobility simulation model (Mobisim-MR), integrated in an agent-based LUTI simulation platform : Mobisim. For each simulated year, Mobisim-MR allows for determination of households which move and their new residential location. Prior to Mobisim-MR, we created a demographic microsimulation model (Mobisim-Démo) within the Mobisim platform. It allows reproducing households lifecycle evolutions in a dynamic and agent-based way. A part of the thesis is dedicated to the calibration of both models, a required stage preliminary to scenarios simulation.

Another part of the thesis concerns the exploration of Mobisim-MR model behaviour, in order to assess the simulation results' stability and their consistency (sensitivity analysis). Agent-based models use is quite recent in geography, explaining the lack of standard protocol to explore such models. A specific protocol has been designed to explore the behaviour of Mobisim-MR. This protocol takes into consideration the parameters characteristics, simulation technical constraints, and the initial design for which the model has been built.

The last part of the thesis consists of thematic analyses aimed at studying the impact of two housing construction planning scenarios in the urban region of Besançon (named le Grand Besançon). These analyses highlight the ability of Mobisim-MR to answer concrete planning questions and to initiate discussion among urban planners.

Table des matières

Remerciements 5

Résumé 9

Abstract 11

Introduction générale 19

I Présentation des modèles 45

Chapitre 1. La plateforme de simulation Mobisim 49

1.1 Qu'est-ce que Mobisim ? 50

1.1.1 Une plateforme de simulation LUTI 50

1.1.2 Une plateforme de simulation individu-centrée 55

1.1.3 Une plateforme pour l'aide à la décision - la simulation comme média, support de discussion 57

1.2 La simulation avec Mobisim : fonctionnement de la plateforme 59

1.2.1 Initialiser le modèle : génération du cadre agents / espace 59

1.2.2 Simuler les évolutions des individus et de l'environnement 62

1.2.3 Simuler les mobilités 66

1.2.4 Données 68

1.3 Mobisim : d'hier à aujourd'hui 69

1.3.1 Mobisim ATN - 1999 à 2008 69

1.3.2 Mobisim à ThéMA - depuis 2008 71

1.4 Conclusion 74

Chapitre 2. Le modèle de simulation des évolutions démographiques (Mobisim-Démo) 75

2.1 Pourquoi simuler les évolutions démographiques dans Mobisim ? 76
2.1.1 Le cycle de vie des ménages, clé des mobilités résidentielles . . . 76
2.1.2 La simulation des évolutions démographiques au service des modèles de mobilités résidentielles 77
2.1.3 Rôle et enjeux de Mobisim-Démo 79
2.2 Présentation générale du modèle démographique de Mobisim 80
2.2.1 Un modèle de microsimulation dynamique 80
2.2.2 Caractéristiques générales du modèle 83
2.3 Formalisation des évènements démographiques 85
2.4 Fonctionnement du modèle : des variables en interactions 91
2.5 Conclusion 94

Chapitre 3. Le modèle de simulation des mobilités résidentielles (Mobisim-MR) 97

3.1 Caractéristiques générales du modèle 98
3.1.1 Entités élémentaires de Mobisim-MR 98
3.1.2 Les évaluations résidentielles : le ménage versus les logements . 99
3.1.3 Un modèle géographique 101
3.1.4 Connaître l'attractivité des logements vacants 101
3.1.5 *"To move or not to move, that is the question"* 102
3.1.6 Un modèle, des évolutions 104
3.2 Formalisation de la décision résidentielle dans Mobisim 105
3.2.1 Les variables du modèle 105
3.2.2 Appréciations et importances : des évaluations à la source de la décision 111
3.2.3 La satisfaction et l'intérêt d'un ménage H vis-à-vis des localisations résidentielles I et J 116
3.2.4 L'attractivité $Y_{IJ}(H)$ de chaque destination : *push-pull* 119
3.2.5 La mobilité individuelle φ_H, ou mobilité intrinsèque du ménage 120
3.2.6 L'intérêt global à déménager $M_{IJ}(H)$ dans l'agglomération : une référence collective 120
3.2.7 La probabilité de déménager $\Omega_J(H)$ 122
3.2.8 Le choix de la nouvelle destination $\Psi_{IJ}(H)$ 123

3.3 La simulation des mobilités résidentielles avec Mobisim-MR : fonctionnement du modèle . . . 123
3.3.1 Déroulé d'une simulation . . . 123
3.3.2 Évolutions simulées . . . 125
3.3.3 Récapitulatif du rôle des variables dans le modèle . . . 126
3.4 Conclusion . . . 128

II Paramétrage des modèles 133

Chapitre 4. Paramétrage du modèle des évolutions démographiques . . . 137

4.1 La mission du paramétrage : objectifs et comportements démographiques 138
4.1.1 Les objectifs à atteindre avec le paramétrage : simuler un prolongement des tendances actuelles . . . 138
4.1.2 Comportements démographiques modélisés . . . 140
4.2 Quantifications initiales . . . 141
4.2.1 Quantifier les objectifs à atteindre . . . 141
4.2.2 Quantification des paramètres de Mobisim-Démo . . . 146
4.2.3 Résultats de la simulation avec les valeurs initiales de paramètres 156
4.3 Calibrage de Mobisim-Démo . . . 158
4.3.1 Calibrage pour atteindre l'objectif PLH . . . 159
4.3.2 Calibrage pour atteindre l'objectif TEAM . . . 161
4.3.3 Calibrage pour atteindre la projection linéaire . . . 164
4.3.4 Bilan du calibrage . . . 166
4.4 Paramétrage final du modèle . . . 168
4.4.1 Bilan du paramétrage du modèle d'évolutions démographiques de Mobisim . . . 168
4.5 Perspectives pour le modèle et conclusion . . . 171

Chapitre 5. Paramétrage du modèle des mobilités résidentielles . . . 181

5.1 Enjeux et définition du paramétrage de Mobisim-MR . . . 182
5.1.1 Objectif : simuler les tendances actuelles... . . . 182
5.1.2 ... à partir des comportements résidentiels des individus. . . . 183
5.1.3 Spécificités des paramètres . . . 184
5.1.4 Une démarche de paramétrage itérative . . . 186
5.2 Paramétrage des évaluations résidentielles : quantification floue d'évaluations subjectives . . . 187

5.2.1 Appréciations et préférences du logement et de l'environnement résidentiel local . . . 187
5.2.2 Quantification des importances . . . 196
5.3 Paramétrage initial des variables de la dynamique de la décision . . . 204
5.3.1 Paramètres de la mobilité individuelle : quantifier α et β . . . 204
5.3.2 L'intérêt global à déménager : trois paramètres pour une variable 208
5.4 Résultats obtenus avec les valeurs initiales des paramètres . . . 210
5.5 Conclusion . . . 211

III Exploration et validation du modèle de mobilités résidentielles 215

Encart technique . . . 219

Chapitre 6. Analyse de stabilité : objectifs, outils et résultats . . . 223

6.1 Tester la stabilité dans Mobisim-MR : pourquoi ? comment ? . . . 224
6.1.1 De la nécessité de tester la stabilité des résultats d'un modèle de simulation . . . 224
6.1.2 Quels résultats analyser ? . . . 225
6.1.3 Un outil statistique unique fondé sur la variabilité . . . 228
6.2 Objectif 1 : tester la variabilité des résultats sur 100 simulations. . . . 229
6.2.1 Axe 1 : variabilité en début et en fin de simulation . . . 230
6.2.2 Axe 2 : évolution de la variabilité . . . 231
6.2.3 Bilan de la variabilité entre les 100 simulations . . . 238
6.3 Objectif 2 : définir un seuil de stabilité dans la variabilité . . . 238
6.3.1 Une démarche par l'échantillonage multiple . . . 238
6.3.2 Des résultat unanimes : un seuil unique pour l'ensemble des résultats . . . 240
6.4 Conclusion : des résultats stables . . . 241

Chapitre 7. Analyse de sensibilité . . . 243

7.1 Conduire une analyse de sensibilité pour Mobisim-MR : objectifs, approches et mise en œuvre . . . 245
7.1.1 Méthodes d'analyse de la sensibilité . . . 245
7.1.2 L'analyse de sensibilité de Mobisim-MR : choix méthodologiques 250

7.2 Les paramètres des évaluations résidentielles 263
7.2.1 Les valeurs d'appréciations 263
7.2.2 Sensibilité vis-à-vis de la modification des valeurs de l'échelle des importances ω_H 281
7.3 Le coût du logement 293
7.3.1 Sensibilité vis-à-vis de la modification du paramètre « taille du logement » correspondant à un coût du logement maximal $\mu(cout|superficie)$ 294
7.3.2 Sensibilité vis-à-vis de la modification du paramètre « revenu médian dans le voisinage » correspondant à un coût du logement maximal $\mu(cout|voisinage)$ 297
7.3.3 Sensibilité vis-à-vis de la modification de la part respective des paramètres « taille du logement » et « revenu médian dans le voisinage » dans le calcul du coût du logement μ 300
7.3.4 Sensibilité vis-à-vis de la modification de la probabilité d'affectation des valeurs de $P(\kappa_1)$, $P(\kappa_2)$ et $P(\kappa_3)$ à chacune des classes de coût 303
7.4 L'intérêt global à déménager : tester l'impact des valeurs n_J et $A_H(v_J)$ 308
7.4.1 Exploration de l'attractivité des ménages 309
7.4.2 Analyse de sensibilité des paramètres d'attractivité des ménages 329
7.5 Sensibilité vis-à-vis de la modification des valeurs d'α dans chacune des classes de mobilité individuelle φ 345
7.5.1 Impact local sur la mobilité individuelle φ intra-classe 348
7.5.2 Impact local sur la probabilité de déménager Ω intra-classe . . . 357
7.5.3 Impact de la modification du paramètre α de chaque classe de mobilité individuelle sur le taux annuel de migration intra-classe 362
7.5.4 Impact global sur la mobilité individuelle φ 364
7.5.5 Impact global sur la probabilité de déménager Ω 368
7.5.6 Impact de la modification du paramètre α de chaque classe de mobilité individuelle sur le taux annuel de migration 371
7.5.7 Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation du paramètre 372
7.6 Conclusion 372
7.6.1 Synthèse des résultats de sensibilité de Mobisim-MR 372
7.6.2 Bilan de l'analyse de sensibilité 384

IV Analyses thématiques **391**

Chapitre 8. Simulation d'un prolongement des tendances sur l'agglomération du Grand Besançon **399**

8.1 Paramétrage du scénario « prolongement de tendances actuelles » . . . 400
8.1.1 La situation initiale : données sources . . . 400
8.1.2 Scénarisation des prolongements de tendance (BAU) . . . 401
8.2 Résultats de simulation du scénario BAU . . . 405
8.2.1 Résultats généraux . . . 405
8.2.2 Focus sur les ménages cibles . . . 414
8.3 Conclusion des analyses sur le scénario prolongement de tendances . . . 425

Chapitre 9. Simulation de la mise en œuvre d'une politique volontariste de construction de logements par la Ville de Besançon **427**

9.1 Paramétrage du scénario de développement résidentiel contrôlé (DC) . 429
9.2 Résultats de simulation : comparaison des deux scénarios . . . 431
9.2.1 Migrations et satisfaction résidentielle . . . 431
9.2.2 Localisation des ménages cibles dans l'agglomération . . . 434
9.2.3 Localisation de l'offre vacante attractive pour les ménages cibles 434
9.3 Bilan de cette analyse . . . 439

Conclusion générale **443**

Bibliographie **449**

Table des figures **469**

Liste des tableaux **479**

Annexes **485**

Introduction générale

Les mobilités résidentielles se rapportent aux comportements migratoires, individuels (décision de déménager, choix de localisation) et agrégés (flux migratoires) d'une population. Les mobilités résidentielles intra-urbaines sont étudiées au sein d'une agglomération urbaine, sans tenir compte des migrations sur de plus longues distances (inter-urbaines, inter-régionales). Explorer ces mobilités résidentielles intra-urbaines signifie 1) en définir les facteurs pour chaque type de ménage, 2) étudier les configurations spatiales résultantes dans une agglomération (flux migratoires, concentrations locales de différents types de ménages) et 3) en tester les évolutions possibles face à des modifications de l'environnement dans lequel elles s'effectuent, à savoir l'offre de logements disponible, l'offre de commerces, services et équipements, l'accessibilité aux espaces verts, etc.

La complexité qui ressort de ces comportements peut être abordée à l'aide d'un modèle de simulation multi-agents - Mobisim dans le cadre de cette thèse - et interprétée en vue d'apporter des résultats pertinents pour l'aide à la décision en aménagement. Mobisim modélise des individus, appartenant à des ménages localisés dans des logements, et permet de simuler leurs changements de localisation résidentielle au sein d'une agglomération. La dynamique du modèle résulte de ces changements de localisation résidentielle (Mathian et Tannier, à paraître).

Le travail de thèse porte sur l'exploration de ce modèle, de la quantification des paramètres à l'exploration des résultats qu'il simule. Cette introduction générale permet de définir les contextes - tant au niveau de la thématique résidentielle qu'en ce qui concerne la méthodologie employée - du sujet et de présenter les questionnements et la démarche qui ont guidé ce travail de modélisation en géographie, qui mobilise des concepts et des outils d'autres disciplines, notamment l'économie et l'informatique.

Mieux comprendre les mobilités résidentielles : une nécessité pour l'aménagement urbain

La question du logement est particulièrement prégnante pour les collectivités locales qui doivent être en mesure de proposer une offre suffisante et adaptée pour répondre à la demande de la population. Cette demande dépend entre autres de l'effectif et de la composition de la population, ainsi que de la structure des ménages. En effet, selon le revenu, l'âge ou la composition des ménages, leurs besoins et leurs attentes en logements diffèrent et évoluent.

Les collectivités territoriales doivent faire face aux évolutions structurelles de la population (AUDAB, 2005; Gaube et Remesch, 2013) et aux demandes qui y sont liées. Parmi les tendances démographiques actuelles, le vieillissement de la population et la diminution de la taille moyenne des ménages affectent considérablement la nature de la demande en logements (Haase *et al.*, 2010; Prioux *et al.*, 2010). Par exemple, en vieillissant, les ménages ont tendance à se rapprocher des villes, ou du moins des commerces et services (Authier *et al.*, 2010a), et certaines personnes âgées préfèrent déménager d'une maison à un appartement pour diminuer l'entretien du logement. Une augmentation du nombre des ménages vieillissants accentue donc potentiellement la pression sur les zones urbaines et sur certains types de logements. Inversement, certaines personnes âgées vivant seules font le choix de rester dans de grands logements afin, par exemple, d'y accueillir leur famille (Megbolugbe *et al.*, 1999; Bonvalet, 2005). Le rééquilibrage entre le nombre de personnes dans le ménage et la taille du logement n'est donc pas systématique.

La diminution de la taille moyenne des ménages trouve son origine dans une double conjoncture : d'une part, l'augmentation du nombre de couples en situation de décohabitation, c'est-à-dire de couples dont les partenaires choisissent de conserver chacun leur logement, et d'autre part l'augmentation du nombre de séparations. Ces deux phénomènes favorisent la création de « ménages seuls », ce qui a pour effet d'amplifier les besoins en logements de petite et moyenne taille notamment. Lorsque la séparation concerne un couple avec enfants, une garde alternée peut encourager chacun des exconjoints à rechercher un grand logement, avec suffisamment d'espace pour accueillir les enfants. De plus, leurs revenus étant généralement plus faibles (Feijten et Mulder, 2010), ces ménages monoparentaux recherchent des logements à la fois grands et à moindre coût. Le statut d'occupation du logement peut également être remis en cause : si le couple était propriétaire, la séparation implique souvent qu'au moins une des deux

personnes, celle qui quitte le logement, redevienne locataire (Bonvalet et Brun, 2002; Bonvalet, 2005; Feijten et van Ham, 2008; Gram-Hanssen et Bech-Danielsen, 2008).

Les aménageurs sont également confrontés à des demandes auxquelles ils peuvent difficilement répondre. Par exemple, la demande de maisons individuelles au plus proche des espaces verts est particulièrement forte depuis quelques décennies (Attwell, 2000; TNS Sofres, 2007; Pattaroni *et al.*, 2009; Youssoufi, 2011; Debroux, 2012). De telles offres étant limitées en ville, les ménages se tournent vers les communes périphériques pour satisfaire leurs attentes (Bonvalet et Brun, 2002; Pochet et Routhier, 2002). Les villes-centres voient ainsi une partie de leur population leur échapper, et avec elle une partie de leurs recettes fiscales. De surcroît, elles doivent répondre aux difficultés engendrées par cet éloignement des populations, pour ce qui est des déplacements quotidiens et de l'accessibilité notamment. Parvenir à limiter ces migrations résidentielles des zones urbaines aux zones périurbaines, en tentant de suppléer cette offre, représente donc un véritable défi pour les acteurs publics des communes urbaines (Haase *et al.*, 2010).

La durabilité des territoires est largement abordée dans les politiques publiques. Développer durablement l'offre résidentielle implique de pouvoir anticiper, à plus ou moins long terme, les différents besoins des ménages, aussi diversifiés soient-ils. Savoir si ces besoins peuvent être satisfaits, et ce de manière durable, constitue donc un enjeu majeur en aménagement. Une meilleure connaissance des choix et des préférences résidentiels s'avère utile dans ce contexte. La compréhension des mobilités résidentielles qui en résultent paraît essentielle pour identifier des leviers d'action pour l'aménagement urbain.

La décision spatiale à l'origine des dynamiques résidentielles

La notion de mobilité résidentielle recouvre plusieurs aspects, notamment les motifs de départ du lieu de résidence et le choix d'un nouveau logement. Elle concrétise une décision de déménager, et toute décision de déménager aboutit à un changement de domicile. Le processus sous-jacent est complexe : pourquoi déménager ? Comment se passe la décision ? Où déménager ?

Les raisons qui poussent un ménage à changer de localisation résidentielle sont nombreuses, et il est important de faire la distinction entre deux types de mobilités. Les mobilités résidentielles souhaitées, ou mobilités d'ajustement (Clark et Onaka, 1983; Hooimeijer et Oskamp, 1996), dont l'amélioration du lieu de vie (logement, environne-

ment résidentiel) est la principale motivation, s'opposent aux mobilités induites, dont les impulsions ne sont pas liées au logement même (changement de travail, séparation d'un couple, arrivée d'un nouvel enfant, etc). Mulder (1996) résume la mobilité résidentielle comme un rééquilibrage de la situation vécue par un ménage, entre ses besoins et ce que le logement lui apporte. Le comportement résidentiel, quel qu'il soit, traduit donc une nécessaire adéquation entre la situation du ménage et le logement qu'il occupe (Baker, 2002; Homocianu, 2009). Benenson (2004) évoque par ailleurs la notion de dissonance résidentielle, qui renvoie à l'insatisfaction d'un ménage vis-à-vis de son lieu de vie.

Les éléments fondateurs de la décision sont ainsi liés aux caractéristiques du lieu de vie et à celles du ménage (Raju *et al.*, 1998), et les changements d'état de l'un ou de l'autre sont généralement les principales sources d'insatisfaction (Mulder, 1996). Le lieu est défini par la conjonction entre le site et la situation (Dieleman et Mulder, 2002). Le site dépend de ses caractéristiques propres (ex. la taille du logement), tandis que la situation est définie relativement, par les accessibilités notamment (ex. temps d'accès aux commerces et services). Le voisinage social d'un logement fait également partie de ses caractéristiques. Les modifications potentielles d'un lieu de résidence sont donc nombreuses : augmentation du coût du loyer ou des taxes locales, proximité de nouvelles infrastructures de transport, nuisances dans le voisinage ou modifications des accessibilités, ouverture d'une crèche ou d'une école.

Les caractéristiques des ménages rassemblent elles toutes les variables permettant de le décrire : l'âge, la composition du ménage, le nombre d'enfant(s), les revenus sont le plus fréquemment énoncés dans la littérature. Elles évoluent également à travers les différentes étapes du cycle de vie.

Les cycles de vie des ménages

Il est communément admis dans la littérature que la mobilité résidentielle est étroitement liée aux étapes du cycle de vie des individus (Speare, 1970; Clark et Onaka, 1983; Courgeau, 1984; Kendig, 1984; Lindberg *et al.*, 1992; Nijkamp *et al.*, 1993; Dieleman, 2001; Bonvalet et Brun, 2002; Royer, 2007; Authier *et al.*, 2010b; Stockdale et Catney, 2014; Smith et Olaru, 2013; Jordan *et al.*, 2014). Le cycle de vie est défini par Clark et Onaka (1983) comme *"the changing demographic characteristics of a household as it progresses from initial situation to dissolution"* [1], et c'est à travers les évènements démographiques qu'il évolue pour chaque ménage : naissance d'un nouvel enfant, dé-

1. « l'évolution des caractéristiques démographiques d'un ménage, de sa formation à sa dissolution »

cès d'un membre de la famille, émancipation d'un enfant, séparation du couple, entre autres. Les évènements démographiques, par les modifications qu'ils entraînent dans le ménage, sont des déclencheurs potentiels de décalage entre ce dernier et sa situation résidentielle, et donc d'insatisfaction : le logement devient trop grand, trop petit, trop cher, trop loin. Les évènements démographiques déclenchent certes des besoins mais également des envies, comme l'accès à la propriété par exemple. Enfin, ils peuvent être à l'origine de différences entre les intentions et les déménagements (De Groot *et al.*, 2011) : la séparation d'un couple peut arrêter un projet en cours (travaux, achat) et provoquer le déménagement de l'un des deux conjoints.

Étant données les évolutions démographiques récentes et le constat de cycles de vie moins réguliers qu'auparavant, Jordan et al. (2014) proposent de lier davantage la décision de déménager à l'insatisfaction résidentielle plutôt qu'aux cycles de vie. Ces deux notions demeurent quoi qu'ils en soit fondamentales dans la compréhension des mobilités résidentielles.

La décision résidentielle : facteurs *push* et facteurs *pull*

L'importance de la satisfaction, ou plutôt de l'insatisfaction, comme baromètre de la situation résidentielle est récurrente dans la littérature (Baker, 2002; Ge et Hokao, 2006), mais elle ne suffit pas, à elle seule, à déclencher la décision de déménager. Elle doit être mise en regard d'autres critères comme des besoins et des préférences en matière de logement, mais également des critères endogènes au ménage tels que les expériences passées et les émotions personnelles (Brown et Moore, 1970; Hedman *et al.*, 2011; Nicod *et al.*, 2012). La décision dépend également des contraintes du ménage (Brummell, 1979; Mulder, 1996; Pellegrini et Fotheringham, 2002), qui peuvent être budgétaires ou familiales. Une grande part de la décision de déménager relève donc de la relation entre ce que le ménage est, ce qu'il possède déjà, et ce qu'il pourrait avoir. Ces différents critères sont définis dans la littérature comme facteurs *push* et *pull* (Ettema *et al.*, 2007).

Les facteurs *push*, ou facteurs de propension à l'action, poussent l'individu en dehors de son logement, par l'évaluation de ce qu'il connaît. Ils préparent l'individu dans son choix à travers l'insatisfaction qu'il ressent vis-à-vis de sa situation résidentielle actuelle (Brown et Moore, 1970; Tannier *et al.*, 2012a). Une grande partie de ces facteurs est liée au cycle de vie des ménages (Rossi, 1955), mais peut également être d'ordre familial, psychologique ou économique. Un changement de situation professionnelle par

exemple peut avoir un impact sur ce que les ménages peuvent supporter financièrement (Jordan *et al.*, 2014) et développer un mal-être dans le logement occupé. L'aspiration à retrouver une situation proche d'expériences résidentielles passées, pendant l'enfance par exemple, peut également déclencher une décision de déménager (Feijten et van Ham, 2008; Chen et Lin, 2011).

Les facteurs *push* n'ont pas tous le même impact temporel sur la décision et sur la mobilité résidentielle. Certains sont immédiats, intervenant à un temps t (décès, séparation), d'autres sont des processus cumulatifs se transformant en événements déclencheurs au-delà d'un certain seuil (nuisance dans le voisinage, dégradation de la réputation du quartier ou encore éloignement de la famille).

Les facteurs *pull*, ou facteurs de choix, représentent ce qui incite le ménage à aller vers une autre localisation résidentielle. Ils représentent les souhaits de vivre ailleurs, les préférences des individus. Ils correspondent à ce que l'individu pourrait connaître, et appartiennent de fait au non-vécu. Ils découlent de divers éléments tels que la connaissance des conditions résidentielles locales, l'attractivité des lieux, le bouche-à-oreille, la réputation des lieux et les idées reçues. Ils existent indépendamment de la nécessité de l'action de migrer : un individu peut trouver un lieu de vie agréable sans pour autant envisager d'y emménager.

Ces facteurs dépendent de plusieurs types de caractéristiques : celles des individus et celles des lieux et du contexte général du territoire dans lequel le ménage vit (contexte économique, social ou politique (Bonvalet et Brun, 2002; Tannier *et al.*, 2012a)). Les caractéristiques considérées comme facteurs *push* ou comme facteurs *pull* peuvent être les mêmes, mais elles interviennent différemment.

Les interactions *push-pull*, moteurs du processus de décision

Les facteurs *pull* et leur importance dans la prise de décision vont dépendre de l'origine des motifs qui conduisent le ménage à changer de logement (Brummell, 1979) ; en cela, les facteurs *push* et *pull* interagissent dans la décision résidentielle des ménages. Ces interactions traduisent le caractère dynamique de la décision : un ménage ne se contente pas d'un élément déclencheur, ou d'un coup de cœur par rapport à un logement, pour décider de déménager. Sa réflexion, de la prise de décision au choix du nouveau logement, intègre l'ensemble des facteurs énoncés précédemment, en regard les uns avec les autres.

L'interaction *push-pull* la plus souvent citée résulte de la comparaison entre la satisfaction actuelle (facteur *push*) et la satisfaction que le ménage pourrait ressentir dans un autre logement (facteur *pull*) (Smith *et al.*, 1979; Ben-Akiva et Palma, 1986; Weidlich et Haag, 1988; Ettema *et al.*, 2007; Benenson, 2004; Haase *et al.*, 2010). Elle renvoie à la notion d'attractivité des lieux par rapport au lieu de vie actuel du ménage, et traduit les questions suivantes : compte tenu de ma situation et de mes besoins actuels, existe-t-il ailleurs un logement qui me serait plus adéquat ? Quelle est l'attractivité des autres logements par rapport à celui que j'occupe ? Plus la satisfaction du ménage dans son logement est faible, plus les opportunités lui seront attractives. Cette interaction conduit à une propension plus ou moins grande du ménage à prendre sa décision, et le prépare à l'éventualité de déménager.

Il arrive également que le ménage compare sa situation actuelle non pas avec des logements existants mais avec une situation désirée, ou ressentie comme optimale (Ettema *et al.*, 2007; Ettema, 2011), qui représente alors le facteur *pull*. Ce sont les besoins et les préférences du ménage qui le conduisent alors à imaginer ce qui pourrait être mieux pour lui, parfois sans savoir si des opportunités correspondent effectivement à ses attentes (Benenson, 2004).

Dans la littérature, le résultat de cette première interaction est appelée *propension à migrer* ou *stress résidentiel* (Brummell, 1979; Weidlich et Haag, 1988). Lorsque ce stress est élevé, le ménage peut envisager d'explorer le marché immobilier en vue de déménager.

La recherche et le choix du nouveau logement fonctionnent souvent par comparaison avec le logement que le ménage quitte (Thomas *et al.*, 2011), l'objectif étant que le déménagement le conduise à un lieu de vie qui lui apportera davantage de satisfaction. Cette comparaison constitue elle aussi une interaction *push-pull*. Si une alternative se révèle intéressante pour lui, alors le ménage peut choisir d'y emménager. Toutefois, Benenson (2004) décrit cette interaction comme une résistance au déménagement, puisque le ménage peut préférer ne pas changer de localisation résidentielle s'il considère que cela n'en vaut pas la peine.

Indépendamment de l'adéquation avec le logement, des facteurs individuels des ménages peuvent également freiner ou accélérer la décision, et influencer le temps nécessaire pour entériner le passage à l'acte du déménagement (Griffond-Boitier *et al.*, 2012). Parmi eux, la durée écoulée depuis le dernier déménagement (Speare, 1970), les négociations intra-familliales, l'investissement (matériel ou affectif) dans le loge-

ment et le temps passé dans le logement (Megbolugbe *et al.*, 1999) représentent un coût moral qui n'est pas négligeable dans la prise de décision. S'ajoutent à cette liste l'énergie nécessaire au déménagement et la mobilité intrinsèque des ménages. À motifs de déménagements égaux, la mobilité n'est pas la même pour tous. Elle varie notamment selon les caractéristiques socioéconomiques des ménages : les ménages plus riches, moins freinés par les coûts de transaction, vont être plus mobiles (Clark et Dieleman, 1996; Rabe et Taylor, 2010), la mobilité sera plus élevée pour les ménages jeunes et diplômés (Ioannides, 1987), et les personnes âgées n'envisageront pas un déménagement avec autant de facilité que des jeunes adultes (Megbolugbe *et al.*, 1999).

Conjointement aux interactions évoquées précédemment, tous ces facteurs individuels peuvent ralentir ou remettre en question la prise de décision. De plus, ils interviennent de manière différente selon la configuration des opportunités (Bonvalet, 2010), *via* la connaissance que le ménage a du marché immobilier et de l'image qu'il s'en fait. Si le ménage sait qu'il n'y a pas beaucoup d'offres correspondant à sa demande, il peut vouloir ne pas passer à côté d'une opportunité, et ainsi diminuer ses exigences en mettant de côté certains aspects de la décision qui étaient pour lui des freins. Au contraire, il peut justement ne pas vouloir prendre de risque, et décider de mettre en avant des considérations personnelles, le conduisant ainsi à annuler ou reporter son intention de déménager. S'il considère que le marché lui est favorable, le ménage peut au contraire accélérer sa démarche afin de s'assurer un choix satisfaisant (Hooimeijer et Oskamp, 1996). La perception que le ménage a du contexte immobilier, considérée alors comme une référence collective, peut donc également créer un décalage entre les intentions du ménage et sa décision finale. L'interaction entre les comportements individuels et cette référence collective est également une interaction *push-pull* (Tannier *et al.*, 2012a).

La décision de déménager : un processus complexe

La dynamique résidentielle fait l'objet de nombreuses études, et ce depuis quelques décennies maintenant, mais il reste « difficile de synthétiser de façon simple ces comportements qui mettent en jeu des facteurs complexes »(Griffond-Boitier *et al.*, 2012). En effet, la dynamique résidentielle implique une grande variété d'éléments, en interactions les uns avec les autres ; les dynamiques à l'œuvre sont non linéaires. Comme dans tout système complexe, les relations de cause à effet sont difficiles à identifier. Il n'est pas possible de prévoir le comportement résidentiel des ménages, pas plus que leurs évolutions et les conséquences sur le territoire en termes de satisfaction ou de mobilité. De par leur complexité, il est difficile voire impossible d'étudier les dynamiques résidentielles sans modélisation (Mulder, 1996).

Les outils de simulation permettent de modéliser et de simuler les dynamiques urbaines futures. La modélisation permet de distinguer les différents facteurs et de formaliser leurs interactions, en liant des caractéristiques spatiales aux préférences et aux caractéristiques humaines (Pellegrini et Fotheringham, 2002) ; la simulation permet de faire émerger les comportements qui en découlent. La simulation des décisions résidentielles paraît donc particulièrement adaptée pour mieux comprendre les mobilités résidentielles, et offre une voie d'étude pour l'aménagement (Batty *et al.*, 2012).

La modélisation des mobilités résidentielles

La modélisation des mobilités résidentielles est reconnue comme étant l'un des principaux défis dans les sciences sociales actuelles (Haase *et al.*, 2010; Gaube et Remesch, 2013). De nombreux modèles de mobilités résidentielles ont déjà été développés. Ils se différencient les uns des autres à plusieurs égards : leur approche du processus de décision et des interactions entre les ménages, leurs niveaux d'agrégation ou encore leur prise en considération de l'espace.
Une des spécificités du déménagement dans le monde occidental est qu'il est très rare de déménager sans connaître le prochain lieu de résidence (Mulder, 1996; Dieleman, 2001) ; aussi ne seront évoqués ici que des modèles visant à travailler sur les mobilités occidentales, puisque les logiques sous-jacentes à la mobilité résidentielle dans d'autres cultures ne seront pas les mêmes (Dureau, 2002).

1. **L'espace**. Une des premières distinctions entre les différents modèles de mobilités résidentielles a trait à l'espace, et porte sur plusieurs aspects : la portée de la mobilité considérée, les entités de référence modélisées et la prise en compte de l'espace dans les variables de choix.

   – Certains modèles considèrent les migrations inter-régionales (Weidlich et Haag, 1988; Sanders, 1992; Pellegrini et Fotheringham, 1999), intra-régionales (Wegener, 1985; Lauf *et al.*, 2012) ou intra-urbaines, c'est-à-dire au sein d'une agglomération ou d'une métropole (Benenson, 1998; Hedman *et al.*, 2011; Jordan *et al.*, 2011).

   – La modélisation de chaque type de mobilité implique une granularité spatiale différente, et les modèles de même échelle présentent des différences souvent imputables à l'objet d'étude pour lequel ils ont été conçus. Dans le cas des

mobilités intra-urbaines, puisque ce sont celles qui nous intéressent dans ce travail, les entités de référence sont couramment le logement ou le quartier. Dans les travaux de Hedman et al. (2011) portent sur le choix du voisinage et les attributs considérés dans les choix des ménages sont ceux des quartiers. C'est également le cas dans le modèle Simbad (Nicolas *et al.*, 2009), où les flux de mobilités sont calculés entre les IRIS [2]. Mais la plupart des modèles de mobilités intra-urbaines considèrent le logement et ses attributs, intégré dans un environnement résidentiel, comme entité de référence pour la modélisation (Wegener, 1985; Hooimeijer et Oskamp, 1996; Kim *et al.*, 2005; Haase *et al.*, 2010).

– Les premiers modèles de choix résidentiels basés sur les choix discrets [3], étaient aspatiaux (Pellegrini et Fotheringham, 2002), c'est-à-dire qu'ils ne considéraient pas l'espace dans les variables de décision (Onaka et Clark, 1983; Ben-Akiva et Palma, 1986). A l'inverse, un modèle est dit spatialement explicite lorsque les ménages sont explicitement localisés dans l'espace (Zellner, 2008; Crooks et Heppenstall, 2012). Ils ont donc conscience à la fois de leur environnement et de la structure urbaine, ce qui leur permet d'en tenir compte dans leurs choix, à travers les notions de proximité et d'accessibilité. L'espace peut être modélisé sous forme de zonages, de grille ou de manière plus fine avec les bâtiments et les logements. Par exemple, Ettema et al. (2007) utilisent une grille pour représenter l'occupation du sol, chaque cellule de la grille contenant des entités spatiales plus fines telles que les logements, les bâtiments commerciaux et les emplois. Les réseaux de transport sont également modélisés. Filatova et al. (2009) font de même, et localisent également un centre-ville et des aménités vertes, afin de tenir compte de leurs proximités. Benenson (1998) utilise également une grille dont chaque cellule représente une maison individuelle. L'environnement résidentiel considéré par les ménages est un carré de 5 cellules par 5 autour de la maison. Benenson (2004) précise cette démarche en représentant plus précisément les bâtiments, et en définissant leur voisinage par des polygones de Voronoi calculés à partir du centroïde de ces derniers. Les voies de communication de la ville sont également utilisées dans le calcul du voisinage.

2. « Ilôts Regroupés pour l'Information Statistique » : maille de découpage territorial infracommunale créée par l'Insee en 1999, pour la diffusion des résultats du recensement général de la population au niveau intra-urbain.

3. Les modèles de choix discret sont des modèles probabilistes, développés notamment en économie et en psychologie (De Palma et Thisse, 1987).

2. **Les entités sociales de référence.** La plupart des modèles intra-urbains considèrent le ménage comme entité de référence pour la prise de décision de déménager ; ceci signifie que les hypothèses de comportement sont posées au niveau des ménages (Hooimeijer et Oskamp, 1996; Pellegrini et Fotheringham, 1999; Devisch *et al.*, 2006; Jordan *et al.*, 2011; Lauf *et al.*, 2012). Dans le cadre d'une recherche plus ciblée sur la décision au sein d'un couple, Timmermans et al. (1992) se préoccupent des préférences de chaque conjoint, et l'entité de référence est donc l'individu. Le niveau de diversité des entités (individus, ménages) dépend du nombre de caractéristiques choisies pour les qualifier. Les règles implémentées peuvent différer selon leurs caractéristiques, permettant ainsi de tenir compte de la diversité des comportements observés dans la réalité.
   Ces modèles s'inscrivent dans la logique des modèles entité-centrés ou individu-centrés, c'est-à-dire qu'ils représentent explicitement les « entités qui composent la population considérée »(Amblard, 2003). Ils se focalisent sur le niveau microscopique ou micro-géographique du système étudié.

3. **Les dynamiques modélisées.** La considération des interactions entre les ménages, qu'elles soient directes ou indirectes, est également source de différences entre les modèles. Ne pas modéliser ces interactions revient à considérer que chaque entité élémentaire prend sa décision indépendamment de ce qui se passe par ailleurs dans l'agglomération (Wegener, 1985). À l'opposé, dans les modèles dits dynamiques, les décisions des uns peuvent avoir un impact sur les décisions des autres. Les interactions ont lieu entre les ménages ou entre les ménages et leur environnement dans les modèles désagrégés (Sanders, 2007; Zellner *et al.*, 2010; Crooks et Heppenstall, 2012), ou entre groupes d'entités (sociales ou spatiales) dans les modèles plus agrégés (Weidlich et Haag, 1988). La vacance des logements est un bon exemple pour les modèles désagrégés : si un ménage décide de déménager, son logement deviendra vacant et donc disponible dans les possibilités de choix d'un autre ménage. Cette interaction repose donc, au moins pour partie, sur les choix faits par les autres ménages (Fagiolo *et al.*, 2007). La modélisation du marché à travers l'offre et la demande représente également une interaction (Ben-Akiva et Palma, 1986). L'environnement social constitue un autre exemple, puisque le déménagement des uns entraînent potentiellement des modifications dans la composition sociale du voisinage des autres. Ces changements peuvent avoir des conséquences sur le comportement de ménages à l'égard de leurs voisins : c'est le cas des modèles de ségrégation socio-spatiale notamment (Benenson,

1998), où les ménages, suivant les règles de comportements implémentés et des seuils de tolérance définis, s'adaptent et déménagent si leur environnement social ne leur convient plus. Il s'agit d'une dynamique de systèmes.

Les modèles dynamiques les plus connus sont les modèles multi-agents, qui appartiennent à la famille des modèles individu-centrés (Crooks et Heppenstall, 2012). Les travaux de Benenson (1998, 2002 et 2004) et de Jordan et al. (2011, 2014) peuvent être cités dans cette catégorie, ainsi que le modèle LocSim de Hooimeijer et Oskamp (1996) ou RESMOBcity de Haase et al. (2010). L'apport des sciences computationnelles, c'est-à-dire basées sur le calcul informatique *via* l'ordinateur, a considérablement favorisé le développement de ces modèles de simulation (Grimm *et al.*, 2006).

Les modèles multi-agents sont fondés sur une approche ascendante, ou *bottom-up* : à partir des interactions entre les agents (ménages, individus) et de leur perception de l'environnement émergent des configurations spatiales globales (Crooks et Heppenstall, 2012). Les individus et les bâtiments évoluant chaque année, ces configurations évoluent également au cours de la simulation. Les modèles dynamiques permettent donc d'identifier des changements de comportements issus des interactions, et de comparer les structures qui émergent entre différents scénarios simulés (Huang *et al.*, 2013).
Les modèles multi-agents offrent une grande flexibilité (ex. hétérogénéité des agents), notamment dans la modélisation des décisions, ce que les autres types de modèles n'offrent pas (Huang *et al.*, 2013). L'approche *bottom-up* les rend particulièrement attrayants pour la simulation des mobilités résidentielles (Haase *et al.*, 2010). En effet, l'enjeu des acteurs locaux est de pouvoir identifier quels aménagements peuvent infléchir certaines trajectoires (ex. : le départ des familles des centres-villes) : la production de structures émergentes à partir de comportements individuels en interactions d'une part, et la possibilités d'analyser les trajectoires résidentielles des ménages dans le temps d'autre part, positionnent donc les modèles agents comme outils privilégiés pour l'aide à la décision.

4. **La connaissance du marché du logement.** Les questions du lieu de vie et de la connaissance du marché du logement sont abordées différemment selon les modèles. Dans les modèles hiérarchiques de choix discret (les modèles *hierarchical logit* ou *nested logit*) par exemple, le ménage sélectionne d'abord un quartier dans lequel il choisira ensuite un type de logement puis un logement précis ; c'est le cas

du modèle de Onaka et Clark (1983) ou de Nijkamp et al. (1993). Ceci présuppose une connaissance restreinte des offres de logements, limitée au seul quartier choisi au début du processus. Les ménages du modèle de Gaube et Remesch (2013) présélectionnent une région en fonction des prix maximum qu'ils peuvent investir dans leur logement. Dans d'autres modèles encore, le choix se porte davantage sur le logement, caractérisé par un environnement résidentiel, sans pré-sélection spatiale au préalable. C'est le cas du modèle de Jordan et al. (2011) dans lequel chaque ménage teste toutes les alternatives, pour choisir au final celle qui lui conviendra le mieux. Quel que soit le point de vue choisi, la connaissance limitée du marché est souvent représentée dans les modèles (Brummell, 1979; Smith *et al.*, 1979; Benenson, 2004; Devisch *et al.*, 2009; Ettema *et al.*, 2011), et le modèle de Jordan et al. (2011) fait plus figure d'exception que de norme.

La connaissance limitée du marché ne doit pas être confondue avec la rationalité limitée des ménages, en micro-économie ; elle n'en est qu'une composante. La rationalité limitée des ménages considère trois aspects dans la décision des ménages : un individu ne peut connaître toute l'offre disponible ; ses capacités cognitives ne lui permettent pas de considérer tous les facteurs de choix dans sa décision (Mulder, 1996; Manson *et al.*, 2012) ; ses capacités cognitives ne lui permettent pas d'anticiper l'évolution de ses appréciations dans le temps (Magliocca *et al.*, 2011). Le choix résultant ne peut donc être optimal (Zhu et Timmermans, 2010). Certains modèles restreignent la connaissance des ménages sur l'offre en logements sans pour autant se revendiquer des théories micro-économiques. En opposition à la rationalité limitée, en économie classique, on parle de rationalité parfaite ou de choix rationnel, en assumant que le ménage est capable de quantifier et classer tous les facteurs de choix (classement ordinal des préférences), et donc d'optimiser sa décision (Fagiolo *et al.*, 2007; Zhu et Timmermans, 2010). On parle alors de « maximisation de l'utilité » : le ménage choisit le logement qui lui apportera la meilleure situation résidentielle, l'utilité étant définie comme une mesure de satisfaction pour l'acquisition d'un bien. On parle enfin d'« utilité espérée » lorsque le ménage anticipe dans son choix les changements qu'il va traverser dans sa vie et la satisfaction résidentielle qui en découlera. Hooimeijer et Oskamp (1996) appellent ces déménagements des déménagements prospectifs, c'est-à-dire basés sur l'anticipation des besoins futurs. Devisch et al. (2009) modélisent cette anticipation à travers leur *expected lifetime utility*. Les modèles de choix résidentiels récents tendent à conceptualiser des comportements rationnels, mais sur l'évaluation d'un nombre restreint de logements (Devisch *et al.*, 2009).

5. **Les préférences résidentielles.** La modélisation des mobilités est souvent liée aux études sur le choix résidentiel. Ce dernier implique de s'intéresser aux préférences des ménages, et deux approches s'opposent dans les travaux, entre les préférences déclarées et les préférences révélées. Les préférences déclarées sont les préférences réelles des ménages, dans l'absolu, sans contrainte aucune (Mulder, 1996) ; elles reflètent leurs intentions et leurs souhaits. Beaucoup insistent sur la nécessité de les considérer pour être au plus proche de la réalité ressentie des ménages (Timmermans *et al.*, 1992; Fernandez *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2005), et elles sont majoritairement présentes dans les travaux de modélisation des choix résidentiels (Benenson, 2004). Les préférences révélées sont les préférences observées, ou révélées par les choix qui ont été faits ; elles sont donc plus facilement observables. La principale limite de cette approche est de représenter davantage le choix que les préférences, et de ne pas tenir compte des préférences latentes des ménages (Vasanen, 2012). Timmermans et al. (1994) leur reconnaîssent tout de même la qualité de considérer les préférences non pas à huis clos, mais dans le contexte et les disponibilités du marché immobilier. Certains travaux combinent les deux (Adamowicz *et al.*, 1994; Earnhart, 2001), afin de pallier les défauts et manques de chacune des deux méthodes. Benenson (2004) considère également la complémentarité des deux approches : les préférences déclarées permettent d'établir les règles de comportement des ménages, tandis que les préférences révélées participent à la validation des modèles.

6. **Le processus de décision résidentielle.** La modélisation de la décision et la considération des interactions *push-pull* varient selon les modèles. La décision de déménager est couramment conceptualisée en deux phases successives (Onaka et Clark, 1983; Nijkamp *et al.*, 1993; Jordan *et al.*, 2011) : le ménage décide tout d'abord de déménager ou non, et choisit ensuite une nouvelle destination résidentielle en fonction de préférences et de choix (Hedman *et al.*, 2011) ; cette conceptualisation est appelée *two stages* (Mulder, 1996). Certains, comme Nijkamp et al. (1993) divisent même la décision en deux modèles différents, et non deux étapes d'un même modèle : un modèle de mobilité résidentielle (qui va déménager ?) et un modèle de choix. Les modèles appelés *three stages* ajoutent à la recherche du nouveau logement une étape de choix final, consistant à déménager ou non, compte tenu des possibilités identifiées (van Lierop et Rima, 1982; Ben-Akiva et Palma, 1986). Dans ces modèles, propension à migrer, recherche du logement et choix du nouveau logement sont considérés comme différentes étapes successives.

Les choix conceptuels pour chacune des étapes diffèrent selon les modèles. La première étape, l'évaluation de la propension à migrer du ménage, dépend souvent de l'insatisfaction du ménage, liée à un changement de situation familiale ou de l'environnement résidentiel dans lequel il habite. Gaube et Remesch (2013) comparent la satisfaction du ménage avec un seuil d'insatisfaction fixe : lorsque ce seuil est dépassé, le ménage envisage de déménager. Jordan et al. (2014) évaluent pour chaque ménage une propension à migrer selon ses caractéristiques seules et la comparent avec une valeur générée aléatoirement. Si la propension à migrer du ménage dépasse cette valeur, alors il est autorisé à envisager un déménagement, et donc à passer à la seconde étape : la recherche d'un nouveau logement qui lui conviendrait mieux, parmi les logements vacants. Le choix du logement ne tient pas forcément compte d'une comparaison avec le logement actuel : il dépend souvent des besoins ou des préférences (déclarées ou révélées) des ménages, définis en amont selon leurs caractéristiques (Lauf *et al.*, 2012; Jordan *et al.*, 2014). Ainsi, ces modèles sont non seulement séquentiels, mais ils ne considèrent aucune interaction *push-pull* dans leur modélisation de la décision.

D'autres modèles, malgré la conceptualisation séquentielle de la décision, intègrent au moins une interaction *push-pull*. La première interaction *push-pull*, la propension à migrer, est la plus fréquemment modélisée : Smith et al. (1979) comparent une utilité espérée d'un quartier avec l'utilité vis-à-vis du logement actuel du ménage. La différence entre les deux génère un stress résidentiel qui peut encourager le ménage à chercher un nouveau logement dans ce quartier. Ben-Akiva et de Palma (1986) formalisent aussi la propension à migrer dans la relation entre le logement connu et les logements possibles. Hooimeijer et Oskamp (1996) formalisent, au moment du choix du nouveau logement, un taux d'acceptation dont la limite inférieure équivaut à la situation actuelle. Ils modélisent ainsi la seconde interaction *push-pull* et garantissent au ménage d'améliorer sa situation résidentielle en déménageant dans un logement dont l'attractivité lui est positive.
Enfin, Benenson (2004), par sa modélisation de l'approche *"stress-resistance"*, conceptualise la décision comme un processus en deux étapes, chaque étape étant une interaction *push-pull*. Moins fréquente dans la littérature, cette conceptualisation signifie que le ménage compare systématiquement sa situation actuelle avec ce qui est potentiellement intéressant pour lui, à la fois au moment de prendre sa décision de déménager et au moment de choisir le nouveau logement. Le mé-

nage a ainsi la possibilité de ne pas changer de localisation résidentielle si aucune alternative ne lui convient. Le modèle des mobilités résidentielles de Ettema et al. (2007) appartient à cette catégorie : à partir de la situation actuelle et de situations potentielles, chaque ménage calcule une utilité optimale qui lui sert de référence à la fois dans sa propension à migrer et dans son nouveau choix.

7. **L'intégration de dynamiques autres que résidentielles.** Ce dernier point concerne la prise en compte d'autres dynamiques conjointement avec la dynamique résidentielle. Les mobilités résidentielles ne dépendent en effet pas uniquement des ménages et des logements. En tant que système, elles sont reliées à d'autres systèmes tels que les évolutions démographiques, les politiques publiques et les mobilités quotidiennes (Huang *et al.*, 2013). Afin de construire un modèle cohérent, tous ces systèmes doivent être abordés conjointement, dans leurs interactions et leurs interdépendances (Wilson, 2010). Étudier les mobilités résidentielles indépendamment des autres systèmes reviendrait à les considérer en huis clos, limitant la complexité du processus et rendant incomplètes les réponses apportées. Certains travaux tiennent compte de ces interactions systémiques, en combinant les modèles de mobilités résidentielles à d'autres modèles.

   Hooimeijer et Oskamp (1996) par la nature *"event-driven"* de leur modèle, intègrent les évolutions démographiques ; c'est également le cas de Nijkamp et al. (1993) et de Wegener (1983), dont le modèle dispose d'un filtre démographique afin de représenter les évolutions des ménages dans leur cycle de vie.
   Haase et al. (2010) et Lauf et al. (2012) modélisent, conjointement aux déménagements, les évolutions démographiques et le développement résidentiel, dans un modèle où la ville peut rétrécir [4] : lorsque les ménages ne sont pas satisfaits de l'offre, ils peuvent sortir de la zone d'étude (migrations *out*), et après cinq années consécutives de vacance, un logement peut être détruit. Ainsi, les trois dynamiques (évolutions démographiques, développement résidentiel et mobilités résidentielles) rétroagissent les unes sur les autres. Cornelis et al. (2012) combinent quant à eux les mobilités résidentielles avec la démographie et les mobilités quotidiennes.
   Les modèles les plus complets intègrent les quatre composantes dans ce qu'il est classique de nommer les modèles LUTI (*Land Use and Transport Interaction*). C'est le cas des travaux de Wegener et al. (1991) avec le modèle Illumass sur la ville de Dortmund, de Waddell et al. (2000, 2003) avec UrbanSim, d'Ettema et

4. Communément appelé *"shrinkage scenario"*.

al. (2007) avec le modèle PUMA. Ces modèles permettent ainsi l'intégration du système urbain dans une dynamique complète.

Modélisation des dynamiques résidentielles dans la plateforme de simulation Mobisim

Pour étudier les dynamiques résidentielles intra-urbaines, nous avons choisi d'utiliser un modèle des mobilités résidentielles intégré dans une plateforme de simulation plus large : Mobisim (Antoni *et al.*, 2011; Antoni, 2011). Il s'agit d'une plateforme LUTI, qui permet de simuler les interactions entre différents processus : mobilités quotidiennes et résidentielles, mais également évolutions démographiques et développement résidentiel. Les différents modèles intégrés dans Mobisim sont individu-centrés et considèrent en entrée des données totalement désagrégées, aussi bien au niveau des individus que des entités spatiales (bâtiments et logements). La plateforme fonctionne selon une modélisation informatique itérative, le pas de simulation étant d'une année, ce qui signifie que les individus, les ménages et l'espace évoluent au cours des simulations. Les modules de mobilités permettent de recréer les comportements des agents, en interaction avec leur environnement. Mobisim permet la simulation de scénarios d'aménagement, pour une approche prospective.

Au sein de cette plateforme, le modèle des mobilités résidentielles (Mobisim-MR) permet de déterminer, pour chaque année de simulation, les ménages qui déménagent et leur nouvelle localisation résidentielle (i.e. un logement localisé dans un environnement résidentiel). L'interaction de Mobisim-MR avec d'autres modèles permet de modéliser les comportements de déménagement dans un système plus large, en tenant compte des différents facteurs extérieurs influençant les dynamiques résidentielles. Les mobilités sont modélisées à travers la décision résidentielle des ménages, basée sur la satisfaction résidentielle et l'attractivité des lieux. En amont, la modélisation des évolutions démographiques fait évoluer chaque année les ménages dans leur cycle de vie, ce qui entraîne une réévaluation systématique de leur satisfaction. Sont considérées dans cette évaluation les caractéristiques du logement, et de l'environnement résidentiel dans lequel il s'inscrit. Notons toutefois que le modèle ne modélise pas le fonctionnement du marché immobilier. La dynamique résidentielle dépend de la différenciation entre les lieux (site et situation) combinée aux caractéristiques des ménages.

Une des particularités de Mobisim-MR est de focaliser la décision résidentielle sur les interactions *push-pull*. Lorsqu'il n'est pas satisfait de sa situation résidentielle, et

compte tenu du coût que représente un déménagement, un ménage ne s'engage dans une démarche de changement de domicile que s'il sait qu'il y a une possibilité de trouver un nouveau logement qui correspondrait mieux à ses attentes. C'est la première interaction *push-pull* du modèle : elle correspond à l'identification d'une possible amélioration de la situation résidentielle, à travers l'attractivité du territoire. Une seconde interaction *push-pull* est présente dans le calcul d'une probabilité de déménager : elle traduit le passage à l'acte ou non du ménage. Cette probabilité dépend de l'interaction entre une perception du contexte immobilier et la mobilité intrinsèque des ménages. Les références collectives dépendent de l'attractivité du territoire pour chaque ménage, ce qui englobe la décision dans un processus unique, composé de plusieurs éléments en interactions les uns avec les autres.

Intégré dans la plateforme Mobisim, le modèle des mobilités résidentielles Mobisim-MR est un modèle prospectif, qui a pour vocation de simuler les mobilités à partir de règles de comportements basées sur des faits stylisés.

De la conception du modèle à son utilisation

Le point de départ de la thèse est le modèle des mobilités résidentielles de Mobisim (nommé ici Mobisim-MR), formalisé sous la forme d'équations et implémenté informatiquement dans la plateforme de simulation, ce qui implique deux points : aucune valeur n'est attribuée aux différents paramètres, et le modèle n'a jamais fait l'objet de simulation, c'est-dire que l'on ne dispose d'aucune connaissance sur la cohérence des résultats qu'il peut générer. L'objectif de la thèse est donc de procéder aux différentes étapes nécessaires à l'utilisation du modèle Mobisim-MR, de son paramétrage à sa validation, afin 1) de simuler des scénarios et 2) d'en exploiter les résultats.

Le paramétrage du modèle Mobisim-MR

La première étape de la thèse consiste à affecter aux paramètres du modèle des valeurs qui permettent de représenter des phénomènes ou processus, en fonction d'objectifs définis au préalable. La première question posée dans ce travail est donc la suivante : quelles valeurs affecter aux différents paramètres de Mobisim-MR pour obtenir des résultats cohérents ?

Le paramétrage d'un modèle s'organise différemment selon deux éléments clés : la nature des paramètres et la disponibilité des données pour en définir les valeurs (Richiardi *et al.*, 2006). Compte tenu de la structure du modèle Mobisim-MR, de son

imbrication dans une structure de simulation plus globale, et du grand nombre de variables à renseigner, son paramétrage nécessite une réflexion approfondie avant sa mise en œuvre. Les comportements résidentiels impliquent des évaluations subjectives, et nous nous interrogerons sur la manière de les formaliser. Par ailleurs, la nature du paramétrage de toute variable dépend beaucoup de la disponibilité de la donnée qui s'y réfère. S'il existe une donnée qui correspond directement à la variable, alors le paramétrage renvoie simplement à l'affectation d'une valeur. Si la donnée n'existe pas, une alternative doit être trouvée : simulation de la donnée ou estimation de la valeur à travers un calibrage par essai-erreur, par exemple.

Exploration et validation du modèle Mobisim-MR

Une fois le modèle Mobisim-MR paramétré, il est possible de le faire fonctionner afin d'obtenir des résultats de simulation. Cela étant, les processus modélisés s'inscrivent dans le concept de la complexité, et sans vérification du bon fonctionnement du modèle, nous n'avons aucune garantie sur la fiabilité des résultats de simulation. La seconde étape de la thèse vise donc à évaluer la stabilité, la cohérence et la qualité des résultats, en répondant aux questions suivantes : Mobisim-MR est-il capable de répondre aux objectifs pour lesquels il a été conçu ? Les résultats sont-ils cohérents ?

L'évaluation des modèles entité-centrés représente un enjeu pour les modélisateurs (Batty et Torrens, 2005; Richiardi *et al.*, 2006; Windrum *et al.*, 2007). Le type même des modèles implique qu'il n'existe pas de protocole standard pour permettre au modélisateur de valider son modèle d'une part, et pour comparer des niveaux de validité de différents modèles entre eux d'autre part. En effet, les modèles individu-centrés sont fondés sur l'émergence de comportements globaux à partir de variables comportementales individuelles : ce sont les règles de comportement, et les interactions entre les agents qui permettent de faire émerger des structures à l'échelle macro. Ces règles sont définies à partir d'observations du processus (tendances observées ou données empiriques) dont on souhaite reproduire ou explorer la dynamique (ex. les changements des localisations résidentielles). Néanmoins, les données, nécessaires à la fois à la conceptualisation du modèle et à la validation des résultats de simulation, ne sont pas toujours disponibles ou adéquates : elles représentent les phénomènes (ex. localisation des ménages à un temps T), et non les processus (ex. la décision résidentielle des ménages) à l'œuvre. Elles consistent donc souvent en des fréquences observées mais ne permettent pas de détailler le comportement lui-même (ex. constater qu'une famille nombreuse réside dans un petit logement ne permet pas de comprendre pourquoi elle occupe un

logement *a priori* trop petit). Ceci implique que les interactions à modéliser (interactions entre agents ou entre les agents et leur environnement) sont souvent modélisées à travers des interactions probabilistes, pour pallier l'incertain. Dès lors, différentes configurations peuvent émerger à partir d'une même situation initiale.

Il est toutefois possible d'identifier plusieurs étapes permettant d'attester la validité globale d'un modèle individu-centré, étapes sur lesquelles nous nous sommes appuyés pour définir la démarche de validation de Mobisim-MR.

Analyse de stabilité.

Directement liée au caractère probabiliste des actions des agents, la première étape de validation d'un modèle individu-centré passe par l'analyse de la stabilité du modèle. On s'interroge ici sur la capacité de réplication d'un résultat pour un grand nombre de simulations (Ginot et Monod, 2007) : avec un même jeu de paramètres, le modèle est-il capable de simuler un même résultat, dans un certain intervalle de tolérance ? Pour confirmer la stabilité de son modèle, le modélisateur doit définir un seuil de précision attendue (Sargent, 2010). Cela peut s'apparenter, par exemple, à la définition d'intervalles de confiance des modèles statistiques. L'analyse de stabilité de Mobisim-MR vise donc à tester son comportement et sa variabilité sur plusieurs simulations, toutes choses égales par ailleurs.

Cette variabilité est due à la stochasticité du modèle dans l'émergence des résultats des simulations. Aussi, afin de produire des résultats fiables, il est nécessaire de répliquer un scénario plusieurs fois et de considérer la moyenne des valeurs de chaque résultat, plutôt qu'une valeur unique (Amblard, 2003; Huang *et al.*, 2013; Wegener, 2014). Le nombre de réplications nécessaire à la stabilisation de chaque valeur moyenne est également défini dans l'analyse de stabilité : combien de réplications le modèle Mobisim-MR nécessite-t-il pour stabiliser une valeur moyenne de résultat ?

Exploration du modèle.

Une fois la stabilité du modèle Mobisim-MR attestée, il convient d'explorer le fonctionnement de ce dernier afin d'évaluer la cohérence et la qualité de ses résultats. Notre objectif est de tester le comportement du modèle, de la manière la plus complète possible, afin de ne rien laisser au hasard dans l'interprétation des résultats.

L'exploration des modèles individu-centrés implique plusieurs étapes, qui ne sont pas toujours décomposées de la même manière dans la littérature. Quelles que soient leurs appellations, ces questions concernent globalement le développement informatique du modèle, les paramètres et la cohérence des résultats en sortie. Crooks et al. (2008), Manson (2012), et Ngo et See (2012) déclinent le protocole de validation en trois étapes, qui sont 1) la vérification du modèle (qui inclut la cohérence du code informatique avec les hypothèses formulées et l'analyse de sensibilité des paramètres), 2) le calibrage des paramètres et 3) la validation des résultats. Amblard et Rouchier (2006) parlent eux de validation interne et validation externe : la validation interne renvoie à la vérification de Crooks, tandis que la validation externe s'intéresse à l'adéquation entre le modèle et le phénomène qu'il représente. Sargent (2010) évoque uniquement les notions de vérification et de validation, en les décomposant différemment : vérification du modèle conceptuel, vérification du modèle informatique et validité opérationnelle. Il considère ainsi ce qui concerne le modèle lui-même d'une part, et tout ce qui a trait à la confrontation avec des données d'autre part.

L'ensemble de la démarche permet d'attester que le modèle peut répondre aux questions posées par le modélisateur, en implémentant correctement les hypothèses de départ (la *face validation* de Ngo et See, la validation interne d'Amblard et Rouchier ou les vérifications de Sargent) et en étant capable de représenter une certaine réalité (la validation de Ngo et See, la validation externe d'Amblard et Rouchier ou la validité opérationnelle de Sargent). Analyse de sensibilité et calibrage doivent plutôt être considérés comme des explorations et des ajustements des paramètres du modèle et sont souvent évoqués en décalage de la vérification et de la validation, bien qu'elles interviennent en amont de la validation, lorsqu'elles sont réalisées (Ngo et See, 2012; Jordan *et al.*, 2014).

Menées successivement, ces différentes étapes permettent au modélisateur non seulement une validation mais surtout l'apprentissage de son modèle, qui est une finalité en soi (Deffuant *et al.*, 2003; Amblard *et al.*, 2006). Enfin, il est important de garder à l'esprit qu'un modèle ne peut être validé dans l'absolu, puisqu'il est avant tout un outil relatif à un contexte de recherche. La fiabilité des résultats doit donc être définie par le modélisateur, compte tenu de la connaissance qu'il a de son modèle et de l'utilisation qu'il en fait. C'est donc dans ce contexte que la validation doit être pensée, en gardant toujours à l'esprit les objectifs pour lesquels le modèle a été conçu (Amblard *et al.*, 2006).

Chaque étape requiert du temps et les expérimentations peuvent être très consommatrices de données, dont le modélisateur ne dispose pas systématiquement (Windrum

et al., 2007; Batty *et al.*, 2012; Manson *et al.*, 2012). Chacune de ces étapes nécessite également une réflexion profonde dans sa mise en place (protocole détaillé de l'analyse, précision attendue ou souhaitée du résultat, nombre de paramètres à tester), en regard de l'objectif général du modèle d'une part et des besoins liés à l'exploitation des résultats d'autre part.

Dans le cadre de la thèse, le modèle Mobisim-MR n'a pas fait l'objet de vérification du code informatique. L'exploration du modèle commence avec l'analyse de sensibilité.

Analyse de sensibilité. Elle permet de mieux connaître le fonctionnement interne d'un modèle ; elle se focalise sur les paramètres du modèle, et la manière dont ils affectent son comportement et les résultats en sortie (Ngo et See, 2012), et ce à travers la variation des valeurs qu'ils peuvent prendre. En testant l'impact de différentes valeurs de chaque paramètre sur les résultats, elle permet 1) d'identifier les intervalles de valeurs pertinents pour représenter le système étudié et 2) d'évaluer l'importance respective de chaque paramètre dans le système modélisé. Ceci permet par la suite de sélectionner les paramètres les plus signifiants pour le modèle, en vue d'une éventuelle simplification méthodologique ou d'un apport de connaissance thématique.

Étudier la sensibilité d'un modèle implique également de questionner la dépendance des résultats aux conditions initiales de la simulation (Wilson, 2010; Barrios Garcia et Rodriguez Hernández, 2008). En effet, dans une approche probabiliste, il est important de connaître les conséquences de petites variations dans la situation initiale sur les résultats finaux. Certains auteurs intègrent la stochasticité du modèle (i.e. l'analyse de stabilité évoquée précédemment) dans la sensibilité (Richiardi *et al.*, 2006), en considérant le test du nombre de réplications à effectuer comme un paramètre à explorer.

Une analyse de sensibilité peut être menée de manière qualitative ou quantitative, mais également selon différentes approches des réponses du modèle (Schouten *et al.*, 2014) : les analyses dites locales se focalisent sur le comportement du modèle par rapport aux variations d'un paramètre à la fois, alors que les analyses dites globales s'intéressent à son comportement face aux variations simultanées des différents paramètres.

L'objectif principal de l'analyse de sensibilité de Mobisim-MR porte sur l'impact des différents paramètres sur les résultats du modèle, ce qui présente un double intérêt :

– un intérêt méthodologique, par l'approfondissement de la connaissance sur le fonctionnement interne de l'outil Mobisim-MR ;

– un intérêt thématique, en donnant une possibilité d'identifier, dans le processus de choix résidentiel des individus, les variables et les interactions qui influencent le plus la dynamique spatiale résidentielle d'une agglomération.

La démarche proposée ici repose sur l'expérimentation par la simulation (Ginot et Monod, 2007), avec la définition d'un échantillon des valeurs de paramètres à tester. L'impact des paramètres est évalué sur plusieurs résultats : des résultats généraux comme le taux de migration, et des résultats plus spécifiques à un paramètre pour étudier un impact très local des variations de valeurs.

Analyse exploratoire de la cohérence du modèle. Certaines sorties du modèle Mobisim-MR sont également des entrées lors d'étapes intermédiaires de calcul, et il est primordial d'évaluer leur cohérence : les valeurs d'attractivité des ménages sont-elles réalistes compte tenu de la zone d'étude ? Les comportements résidentiels des ménages dans leur prise de décision sont-ils cohérents avec les valeurs empiriques, en termes de taux de migration par exemple ? L'échantillon du nombre de logements dont le ménage a connaissance sont-ils représentatifs de l'offre globale modélisée ?

Analyse de sensibilité et analyse exploratoire, par les précisions qu'elles apportent sur chaque composante de la formalisation, aident à la maîtrise du modèle Mobisim-MR et fiabilisent l'interprétation des résultats. De plus, par l'intérêt porté aux relations entre différentes valeurs de paramètres et les valeurs de résultats, l'analyse de sensibilité permet de préparer le travail du calibrage.

Calibrage du modèle. L'objectif du calibrage d'un modèle est de « minimiser la différence entre le comportement simulé par le modèle et un comportement défini selon des connaissances expert et/ou des données » (Schmitt *et al.*, à paraître). Il consiste donc à tester plusieurs jeux de paramètres possibles pour certaines variables et à choisir l'un d'eux pour l'exécution des simulations. Il vient ainsi compléter le paramétrage du modèle Mobisim-MR, pour les variables dont on ne connaît pas l'ordre de grandeur et pour lesquelles il n'existe aucune donnée empirique. Manson et al. (2012) soulignent la difficulté rencontrée par les modélisateurs pour réunir les données nécessaires au calibrage, notamment pour les modèles agents, et cette étape est parfois évincée des processus de validation (Jordan *et al.*, 2014).

Validation des résultats.

D'une manière générale, la validation des résultats d'un modèle a pour objectif d'évaluer leur adéquation avec les observations réelles, finalisant ainsi la vérification de la cohérence du modèle avec la réalité du système représenté, selon les objectifs du modélisateur (Gilbert et Terna, 2000). Amblard et Rouchier (2006) parlent ici plutôt d'évaluation de la qualité du modèle, puisqu'il est parfois difficile de valider quantitativement les résultats. En effet, il n'est souvent pas possible de trouver de solution analytique dans les modèles complexes. Ceci est dû aux grand nombre d'interactions entre agents et à la formalisation non-linéaire de leur comportement qui induit des dynamiques *a priori* inconnues. C'est pourquoi l'exploration du comportement du modèle, à travers la simulation, est fondamentale dans la validation d'un modèle agent, cette dernière ne pouvant être formelle.

La validation d'un modèle, lorsqu'elle est menée par confrontation des résultats avec des données empiriques, nécessite un jeu de données supplémentaire, différent de celles utilisées pour la définition des hypothèses, le paramétrage ou encore le calibrage du modèle. Les chercheurs ne disposent pas forcément d'une telle quantité et variété de données. Certains travaux se passent d'ailleurs volontiers d'une validation quantitative (Jordan *et al.*, 2014). Néanmoins, des évaluations qualitatives peuvent compléter la démarche, en étudiant la cohérence des résultats avec des faits stylisés, souvent au niveau macroscopique (Amblard *et al.*, 2006), ou à l'aide de paroles d'experts. Notons que la validation d'un modèle, quelle qu'elle soit, ne doit pas être dissociée du jeu de paramètres avec lequel elle a été réalisée ; un modèle peut être validé dans une certaine configuration de paramètres, et invalidé dans d'autres (Sargent, 2010).

Amblard et Rouchier (2006) rappellent que la « validation d'un modèle reste un jugement humain », et que le modélisateur se doit uniquement de transmettre les moyens d'évaluer son modèle, plutôt que d'en donner des réponses. Un enjeu de la validation est donc de produire des résultats précis, tout en admettant qu'ils ne peuvent l'être complètement (Brown *et al.*, 2005).

Compte tenu de la structure du modèle Mobisim-MR, sa validation ne constitue pas une étape supplémentaire aux différentes étapes présentées jusqu'alors, mais se fait progressivement à travers elles. Chaque étape mène à des conclusions qui valident successivement différents aspects du modèle. L'analyse de stabilité permet de quantifier la stochasticité du modèle. L'exploration des résultats intermédiaires permet d'évaluer la cohérence du fonctionnement interne du modèle. Le calibrage enfin, dont l'objectif

est d'ajuster les valeurs des derniers paramètres pour faire concorder les résultats aux données empiriques, entérine le processus de validation du modèle en garantissant un jeu de valeurs de paramètres permettant la cohérence avec une réalité connue.

Impact de scénarios d'aménagement sur les mobilités résidentielles

Une fois validé, le modèle peut être appliqué en vue d'obtenir des résultats thématiques. La question considérée dans le cadre de la thèse est posée par la Ville de Besançon, qui déplore le départ des ménages avec enfant(s) vers les communes périphériques au détriment de la ville-centre. L'objectif est donc de tester par la simulation l'impact de deux scénarios réalistes de développement résidentiel sur les comportements de mobilités résidentielles de ces ménages (les couples avec enfant(s) et les familles monoparentales). Le premier scénario est un prolongement des tendances actuelles de développement résidentiel et du nombre de logements nouvellement construits (scénario BAU). Le second scénario simule une politique active de construction de logements, de grande taille notamment, dans la ville de Besançon. Les résultats de chacun des scénarios, en termes de vacance des logements, de satisfaction résidentielle et d'attractivité des communes et des IRIS par exemple, sont comparés entre eux. Les simulations sont exécutées sur une période de 20 ans (2010 à 2030), et la zone d'étude est l'agglomération du Grand Besançon.

La dynamique du modèle permet d'identifier les trajectoires des ménages cibles, et les moments clés dans les changements de comportement résidentiel. L'évaluation des résultats de simulation permet d'ouvrir des discussions sur les conséquences et l'efficacité des choix d'aménagement simulés, et sur les perspectives d'action pour la Ville de Besançon. Ces résultats de simulation permettent également de discuter de l'utilité du modèle, qui est une réduction et une simplification de la réalité, et de la simulation au regard du processus d'aménagement urbain.

Plan de thèse

La thèse est divisée en quatre parties, correspondant à chacune des principales étapes du travail. La première partie présente les différents outils utilisés. La plateforme de simulation Mobisim et ses enjeux font l'objet du premier chapitre, les deux chapitres suivants portant sur le modèle de simulation des évolutions démographiques et le modèle de simulation des mobilités résidentielles Mobisim-MR.

La deuxième partie de thèse est dédiée au paramétrage de ces deux modèles. La question des données et de leur utilisation pour le paramétrage sont mises en avant. Le paramétrage du modèle des évolutions démographiques doit permettre de reproduire les cycles de vie des ménages. Le paramétrage du modèle Mobisim-MR se fait par la quantification de faits stylisés, basée non pas sur les préférences révélées des ménages, mais sur des données statistiques locales permettant de définir des ordres de grandeur réalistes pour les paramètres et les variables.

Dans la troisième partie est abordé le protocole d'évaluation de la stabilité, de la qualité et de la cohérence du modèle, toutes indispensables à la validation du modèle. Analyses de stabilité, de sensibilité et d'exploration des résultats intermédiaires permettront de définir dans quelle mesure les résultats du modèle sont fiables.

La quatrième et dernière partie s'attelle aux scénarios d'aménagement et à l'analyse thématique des résultats de simulation. Après une présentation de la zone d'étude (l'agglomération du Grand Besançon), elle porte sur la mise à l'épreuve du modèle pour répondre à une question d'aménagement posée par les acteurs de la Ville de Besançon en charge de la politique du logement.

Une discussion des résultats, tant méthodologiques que thématiques, conclut cette thèse.

Première partie

Présentation des modèles

"The best way to predict the future is to invent it"

Alan Kay

"A model is an abstract simplification and representation of the real world rather than a complete replication of reality"

Chorley et Haggett

Introduction de la première partie

La mobilité urbaine est aujourd'hui un enjeu important dans le développement durable des territoires : en lien avec la localisation des personnes et des activités, elle est source de dynamiques spatiales et économiques dans une agglomération. Qu'elle soit quotidienne ou résidentielle, la mobilité des individus dessine, produit et impacte l'espace. Les mobilités résidentielles se distinguent des mobilités quotidiennes dans leur temporalité, dans les espaces qu'elles relient, dans les distances qu'elles parcourent. Elles résultent de comportements différents, et réagissent à des variables de choix différentes. La considération conjointe de ces deux types de mobilités est néanmoins indispensable (Huang *et al.*, 2013), mais il n'est pas possible d'en évaluer les impacts sans outils adaptés.

Depuis plusieurs décennies, la modélisation fait figure de méthode de prédilection pour aider les aménageurs à travailler au mieux avec cette complexité. La simplification et la représentation des comportements par le calcul permet de synthétiser le fonctionnement et les évolutions d'un territoire. Ainsi se développent des modèles urbains de simulation, dont la vocation est de répondre au mieux aux besoins des aménageurs, d'apporter des compléments d'information sur le présent et d'aider à anticiper ce que pourrait être le futur, sans avoir la prétention de le prédire. Les questions des aménageurs sont bien souvent formulées de la manière « que se passerait-il si [...] ? » ; ce « si » implique des éventualités, des scénarios, que seuls des modèles de simulation permettent de tester.

La difficulté n'est pas de répondre à ces questions avec un modèle, mais de trouver le bon modèle pour y répondre. Un modèle de simulation est avant tout une simplification de la réalité, et il existe une multitude de manières de simplifier la réalité. Aussi la conception et la construction d'un modèle impliquent des choix résultants de compromis, justifiés par les objectifs des modélisateurs. Quelles interactions considérer ? Lesquelles peut-on se permettre de négliger sans pour autant négliger la réalité ? Comment représenter au mieux les comportements des individus ? Quelles données uti-

liser et comment ? Autant de questions que les modélisateurs doivent se poser avant de pouvoir construire ces outils « d'invention de futurs ».

Parmi les choix de modélisation possibles, la modélisation systémique individu-centrée de type LUTI (*Land Use and Transport Interaction*) nous est apparue comme particulièrement adaptée. La première partie de cette thèse porte sur la modélisation telle qu'elle est envisagée dans la plateforme de simulation Mobisim. La présentation de la plateforme dans le chapitre 1 permet de comprendre les objectifs et la logique méthodologique générale sous-jacente à la conception d'une plateforme telle que Mobisim. Parmi les modèles qui composent Mobisim, deux d'entre eux ont été les outils de ce travail de thèse : le modèle de simulation des évolutions démographiques et celui des mobilités résidentielles. Ils sont décrits respectivement dans les chapitres 2 et 3. Il s'agit plus particulièrement de présenter les enjeux de la modélisation à travers 1) la définition des objectifs du modèle, 2) le choix des approches méthodologiques et 3) la formalisation de différents processus qui sont partie prenante de la dynamique d'une ville.

Chapitre 1

La plateforme de simulation Mobisim

Mobisim (Antoni, 2011; Antoni *et al.*, 2011) est une plateforme de simulation LUTI (*Land-Use and Transport Interaction*) individu-centrée consacrée à l'analyse géographique des dynamiques de mobilités résidentielles et quotidiennes. Son objectif est d'apporter une aide à la décision, notamment dans le cadre d'aménagements durables du territoire. Elle permet la simulation de scénarios prospectifs réalistes d'évolution de l'espace. Ces scénarios peuvent intégrer des modifications du contexte global d'une société telles que des évolutions démographiques, des modifications du coût de l'énergie ou des revenus des ménages ; du contexte local, comme l'aménagement d'une nouvelle infrastructure de transport ; ou encore des changements de comportements des individus comme les préférences résidentielles ou de choix modal de transport.

La plateforme Mobisim a été conçue originellement par l'entreprise ATN (Application des Nouvelles Technologies), repensée entièrement par Jean-Philippe Antoni et Gilles Vuidel, et complétée, notamment dans toute sa composante résidentielle, par Cécile Tannier. Certains contenus de ce chapitre (de la section 1.1.2 à 1.2.4 notamment) reprennent le contenu des publications Antoni (2011) et Antoni et al. (2011), ainsi que du site web de Mobisim : http ://thema.univ-fcomte.fr/mobisim/ .

Ce premier chapitre consacré à la présentation de Mobisim, présente les caractéristiques générales de la plateforme et les différents modèles qui la composent, en développant plus spécifiquement ceux qui ne font pas partie de cette thèse mais dont l'interaction avec les évolutions démographiques et les mobilités résidentielles apparaît essentielle. La dernière partie du chapitre permettra de retracer l'évolution de la plateforme dans le temps, et ainsi de mieux comprendre les enjeux liés au développement d'un tel outil.

1.1 Qu'est-ce que Mobisim ?

1.1.1 Une plateforme de simulation LUTI

1.1.1.1 La modélisation LUTI, une modélisation systémique des dynamiques urbaines

Modèle LUTI, modèle urbain (Wegener, 2004) ou modèle général (Wilson, 2010) : ces différentes appellations traduisent bien la volonté de modéliser le système urbain de manière globale et dynamique. Ces modèles sont basés notamment sur la représentation de la relation entre transports et urbanisme (ou utilisation des sols).

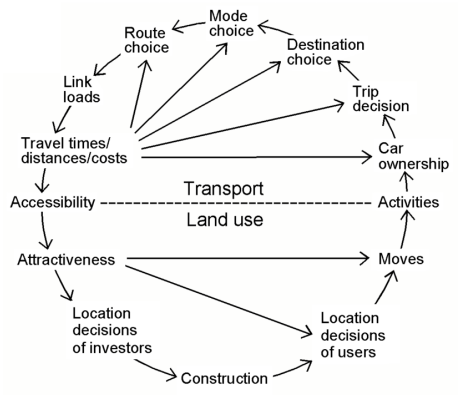


FIGURE 1.1 – Boucle de rétroaction entre transport et utilisation du sol de Wegener (Wegener, 2004)

Wegener (1999) synthétise cette relation dans une boucle de rétroaction (Fig. 1.1) : les localisations des différentes types d'utilisation des sols (logements, industries, commerces) influencent les activités qui influencent les systèmes de transport, qui à leur tour orientent les infrastructures de transport dont dépendent les accessibilités. De ces accessibilités va dépendre la localisation des ménages et des activités, impactant alors l'occupation du sol (Wegener, 2004). Cette relation est complexe et les différents sous-systèmes qui la composent sont en interaction les uns avec les autres. On parle de sous-systèmes pour décrire les processus en jeu dans la dynamique urbaine ; Wegener en distingue huit : les réseaux, l'utilisation des sols, les activités, les logements, les emplois, la population, les transports de marchandises et les transports de voyageurs (la mobilité des individus).

La relation transport-urbanisme implique d'autres processus comme les évolutions démographiques et le contexte économique, et la manière de l'envisager s'est enrichie de travaux menés dans d'autres disciplines, notamment l'économie urbaine (Alonso, 1964) et la sociologie urbaine (appropriation de l'environnement par les individus). Les premiers modèles LUTI ont été développés dans les années 1980 (ex. IRPUD de Wegener (1985)). Un renforcement législatif américain dans les années 1990 a ensuite fortement encouragé leur développement aux États-Unis : la prise en compte de l'interaction transport-urbanisme devient obligatoire dans l'élaboration des plans de transports ré-

gionaux (Nguyen-Luong, 2011). Par la suite, les modèles (MEPLAN [1], UrbanSim), ont cherché à intégrer la modélisation de ces différents systèmes ensemble. Les LUTI se sont progressivement développés en Europe (PUMA, ALBATROSS, ILLUMASS), et en France, avec le modèle PIRANDELLO (Piron et Delons, 2011), et les modèles SIMAURIF (Nguyen-Luong, 2008) et SIMBAD (Nicolas *et al.*, 2009), qui reprennent tous les deux UrbanSim.

Le point commun entre les modèles LUTI est de tester les politiques de transport et d'urbanisme et d'en évaluer les différents impacts (Wegener, 2004). Ces impacts peuvent être d'ordre environnemental (émission des polluants), économique (coût des déplacements) et sociaux (part relative des déplacements dans le budget des ménages) (Nicolas *et al.*, 2009). L'impact sur les attractivités est fortement mis en avant puisque ces dernières restent primordiales dans les stratégies de localisation des activités et dans les décisions résidentielles des ménages. Toutes ces questions nécessitent la modélisation systémique des différentes dynamiques urbaines.

1.1.1.2 Des modèles LUTI

La caractéristique fondamentale, commune à tous les modèles LUTI, est de modéliser l'interaction entre le transport et l'utilisation des sols. Néanmoins, les choix conceptuels qui sont associés à la modélisation des différents processus diffèrent selon les modèles (Wegener, 2004). L'objet ici n'est pas d'être exhaustif sur la modélisation LUTI mais d'éclairer les différences entre les modèles existants.

Il existe deux structures de modèles. Certains modèles comprennent les sous-modèles dans une même structure de modélisation ; on parle alors de modèles intégrés ou unifiés (ex. TRANUS de De la Barra (1984)). D'autres sont des modèles d'utilisation des sols [2], couplés avec des modèles de transport pour permettre des simulations LUTI ; ils sont appelés modèles composites (Wegener, 2004). C'est le cas de DELTA (Simmonds, 1999), connecté au modèle de transport START, ou de SIMAURIF (Nguyen-Luong, 2011), qui utilise conjointement le modèle *land-use* UrbanSim (Waddell, 2000) et le modèle de transport VISUM. Les couplages ne sont pas toujours aisés à mettre en place, notamment lorsque les modèles ont été conçus indépendamment les uns des autres, avec de fortes différences entre les bases de données mobilisées.

1. Beaucoup utilisé à l'époque, il est aujourd'hui obsolète, son développement n'ayant pas été amélioré.
2. *Land-use models*

L'intégration des huit sous-systèmes définis par Wegener n'est pas systématique et, en fonction des objets de recherche pour lesquels les modèles sont conçus, la précision de leur modélisation n'est pas équivalente : l'attention peut être portée sur la modélisation d'un sous-sytème, ou d'une interaction plutôt qu'un ou une autre. Certaines dynamiques comme les systèmes de transport et l'évolution de l'utilisation des sols sont communes à tous les modèles ; les évolutions démographiques et les transports de marchandises sont plus rarement représentés (Wegener, 2004).

Un autre point de différenciation concerne les fondements théoriques choisis pour modéliser les processus de décision et de fonctionnement du marché économique. La plupart des LUTI modélisent la localisation résidentielle en s'appuyant sur la théorie de l'utilité aléatoire ou les modèles de choix discrets ; le modèle des mobilités quotidiennes est pris en compte par le modèle à quatre étapes (McNally, 2000) ou par des modèles de choix discrets par exemple. La modélisation du marché immobilier varie également, notamment entre la rente foncière ou la maximisation de l'utilité aléatoire (Wegener, 2004). Compte tenu de la diversité des processus modélisés, il est par ailleurs commun de retrouver plusieurs fondements théoriques au sein d'un même modèle LUTI (Simmonds, 1999).

Enfin, deux points de débat divisent plus fermement les différents modèles (Wegener, 2014) : la modélisation de dynamique des systèmes et le niveau d'agrégation choisi.

Concernant la dynamique des systèmes, deux approches s'opposent : l'approche d'équilibre général et les modèles dynamiques. L'équilibre général part du postulat que le fonctionnement des systèmes tend systématiquement vers un équilibre entre l'offre et la demande, grâce à une réponse quasi immédiate des individus et des entreprises aux changements de configuration de la ville. À l'inverse, l'approche dynamique considère que cet équilibre est possible mais rarement atteint, du fait de l'inertie du système ville à réagir aux changements qui s'y opèrent.

Les modèles dynamiques sont souvent itératifs, avec des pas de temps d'une année généralement. Ceci permet un délai dans les ajustements entre les différentes évolutions des systèmes : les sous-modèles sont exécutés successivement à chaque itération, et les agents s'adaptent à l'itération suivante aux changements passés. L'état final d'une itération représente l'état initial de l'itération suivante, ce qui permet de tenir compte des différentes temporalités des systèmes (temps longs comme les constructions de bâtiments et temps plus courts comme les mobilités quotidiennes). La plupart des

modèles dynamiques sont composites (Wegener, 2014), c'est-à-dire constitués de plusieurs sous-modèles, et la séquence selon laquelle les modèles interviennent peut jouer un rôle important dans l'évolution des systèmes simulés.

Dans les modèles agrégés (METROSIM, MARS), les interactions se produisent entre des entités spatiales assez larges (quartiers, communes) ou des groupes d'individus. Ces choix sont en partie imposés par le manque de données à une échelle plus fine, et par des puissances de calcul plus limitées. Les connaissances lacunaires sur les comportements des individus, leurs préférences et leurs interactions sont également en cause. Les modèles tendent cependant de plus en plus vers la modélisation individu-centrée avec l'utilisation de la microsimulation (Miller et Salvini, 2000) ou de la modélisation agent (Ettema *et al.*, 2007), permettant la formalisation des interactions entre les individus et des prises de décision au niveau individuel. La désagrégation porte à la fois sur les individus et sur les entités spatiales ; ainsi, la représentation des logements comme entités élémentaires permet de préciser les décisions des individus et ouvre l'utilisation des modèles LUTI à la modélisation plus précise des prix et du marché foncier (Ettema, 2011). Elle permet également de simuler des plannings d'activité des individus dont on connaît l'influence sur leur chaîne de déplacement (Arentze et Timmermans, 2004). Les résultats sont quant à eux souvent agrégés par groupes d'individus et analysés à une échelle méso- ou macroscopique.

La plupart des modèles LUTI sont opérationnels, c'est-à-dire qu'ils ont été calibrés et utilisés sur une zone d'étude au moins (ex. IRPUD sur la ville de Dortmund). Certains ont été utilisés par plusieurs métropoles et sont en passe de devenir des logiciels standards pour les acteurs territoriaux (ITLUP aux Etats-Unis (Putman, 1991), DELTA au Royaume-Uni (Simmonds, 1999)). De manière plus intensive encore, ils peuvent tendre vers des produits professionnels, à destination des décideurs uniquement ; c'est le cas du modèle MARS (Pfaffenbichler *et al.*, 2008).

Rares sont les modèles LUTI opérationnels basés sur une approche agents, en raison du niveau de détail requis en modélisation et de celui des données nécessaires (Ettema *et al.*, 2007). Modéliser l'ensemble des processus requiert énormément de données, et en vue d'un transfert de leur utilisation aux acteurs territoriaux, les modèles LUTI tendent souvent à la parcimonie de ces entrées. Cela leur permet d'être moins dépendants des données relatives à chaque sous-système modélisé et en principe plus facilement maniables.

1.1.1.3 Mobisim : un modèle général urbain

Le modèle Mobisim vise à comprendre, à travers la simulation, comment les aménagements des transport et de l'utilisation du sol influencent les mobilités des individus. Pour cela, il intègre au sein d'une même plateforme plusieurs modèles permettant de représenter des processus spatiaux, démographiques et économiques. Les hypothèses sous-jacentes au modèle prennent en compte les avancées récentes de la théorie générale des systèmes (von Bertalanffy, 1968) et de la géographie théorique.

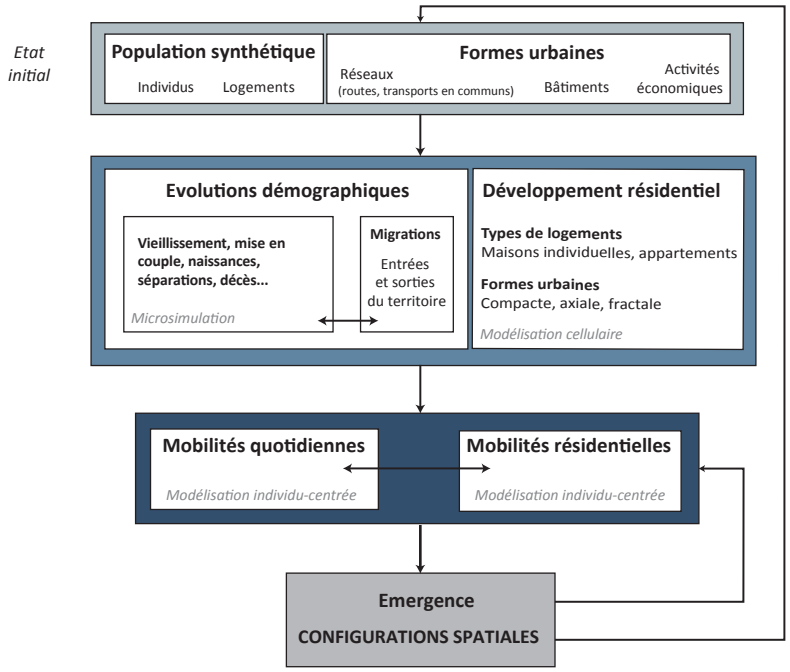


FIGURE 1.2 – Architecture de la plateforme Mobisim

Chaque sous-système est représenté par un modèle (Fig. 1.2) ; tous les modèles sont conçus selon la même approche individu-centrée. Les données en entrée des différents modèles proviennent des mêmes sources, et les résultats de simulation sont stockés dans la même base de données, selon un système de gestion pensé globalement. Les modèles qui composent Mobisim interagissent entre eux de manière à ce que les résultats des uns influencent les résultats des autres. Mobisim suit une modélisation dynamique, itérative.

Les différents sous-systèmes modélisés sont les suivants :

- Évolutions démographiques
- Développement résidentiel
- Mobilités quotidiennes
- Mobilités résidentielles

Mobisim fait partie des rares modèles LUTI qui modélisent les dynamiques démographiques. La mobilité quotidienne des individus est modélisée par un modèle de transport à quatre étapes, inspiré des modèles activité-centré (Arentze et Timmermans, 2004) intégré de manière endogène à la plateforme, contrairement à des modèles comme UrbanSim. Le transport des marchandises et le transport de transit ne sont pas modélisés, pas plus que le développement ou la relocalisation des activités ni le fonctionnement du marché foncier. Les activités économiques sont localisées en début de simulation mais ne connaissent aucune évolution. Le prix des logements est estimé à partir de caractéristiques du logement (taille) et de l'environnement résidentiel (voisinage social), et de caractéristiques spatiales (typologie des communes de l'agglomération) qui permettent de représenter les différences de taxes selon les communes, mais il n'est pas monétarisé.

1.1.2 Une plateforme de simulation individu-centrée

1.1.2.1 Un modèle triplement désagrégé

Mobisim suit une approche complètement désagrégée :

- l'entité élémentaire de référence est l'individu ;
- l'entité spatiale de référence est le logement, localisé dans un bâtiment ;
- l'échelle de temps de simulation est la minute d'un seul jour de l'année, considéré comme représentatif des autres journées.

Le choix de l'individu comme entité de référence permet de modéliser finement les évolutions démographiques, par la représentation des étapes du cycle de vie dont dépendent les préférences résidentielles. Ceci permet également une caractérisation plus précise des choix modaux de transport des individus ou des comportements résidentiels des ménages, valorisant ainsi l'hétérogénéité entre les comportements des agents (Wegener, 2014).

Le choix d'entités spatiales de grain fin, à niveau désagrégé, rend possible la représentation de comportements très précis sur des courtes distances comme la mobilité piétonne, et l'analyse des préférences des individus et de leur satisfaction résidentielle à l'échelle du bâtiment dans son environnement. Elle favorise également la conception de scénarios différenciés en ce qui concerne le développement résidentiel, basés sur différentes règles d'aménagement (portant sur la forme urbaine locale par exemple).

La désagrégation temporelle autorise une description fine des plannings d'activités des individus et des horaires de transport en commun. De plus, toute réagrégation est possible, pour reproduire les rythmes urbains notamment (ex. trafic routier à chaque heure de la journée, pic de congestion ponctuel dans le temps).

Cette triple désagrégation est à l'origine d'un grand nombre de variables dans chaque modèle de Mobisim. Elle présente par ailleurs plusieurs avantages dans la manière d'aborder les résultats : ce qui est désagrégé peut être agrégé, et ce autant de fois que les entités de référence disposent de caractéristiques. L'agrégation spatiale est également possible. Ceci multiplie les points de vue pour l'analyse des résultats : regroupements spatiaux et temporels, groupes d'individus selon leurs caractéristiques, leurs localisations spatiales ou encore leurs comportements de mobilité.

1.1.2.2 La modélisation des comportements individuels

Les comportements des individus sont régis par un ensemble de règles, de probabilités : certaines déterminent comment les individus forment des ménages, d'autres comment ils se localisent dans des logements. D'autres enfin définissent la manière dont ils vont se déplacer en fonction de leur emploi du temps. Les règles de comportement traduisent des faits stylisés (Sanders, 2006), désagrégés : moins un comportement est facile à modéliser, plus il est désagrégé en faits connus, qui sont ensuite combinés entre eux par des règles d'agrégation ou d'interaction. Toutes les règles définies dans Mobisim (règles de comportements et règles spatiales) sont simples, et la formalisation probabiliste permet de tenir compte de phénomènes et de comportements imprécis et incertains.

Les faits stylisés modélisés sont fonction des caractéristiques des ménages et des individus en lien avec leur environnement ; les individus ont connaissance de l'espace qui les entoure, de la proximité aux différentes aménités ce qui leur permet d'évaluer l'attractivité des lieux. Ces faits styliés sont définis en amont de la simulation, ils n'évoluent pas pendant les itérations. Ainsi, les changements de comportements résultent des changements des caractéristiques des individus et des ménages (mise en couple, naissance, etc) ou des changements dans leur environnement uniquement.

1.1.2.3 Interactions entre les individus et configurations émergentes

Les mobilités quotidiennes et résidentielles résultent des comportements des individus et des ménages : elles découlent des interactions des agents (individus ou ménages [3]), entre eux et avec leur environnement. La plupart des interactions entre agents est indirecte dans Mobisim : elle se fait *via* la composition du voisinage, la congestion sur les routes, la vacance des logements, par exemple. Les choix passés (ex. quitter son logement) impactent les actions présentes des autres ménages (ex. le logement est vide). Les interactions directes telles que des négociations ou la transmission d'information ne sont pas modélisées dans Mobisim.

En interagissant avec leur environnement, les agents s'adaptent aux situations qu'ils rencontrent (ex. ils vont avoir une appréciation plus ou moins élevée des logements selon leurs caractéristiques, ou changer de mode de transport ou d'itinéraire face à de la congestion). De ces adaptations émergent des configurations spatiales, la localisation des ménages, leur satisfaction dans leur lieu de vie, le taux de migration global, la vacance des logements, la fréquentation des transports en commun, la congestion sur les axes de transport. Autant de résultats qui représentent des réponses des agents aux aménagements proposés par les politiques publiques.

1.1.3 Une plateforme pour l'aide à la décision - la simulation comme média, support de discussion

1.1.3.1 Mobisim simule tout... ou presque

La plateforme de simulation Mobisim a été conçue pour tester l'impact des politiques d'aménagement sur les mobilités des individus, compte tenu des comportements modélisés. De cet objectif ressortent plusieurs possibilités de scénarios.

Les premiers scénarios possibles sont les scénarios d'aménagement. Ils concernent tout ce qui a trait aux décisions locales : développement résidentiel (localisation des nouveaux logements), évolution de la structure en logements (nombre et types de logements nouvellement construits), infrastructures de transport (nouvelles infrastructures de transport en commun), politiques de transport (baisse des tarifs des transports en

3. Le terme « agent » est à comprendre comme l'entité de référence de la modélisation. Dans le modèle des mobilités quotidiennes, l'entité de référence est l'individu ; dans le modèle des mobilités résidentielles, c'est le ménage.

commun). Il est également possible de simuler des changements plus généraux liés au contexte économique ou écologique, comme une évolution des prix du carburant.

Ces scénarios se paramètrent de manière exogène (*via* les *inputs*) ou par la modification des valeurs de paramètres, et les résultats permettent de tester les réponses des agents aux différents cas de figure, compte tenu des règles de comportement implémentées.

Il est également possible d'évaluer des scénarios dans le cadre d'une évolution structurelle particulière de la population. Dans ce cas, c'est le module démographique qui sera modifié : diminution de la taille moyenne des ménages, augmentation ou baisse du nombre de ménages, vieillissement de la population, augmentation du nombre d'étudiants, migrations en dehors de la zone d'étude. Des scénarios macro-économiques peuvent également être implémentés dans le modèle démographique comme une augmentation du nombre de chômeurs.

Enfin, les variables influençant les mobilités quotidiennes et résidentielles, et les comportements des ménages vis-à-vis de leurs préférences résidentielles (demande de plus d'espace par personne) et de leur mobilité quotidienne (choix des modes de transport) sont modifiables si l'on souhaite simuler une évolution des comportements. A l'origine, ces comportements sont calibrés pour représenter des faits stylisés, c'est-à-dire pour transcrire le contexte et les comportements actuels, mais il est possible de les modifier.

1.1.3.2 Un outil prêt à répondre aux questions des collectivités

Parmi les scénarios possibles, l'augmentation du prix du carburant et les évolutions structurelles de la population représentent des questions particulièrement importantes pour les acteurs locaux, et donc des enjeux pour la modélisation LUTI.

La dimension dynamique de la plateforme renforce son intérêt dans l'aide à la décision. L'objectif des aménageurs est de pouvoir infléchir les trajectoires des systèmes : limiter la « fuite » des ménages vers l'extérieur ou vers les communes périurbaines, limiter l'utilisation de la voiture particulière, encourager ou limiter la concentration d'une catégorie de la population au centre-ville, etc. La modélisation dynamique permet de simuler l'impact des aménagements sur les mobilités de manière précise (possibilité d'identifier uniquement un type de ménage) et régulière dans le temps, en analysant les différentes configurations qui peuvent émerger des comportements de la population.

1.2 La simulation avec Mobisim : fonctionnement de la plateforme

Pour construire un modèle capable de simuler les dynamiques urbaines, deux systèmes spatiaux en interaction sont modélisés : le système résidentiel et le système des mobilités quotidiennes. Pour cela, Mobisim intègre plusieurs modules (Fig. 1.2), interreliés, et calibrés avec les données adéquates. Chaque module peut être utilisé seul ou associé aux autres.

1.2.1 Initialiser le modèle : génération du cadre agents / espace

La simulation de scénarios sur une zone d'étude nécessite la représentation de la zone en question ; une zone d'étude comporte des individus (les agents) et un environnement. L'initialisation du modèle consiste donc à générer de manière réaliste une population synthétique d'individus [4] groupés en ménages et localisés dans des logements. Ces logements sont eux-mêmes localisés dans des bâtiments, composant ainsi l'environnement résidentiel (Fig. 1.3).

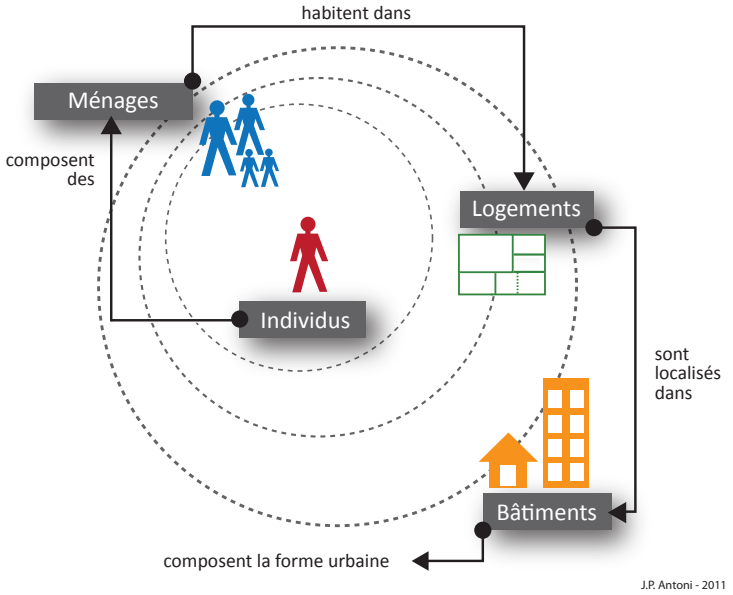


FIGURE 1.3 – Structure de la population synthétique de Mobisim

4. Une population synthétique est une « population dont les caractéristiques individuelles des agents sont reconstruites à un niveau désagrégé N à partir des informations connues à un niveau agrégé $N+1$ » (Antoni *et al.*, 2011). On parle aussi de population artificielle.

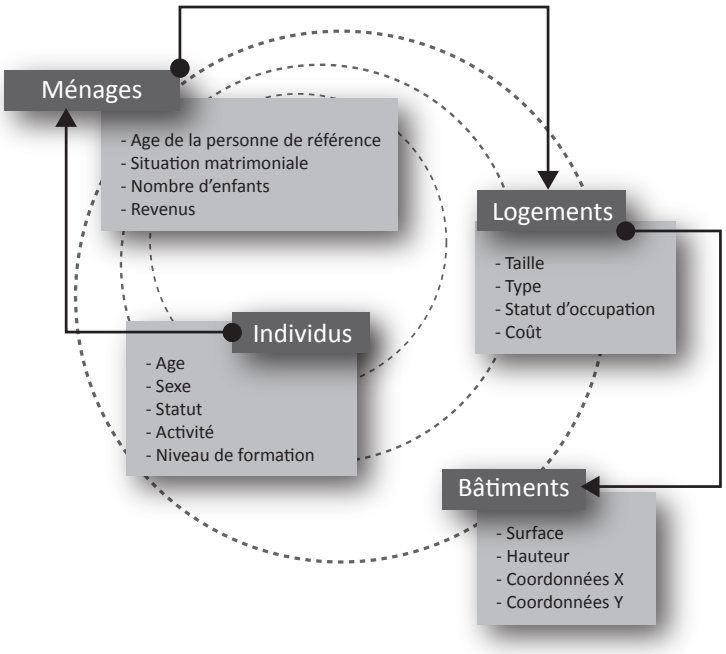


FIGURE 1.4 – Exemples d'attributs pour chacune des composantes de la population synthétique de Mobisim

L'initialisation (i.e. génération de la population d'individus, de ménages et de logements) n'a lieu qu'une fois, au moment de la création d'une zone d'étude. Elle ne fait donc pas partie de la dynamique de la simulation, mais doit être reconduite avec les données adéquates à chaque nouvelle zone d'étude testée dans Mobisim.

1.2.1.1 Individus et logements

Les individus de Mobisim proviennent d'une population synthétique, reconstituée à partir des données du recensement général de la population (RGP) de l'INSEE. La génération (ou création) d'une population synthétique est indispensable, puisqu'il n'existe en France aucune donnée démographique désagrégée, et ce en raison de la protection des données personnelles. Il en est de même pour les logements : nous connaissons le nombre de logements dans chaque commune ou chaque IRIS, mais ne disposons d'aucune information concernant leur localisation exacte dans l'espace, ni de leurs caractéristiques combinées (combien de grands appartements avec deux places de parkings, de petites maisons en location, etc).

Les différentes étapes de calcul permettant de passer des données agrégées [5] de population à la création des individus de Mobisim ne seront pas détaillées ici ; ils sont présentés dans Antoni et al. (2011). D'une manière générale, la génération de

5. Les données sont agrégées à la commune ou à l'IRIS, c'est-à-dire que pour chaque variable considérée, le RGP nous donne un effectif par entité spatiale. Exemple : le nombre de femmes dans chaque commune.

la population synthétique permet de créer chacun des individus d'une zone d'étude, de le définir en lui attribuant des caractéristiques, et en l'affectant à un ménage. Ces ménages sont localisés dans des logements, en fonction de leur taille respective (Fig. 1.3). Chacune de ces entités est caractérisée par un certain nombre d'attributs (Fig. 1.4) :

- Les individus sont définis par des caractéristiques, telles que le genre, l'âge, la profession, le rôle (enfant, chef de ménage), le statut matrimonial ou encore le revenu.
- Les ménages sont composés d'individus ; dans chaque ménage est définie une personne de référence (chef de ménage) : l'homme dans le cas d'un couple, l'adulte dans le cas d'un ménage seul et l'individu le plus âgé dans le cas des colocations. Ceci permet d'attribuer à chaque ménage une classe d'âge. Le revenu du ménage correspond à la somme des revenus de tous les individus qui le composent. Les ménages peuvent être des familles, des célibataires, des colocations. On considère également une catégorie « hors ménage », correspondant à des maisons de retraites, cités universitaires ou encore des casernes militaires (source : www.insee.fr).
- Les logements sont caractérisés par des attributs tels que le type du logement, le nombre de pièces, le statut d'occupation.

1.2.1.2 Formes et fonctions urbaines

L'environnement dans lequel évoluent les agents de Mobisim est constitué par les bâtiments, les réseaux de transport, les espaces verts et les activités économiques. Ces différents éléments sont issus de bases de données géographiques, provenant de l'IGN (Institut Géographique National) notamment. Les bâtiments constituent les entités spatiales de référence et ont une fonction résidentielle (maison ou immeuble) ou d'activité (commerces, services, bâtiments industriels). Ils sont représentés proportionnellement à la réalité. Chaque bâtiment est caractérisé par une surface, une hauteur et une localisation dans l'espace (coordonnées géographiques). Chaque activité est définie par un certain nombre d'attributs tels que le nombre de salariés (définis à partir du fichier Sirene de l'INSEE) et le niveau de fréquentation (ex. quotidien, hebdomadaire) (Tannier *et al.*, 2012b).

L'ensemble des bâtiments et activités sont reliés les uns aux autres par les infrastructures de transport. Chacune d'entre elles se voit affecter les modes de transport qu'il y est possible d'utiliser. La modélisation des déplacements quotidiens en voiture considère les caractéristiques des voies de circulation (vitesse, capacité et sens de cir-

culation). La modélisation des déplacements via les transports en communs prend en compte la localisation des arrêts et leur fiche horaire.

La localisation de chaque bâtiment et infrastructure se fait à l'aide de coordonnées géographiques, sur une classe d'entités vectorielles (*shapefile*), ce qui permet le calcul d'accessibilités entre chaque point de l'espace.

1.2.2 Simuler les évolutions des individus et de l'environnement

La population synthétique d'individus et de logements ainsi créée est le point de départ d'une simulation. Elle évolue à chaque pas de temps de simulation, et ce à travers deux modèles : les évolutions démographiques pour les individus et le développement résidentiel pour les logements. Mise à jour pendant chaque itération, elle constitue le point de départ de l'itération suivante. Aucune activité économique n'est créée au cours des simulations.

Ces deux modules d'évolution constituent des générateurs d'*inputs* pour les modèles de mobilités, mais ne sont pas impactés par leur fonctionnement. Ils ne fonctionnent que sur la base des caractéristiques de la population synthétique (individus et logements) qu'ils ont mis à jour lors de l'itération précédente pour la mettre à jour à nouveau : caractéristiques des ménages pour les évolutions démographiques et nombre et types de logements pour le développement résidentiel.

1.2.2.1 Les évolutions démographiques

La modélisation des évolutions démographiques se fait au niveau des individus et des ménages, à travers deux types d'évènements :

- les évènements démographiques du cycle de vie : naissance, décès, mise en couple, séparations, émancipation des enfants ;
- les migrations avec l'extérieur de la zone d'étude (entrées et sorties).

Le modèle s'appuie sur la microsimulation dynamique (Birkin et Wu, 2012), et chaque probabilité d'évènement est appliquée aux individus en fonction de leurs caractéristiques. Il est exécuté au début de chaque itération, avant les autres processus. Il permet de faire évoluer les individus et les ménages dans leur cycle de vie, et de reproduire ainsi les dynamiques démographiques qui influencent les comportements et les choix qui les affectent.

Les probabilités de chacun des évènements démographiques sont des paramètres du modèles, exogènes à la simulation. Elles ne dépendent pas d'autres processus, et restent les mêmes pendant toute la simulation. De plus, il n'existe aucun lien entre les choix résidentiels des ménages et les migrations entrées / sorties du territoire, contrairement à certains modèles LUTI comme celui de Haase *et al.* (2010). Les migrations en dehors de la zone d'étude sont considérées comme un comportement démographique et non comme des déménagements.

1.2.2.2 Le développement résidentiel

Ce modèle intègre deux composantes : les localisations des nouvelles constructions (développement résidentiel) et les caractéristiques des logements à construire chaque année (évolution de la structure des logements). Aucun logement n'est démoli au cours de la simulation.

Le modèle de développement résidentiel permet de localiser les bâtiments dans lesquels sont construits chaque année les nouveaux logements. La création de ces nouveaux logements et bâtiments est intégrée dans le processus de simulation selon trois échelles spatiales :

- le nombre de logements construits chaque année est défini par l'utilisateur pour l'ensemble de la zone d'étude (paramètres globaux du modèle), tout comme la proportion de maisons et d'appartements, ainsi que le nombre de pièces de chacun d'entre eux ;
- à l'échelle de l'agglomération, les logements nouvellement créés sont distribués spatialement à partir d'un zonage choisi par l'utilisateur. Ce zonage peut être un zonage *ad hoc* (ex. découpage communal) ou tout autre zonage permettant de simuler une macro forme urbaine particulière (ex. buffer autour des gares périurbaines). Le nombre de logements individuels et collectifs à créer est défini pour chaque zone ;
- à une échelle locale, les nouveaux bâtiments sont construits dans des cellules identifiées à l'aide du logiciel MUP-City (Frankhauser *et al.*, 2010; Tannier *et al.*, 2012b).

Sur la base d'un modèle cellulaire, MUP-City évalue, en fonction d'un scénario de forme urbaine locale choisi, les cellules propices à l'urbanisation, en excluant les zones non-constructibles (ex. les zones protégées). Il leur affecte ensuite des valeurs à partir d'un ensemble de règles d'aménagement (ex. accessibilités aux commerces et services

ou aux espaces verts) : les cellules les mieux évaluées sont celles qui répondent le mieux au scénario implémenté.

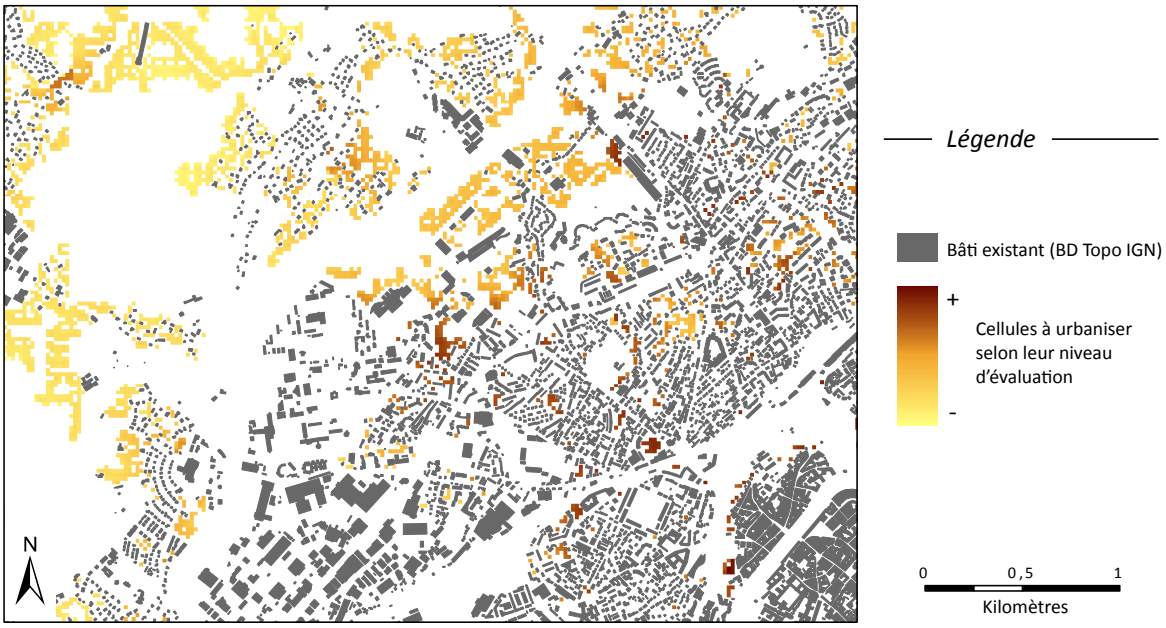


FIGURE 1.5 – Exemple de localisation des zones à urbaniser selon leur niveau d'évaluation par MUP-City dans un scénario en prolongement de tendances (Bourgeois, 2012)

Le modèle de développement résidentiel de Mobisim construit en priorité de bâtiments dans les cellules les mieux évaluées (en marron sur le figure 1.5), puis les cellules moins bien évaluées et ainsi de suite (les dernières cellules urbanisées sont représentées en jaune sur la figure 1.5). Le nombre total de cellules construites en fin de simulation dépend des paramètres du module d'évolution des logements de Mobisim, intégré au modèle de développement résidentiel. Le nombre annuel de logements à construire dans la zone d'étude est également défini par l'utilisateur.

En sortie, Mobisim créé un *shapefile* avec les constructions initiales (les bâtiments de la BD Top de l'IGN) et les bâtiments construits pendant la simulation, représentés par des cellules de 20m de côté (les bâtiments peuvent être des immeubles ou des maisons individuelles). Pour chaque cellule / bâtiment, il est possible de connaître la date de construction (Fig. 1.6), et les caractéristiques résidentielles associées : appartements ou maison, nombre de pièces par logement, etc.

Les constructions issues du développement résidentiel sont indépendantes des préférences des ménages. Il n'existe aucune rétroaction des choix résidentiels sur le développement résidentiel et l'évolution des logements (Fig. 1.2). Ainsi, pour une zone

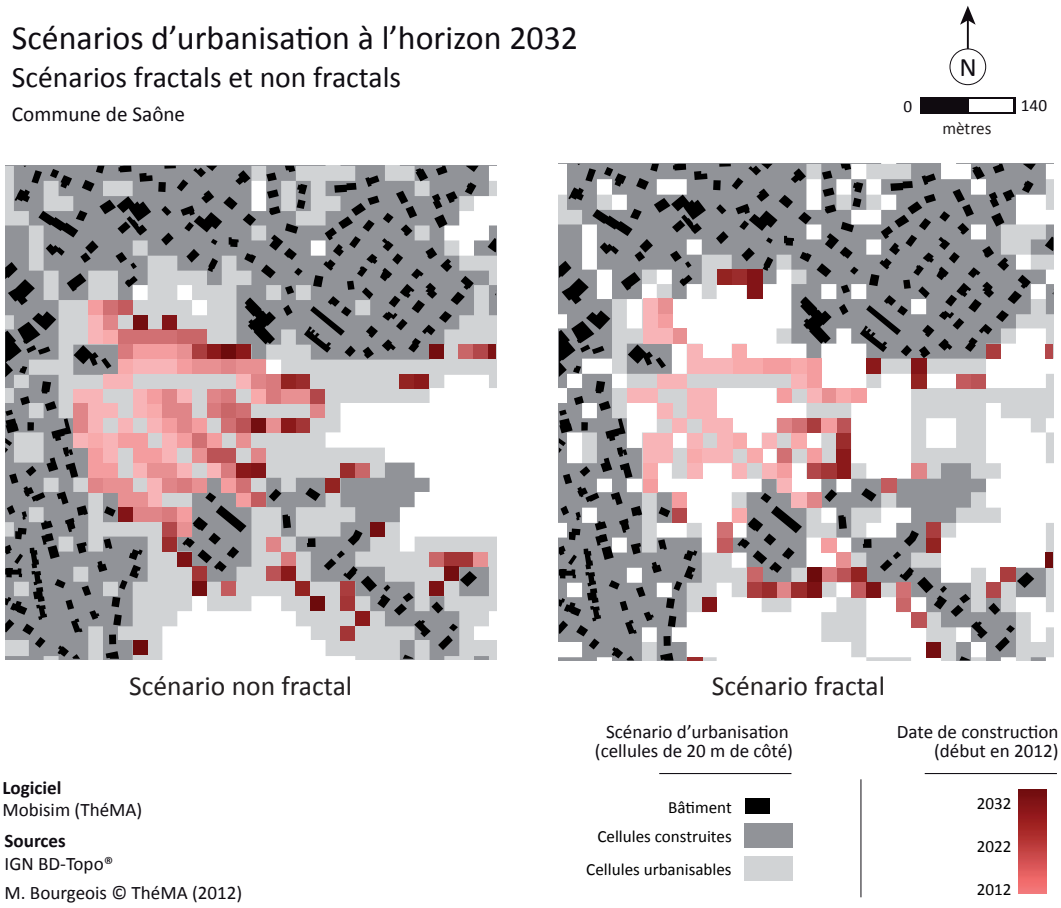


FIGURE 1.6 – Exemples de résultats du développement résidentiel dans Mobisim - Comparaison de deux scénarios

d'étude, les tendances préférentielles d'une population en matière de logements, influencées conjointement par la structure de la population et les préférences résidentielles des individus, n'influencent pas les politiques de logements dans le modèle. La politique de développement (i.e. la carte des zones propices à l'urbanisation) est décidée en amont, et simulée indépendamment de ce qui se passe par ailleurs en ce qui concerne les mobilités, qu'elles soient quotidiennes ou résidentielles.

1.2.2.3 Infrastructures futures

La simulation de l'arrivée de nouvelles infrastructures de transport n'est pas prise en charge par un module spécifique de Mobisim mais à travers la modification exogène de certains paramètres (i.e. en tant qu'*inputs* du modèle) ou de données dans les différents modules. Ces paramètres permettent d'introduire des projets réalistes d'aménagement à travers les scénarios impliquant :

– l'évolution des localisations d'activités : investissements (création d'aménités, nouveaux quartiers) ou nouveaux commerces et services associés à la croissance

urbaine, aux évolutions démographiques et aux changements potentiels de limites administratives [6] ;
- les changements de systèmes de transport, à travers des modifications des réseaux ou des fréquences de passage dans les fiches horaires et/ou par les modifications de caractéristiques des routes (vitesse, capacité, utilisation modale).

Un nouveau système de transport en commun (création de nouveaux arrêts de transport en commun, changement des fiches horaires) peut être introduit lors d'une étape d'itération définie par l'utilisateur (ex. introduction d'un réseau de tramway à Besançon en 2015) pour imiter les évolutions d'aménagement prévus sur le moyen et long terme.

1.2.3 Simuler les mobilités

Les modèles de mobilités dans Mobisim permettent de représenter le comportement des ménages selon leurs caractéristiques, mises à jour à chaque pas de temps, sur l'espace tel qu'il a évolué l'année précédente. Individus et ménages ont connaissance de l'environnement dans lequel ils vivent, et ils peuvent s'y déplacer.

1.2.3.1 Les mobilités quotidiennes

L'objectif du modèle est de simuler les déplacements quotidiens des individus, en fonction de leurs activités. Pour cela, Mobisim dispose d'un module de transports, selon un modèle à quatre étapes. Dans le processus de modélisation de Mobisim, les quatre étapes sont groupées deux à deux, permettant ainsi d'introduire des interactions entre les étapes d'itérations.

- Génération des plannings d'activités et distribution des déplacements sont deux processus interconnectés. Ils déterminent le nombre, les motifs et les lieux de destination des déplacements réalisés par chaque individu de plus de 15 ans (la mobilité des enfants n'est pas modélisée), selon le planning d'activités des individus (pour une période de 24h) (Greaves et Stopher, 1998), duquel découlent des chaînes de déplacements. Le planning d'activités est défini sur la base de règles probabilistes spécifiques à différentes catégories d'individus (actifs, étudiants). La distribution des déplacements est formalisée par un modèle gravitaire adapté du modèle de Huff (1964) et paramétrée à partir de l'Enquête Ménages Déplacements (EMD) ;

6. Cette modélisation est en projet, elle n'a pas encore été implémentée dans Mobisim.

– L'affectation sur le réseau (ou calcul d'itinéraires) rétroagit sur le choix du mode de transport réalisé par les individus afin de tenir compte des phénomènes de congestion. Ces deux étapes permettent de définir le ou les modes de transport de l'ensemble des déplacements effectués par chaque individu de même que les coûts des déplacements ou des chaînes de déplacements. Elles permettent ainsi de cartographier le trafic de tous les modes de transport possibles et de déterminer les points de congestion selon les moments de la journée, éléments qui vont conditionner les coûts d'accès à certains lieux (centre-ville, zones d'emplois).
Le choix modal et l'affectation sur le réseau sont fondés sur un modèle de coût généralisé [7] et sur l'utilisation de l'algorithme du plus court chemin de Dijkstra (Dijkstra, 1959).

A défaut de pouvoir simuler l'ensemble des jours composant une semaine, les plannings d'activités de Mobisim simulent une journée type, valable pour toutes les autres journées de l'année. Cette journée se veut la plus représentative possible de l'ensemble des déplacements effectués par les habitants d'une ville. Elle peut être assimilable à un mardi ou un jeudi, jours ouvrables de l'ensemble des activités [8]. Le modèle est paramétré à partir de l'EMD, et le pas de temps pour le paramétrage du modèle est la minute d'une journée d'une année.

1.2.3.2 Les mobilités résidentielles

Le modèle des mobilités résidentielles permet de définir quels ménages déménagent pour aller où. Il est fondé sur l'appréciation qu'ont les ménages des attributs de leur logement et de leur environnement résidentiel actuels d'une part, et des attributs des logements vacants et de leur environnement résidentiel d'autre part. Chaque logement est caractérisé par des attributs intrinsèques (type, taille, coût) et des attributs de son environnement résidentiel. L'environnement résidentiel local (le quartier) est différencié de l'environnement résidentiel global (défini par rapport aux autres lieux : centre-ville et zones d'emplois).

La propension à déménager des ménages résulte d'une combinaison de trois variables : la satisfaction résidentielle, la mobilité résidentielle intrinsèque des ménages

7. Tout ce qui peut entrer en compte dans le choix modal, ou l'itinéraire d'un agent est traduit en coût : temps de parcours, confort du trajet etc. Les agents tendent donc à optimiser leur choix sur le coût de leur déplacement, appelé coût généralisé.

8. Certaines activités, dont la fréquence de recours est plus rare sont cependant fermées (coiffeur, musées, etc). Ces activités fermées sont considérées comme ouvertes afin de pouvoir considérer les mobilités qu'elles génèrent.

(en fonction de leur cycle de vie), et de l'intérêt global à migrer qu'ils retirent de la zone d'étude. Le calcul de l'intérêt global à migrer implique des variables globales liées au contexte immobilier (quantité et qualité des logements vacants).

Les deux modules de mobilité sont en interaction : de la localisation d'un ménage vont dépendre ses choix en matière de mobilité quotidienne. De son mode de déplacement dominant va dépendre son style de vie et ses aspirations résidentielles. De surcroît, du coût d'accès qu'il a lors de déplacements à certains lieux (centre ville et zones d'emploi) va dépendre ses appréciations sur l'environnement résidentiel global. C'est donc à travers les accessibilités et les modes de déplacements que le transport agit sur les choix résidentiels, ce qui est en partie classique dans les modèles LUTI (Wegener, 2004).

1.2.4 Données

La conception des modèles de Mobisim d'abord, leur calibrage ensuite, et la création de scénarios enfin, requièrent des données désagrégées, touchant à plusieurs domaines. On peut distinguer quatre types de données :

- les informations standards : elles sont utilisées pour l'initialisation d'une zone d'étude dans Mobisim. Il s'agit de bases de données socio-économiques et de données géographiques à fine échelle. Ce type d'informations est généralement disponible dans les régions européennes à partir de recensements officiels ou de données en libre service (ex. le Recensement Général de la Population (RGP) ou le Recensement Général des Entreprises (RGE) - base de données Sirene, INSEE) ;
- les données locales. Elles sont fournies par les collectivités, et portent sur les comportements spécifiques aux différentes zones d'étude, ainsi que sur les comportements et pratiques des individus (ex. l'Enquête Ménages Déplacements (EMD)). Elles sont utilisées pour le calibrage de Mobisim. Mobisim dispose d'un ensemble de paramètres par défaut, dont certains doivent être modifiés pour chaque zone d'étude afin de s'adapter avec les spécificités locales ;
- les enquêtes *ad hoc*. Ces données peuvent être utilisées pour valider le modèle en mesurant les différences entre les résultats de simulation et la réalité révélée par des enquêtes. Ces données doivent donc être différentes des données utilisées pour calibrer le modèle. Leur acquisition peut par ailleurs être coûteuse ;
- les plans locaux d'aménagement, documents de prospective, entretiens avec des experts locaux et des acteurs : ces informations permettent de construire des scénarios d'aménagement réalistes, pour utiliser Mobisim comme un cadre d'accompagnement dans les décisions locales. Cela inclut aussi les préoccupations

politiques concernant les politiques publiques à mener dans le futur.

La question des données est un problème récurrent en modélisation individu-centrée. Le conflit entre la demande de données des modèles et leur rareté est fréquent (Batty *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2013), notamment parce que les données nécessaires sont au niveau individuel et que la désagrégation pose la question de l'anonymat des enquêtés : les recensement nationaux agrègent souvent les résultats d'enquêtes pour préserver l'anonymat. Cette question est particulièrement présente en France. La rareté des données désagrégées condamne parfois la qualité du modèle (lacunes dans le paramétrage, approximation des scénarios, problème de validation des résultats), et conduit alors les chercheurs à préférer une approche plus agrégée (Nguyen-Luong, 2008).

1.3 Mobisim : d'hier à aujourd'hui

La plateforme Mobisim a connu une succession de reprises, de reconfigurations et d'évolutions des modèles qui ont permis d'aboutir à ce qu'elle est aujourd'hui. Plusieurs changements sont intervenus dans l'organisation des modules, dans les approches adoptées pour chaque sous-système, et dans leurs interactions. Mobisim a par ailleurs bénéficié du financement continu de la part du Predit (Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres [9]).

1.3.1 Mobisim ATN - 1999 à 2008

La plateforme de simulation Mobisim a été développée initialement par l'entreprise ATN (Applications de Technologies Nouvelles). L'objectif de Mobisim a toujours été d'étudier l'évolution des interactions transport-urbanisme à travers un modèle LUTI, mais l'outil en lui-même a connu plusieurs évolutions. Mobisim III, fondé sur la dynamique des systèmes, permettait d'étudier « l'évolution complexe du système [...] de façon macroscopique au travers de boucles de rétroactions » (Casanova *et al.*, 2005). Le passage entre les versions Mobisim III et Mobisim SMA [10] a vu naître une modélisation désagrégée (passage d'une ville découpée en trois zones concentriques à un découpage en IRIS, ainsi que d'une grille spatiale) et individu-centrée (passage d'un traitement mésoscopique de la population [11] à l'individualisation de tous les agents et de leurs

9. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE) et l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME)
10. Systèmes Mulit-Agents
11. Nombre de ménages par zone.

comportements).

La dernière version de Mobisim ATN (Mobisim SMA - (Casanova *et al.*, 2005)) est fondée sur la simulation multi-agents, permettant ainsi une modélisation plus fine des interactions entre les agents [12]. Son objectif est de « construire un modèle multi-agent intégré Transport – Urbanisme à partir du comportement des ménages et des entreprises ». Le modèle est basé sur la description des comportements démographiques et des mobilités des ménages, et des entreprises ; il repose sur une population synthétique d'agents, caractérisés par des attributs.

L'évolution de l'utilisation du sol est représentée de manière assez complexe : les nouvelles constructions peuvent être issues de scénarios d'aménagement (agents globaux) ou de la volonté d'accession à la propriété des ménages dans des zones autorisées à la construction. Les bâtiments peuvent également être rénovés ou détruits, selon la dégradation dans le temps ou une vacance trop prolongée. Le prix du foncier est simulé en fonction des caractéristiques des logements. Les évolutions démographiques des agents sont intégrées via la modélisation de différents évènements démographiques appliqués à chaque individu, ou à chaque entreprise [13]. Le marché du travail est également représenté, permettant ainsi de modéliser le marché de l'emploi pour les entreprises. Le modèle de déplacement est un modèle à quatre étapes qui « n'a pas vocation à être un modèle de trafic », mais qui permet simplement de représenter les déplacements et la congestion sur la zone d'étude. Les choix de localisation des différents agents sont basés sur l'attractivité des lieux. Les choix des ménages peuvent être des choix résidentiels, professionnels, de programme d'activité ou encore un choix modal de déplacement.

Différents indicateurs étaient en place pour évaluer les impacts des scénarios sur les comportements des ménages et des entreprises. Pour plus de précision, nous renvoyons le lecteur au rapport de Casanova et al. (2005) sur la présentation de la plateforme.

12. Mobisim SMA est composé de plusieurs types d'agents : des agents dynamiques : ménages, entreprises ; des agents statiques : infrastructures VP et TC ; des agents espace : l'espace et la morphologie urbaines ; des agents globaux : décideurs politiques et transporteurs. Ces derniers sont exogènes au modèle, et n'interviennent qu'à travers la définition de scénarios, comme la définition de zones constructibles ou non.

13. L'objectif est de « simuler la dynamique des emplois au sein de l'aire urbaine et les dynamiques de localisation des différents secteurs d'activité à partir des stratégies propres à chaque secteur d'activité et typologie d'entreprise » (Casanova *et al.*, 2005)

1.3.2 Mobisim à ThéMA - depuis 2008

1.3.2.1 Les modèles en 2008

Au moment de la reprise par ThéMA [14] du projet Mobisim, Mobisim SMA modélise plusieurs sous-systèmes, en interactions, avec plusieurs types d'agents : des ménages et des entreprises. La plateforme de simulation avait connu des développements successifs auparavant et l'appropriation d'un modèle complexe conçu par d'autres s'avérait délicate. Ainsi, la reprise de Mobisim par ThéMA a été synonyme d'une simplification du programme, avec une refonte quasiment complète de la plateforme « dans une nouvelle architecture logicielle (permettant notamment le calcul parallèle) » (Antoni, 2011).

La première simplification a été de ne considérer qu'un seul type d'agents : des individus, regroupés dans des ménages. La modélisation de la composante entreprenariale a ainsi complètement disparu de Mobisim et chacun des sous-modèles a été simplifié.

En 2008, la plateforme Mobisim-ThéMA était donc un couplage de deux modèles, pour simuler d'une part les mobilités quotidiennes et d'autre part les mobilités résidentielles. Le développement résidentiel n'était pas un modèle à part, mais une émergence directe des mobilités résidentielles. Le modèle Mobisim fonctionnait également avec une population synthétique qui n'évoluait pas.

Mobisim-ThéMA comprenait alors trois approches de modélisation : un modèle multi-agents pour les activités des ménages, un modèle à quatre étapes pour les mobilités quotidiennes et un automate cellulaire pour les mobilités et le développement résidentiels. L'espace était représenté au travers d'un modèle matriciel selon une grille, chaque cellule mesurant 200 m de côté. À chaque cellule était attribuée un nombre d'emplois et une densité de population.

1.3.2.2 Principales modifications : les modèles en 2014

La génération de la population synthétique a été repensée. Elle était basée sur une population désagrégée existante, ventilée dans des logements. Aujourd'hui, le point de départ est un recensement agrégé (INSEE), que l'on désagrège pour obtenir un ensemble d'individus, neutres, à qui l'on attribue ensuite des caractéristiques. Une fois que les individus « existent », le modèle permet de composer des ménages.

14. Je nommerai cette version de la plateforme « Mobisim-ThéMA », pour éviter toute confusion dans cette section.

Comme nous l'avons évoqué, cette population a aujourd'hui retrouvé sa dynamique démographique, avec un modèle qui reprend les bases de celui existant dans Mobisim ATN. Cette nouvelle intégration des évolutions démographiques dans la plateforme Mobsim est récente puisque le modèle a été pensé et développé pendant cette thèse.

Le modèle des mobilités quotidiennes au début de Mobisim-ThéMA était déjà un modèle à quatre étapes. Il a connu très peu de modifications et s'est rapidement stabilisé dans sa version actuelle. L'introduction du coût généralisé [15] et l'intégration des déplacements basés sur un planning d'activités [16] sont les deux grandes innovations. La modélisation du coût généralisé a été nécessaire pour fusionner les quatre étapes initiales deux à deux, comme c'est le cas dans la version actuelle du modèle (section 1.2.3.1). Le mode « cycliste » a également été récemment intégré dans les choix modaux et dans les déplacements.

Les modèles de mobilités résidentielles et de développement résidentiel sont ceux qui ont connu le plus de changements. La première version du modèle des mobilités résidentielles de Mobisim était un automate cellulaire (Antoni, 2011). Une première étape consistait à construire une carte des préférences des ménages, en fonction des différents éléments de l'utilisation du sol (espaces verts, loisirs, densité du bâti), de l'accessibilité au centre-ville et des connexions au réseau de transport en commun. Chaque cellule de l'automate combinait alors les valeurs des différents attributs de l'espace, leur conférant ainsi un score compte tenu du profil des ménages. Les préférences des ménages dépendaient de la taille du ménage et de ses revenus. Les ménages pouvaient alors comparer leur situation actuelle et les cellules qu'ils jugeaient préférables. Le déménagement se faisait dans la cellule qui présentait le meilleur score, même si elle n'était pas encore habitée.

Les choix des ménages et leur mobilité résidentielle entraînait ainsi l'évolution de l'occupation du sol. Pour faire une analogie avec la version actuelle, on peut parler d'un impact des choix résidentiels sur le « développement résidentiel » [17], et donc sur l'étalement urbain. En cela, le « développement résidentiel » de cette version du modèle était une émergence du modèle des mobilités résidentielles. L'objectif n'était pas de localiser explicitement les ménages mais de quantifier le nombre de ménages par cellule, et son

15. Le coût généralisé d'un déplacement signifie que les variables qui peuvent rentrer en compte dans les déplacements (le temps et le confort du mode de transport choisi) sont traduites en euros.

16. Avant, le découpage temporel des activités dans la journée n'existait pas.

17. Ce terme est volontairement placé entre guillemets puisque les bâtiments et les logements n'étaient pas spécifiquement représentés. L'échelle spatiale la plus fine était la cellule. En cela, il est préférable de parler d'évolution de l'occupation du sol plutôt que de développement résidentiel.

évolution, pour mieux identifier les lieux attractifs.

Les modèles concernant la dynamique résidentielle ont beaucoup évolué, témoignant d'une évolution de l'ambition du projet. Aujourd'hui, le modèle décompose la décision en différents facteurs, ce qu'il ne permettait pas auparavant. La différenciation des choix repose sur un plus grand nombre de caractéristiques, et la complexité de la décision est représentée. Dans la version actuelle, les ménages sont contraints dans leur choix par une offre qui leur est imposée par un scénario en amont. Avant, aucune offre n'existait de manière individualisée et les ménages pouvaient déménager à leur guise, puisque les logements n'étaient pas caractérisés. La rétroaction des choix sur le développement urbain n'est plus modélisée dans la version actuelle : le développement résidentiel est modélisé en tant que tel, et il est indépendant des choix résidentiels.

La simulation du développement résidentiel a également évolué avec la volonté d'implémenter des scénarios d'aménagement qui traduisent une politique publique, exogène à la simulation (approche plutôt *top-down* du développement urbain). La version actuelle, en comparaison avec la version initiale de Mobisim-ThéMA, perd certes cette rétroaction des choix individuels sur le développement urbain (approche *bottom-up* de l'évolution de l'espace), mais elle présente l'avantage de permettre de tester des politiques publiques d'aménagement (données par le Schéma de Cohérence Territoriale (ScoT) ou par le Plan Local d'Urbanisme (PLU)) et des scénarios précis, ce qui correspond davantage aux attentes actuelles des aménageurs.

Aujourd'hui, les localisations jugées attractives ne sont plus « désignées » par les ménages, mais elles restent identifiables via des indicateurs comme la satisfaction des ménages ou l'attractivité des lieux compte tenu de leur situation (cf. Chapitre 3).

Parmi toutes les évolutions, notons toutefois que trois caractéristiques fondamentales sont restées les mêmes :

- dès les origines, la plateforme de simulation Mobisim a été pensée dans une « démarche prospective d'aide à la décision » (Antoni, 2011) ;
- la dynamique et la complexité du système urbain ont toujours été intégrées à part entière dans la modélisation ;
- la modélisation avec Mobisim s'est très rapidement approchée de la modélisation individu-centrée et des systèmes multi-agents.

1.4 Conclusion

Mobisim est une plateforme de simulation LUTI, permettant d'évaluer l'impact de différents aménagements proposés dans une agglomération urbaine sur les mobilités quotidiennes et résidentielles des individus et des ménages. L'espace et les individus ne sont pas figés dans leur état initial grâce aux modules d'évolutions démographiques et de développement résidentiel : les ménages évoluent dans leur cycle de vie et des nouveaux logements sont construits chaque année. La modélisation itérative permet une simulation dynamique, et il est possible d'étudier la trajectoire des entités de simulation dans le temps.

Les politiques d'aménagement influencent les mobilités, mais à l'heure actuelle Mobisim ne simule pas la rétroaction des choix résidentiels sur le développement des nouvelles constructions. Les réponses des ménages face aux aménagements se mesurent en termes de mobilités et de satisfaction mais pas en termes de nouvelles constructions répondant spécifiquement à une demande.

L'architecture de la plateforme a évolué régulièrement dans le temps pour aboutir à sa configuration actuelle ; ces changements témoignent de l'évolution des ambitions liées au projet plus large dans lequel elle est inscrite. Aux différentes ambitions se sont liés des choix d'intégration, de simplification ou d'abstraction de tel ou tel facteur. La modélisation individu-centrée et les différents modules permettent aujourd'hui de modéliser des comportements complexes dans la ville. La plateforme offre la possibilité de tester de nombreux scénarios : scénarios d'aménagement, de transport, économiques, démographiques et comportementaux. Ces multiples possibilités en font un outil intéressant pour les politiques publiques et adapté à l'aide à la décision, dans sa capacité à reproduire des tendances actuelles pour répondre aux enjeux de l'aménagement urbain. En effet, s'il existe aujourd'hui un grand nombre de modèle LUTI, tous ne sont pas capables de répondre à de telles questions, comme l'impact de l'augmentation du prix du carburant sur les mobilités par exemple (Wegener, 2014).

Le travail de thèse porte sur le modèle des mobilités résidentielles de Mobisim, qui a nécessité la création et d'un modèle de simulation des évolutions démographiques. Ce dernier a été conçu par Gilles Vuidel et moi-même ; le modèle des mobilités résidentielles a été élaboré par Cécile Tannier. Ils seront successivement présentés dans les deux prochains chapitres.

Chapitre 2

Le modèle de simulation des évolutions démographiques (Mobisim-Démo)

La composante démographique de Mobisim est constituée d'une population synthétique, statique, générée à partir des bases de données nationales de recensement. Les individus sont spécifiquement identifiés et coexistent en différents types de ménages dans l'agglomération. Mais... comment exister statiquement dans un espace en perpétuelle évolution, et dans un modèle de simulation dynamique ? Accepter de nier les évolutions personnelles des individus et des ménages, aussi synthétiques soient-ils, reviendrait à nier tout un pan des motivations à l'œuvre dans la dynamique des territoires : les aménageurs ne sont pas les seuls acteurs dans le système urbain.

Construire un modèle capable de faire évoluer chaque individu et chaque ménage de la population synthétique de Mobisim relève ici d'une nécessité de compléter la dynamique du modèle. Ce modèle de microsimulation est une composante des évolutions dans Mobisim, qui, conjointement à l'évolution de l'espace (modèle de développement résidentiel), permet de faire évoluer globalement la zone d'étude.

Ce modèle a été conçu par Gilles Vuidel et moi-même, avec pour objectif de représenter les principaux évènements démographiques du cycle de vie des ménages tout au long d'une simulation. Seront présentées dans ce chapitre les motivations thématiques qui ont donné naissance à ce modèle, avant d'en décrire les caractéristiques générales, nos choix de formalisation pour les différents évènements démographiques qui le définissent, et son fonctionnement.

2.1 Pourquoi simuler les évolutions démographiques dans Mobisim ?

2.1.1 Le cycle de vie des ménages, clé des mobilités résidentielles

Le cycle de vie, en écologie, est décrit comme « la succession de diverses phases de la vie d'un organisme » (Ramade, 2008). En sciences sociales, Clark et Onaka (1983) le définissent pour un ménage comme *"the changing demographic characteristics of a household as it progresses from initial situation to dissolution"* [1]. Ainsi, le cycle de vie d'un individu ou d'un ménage est déterminé par deux éléments : les étapes de la vie et les évènements démographiques qui y conduisent (Fig. 2.1). Tout au long de sa vie, l'individu, ou le ménage, traverse une succession d'étapes, qui permettent de définir sa situation personnelle. Elles sont définies par l'âge, la situation matrimoniale ou encore la présence ou non d'enfant(s) dans le ménage. Elles correspondent à des appellations telles que « célibataire », « jeune couple », « jeune couple avec enfants », « divorcé », « veuf ».

Le passage d'une étape à une autre est déclenché par un évènement démographique (Clark *et al.*, 1984) : par exemple, la mise en couple permet à un individu célibataire d'être en couple (Fig. 2.1). Ces évènements peuvent être renouvelables et intervenir plusieurs fois dans la vie d'un individu (mise en couple, séparation, naissance d'un enfant), par opposition aux évènements non-renouvelables, comme l'émancipation du domicile parental ou le décès [2]. Un même évènement démographique peut conduire à des étapes différentes (Fig. 2.1).

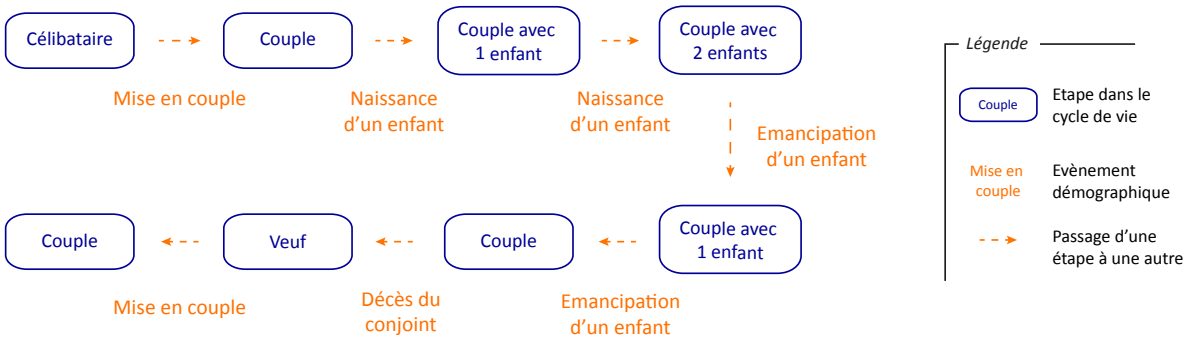


FIGURE 2.1 – Distinction entre étape dans le cycle de vie et évènement démographique

1. « l'évolution des caractéristiques démographiques d'un ménage de sa situation initiale à sa dissolution »
2. Source : Demopaedia (INED) (page consultée en juillet 2014).

Les caractéristiques des ménages sont la clé de leurs préférences et choix résidentiels (Speare, 1970; Pickvance, 1973; Quigley et Weinberg, 1977; Brummell, 1979; Clark *et al.*, 1979; Ioannides, 1987; Lindberg *et al.*, 1992; Long, 1992; Nijkamp *et al.*, 1993; Dieleman et Mulder, 2002; Baker, 2002; Feijten et van Ham, 2008; Huang *et al.*, 2013), et dès lors, chaque modification des caractéristiques d'un ménage au cours de son cycle de vie peut avoir des répercussions sur ses besoins en logement. Reprenant ainsi les termes de Nijkamp et al. (1993) : *"population dynamics, reflected inter alia in a household life cycle model, is crucial in modelling housing market behaviour"*[3].

On identifie dans la littérature huit évènements démographiques principaux qui ont un impact sur le parcours résidentiel des individus ou des ménages (Nijkamp *et al.*, 1993; Dieleman et Mulder, 2002; Debrand et Taffin, 2005; Bigot, 2010) :

- émancipation du domicile parental ;
- entrée sur le marché du travail ;
- cohabitation, formation d'un couple ou mariage ;
- séparation ou divorce ;
- naissance d'un enfant ;
- départ des enfants du domicile familial ;
- départ en retraite ;
- décès du conjoint.

L'émancipation d'un enfant entraîne la modification du ménage de ses parents. Si, suite au départ de leur enfant, le domicile parental est devenu trop grand, ils peuvent envisager de déménager. De la même manière, la formation d'un couple déclenche souvent, à plus ou moins long terme, de nouveaux besoins résidentiels. Il peut s'agir d'un changement de logement ou d'un rapprochement géographique des deux partenaires.

La représentation dynamique des différentes étapes du cycle de vie, à travers la modélisation des évènements démographiques, est donc indispensable à la modélisation des mobilités résidentielles.

2.1.2 La simulation des évolutions démographiques au service des modèles de mobilités résidentielles

De précédents travaux ont intégré les évolutions des ménages dans leur cycle de vie (ou évolutions démographiques) comme variables explicatives aux mobilités résí-

3. « les dynamiques de population, reflétées par un modèle de cycle de vie des ménages, sont primordiales dans la modélisation des comportement du marché du logement »

dentielles, et il est aujourd'hui rare que le développement des modèles de mobilités résidentielles se dispense de l'intégration d'une dynamique démographique. Parmi ces travaux, nous pouvons citer des modèles dédiés uniquement à l'étude des mobilités résidentielles, comme ceux de Nijkamp et al. (1993) ou Haase et al. (2010), des modèles ciblant les interactions entre mobilités résidentielles et quotidiennes (Gusbin *et al.*, 2007; Cornelis *et al.*, 2012), ou des modèles plus complets comme des modèles LUTI (Land Use and Transport Interaction) : IRPUD (Wegener, 1985), ILUTE (dont le modèle démographique est I-PUD (Chingcuanco et , 2013)), PUMA (Ettema *et al.*, 2007), ou encore SIMBAD (Nicolas *et al.*, 2009).

Le point commun de ces modèles d'évolutions démographiques est l'objectif pour lequel ils sont conçus : ils ne sont donc pas directement l'objet d'étude mais constituent un sous-produit (van Imhoff et Post, 1998; Morand *et al.*, 2010), indispensable aux recherches dans lesquelles ils sont intégrés (van Imhoff et Post, 1998). Leurs résultats servent d'*inputs*[4] aux processus modélisés par ailleurs. Leur objectif est simplement de faire évoluer les entités élémentaires d'un modèle de mobilités résidentielles.

Ainsi, la précision et le réalisme des processus modélisés sont différents de ce qu'ils devraient être pour une étude spécifiquement dédiée à la démographie (ex. la structure des réseaux de parenté pour l'assistance aux retraités (van Imhoff et Post, 1998) ou à l'évolution des carrières salariales pour anticiper les retraites (Bonnet *et al.*, 1999)).

Les niveaux de simplification choisis pour intégrer les évolutions démographiques dans les modèles diffèrent en fonction :

- de l'approche globale du modèle auquel ce sous-modèle contribue ;
- du rôle joué par les résultats des évolutions démographiques dans la thématique du projet ;
- des données disponibles.

Par exemple, I-DUM (Chingcuanco et , 2013) est le modèle démographique d'une plateforme LUTI multi-agents (ILUTE) : il est individu-centré et dynamique, et reproduit chaque évènement démographique (naissance, décès, union, etc) au niveau individuel. L'objectif d'I-DUM est, entre autres, de faire évoluer chaque individu de la population synthétique dans un cycle de vie, de reproduire l'hétérogénéité des individus dans le modèle, et d'alimenter les différents modèles de mobilités. Les objectifs sont les mêmes concernant l'intégration des évolutions démographiques au projet MOBLOC

4. « Tout information qui alimente, qui agît sur ou qui est pris en compte par une unité de simulation » (Morand *et al.*, 2010)

(Cornelis *et al.*, 2012), mais les auteurs expliquent, au moment de la réflexion sur le choix de l'approche, que la disponibilité des données conditionnera fortement le choix final de la conceptualisation du modèle.

Nijkamp et al. (1993) étudient l'impact des modifications du cycle de vie des ménages sur les mobilités résidentielles, dans le cadre d'un modèle dynamique de marché du logement. Considérant que l'âge et la taille du ménage sont les éléments qui influencent le plus les déménagements, ils centrent la conception de leur modèle démographique sur ces caractéristiques des ménages ; ils ne modélisent que certains évènements démographiques, comme le vieillissement des individus, leur position dans le ménage ou encore les formations et dissolutions des ménages.

Le sous-modèle des évolutions démographiques du projet MOBIDIC (Gusbin *et al.*, 2007) est conçu pour produire des effectifs de population par arrondissement, utilisés comme *inputs* aux autres modèles. L'ensemble des modèles de MOBIDIC fonctionnent à partir de typologies de ménages, et la démographie ne fait pas exception (les ménages sont regroupés en huit catégories).

D'autres enfin sont plus simplifiés, comme le module démographique de SIMBAD (Nicolas *et al.*, 2009), et modélisent des évolutions démographiques à travers des modifications d'effectifs par IRIS uniquement, sur la base de projections nationales agrégées, alors que les modèles de mobilités sont individu-centrés. Les évolutions démographiques n'ont pas un rôle majeur dans le projet Simbad (la recherche se focalise principalement sur les mobilités quotidiennes et le transport de marchandises), mais leur modélisation, même succincte, vient compléter la dynamique générale du modèle. Dans ce cadre, ce sont uniquement des évolutions démographiques qui sont modélisées et non des évènements démographiques.

2.1.3 Rôle et enjeux de Mobisim-Démo

Le fait de modéliser et simuler les évolutions démographiques dans Mobisim découle directement des besoins du modèle de simulation des mobilités résidentielles. En évoluant dans leur vie, les ménages ont des besoins résidentiels différents ; en cela, Mobisim-Démo doit pouvoir alimenter ce modèle, et faire évoluer la dynamique résidentielle d'une agglomération sous l'impulsion des évolutions personnelles des ménages. L'objectif est de pouvoir observer explicitement le réajustement entre situation personnelle et leur situation résidentielle.

La réflexion sur la nature du modèle à concevoir a été guidée par cet objectif principal, mais également par deux contraintes, en lien avec la philosophie générale de

Mobisim :

- être capable de reproduire des évolutions démographiques plausibles, pour servir la construction de scénarios d'aménagements réalistes ;
- s'intégrer dans la plateforme Mobisim, c'est-à-dire s'adapter à sa structure de modélisation, à savoir :
    1. une modélisation individu-centrée, afin de fournir des données cohérentes avec les données nécessaires dans les autres modèles ;
    2. une modélisation itérative, puisque le fonctionnement général de la plateforme suit un temps discret.

Ainsi, Mobisim-Démo a vocation à reproduire des tendances démographiques générales et réalistes, et permettre à chaque individu qui compose la population synthétique d'évoluer dans son cycle de vie.

2.2 Présentation générale du modèle démographique de Mobisim

2.2.1 Un modèle de microsimulation dynamique

2.2.1.1 L'intérêt de la microsimulation dynamique en démographie

La microsimulation est une technique de modélisation individu-centrée, fondée sur des individus et leurs caractéristiques, avec pour objectif de faire évoluer ces individus *via* des modifications de leurs caractéristiques (Merz, 1991). Dans sa version dynamique (à opposer aux modèles statiques [5]), la microsimulation est fondée sur des probabilités d'évènements ou de transition, appliquées à chacune des entités d'une population selon ses caractéristiques propres. Les probabilités, lorsqu'elles sont réalisées, modifient les attributs de l'individu : sa situation évolue alors dans le temps.

Ces probabilités peuvent être vues comme des règles de comportement. L'approche probabiliste privilégie l'hétérogénéité individuelle (Bonnet *et al.*, 1999; Morand *et al.*, 2010) : à caractéristiques identiques, les individus, *via* les tirages aléatoires des évènements auxquels ils sont soumis, suivent des trajectoires personnelles différentes. Foca-

5. La microsimulation statique repose plutôt sur des matrices de transition, indiquant la probabilité pour l'individu de passer d'un état à un autre (Merz, 1996). Elle est plus adaptée aux projections à court terme, puisqu'elle suppose que les caractéristiques générales de la population évoluent peu (ex. la taille de la population totale ne varie pas en microsimulation statique, les effectifs de chaque type sont juste réajustés chaque année).

lisée sur les entités élémentaires d'un modèle, la microsimulation nécessite des données désagrégées en entrée du modèle, et génère des données désagrégées en sortie de simulation (Zaidi et Rake, 2001; Morand *et al.*, 2010). L'agrégation de ces trajectoires permet d'estimer les conséquences cumulées de tels comportements individuels, formant ainsi une configuration globale de la situation. L'intérêt de la microsimulation, comme toute approche individu-centrée, est donc de représenter une multitude de comportements individuels pour en étudier les structures plus globales qui en émergent [6].

Développée en sciences sociales par Orcutt (1957) sous l'appellation de *simulation microanalytique*, la microsimulation dynamique présente plusieurs avantages qui lui ont rapidement valu une place de choix dans la modélisation des évolutions démographiques (van Imhoff et Post, 1998; Spielauer, 2011; Huang *et al.*, 2013) : elle permet de considérer un grand nombre d'attributs et de caractéristiques des individus, elle est flexible dans la conceptualisation des évènements démographiques (les probabilités sont des paramètres qui s'appliquent individuellement, et indépendamment à chaque entité), elle permet de suivre les trajectoires individuelles des entités [7]. Enfin, le caractère aléatoire des processus démographiques est explicitement modélisé grâce à l'application répétée de probabilités (van Imhoff et Post, 1998) ; ceci coïncide parfaitement avec les évènements démographiques (mise en couple, naissance d'un enfant, séparation, etc), qui interviennent avec une certaine probabilité dans la vie des individus.

Ainsi, les modèles de microsimulation dynamique en démographie « permettent de simuler sur le long terme le renouvellement des caractéristiques socio-démographiques d'un échantillon d'individus et de ménages, par une combinaison de règles déterministes, de modèles de comportement et de tirages aléatoires contrôlés » (Bonnet *et al.*, 1999). Le premier de ces modèles est DYNASIM (Orcutt *et al.*, 1976), et l'approche s'est largement diffusée par la suite (van Imhoff et Post, 1998; Bonnet *et al.*, 1999; Zaidi

6. Approche *bottom-up*.

7. Ces avantages s'envisagent notamment par opposition aux modèles de macrosimulation (van Imhoff et Post, 1998), fondés sur l'évolution d'une population plutôt que sur celle des individus. L'approche repose sur la base de matrices de transition (quelle est la probabilité pour une catégorie de population de passer d'un effectif à un autre ?) et non par l'application de probabilités individuelles (quelle est la probabilité pour cet individu de vivre cet évènement ?). En démographie, la macrosimulation permet donc de modéliser des évolutions démographiques, mais pas la dynamique des processus démographiques (ex. les évolutions démographiques dans le modèle Simbad (Nicolas *et al.*, 2009)). Son principal défaut est de ne pouvoir considérer les trajectoires individuelles, ni de pouvoir diversifier la population (la taille de la matrice dépend du nombre de caractéristiques considérées pour définir les différents types de ménages, ce qui rend problématique la multiplication de ces caractéristiques (nombre de lignes et de colonnes exponentiel). Moins gourmande en données, l'approche présente néanmoins l'avantage d'une mise en place moins contraignante. Les modèles de macrosimulation sont également moins sujets à l'aléa.

et Rake, 2001; Murphy, 2003; Holm *et al.*, 2006; Morand *et al.*, 2010; Ravulaparthy et Goulias, 2011; Chingcuanco et , 2013; Geard *et al.*, 2013).

2.2.1.2 De Destinie à Mobisim

Compte tenu des contraintes et des objectifs liés à la simulation des évolutions démographiques dans Mobisim, la microsimulation dynamique nous a semblé être l'approche la plus adaptée, nous permettant d'ailleurs de bénéficier des expériences d'autres travaux. La version de Mobisim SMA chez ATN (Casanova *et al.*, 2005) comprenait un modèle de microsimulation inspiré de Destinie, modèle démographique dynamique développé par l'INSEE (Bonnet *et al.*, 1999), aussi avons-nous choisi de reprendre cette approche pour définir les bases de notre modèle. Ce choix s'inscrit dans l'approche individu-centrée de Mobisim, et est possible grâce à la composition de la population synthétique de la plateforme (cf. chapitre 1) : nous bénéficions d'une base démographique faite d'une population complètement désagrégée, qui nous permet de construire un tel modèle [8].

Le modèle de microsimulation Destinie a été créé à la fin des années 1990 en France par l'INSEE pour étudier l'évolution de la situation des retraités. Ainsi, le modèle se focalise principalement sur la simulation d'évènements démographiques et des carrières salariales. Ces dernières ne nous intéressant pas dans Mobisim, nous nous sommes uniquement inspirés de sa modélisation des évènements démographiques.

L'entité de référence de Destinie est l'individu, et c'est le choix que nous faisons également pour le modèle démographique de Mobisim. L'individu comme entité élémentaire nous permet de combiner les évolutions des individus et celles des ménages : nous modélisons les évolutions des individus et, à travers les liens qui les unissent (parentalité, union, colocation), faisons conjointement évoluer les ménages. Les deux dimensions sont donc conservées (Bonnet *et al.*, 1999), ce qui est indispensable dans Mobisim : les entités de référence, ou agents, ne sont pas les mêmes dans le cadre des mobilités quotidiennes (l'agent est l'individu) et des mobilités résidentielles (l'agent est le ménage). L'intérêt d'un modèle de microsimulation dynamique pour Mobisim-Démo est de pouvoir à la fois donner au territoire une dynamique démographique, d'une manière générale, tout en faisant évoluer spécifiquement chacun des ménages dans leur cycle de vie.

8. Chaque individu est différentiable des autres, et ses caractéristiques permettent l'application de probabilités individuelles.

2.2.2 Caractéristiques générales du modèle

La population initiale du modèle est la population synthétique de Mobisim, où chaque individu est unique (nommé par un identifiant) et caractérisé par plusieurs attributs (cf. chapitre 1). Ces caractéristiques sont à la base de la simulation dans Mobisim-Démo. Le modèle ne connaît pas de phase d'initialisation, il utilise en entrée les informations de la population, et produit en sortie des informations sur la population. Il intervient au début de chaque itération, en amont des autres sous-modèles.

2.2.2.1 Les évènements démographiques de Mobisim

Nous avons choisi les évènements démographiques à modéliser en fonction de l'importance de leur influence dans les besoins résidentiels des ménages. Reprenant les évènements démographiques énoncés précédemment (cf. 2.1.1), sont modélisés dans Mobisim :

- le vieillissement des individus ;
- l'émancipation du domicile parental ;
- la formation d'un couple ;
- la séparation d'un couple ;
- la naissance d'un individu ;
- le décès d'un individu.

De plus, nous modélisons également les migrations avec « l'extérieur » afin de :

- conserver la dynamique globale de population sur le territoire, avec les territoires extérieurs [9] ;
- intégrer à la base de données des individus autrement que par la naissance (immigration), et les supprimer autrement que par le décès (émigration) (van Imhoff et Post, 1998) [10]

Ces migrations (entrée et sortie de la zone d'étude) sont donc traitées dans le module démographique, contrairement au modèle de Haase et al. (2010), qui les intègre dans le module de mobilités résidentielles. Dans la base de données, elles ne comptent pas

9. L'extérieur n'a aucune consistance dans le modèle. Il permet uniquement de considérer un réservoir de population, sans autre considération dans le modèle : les individus y sont neutres, sans caractéristique aucune, et ne sont pas concernés par les processus modélisés dans la plateforme. Il s'agît simplement de tenir compte du fait qu'il y a des individus en dehors de la zone d'étude simulée par Mobisim.

10. On parle alors de modèle ouvert, par opposition aux modèles fermés, dont les nouveaux individus ne peuvent être issus que d'une naissance.

comme des déménagements, mais bien comme des évènements démographiques.

Enfin, les caractéristiques professionnelles des individus sont également simulées, afin de faire un lien avec les informations nécessaires au module des mobilités quotidiennes. Ces caractéristiques sont modélisées, mais n'évoluent pas au cours d'une simulation, pas plus que les revenus des individus.

La réalisation d'un évènement entraîne une modification des caractéristiques des individus et/ou des ménages. Les évènements sont simulés consécutivement les uns aux autres et, à travers les probabilités qui leur sont associées, définissent le cycle de simulation des évolutions démographiques de Mobisim.

2.2.2.2 Caractéristiques socio-démographiques utilisées dans le modèle démographique

Chaque individu et chaque ménage dispose d'un vecteur d'attributs. Les caractéristiques des agents (individus ou ménages) sont à considérer comme des conditions qui déclenchent ou non l'application des probabilités des évènements démographiques, ce qui revient à définir « la manière dont les caractéristiques d'un individu influencent les évènements qui se produisent » (Bonnet *et al.*, 1999).

La majorité des caractéristiques socio-démographiques utilisées dans le modèle démographique de Mobisim proviennent, à travers la population synthétique, des recensements de population INSEE. Ces variables sont les suivantes :

- l'âge des individus ;
- le genre (féminin ou masculin) ;
- la composition du ménage [11] ;
- le rôle dans le ménage (enfant, chef de ménage, colocataire) ;
- le diplôme.

Pour les besoins du modèle sont créées des variables qui n'apparaissent pas dans les recensements INSEE. Il s'agit de la durée du couple et de l'âge de fin d'étude. La variable « durée du couple » permet de définir les probabilités de séparation. Les couples issus de la population synthétique se voient attribuer une valeur à l'initialisation. Pour

11. Célibataire, En couple, En couple avec enfant(s), Famille monoparentale, Collocation ou Hors Ménage. Sont considérés comme Hors Ménage les foyers étudiants, les maisons de retraite, les casernes militaires et autres institutions d'hébergement.

les couples créés pendant la simulation, la variable est ajoutée aux caractéristiques du ménage, et le compteur est à zéro. Chaque année, les valeurs sont actualisées.

L'âge de fin d'étude nous permet d'attribuer, de manière probabiliste, une catégorie socio-professionnelle (CSP) aux individus, étape intermédiaire mais indispensable pour l'attribution d'un revenu (ou classe de revenu) aux individus, et donc aux ménages [12]. Pour les individus présents dans la population synthétique de départ, l'âge de fin d'études est extrapolé à partir de leur diplôme. Pour les individus nés pendant la simulation, il est calculé en fonction des âges de fin d'étude de chacun des parents (cf. 2.3).

A chaque itération, les nouveaux individus et les nouveaux ménages sont ajoutés à la base de données avec toutes leurs caractéristiques (définissant leur vecteur d'attributs), et les caractéristiques des individus déjà existants sont mises à jour en fonction des évènements démographiques qui leur sont arrivés, dont le vieillissement systématiquement appliqué à l'ensemble des individus.

2.2.2.3 Mobisim n'a pas de mémoire

Au cours des itérations, toutes les informations ne sont pas enregistrées. Les liens de filiation, une fois les enfants émancipés du domicile parental, et les liens entre deux expartenaires ne sont pas conservés. Bien que ces deux liens sociaux, entre autres, puissent avoir un impact sur les mobilités résidentielles, ce choix a été fait dans un premier temps pour ne pas surcharger le modèle. Seules sont considérées les caractéristiques intrinsèques aux ménages et relevant de l'itération en cours.

2.3 Formalisation des évènements démographiques

Les probabilités des évènements démographiques dépendent soit des caractéristiques des individus, soit des caractéristiques du ménage auquel il appartient, ou des deux à la fois.

Les simulations fonctionnent par itération, en temps discret comme pour l'ensemble de la plateforme. Ainsi, les probabilités sont appliquées à chaque agent selon ses caractéristiques à l'itération précédente pour mettre à jour ses caractéristiques pour l'itération en cours. Les évènements sont séquentiels, et interviennent les uns à la suite des autres. En cas de réalisation, les probabilités déclenchent l'évènement démographique pour l'individu, ce qui entraîne une modification de ses caractéristiques et/ou de celles de son

12. Le revenu d'un ménage est la somme des revenus des individus qui le composent.

ménage. Chaque évènement renouvelable [13], s'il a lieu, ne peut arriver qu'une seule fois par individu dans l'itération. Seront présentés successivement chacun des évènements démographiques : les évènements familiaux, les migrations et les décès.

Émancipation des individus

Dans Mobisim, les individus ne peuvent quitter le foyer parental que lorsqu'ils ont terminé leurs études. Ce postulat nous permet de cantonner les créations de nouveaux ménages à un moment précis de la « vie » des individus.

La possibilité d'émancipation d'un individu n'intervient donc que lorsque son âge égale son âge de fin d'étude, variable clé dans la modélisation des évolutions démographiques de Mobisim. En effet, l'émancipation d'un individu entraîne la création d'un ménage et déclenche ainsi potentiellement les autres processus d'évolution dans son cycle de vie. Dans la version de Mobisim SMA et dans le modèle Destinie, l'âge de fin d'étude d'un individu dépend de celui de ses parents, permettant ainsi de modéliser l'hypothèse d'une certaine reproduction sociale. De plus, l'âge de fin d'étude du père a un poids plus important dans la détermination de celui de l'enfant que celui de la mère. Enfin, sont prises en compte la génération à laquelle appartient l'individu ainsi que la génération de ses parents, afin de modéliser l'évolution globale du niveau d'étude à travers les générations. Par souci de simplification, nous n'avons pas conservé cette dernière hypothèse dans Mobisim. Ainsi, l'âge de fin d'étude est calculé de la manière suivante :

$$[\ (1,5\times \text{(âge de fin d'étude du père)} + \text{(âge de fin d'étude de la mère)}\ ] \ /\ 2{,}5$$

Une fois que l'individu atteint cet âge, il est nécessaire de convertir sa CSP [14] « Étudiant » en une CSP classique. Cette modification s'effectue en deux étapes :

1. Conversion de l'âge de fin d'étude des enfants en diplôme.
2. Conversion du diplôme en CSP.

Parallèlement au changement de statut professionnel, trois probabilités s'appliquent aux individus : la probabilité de s'émanciper en ménage célibataire, la probabilité de s'émanciper dans une colocation et la probabilité d'aller en « hors ménage ». Les deux premières engendrent la création d'un nouveau ménage (ménage célibataire ou formation d'une colocation avec d'autres individus), ce qui n'est pas le cas de la dernière.

13. Formation d'un couple, séparation d'un couple et naissance d'un enfant
14. Catégorie Socio-Professionnelle

L'émancipation d'un enfant dans un ménage entraîne des modifications dans les caractéristiques de ce dernier :

- si l'enfant était le seul enfant, le ménage passe de « couple avec enfant(s) » à « couple sans enfant », ou de « famille monoparentale » à « célibataire » ;
- dans le cas contraire, seule la variable « nombre d'enfant(s) » est affectée.

Dans les deux cas, le nombre de personnes appartenant au ménage est modifié.

Mise en couple

D'un point de vue démographique, cet évènement inclut les premiers mariages et les unions libres, ainsi que les remises en couple. La probabilité de mise en couple dans Mobisim ne concerne que les individus célibataires, émancipés du foyer parental, c'est-à-dire les individus dont le statut du ménage est « célibataire », « famille monoparentale » ou « colocation » (Fig. 2.2). Elle s'effectue en deux étapes :

1. La première consiste à mettre en réserve des candidats à la mise en couple, c'est-à-dire à procéder à un tirage au sort parmi les individus célibataires, selon leur sexe et leur âge. La probabilité de mise en couple est un paramètre du modèle (cf. Chapitre 4).
2. La deuxième étape forme les couples : elle constitue des dyades à partir des individus sélectionnés dans l'étape précédente. L'association des individus se fait également par tirage au sort, mais sans paramètre extérieur : pour chaque femme, sept hommes sont sélectionnés aléatoirement, parmi lesquels l'« heureux élu » est celui dont l'âge et l'âge de fin d'étude sont conjointement les plus proches de celui de la femme.

Au niveau de la base de données, lorsque deux individus se mettent en couple, leur statut individuel passe de « célibataire » à « en couple » (Fig. 2.2), leur statut du ménage devient « en couple » (avec ou sans enfant(s) selon leur statut précédent) et ils forment un nouveau ménage. Les deux ménages auxquels ils appartenaient sont supprimés. A la création d'un couple est générée la variable « durée du couple », qui permettra ensuite d'appliquer la probabilité de séparation.

Naissances

Elles sont distinguées en deux catégories, les primo-naissances et les naissances dites suivantes. Dans Mobisim, les femmes ne peuvent avoir des enfants qu'entre 16 et 49 ans, et ce uniquement si elles sont en couple (Fig. 2.2).

- Les primo-naissances correspondent à la naissance du premier enfant d'une femme ; la probabilité d'avoir un premier enfant dépend de l'âge de la mère.
- Les naissances suivantes ne dépendent plus de la mère mais du rang de l'enfant et de la différence d'âge avec l'enfant précédent dans la fratrie.

Le nombre d'enfant(s) par femme ne peut être supérieur à 6. La naissance d'un individu modifie le statut matrimonial du ménage si c'est le premier enfant (un « couple sans enfant » devient un « couple avec enfant »), le « nombre d'enfant(s) » (qui passe de « aucun » à « un à deux enfant(s) ») et le nombre de personnes dans le ménage. Seules ces deux dernières caractéristiques sont modifiées si le ménage était déjà un « couple avec enfant(s) ».

Mobisim ne gardant pas en mémoire les informations relatives aux familles, lorsque le dernier enfant d'un couple s'émancipe, son statut devient alors « couple sans enfant » et la femme se trouve donc à nouveau concernée par les probabilités de primo-naissance.

Séparation

La séparation dans Mobisim correspond à une désunion entre un homme et une femme en couple, qu'il s'agisse d'une procédure de divorce ou non. La probabilité de séparation dépend uniquement de la durée du couple, contrairement à Destinie où elle dépend également de l'âge de chacun des deux conjoints. Au moment de la séparation, le statut du ménage est modifié (passage de « en couple sans enfant » à « célibataire », ou de « en couple avec enfant » à « monoparental ») pour l'un des deux conjoints, et un nouveau ménage « célibataire » est créé pour le second. Les caractéristiques individuelles des deux partenaires du couple sont affectées de la même manière, c'est-à-dire que le statut de l'individu est modifié de « en couple » à « célibataire » (Fig. 2.2).

Lorsqu'un couple avec enfant se sépare, nous affectons les enfants à l'un des deux parents, avec une probabilité de 0,85 pour la mère et de 0,15 pour le père (INSEE, 2007).

Migrations

Les migrations concernent tous les ménages. Les ménages de Mobisim peuvent entrer ou sortir du territoire, et ce différemment selon deux caractéristiques - le statut du ménage et l'âge de la personne de référence - dont dépendent les probabilités de migration. En cas de réalisation de l'évènement, le ménage entier est concerné. Pour les sorties, un ménage correspondant aux caractéristiques tirées au sort est choisi puis

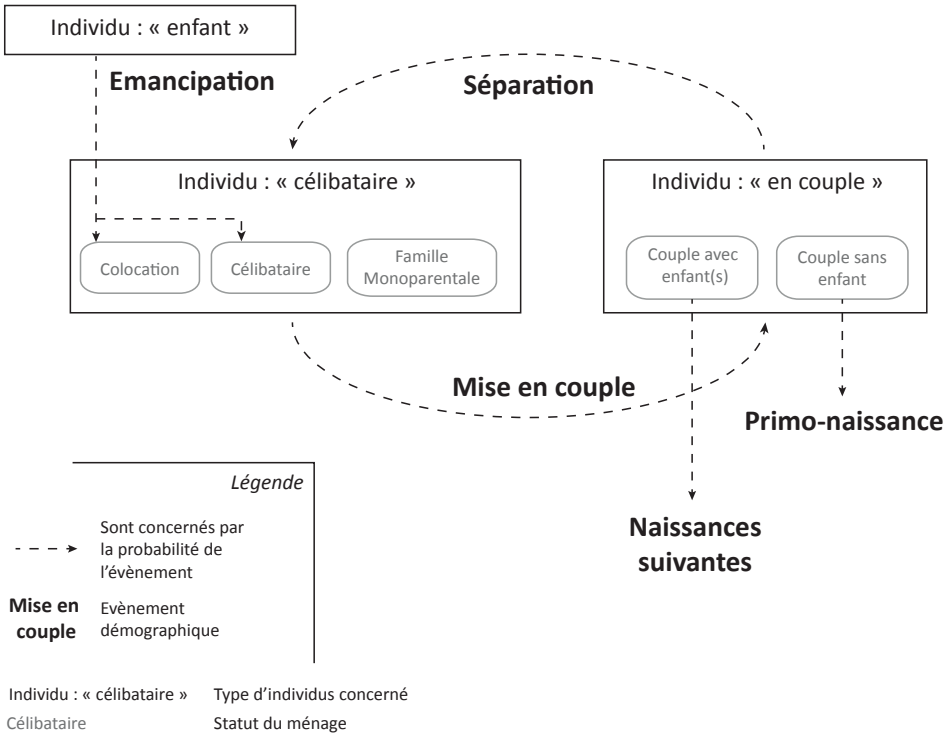


FIGURE 2.2 – Synthèse du fonctionnement des évènements démographiques familiaux dans Mobisim-Démo

effacé de la base de données. Pour les entrées, un ménage répondant aux deux caractéristiques est sélectionné aléatoirement, puis dupliqué dans la base de données.

Décès

La probabilité de décéder s'applique systématiquement à tous les individus de Mobisim, selon le sexe et l'âge. Si l'individu vit seul, son ménage disparaît ; dans le cas contraire, les caractéristiques du ménage auquel il appartenait sont modifiées. Si le ménage est un ménage monoparental, les enfants passent dans la catégorie « hors ménage ».

Le tableau 2.1 synthétise les différents évènements démographiques modélisés dans Mobisim, en présentant la population concernée par l'application de la probabilité de l'évènement, les caractéristiques de l'entité concernée dont va dépendre la probabilité, et les conséquences démographiques qui en découlent sur le ménage du ou des individu(s) concerné(s) par l'évènement.

D'autres évènements sont intégrés dans Mobisim-Démo. Ils permettent de traduire une information pour le besoin des modules de mobilités quotidiennes et résidentielles :

– les écoliers prennent la CSP de « Étudiant » à l'âge de 15 ans ;

Tableau 2.1 – Récapitulatif des évènements démographiques dans Mobisim

Événement	Population concernée	Caractéristiques conditionnelles	Impact sur le ménage
Émancipation	Rôle = « enfant »	Âge supérieur ou égal à l'âge de fin d'étude	Modification des caractéristiques du ménage parental, création d'un ménage
Mise en couple	Individus célibataires et émancipés (rôle = « chef de ménage »)	Sexe, âge	Création d'un ménage
Primo-naissance	Femme en couple	Âge	Modification des caractéristiques
Naissance suivante	Couple avec enfant	Rang de la naissance, différence d'âge avec l'enfant précédent	Modification des caractéristiques
Séparation	Couple	Durée du couple	Modification des caractéristiques et création d'un ménage
Migrations (entrées)	Tous les ménages	Statut, âge de la personne de référence du ménage	Duplication d'un ménage existant
Migrations (sorties)	Tous les ménages	Statut, âge de la personne de référence du ménage	Suppression d'un ménage
Décès	Tous les individus	Sexe, âge de l'individu	Modification des caractéristiques ou suppression du ménage

– nous ne simulons aucune évolution des CSP dans Mobisim, et nous affectons aux personnes actives une certaine probabilité de devenir « Inactif », et une autre de passer dans la catégorie « Chômeur » ;
– l'âge de la retraite est fixé à 65 ans. Il permet de transformer la variables CSP en faisant passer l'individu de sa catégorie socio-professionnelle à « retraité ». Cette information est nécessaire dans la modélisation des mobilités quotidiennes. Celles-ci dépendent en effet de l'emploi du temps des individus, lui-même en partie défini par leur CSP ;
– les personnes âgées peuvent, au-delà de 80 ans, partir en « hors ménages », ce qui correspond à la maison de retraite. Cet évènement implique une suppression d'un ménage si il est « célibataire », ou une modification de ses caractéristiques dans les autres cas. Par ailleurs, des individus sont ajoutés dans les effectifs de population « hors ménage ».

Le revenu d'un ménage dépend de la somme des revenus des individus qui le composent [15]. Aussi, lorsqu'un ménage subit une modification de ses caractéristiques, avec l'ajout ou la suppression d'un individu en son sein, son revenu est réévalué en fonction du nombre de personnes dans le ménage.

Dans une simulation, les calculs de probabilités des évènements démographiques interviennent dans l'ordre suivant :

1. Migrations (entrées et sorties du territoires) ;
2. Décès des individus ;
3. Vieillissement des individus et évolution des statuts professionnels (passage de « écolier » à « étudiant » ou de « étudiant » à la CSP définie par le diplôme) ;
4. Naissance ;
5. Formation des couples ;
6. Séparation des couples ;
7. Émancipation du domicile parental.

2.4 Fonctionnement du modèle : des variables en interactions

Comme le montre le schéma 2.2, les variables et évènements simulés sont fortement dépendants les uns des autres. L'identification de ces interactions permet de mieux comprendre le fonctionnement du modèle d'une part, mais également d'anticiper le calibrage du modèle par la suite.

Les principales interactions concernent les évènements liés aux couples : émancipation, unions, naissances et séparations (Fig. 2.3). Ce groupe d'évènements représente les dynamiques démographiques les plus décisives de notre modèle, au sens où ils influencent de nombreux résultats démographiques : le taux de natalité, le nombre de

15. Le revenu des individus dans Mobisim est estimé à partir du niveau de vie médian, variable disponible dans le recensement de la population (INSEE) à l'échelle de chaque entité spatiale (IRIS ou commune). Au moment de générer la population synthétique, ce revenu est décliné à l'échelle de chaque ménage, en fonction de son type et de sa catégorie socio-professionnelle. Ceci attribue à chaque ménage un niveau de vie, ou revenu par unité de consommation. Le revenu simulé d'un ménage est obtenu en multipliant ce niveau de vie par la somme des unités de consommation présentes dans le ménage ; chaque individu a un poids différent, selon une définition de l'INSEE. Dans la base de donnée, le montant du revenu du ménage est enregistré au niveau des individus : il est ventilé pour chaque adulte proportionnellement à sa CSP. Le revenu d'un individu n'évolue pas au cours de la simulation ; lorsqu'un enfant s'émancipe, son revenu (qui était nul) est défini comme le revenu moyen de ses parents.

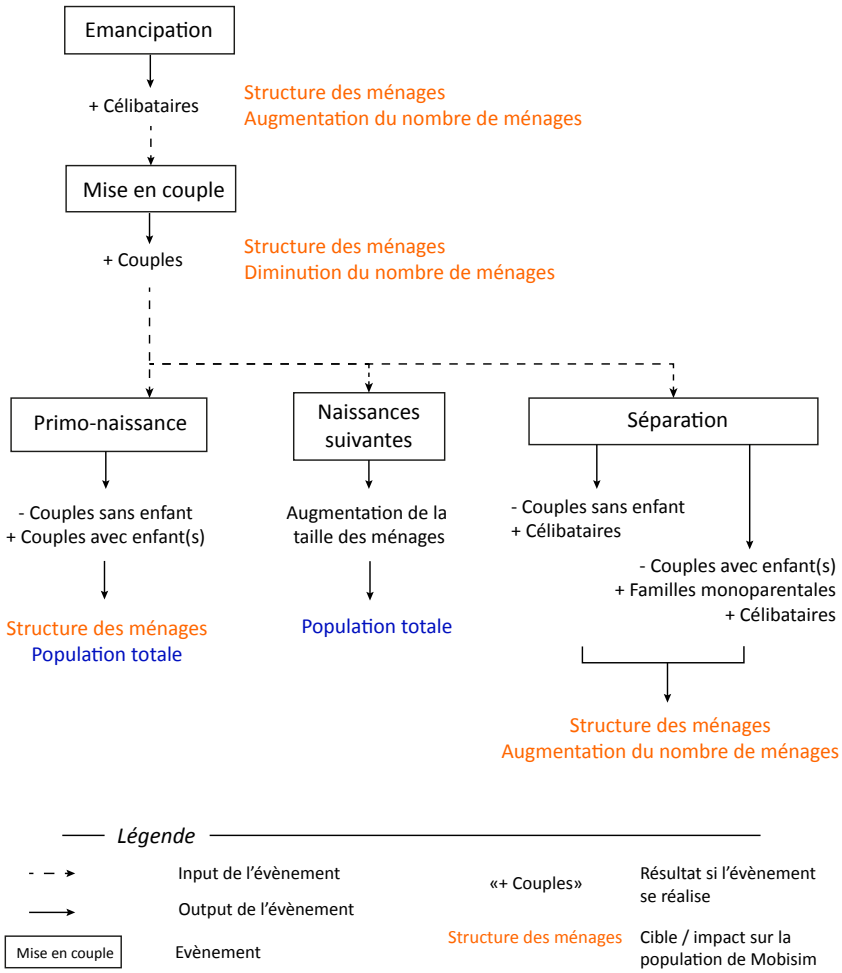


FIGURE 2.3 – Interactions entre les évènements démographiques familiaux

ménages et leur structure, la population dans son ensemble et la population des ménages ainsi que la structure par âge des individus. Si l'on se réfère à la deuxième colonne du tableau 2.1, ce bloc d'évènement est également le plus sélectif, puisque chaque évènement concerne un type d'individu ou de ménage bien particulier.

Bien que la mise en couple n'intervienne qu'en 5ème position dans la séquence de simulation des évènements, elle constitue un levier important dans l'ensemble des paramètres : par la création de couples, elle stimule à la fois les possibilités de naissances et de séparation (Fig. 2.3).

La séparation permet de réguler le décalage entre les effectifs des ménages en couple et des ménages monoparentaux ; une modification de ses valeurs de probabilité impacte donc surtout la structure des ménages, mais également le nombre de ménages (Fig. 2.3). Elle a également un impact indirect sur les naissances, puisqu'elle diminue le nombre de couples.

Les naissances agissent différemment dans le modèle en fonction de leur rang. Les premières naissances modifient la structure des ménages, régulant la balance entre les couples avec ou sans enfant, alors que les naissances suivantes contribuent surtout à augmenter le taux de natalité, la taille moyenne des ménages et l'effectif de la population totale. Dans l'itération, les naissances interviennent avant la mise en couple des individus, ce qui veut dire qu'un couple « fraîchement uni » ne peut avoir d'enfant dans la même itération.

En amont de ces paramètres les émancipations ont un rôle non négligeable : plus les individus s'émancipent, plus il y aura de ménages dont l'adulte est célibataire, et de fait, candidat à la mise en couple.

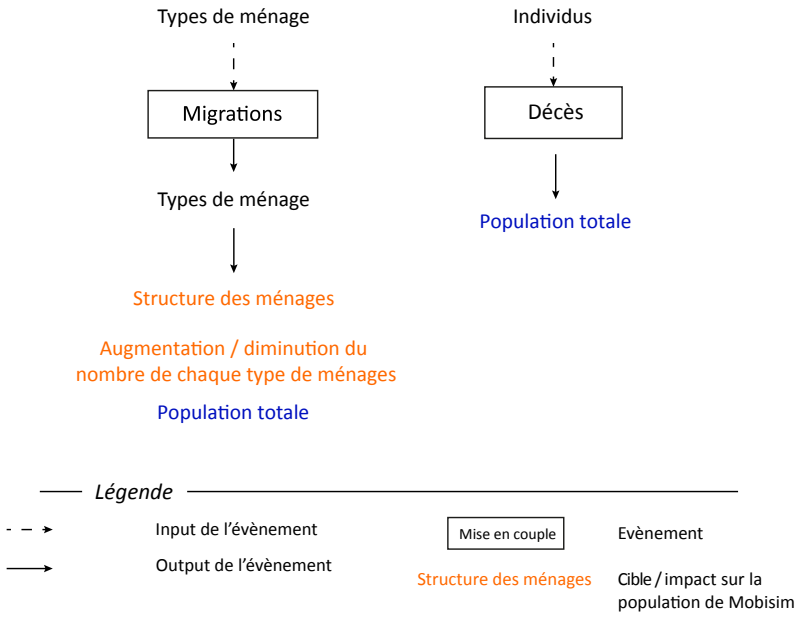


FIGURE 2.4 – Évènements démographiques généraux

La probabilité de décéder est un évènement relativement indépendant dans le modèle, qui influence avant tout le taux de mortalité globale. Il impacte principalement l'effectif de population (Fig. 2.4) et sa structure par âge. Les personnes âgées étant majoritairement concernées, une variation des taux de mortalité peut influencer leur effectif ou l'effectif des personnes en « hors ménage », par répercussion sur la probabilité de passer en « hors ménage » au-delà de 80 ans.

Les migrations étant calculées selon la composition des ménages et l'âge de la personne de référence, elles représentent une variable d'ajustement assez fine. Elles peuvent

ainsi avoir de l'influence sur la structure des ménages, mais également sur la structure de la population par âge et sur la population totale (Fig. 2.4).

Les migrations sont le premier évènement à avoir lieu dans les itérations, et les individus des ménages entrant sont donc soumis au processus d'évolution démographique dès leur arrivée dans Mobisim.

L'impact des différentes probabilités d'émancipation et des probabilités de départ en « hors ménage » affecte principalement le nombre et les effectifs des colocations, le nombre de ménages seuls et, indirectement, l'effectif total de population (par le biais des personnes en hors ménages et l'influence de leurs migrations).

La séquence dans laquelle les différents évènements démographiques sont simulés signifie que toutes les créations et suppressions d'individus et de ménages ont lieu avant les évènements matrimoniaux (unions et séparations).

2.5 Conclusion

Le modèle de simulation des évolutions démographiques de Mobisim est une composante à part entière de la dynamique de la plateforme de simulation, et bien que sa conception ait été impulsée par des besoins inhérents à la thématique résidentielle, il s'intègre dans la cohésion générale de Mobisim.

Tout d'abord, il renforce l'aspect dynamique de la simulation dans Mobisim, en permettant l'évolution de la population d'agents, parallèlement à l'évolution spatiale de la zone d'étude. Les caractéristiques des individus et des ménages sont évolutives, ce qui permet d'alimenter les dynamiques résidentielles de Mobisim.

Notre choix d'une modélisation par la microsimulation, souvent utilisée en démographie, a été conditionné par le fonctionnement global de Mobisim : une modélisation désagrégée pour une évaluation agrégée. Par ailleurs, ce modèle reste cohérent avec la logique méthodologique de Mobisim : 1) rester dans l'approche individu-centrée, itérative, 2) avec un modèle dont les règles simples permettent de représenter des processus complexes, à savoir ici l'évolution de la structure de la population dans une agglomération. La composante démographique de Mobisim forme ainsi un tout cohérent, de la création d'une population synthétique désagrégée à l'évolution de chacun des individus dans leur cycle de vie. Il est possible de suivre chacun des individus de Mobisim, de

l'initialisation du modèle à la fin de la simulation. De plus, les évolutions démographiques sont modélisées à travers des processus et des comportements démographiques basiques, et les interactions entre les différents évènements sont explicites :

- le socle du modèle repose sur les évènements matrimoniaux (mises en couple, séparations et naissances), qui constituent le moteur principal des toutes les évolutions possibles ;
- lorsqu'ils ne font pas partie de la population synthétique de Mobisim, les individus peuvent entrer dans le modèle à travers deux évènements : les naissances et l'immigration. Inversement, il n'y a que deux moyens de sortir de la simulation : le décès ou l'émigration.

Ce modèle renforce également la pluralité de la plateforme, qui combine en son sein des approches de modélisation différentes. La combinaison de la microsimulation avec les modèles agents est de plus en plus courante en modélisation, du fait de la proximité et de la complémentarité des approches (Morand *et al.*, 2010; Birkin et Wu, 2012; Huang *et al.*, 2013) : la microsimulation permet de représenter des données réelles sur les individus, tandis que les modèles agents permettent de mieux prendre en compte les interactions entre les agents, et leurs adaptations à des changements d'environnement (Wu et Birkin, 2012). Dans le cas de Mobisim, cette combinaison permet effectivement de cumuler des comportements démographiques individuels et des préférences résidentielles hétérogènes dans une même dynamique.

D'un point de vue thématique, la construction d'un tel modèle nous permet :

- d'inscrire les ménages dans la logique dynamique du modèle ;
- de modéliser la dynamique de la décision résidentielle en ayant la possibilité de lier les facteurs *push-pull* à des évènements démographiques précis ;
- de tester des scénarios d'évolutions démographiques et d'en étudier l'impact sur les configurations spatiales de mobilités et de satisfactions résidentielles. [16]

16. Cette possibilité ne sera pas exploitée dans le cadre de ce travail, mais elle est envisageable avec Mobisim.

Chapitre 3

Le modèle de simulation des mobilités résidentielles (Mobisim-MR)

La connaissance des mobilités résidentielles représentent un enjeu majeur pour l'aménagement du territoire. La compréhension de leurs dynamiques et des structures qui en résultent est de plus en plus importante dans la gestion des politiques publiques, et constitue un champ de recherche important. Depuis les années 50, de nombreux modèles ont été développés pour analyser ces fonctionnements complexes, et autant de méthodes avancées. Si celles-ci diffèrent les unes des autres, les conceptualisations restent souvent les mêmes : la plus fréquente place le ménage dans un processus de non-satisfaction vis-à-vis de son logement, qui, à l'arrivée d'un événement déclencheur, le décide à déménager. Le choix du nouveau logement s'opère généralement dans un second temps, avec pour objectif une amélioration de la situation résidentielle. Certaines questions restent cependant généralement en suspens : quelle est la propension des individus à migrer ? Comment s'effectue le passage à l'acte ? Quelle est la dynamique des processus de décision ? Quel est le rôle respectif des facteurs individuels et collectifs ? Sur ces questions qui touchent aux temporalités de la décision de déménager, il existe peu de littérature. On connaît mal les facteurs qui jouent un rôle dans le passage à l'acte. Il est difficile d'évaluer le laps de temps entre le moment où apparaît l'envie de déménager et le déménagement lui-même ; il est de même difficile de déterminer les raisons qui font naître l'envie et celles qui déterminent l'action.

La modélisation de tels processus pose la question du choix des variables à représenter et des interactions à considérer ou non : de toutes les interactions et variables en jeu dans le processus de décision, lesquelles considérer et lesquelles négliger ? Le modèle Mobisim-MR développé dans le cadre de la plateforme de simulation Mobisim reprend

ces différents éléments pour représenter les mobilités résidentielles intra-urbaines. Sont notamment modélisées les interactions entre la satisfaction vis-à-vis du lieu de résidence actuel et le choix d'une nouvelle localisation parmi un ensemble de destinations possibles.

Mobisim-MR a été conçu par Cécile Tannier, et ce chapitre reprend en grande partie l'article écrit par Tannier et al., soumis en octobre 2014 dans la revue *"Progress in Planning"*[1] ; je ferai également référence à la partie sur le modèle des mobilités résidentielles dans Antoni et al. (2011). Ce troisième chapitre de la thèse permettra de présenter les caractéristiques générales du modèle de simulation, ainsi que la formalisation mathématique sur laquelle il repose. La fin du chapitre permettra de synthétiser les différents éléments du fonctionnement du modèle à savoir : le déroulé d'une simulation, la synthèse des différentes évolutions simulées et la modélisation de l'hétérogénéité des comportements dans Mobisim-MR.

3.1 Caractéristiques générales du modèle

3.1.1 Entités élémentaires de Mobisim-MR

Comme l'ensemble de la plateforme, Mobisim-MR est un modèle individu-centré. La décision de déménager est prise au niveau des ménages : un ménage est considéré comme une entité au sein de laquelle la décision se prend de manière collégiale. On suppose que le chef de ménage prend les décisions en tenant compte de l'opinion des autres membres du ménage.

Comme nous l'avons déjà évoqué[2], chaque logement est décrit par des caractéristiques intrinsèques, et par les caractéristiques de son environnement. Une distinction est faite dans le modèle entre l'environnement résidentiel local, à savoir le voisinage direct du logement, et l'environnement résidentiel global, défini par des proximités à différentes aménités (commerces et services, espaces verts) et des accessibilités relatives à d'autres lieux de la ville. On retrouve ces différentes échelles de manière récurrente dans la littérature (Timmermans *et al.*, 1992; Dieleman et Mulder, 2002; Benenson, 2004; Prashker *et al.*, 2008; Devisch *et al.*, 2009). Travailler sur ces trois échelles d'analyses - le logement, le voisinage direct et l'environnement global - facilite la mise en

1. Tannier C., Hirtzel J., Stephenson R., Couillet A., Vuidel G., Youssoufi S. - Conditions for the usefulness of a complex simulation platform in a planning decision process. Feedback from an experiment in the city of Besançon, France

2. cf. chapitre 1

relation des mobilités quotidiennes avec les mobilités résidentielles.

Mobisim-MR est un modèle spatialement explicite. L'entité spatiale de référence est le logement, localisé dans l'agglomération.

3.1.2 Les évaluations résidentielles : le ménage versus les logements

Le modèle est fondé sur les appréciations de chaque ménage vis-à-vis de chaque attribut du logement qu'il occupe et de son environnement résidentiel d'une part, et des attributs des logements qu'il pourrait occuper (les localisations résidentielles potentielles) ainsi que de leur environnement résidentiel, d'autre part. Chaque attribut est également affecté d'une importance pour le ménage. Ainsi, le ménage évalue chaque attribut d'une localisation résidentielle à deux niveaux :

- est-ce que globalement, cet attribut est important pour moi lorsque j'examine un logement ?
- En ce qui concerne ce logement-ci, est-ce que cet attribut me convient ?

Sur cette base, sont calculés pour chaque ménage la satisfaction qu'il retire de son logement et de son environnement résidentiel actuel, ainsi que l'intérêt qu'il porte à chaque destination résidentielle possible. Satisfaction et intérêt sont des évaluations résidentielles de la situation actuelle (satisfaction) ou d'une situation potentielle (intérêt) (Fig. 3.1).

La satisfaction résidentielle (facteurs *push*) est caractérisée par :

- les variables caractérisant le logement : elles mesurent l'adéquation entre les caractéristiques du logement et les caractéristiques socio-économiques du ménage ;
- l'environnement résidentiel local, dont le niveau moyen des revenus des ménages résidant dans le voisinage, afin d'évaluer la qualité de vie du ménage dans le logement donné ;
- l'environnement résidentiel global, défini simplement par le coût d'accès au centre-ville.

Les facteurs de choix (facteurs *pull*) impliquent une évaluation de ce que le ménage pourrait obtenir, et ressentir dans un autre logement. Les localisations potentielles sont considérées comme imparfaitement connues : elles appartiennent au non-vécu et au non fréquenté. La majorité des variables considérées pour les facteurs de choix sont les mêmes que pour les facteurs encourageant le ménage à déménager (i.e. les facteurs de satisfaction résidentielle), mais leur rôle est différent (cf. section 3.2.3.2).

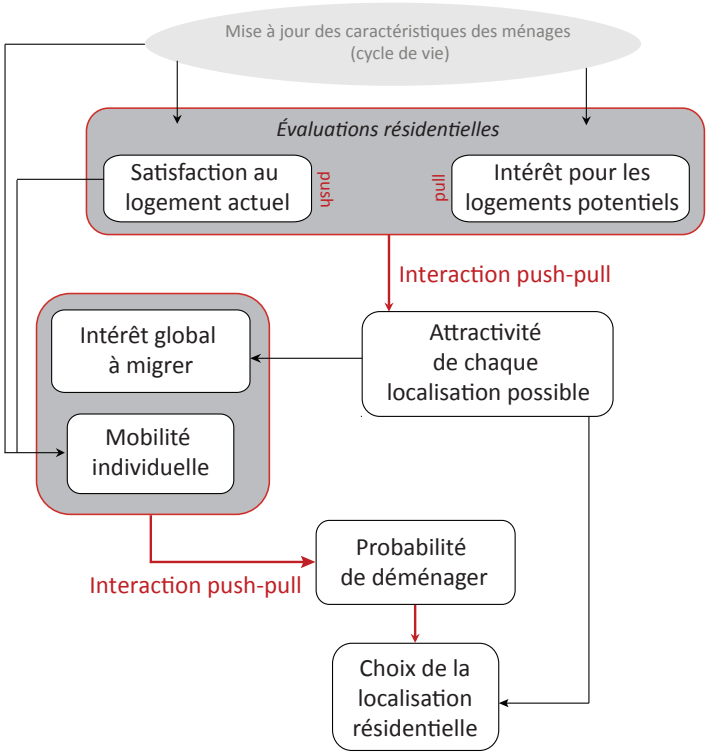


FIGURE 3.1 – Architecture du modèle des mobilités résidentielles de Mobisim

La littérature sur les facteurs de choix individuels (facteurs *pull*) est abondante, mais la pondération entre ces différents facteurs est assez mal connue. Néanmoins, une analyse approfondie de la littérature a permis de répertorier suffisamment d'éléments pour élaborer des hypothèses et quantifier cet aspect du modèle. On sait par exemple que les attributs caractérisant l'environnement résidentiel local (ex. accessibilité aux commerces et services de proximité, aux espaces verts et aux transports en commun) sont moins importants que les attributs de l'environnement résidentiel global et, plus encore, que les attributs des logements.

Ces attributs (caractérisant l'accessibilité locale) sont davantage des facteurs de satisfaction résidentielle (*push*) que des facteurs de choix (*pull*). Ces informations sont des tendances générales, et peuvent varier pour certains types de ménages ; c'est le cas des ménages aux revenus élevés, qui montrent un intérêt plus grand pour leur environnement résidentiel (paysage visible et catégorie sociale des voisins similaire à la leur) que les autres types de ménages au moment du choix du logement (Fernandez *et al.*, 2005). Ainsi, les évaluations résidentielles dépendent des caractéristiques des ménages. Indépendamment de ces caractéristiques, les travaux ont montré que les évaluations résidentielles dépendaient également du style de vie des ménages (Francescato, 2002; Gärling et Friman, 2002; Ge et Hokao, 2006), dimension qui sera prise en compte dans le modèle.

3.1.3 Un modèle géographique

Les variables purement économiques (le coût du logement, des déplacements et les revenus) sont considérées dans le modèle de la même manière que les autres variables caractérisant le style de vie des ménages et leur position dans le cycle de vie. En effet, les variables économiques sont des facteurs importants mais elles ne dominent pas les décisions individuelles différemment (Authier *et al.*, 2010b). Elles représentent des contraintes, floues, que les ménages peuvent surmonter selon les situations. Plusieurs études ont ainsi montré que les préférences et les choix résidentiels sont faiblement (ou du moins partiellement) statistiquement corrélés aux caractéristiques socio-économiques et démographiques des ménages, à l'exception de leur position dans leur cycle de vie (Fernandez *et al.*, 2005).

C'est pourquoi, dans Mobisim-MR, les contraintes budgétaires des ménages interviennent de la même manière que les autres facteurs au moment du choix du logement ; cela suppose que les ménages font des compromis. Dans le modèle, le revenu des ménages joue également le rôle de proxy pour mesurer l'appartenance à un groupe social, et mesurer ainsi le rapport de chaque ménage à son environnement social. Il en résulte une ségrégation socio-spatiale qui encourage les ménages aux revenus les plus faibles à rester à proximité des zones d'emplois, tout en bénéficiant d'une bonne accessibilité en transport en commun au reste de la ville (Lévy, 2009). Les catégories sociales élevées sont quant à elles plutôt tournées vers la centralité, l'urbanité et la proximité d'un patrimoine culturel et paysager. Les cycles de vie des ménages interviennent également dans cette ségrégation, ce qui introduit une dynamique spatiale et temporelle (Charlot *et al.*, 2009).

Par ailleurs, le fonctionnement du marché du logement n'est pas modélisé. L'hypothèse sous-jacente est que la structure spatiale urbaine ne résulte pas essentiellement du fonctionnement du marché du logement. Dans le modèle, elle dépend principalement des différentiations spatiales intra-urbaines relevant du site (paysage) et de la situation (accessibilité aux emplois et aux différents types d'aménités) combinées aux caractéristiques sociales des individus (professions et catégories sociales, styles de vie).

3.1.4 Connaître l'attractivité des logements vacants

La satisfaction au lieu de vie actuel et l'intérêt des autres localisations résidentielles sont confrontés l'une à l'autre pour permettre au ménage d'évaluer l'attractivité des

différentes destinations résidentielles possibles, compte tenu de l'endroit où il habite. L'attractivité des lieux pour le ménage résulte donc d'une interaction *push-pull* (Fig. 3.1), qui permet d'aborder le processus décisionnel dans son caractère dynamique. Elle permet également de mettre en avant la logique comportementale des ménages en situation de stress résidentiel : lorsqu'il n'est pas satisfait de sa situation résidentielle, et compte tenu du coût que représente un déménagement, un ménage ne s'engage dans une démarche de changement de domicile que s'il sait qu'il y a une possibilité de trouver un nouveau logement qui correspondrait mieux à ses attentes.

Les logements que le ménage évalue sont des logements vacants au moment de la décision résidentielle. Lorsqu'il compare les localisations résidentielles potentielles, un ménage ne peut étudier toutes les possibilités de la ville ; les ménages ont une connaissance limitée des opportunités qui existent. C'est la raison pour laquelle le nombre de localisations résidentielles évaluées par le ménage dans Mobisim-MR est restreint et fixé par l'utilisateur. Au moment des évaluations, le ménage a donc connaissance d'une certaine attractivité : celle des logements qu'il « visite » uniquement.

L'attractivité ne suffit pas à elle seule à déclencher un changement de localisation résidentielle, mais elle permet au ménage de faire le point sur les gains potentiels d'un déménagement, compte tenu de sa situation actuelle. En cela, les évaluations résidentielles constituent le fondement de la réflexion résidentielle du ménage. L'attractivité est ensuite comparée à d'autres facteurs, qui lui permettront de prendre ou non sa décision de déménager. Le pendant de la décision spatiale est la non-décision (le statut quo) qui, dans le temps, est plus souvent observée que la décision. Le fait de ne pas déménager traduit donc une absence de décision ou une décision de ne pas changer.

3.1.5 *"To move or not to move, that is the question"*

Le modèle permet ensuite de calculer une probabilité de déménager pour chaque ménage, et pour ceux qui déménagent, de déterminer le choix de leur nouvelle localisation (Fig. 3.1). Pour ces aspects, la formalisation est inspirée des modèles probabilistes sociodynamiques (Weidlich et Haag, 1987; Weidlich, 2006). Le modèle est une adaptation individu-centré (à l'échelle du ménage et du logement) de celui de Tannier et Frankhauser (2001) et de Tannier et al. (2011).

D'un point de vue général, la propension du ménage à déménager est fonction de :
– l'insatisfaction dans le logement actuel, qui dépend de la mobilité quotidienne du

ménage, et de son utilisation sociale de l'espace ;
- la correspondance entre ses besoins et les caractéristiques du logement qu'il occupe ;
- l'énergie qui lui est nécessaire pour déménager [3] ;
- un évènement déclencheur : naissance d'un enfant, séparation du couple, changement de revenu, décès, départ en retraite.

L'impact de tous ces élèments diffère selon la position du ménage dans son cycle de vie (Wegener, 1985) et selon ses expériences antérieures (Grafmeyer, 2010). Ainsi dans Mobisim-MR, la propension à déménager d'un ménage résulte d'une combinaison de trois variables : la satisfaction résidentielle du ménage, sa mobilité individuelle (en fonction de l'étape dans le cycle de vie) et l'intérêt global qu'il a à déménager, c'est-à-dire le bénéfice général qu'il peut retirer d'un déménagement dans l'agglomération [4] (Fig. 3.1).

Dans Mobisim-MR, les décisions de déménager sont déterminées à la fois par les facteurs individuels des ménages et par des références collectives. Ces dernières sont modélisées à travers l'introduction (directe ou indirecte, *via* le modèle de simulation des mobilités quotidiennes) de variables de contexte : les caractéristiques générales de la structure spatiale urbaine (accessibilité au centre-ville et aux zones d'emplois) ou le prix du carburant. Ces références collectives représentent une part notable des choix résidentiels du modèle, notamment dans l'évaluation de l'intérêt global à déménager dans l'agglomération en question. Elles mettent ainsi en relation des variables générales avec le marché du logement, à savoir la qualité et la quantité des logements disponibles. Par conséquent, un ménage sera plutôt favorable à un déménagement si le marché du logement lui offre de bonnes opportunités.

Ne sont considérés comme déménagements dans Mobisim-MR que les mobilités intra-urbaines : les ménages qui quittent la zone d'étude ne sont pas compris dans le taux de migration. Leur sortie de la zone d'étude ne dépend pas de leur choix résidentiel [5], contrairement à d'autres modèles (Haase *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2013).

3. Aversité au risque, attitude pessimiste (les agents ont conscience de ce qu'ils perdent, mais pas de ce qu'ils gagnent). Ces facteurs interviennent ici comme des freins à la décision de déménager. Suivant l'approche de Moles et Rohmer (1977), un individu agit lorsque les bénéfices qu'il peut obtenir de ses actions (à plus ou moins long terme) sont plus importants que les ressources internes dont il a besoin pour passer à l'action.

4. L'intérêt global à migrer d'un ménage dépend de son attractivité précédemment évaluée (cf. 3.1.4)

5. Les migrations entrées et sorties dépendent d'une probabilité de quitter ou non le territoire, dans le module des évolutions démographiques (Chapitre 2).

3.1.6 Un modèle, des évolutions

Pour chaque année de simulation, le modèle permet à l'utilisateur de déterminer quels ménages vont déménager et leur nouvelle localisation résidentielle (c'est-à-dire le logement situé dans un environnement résidentiel). Au cours du temps, les caractéristiques des ménages évoluent [6] (l'âge des individus du ménage, la composition du ménage et donc son revenu). Cela engendre des changements dans leurs préférences et leurs perceptions du marché du logement. Parallèlement, l'environnement résidentiel évolue également (construction de nouveaux bâtiments [7], départs et arrivées de nouveaux ménages dans le voisinage), ce qui modifie la satisfaction des ménages et l'attractivité qu'ils retirent des autres logements disponibles.

Selon les différents points évoqués dans l'introduction générale, le tableau 3.1 synthétise les principales caractéristiques de Mobisim-MR, le positionnant ainsi par rapport à d'autres modèles de mobilités résidentielles.

Tableau 3.1 – Caractéristiques générales de Mobisim-MR

Élément de description	**Mobisim-MR**
Echelle de migration	Mobilités résidentielles intra-urbaines
Granularité spatiale	Le logement, localisé dans l'agglomération (coordonnées spatiales)
Modèle spatialement explicite ?	Oui : l'espace est explicitement représenté, et considéré dans les variables de choix résidentiels
Entité de référence	Le ménage, composé d'individus
Dynamique du modèle	Interactions entre les ménages via l'environnement résidentiel ; approche *bottom-up*
Connaissance du marché du logement	Limitée : nombre de logements visités pour l'évaluation résidentielle fixé par l'utilisateur
Décision résidentielle	Modélisation de deux interactions *push-pull* dans un processus unique.
Autonomie du modèle	Intégration dans une plateforme LUTI

6. A travers le modèle des évolutions démographiques - Chapitre 2.
7. A travers le modèle développement résidentiel - Chapitre 1, section 1.2.2.2.

3.2 Formalisation de la décision résidentielle dans Mobisim

Dans le modèle, la complexité vient du grand nombre de variables et de leurs interactions, mais les règles générant les dynamiques sont simples. Elles correspondent à des faits stylisés désagrégés : moins un phénomène est connu, plus il est désagrégé en faits stylisés simples, qui sont ensuite ré-agrégés (à l'aide de règles d'agrégation) et liés (à l'aide de règles d'interactions). Les règles d'agrégation et d'interaction peuvent être imprécises (variables continues) ou incertaines (probabilités).

3.2.1 Les variables du modèle

Trois ensembles de variables sont considérés dans le modèle des mobilités résidentielles de Mobisim :

- H : le ménage [8], décrit par ses caractéristiques socio-économiques et son style de vie ;
- D : le logement[8], distingué entre le logement occupé D_I et le logement potentiel D_J ;
- E : l'environnement résidentiel.

3.2.1.1 Les variables caractérisant le ménage H

Chaque ménage est défini par quatre variables socio-économiques :

Tableau 3.2 – Variables socio-économiques caractérisant les ménages

Variables	Nom	Modalité
H_{y_i}	Revenu	H_{y_1} : revenus faibles ; H_{y_2} : revenus moyens ; H_{y_3} : revenus élevés
H_{a_i}	Âge du ménage	H_{a_1} : moins de 30 ; H_{a_2} : entre 30 et 44 ; H_{a_3} : entre 45 et 60 ; H_{a_4} : plus de 60
H_{c_i}	Nombre d'enfant(s)	H_{c_1} : aucun ; H_{c_2} : un ou deux enfant(s) ; H_{c_3} : plus de trois
H_{s_i}	Composition du ménage	H_{s_1} : célibataire ; H_{s_2} : couple ; H_{s_3} : famille (au moins un enfant) ; H_{s_4} famille monoparentale

Ces variables ont été choisies en fonction de leur fréquence d'apparition dans la littérature. Le nombre de combinaisons possibles entre les différentes modalités permet

8. En anglais, le ménage se dit *household*, et le logement se dit *dwelling* ; les lettres utilisées proviennent des mots anglais.

de distinguer 72 types de ménages, ce qui maintient un degré d'hétérogénéité dans les comportements résidentiels modélisés (Grafmeyer, 2010). Les ménages peuvent donc être catégorisés de plusieurs manières, et chacune d'entre elles offre la possibilité d'un point de vue différent (ex. les célibataires ou les familles monoparentales, selon l'âge et le revenu).

Les ménages sont également caractérisés par des styles de vie, et ce grâce à deux autres variables :

- le mode de transport préféré H_{t_i} : le ménage utilise avant tout soit sa voiture personnelle H_{t_1}, soit les autres modes de transport (transports en commun, vélo ou marche à pied) H_{t_2} ;
- le type d'environnement résidentiel H_{r_i} : les ménages habitant dans un environnement résidentiel rural H_{r_1}, ou dans un environnement résidentiel urbain H_{r_2}.

Le type d'environnement résidentiel permet de faire la distinction entre un style de vie principalement orienté sur la vie urbaine (fréquentation des commerces et services plus importante) et un style de vie principalement orienté sur les aménités rurales (importance de la qualité paysagère et de la proximité aux espaces verts). L'environnement résidentiel des styles de vie est défini en fonction de la composition de l'occupation du sol dans un rayon de 300 m autour du logement. Un environnement résidentiel est considéré comme rural lorsqu'au moins 65% de la surface est naturelle ou agricole d'une part, et lorsqu'il n'y a pas plus de 10% du sol occupé par une activité industrielle ou un parking d'autre part. Ces seuils ont été déterminés par S. Youssoufi en 2013 [9]. Si ces conditions ne sont pas remplies, l'environnement n'est pas rural, et il est de fait urbain. Lorsqu'un ménage arrive dans la zone d'étude depuis l'extérieur (migration *in*), il a une probabilité de 0,5 de préférer l'un ou l'autre de ces deux environnements.

Concernant la variable H_{t_i}, lorsqu'un ménage utilise principalement sa voiture pour ses déplacements, son style de vie est défini par l'utilisation de la voiture (H_{t_1}). Inversement, lorsque ses déplacements sont principalement effectués avec d'autres modes de transports, alors son style de vie penche pour les autres modes (H_{t_2}). Le modèle des mobilités quotidiennes de Mobisim estime le nombre de déplacements effectués par un ménage dans une journée et le mode de transport utilisé pour chacun d'entre eux, ce qui permet d'identifier quel style de vie correspond à chaque ménage. Le style de vie

9. La méthode pour définir les seuils consiste à calculer la part d'occupation du sol de trois types d'occupation (bâti résidentiel, espaces industriels et espaces naturels) dans l'environnement résidentiel de chaque logement, puis à effectuer une classification des logements selon ce résultat.

dominé par la voiture (H_{t_1}) est défini par au moins 2/3 des déplacements effectués en voiture par les adultes du ménage. Dans tous les autres cas, c'est l'autre style de vie qui est appliqué.

3.2.1.2 Les variables caractérisant le logement D

Tableau 3.3 – Variables caractérisant le logement

Variables	Nom	Modalité
D_{κ_i}	Coût	D_{κ_1} : coût faible ; D_{κ_2} : coût moyen ; D_{κ_3} : coût élevé
D_{ξ_i}	Taille	D_{ξ_1} : une ou deux pièces ; D_{ξ_2} : trois ou quatre pièces ; D_{ξ_3} : cinq pièces ou plus
D_{λ_i}	Type	D_{λ_1} : maison individuelle ; D_{λ_2} : appartement
D_{θ_i}	Statut d'occupation	D_{θ_1} : propriétaire ; D_{θ_2} : locataire du privé ; D_{θ_3} : locataire social

Les coûts des logements sont des proxys, estimés à partir de deux variables : la surface du logement (70% du coût) et le revenu médian des ménages avoisinant (30% du coût) (Benabou, 1993; Baumont, 2009; Charlot *et al.*, 2009; Nicolas *et al.*, 2009; Descamps et Gaschet, 2013; Nguyen-Luong, 2011). Le coût du logement se définit ainsi :

$$\mu(cout) = [0.7 \times \mu(cout|superficie)] + [0.3 \times \mu(cout|voisinage)]$$

où : $\mu(cout)$ est l'évaluation du coût du logement.

$\mu(cout|superficie)$ et $\mu(cout|voisinage)$ sont des variables continues (Fig. 3.2).

Lorsqu'un logement est classé comme « propriétaire » (état θ_1), l'évaluation de son coût prend également en considération une valeur immobilière locale (un prix immobilier), en mètres carrés, via la variable δ :

$$\mu(cout|priximmo) = \mu(cout)^{\delta}$$

Trois classes de prix immobiliers ont été définies pour chaque agglomération :

- Si le prix de l'immobilier est plutôt bas, $\delta = 3$;
- Si le prix de l'immobilier est moyen, $\delta = 1$;

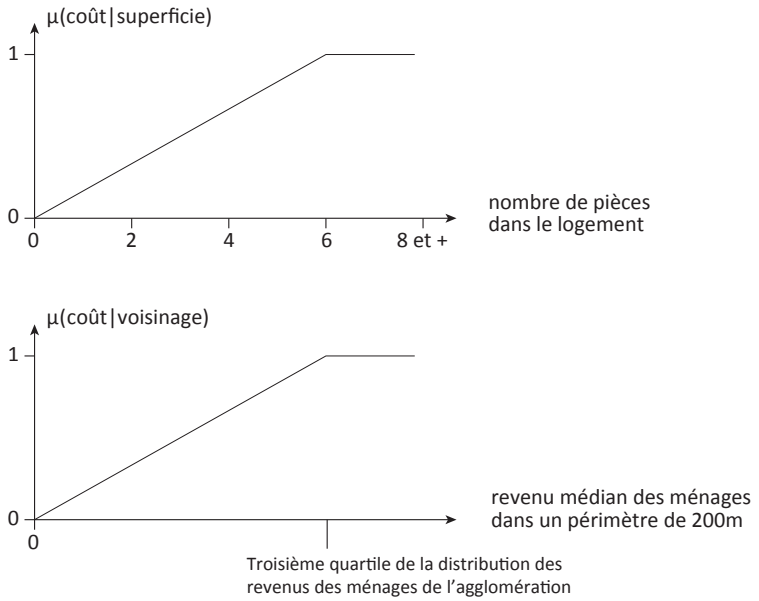


FIGURE 3.2 – Définition des deux variables $\mu(cout|superficie)]$ et $\mu(cout|voisinage)]$

– Si le prix de l'immobilier est élevé, $\delta = 0.2$.

Pour les locataires sociaux (état θ_3), l'évaluation du coût du logement ne considère pas le voisinage social. Il équivaut donc à :

$$\mu(cout|\theta_3) = 0.7 \times \mu(cout/superficie)$$

De cette manière, un voisinage socialement avantagé n'augmentera pas le prix du logement. De plus, l'évaluation du coût maximum est au plus égale à 0.7 fois un grand logement.

Selon la valeur de $\mu(cout)$, une fonction de probabilité attribue à chaque logement un état de la variable « coût du logement » D_{κ_i} : faible κ_1, moyen κ_2, élevé κ_3 (Fig. 3.3).

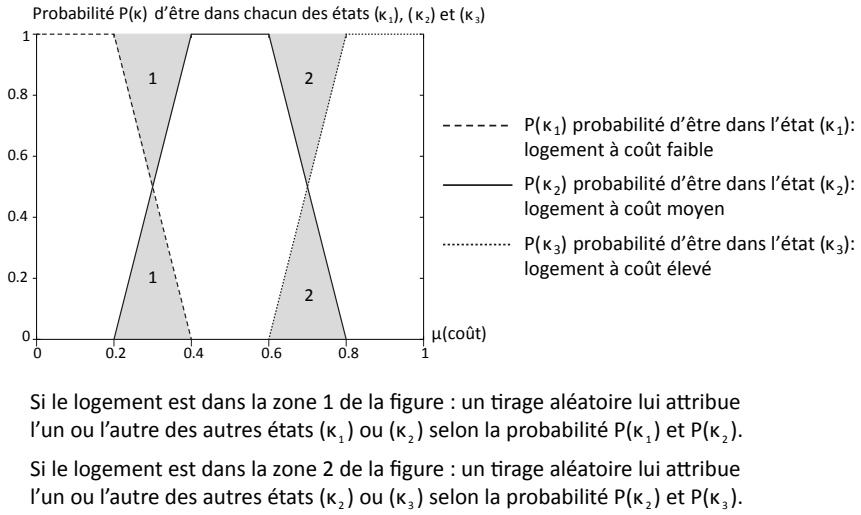


FIGURE 3.3 – Distribution des probabilités pour l'affectation de la classe « coût » aux logements

3.2.1.3 Les variables caractérisant l'environnement $[E|D]$ du logement D

A un niveau local, l'environnement $[E|D]$ est caractérisé par :

- le nombre de commerces et services de fréquentation quotidienne $[E_{df}|D]$ et hebdomadaire $[E_{wf}|D]$;
- le nombre d'arrêts de transport en commun $[E_{ts}|D]$;
- la distance au square ou parc le plus proche $[E_{gs}|D]$, et la distance à la bordure urbanisée $[E_{ub}|D]$ (la bordure urbanisée est considérée comme la limite ville-campagne) ;
- la qualité paysagère de l'environnement résidentiel : paysage forestier $[E_{fl}|D]$, paysage bâti $[E_{bl}|D]$;
- la part des ménages aux revenus élevés dans l'environnement résidentiel du logement $[E_{hi}|D]$.

Ces variables caractérisent l'accessibilité aux aménités locales à partir du logement et l'environnement social de celui-ci (Brueckner *et al.*, 1999). Plusieurs études ont montré que l'accessibilité aux commerces et services (Bramley et Power, 2009) et la proximité aux espaces verts et aux zones naturelles (Kweon *et al.*, 2010) sont des facteurs importants dans la satisfaction résidentielle.

Plusieurs travaux ont examiné plus précisément le rôle du paysage dans les préférences résidentielles des individus (Kaplan et Kaplan, 1989; Ratiu, 2003). Trois approches méthodologiques majeures permettent de considérer l'environnement paysager : la distance entre le logement et un élément paysager particulier (Tyrväinen et

Miettinen, 2000), la composition ou la configuration du paysage autour du logement (Kestens *et al.*, 2004; Cho *et al.*, 2008), et la vue de différents éléments paysagers depuis le logement, c'est-à-dire en trois dimensions (Cavailhès *et al.*, 2009). Le point commun entre ces différents travaux est la récurrence de la satisfaction générée par la présence d'éléments naturels ou forestiers dans l'environnement résidentiel de l'individu. Par opposition, les routes, les bâtiments industriels ou les éléments agricoles dans le paysage génèrent une certaine insatisfaction.

La distance moyenne à une aménité donnée indique la proximité des résidents à ces aménités alors que le nombre moyen d'aménités à une certaine distance indique une ressource d'aménités dans le voisinage (Apparicio et Seguin, 2006).

La variable $[E_{hi}|D]$ (part des ménages à hauts revenus dans l'environnement résidentiel), qui est souvent un élément des modèles en économie classique, permet de considérer la préférence des ménages à être plus proche d'autres ménages socialement similaires (l'entre soi). Dans Mobisim-MR ne sont considérés que les ménages aisés dans le voisinage : une part élevée des ménages aisés dans le voisinage immédiat est attractif pour les ménages aisés, et répulsif pour les ménages plus modestes (Tannier *et al.*, 2012a).

Au niveau plus global, l'environnement $[E|D]$ est caractérisé par :

- le coût d'accès au centre-ville en voiture $[E_{ccar}|D]$, ou en transport public, vélo ou marche à pied $[E_{cpt}|D]$;
- l'accessibilité généralisée aux zones d'emplois, via les réseaux routiers $[E_{wcar}|D]$ ou via les réseaux de transport en commun $[E_{wpt}|D]$.

Le coût d'accès au centre-ville est un *proxy* de l'accessibilité aux aménités culturelles et historiques. Il est calculé de la manière suivante (dans le cas de la voiture) :

$$[E_{ccar}|D_J] = Cd_{car} \times d_{car}(Jc) + Ct_{H_{(y)}} \times t_{car}(Jc)$$

avec :

- Cd_{car} le coût de la distance lors d'un déplacement en voiture ;
- $Ct_{H_{(y)}}$ la valeur du temps pour chaque ménage (en fonction du revenu) ;
- $d_{car}(Jc)$ la distance en voiture entre le logement J et le centre-ville c ;
- $t_{car}(Jc)$ le temps de trajet en voiture entre le logement J et le centre-ville c.

L'accessibilité généralisée aux zones d'emploi consiste à mesurer le coût d'accès d'une zone résidentielle J à chaque zone d'emploi W, combinée au nombre d'emplois de chaque zone m_W. Elle est calculée de la manière suivante (pour le cas de l'accessibilité en voiture) :

$$[E_{wcar}|D_J] = \sum m_W.e^{-\alpha.C_{car_{JW}}}$$

avec :

- $C_{car_{JW}}$ le coût de la distance entre la localisation résidentielle J et chaque zone d'emploi W lors d'un déplacement en voiture ;
- m_W le nombre d'emplois dans chaque zone. Les zones d'emploi sont cartographiées sous la forme de cellules de 50 mètres par 50 mètres, chacune contenant un certain nombre d'emplois.

Le mode de calcul est le même pour les modes de transport alternatifs.

Dans Mobisim-MR, les ménages ne cherchent pas à minimiser les coûts de transport : la proximité à leur logement depuis leur lieu de travail n'est pas un facteur de choix résidentiel, et, de la même manière, un changement de travail ne provoque pas de déménagement (Carpentier et Gerber, 2009; Lévy, 2009). Cependant, dans le choix de la nouvelle localisation résidentielle, l'accessibilité générale aux emplois joue un rôle important pour les ménages à faibles revenus. Les ménages aisés supportent mieux les contraintes d'accessibilités grâce à leurs revenus, qui leur permettent de se déplacer facilement même lorsque les coûts de transport sont élevés.

3.2.2 Appréciations et importances : des évaluations à la source de la décision

Tous les logements vacants de l'aire d'étude sont évalués par chaque ménage. Pour un logement donné, chaque ménage a une appréciation de ses attributs et de ceux de l'environnement résidentiel dans lequel il s'inscrit. Les règles permettant de calculer les niveaux d'appréciations reflètent des normes, des comportements typiques, à partir desquels les ménages dérivent une appréciation subjective.

Les appréciations du logement et de l'environnement résidentiel sont traitées différemment, notamment parce que les variables qui les concernent sont de différente nature : elles sont discrètes pour le logement et continues pour l'environnement résidentiel.

3.2.2.1 Appréciations et importances des attributs du logement

Les appréciations du logement $A_H(D_I)$ sont des quantifications, comprises entre 0 et 1, de l'adéquation entre les caractéristiques du ménage et les attributs de son logement, qui découlent implicitement des préférences du ménage en matière de logement.

Les caractéristiques des ménages et des logements considérées dans Mobisim-MR ont été choisies en fonction de leurs apparitions récurrentes dans la littérature. Cependant, les informations issues de la littérature ne permettent pas de lier chaque état du logement à chaque type de ménage. Pour cette raison, le modèle considère des relations entre :

– d'une part, chaque état des différents attributs du logement ;
– d'autre part, chaque état des différentes caractéristiques du ménage.

La quantification des appréciations du logement se fait donc de manière totalement désagrégée (Fig. 3.4). Chaque paire « caractéristique-attribut » est considérée sous la forme : $A_{H_{a_i}}(D_{\lambda_k})$.

Par exemple, est évaluée dans Mobisim-MR la relation entre l'âge d'une personne de référence d'un ménage et le statut d'occupation du logement : pour cela, nous considérons l'évaluation de chacune des quatre classes d'âge pour chacun des deux statuts d'occupation possible, c'est-à-dire locataire et propriétaire (Fig. 3.4). L'intensité de ces liens est quantifiée via un paramètre du modèle. Les valeurs des paramètres d'appréciation sont fixées par expertise, suite à notre analyse préalable de la littérature scientifique dans le domaine (cf. Chapitre 5). Seuls les liens les plus pertinents ont été conservés, ce qui veut dire que, selon les types de ménages, les attributs du logement ne rentrent pas tous en compte dans le calcul de la satisfaction du ménage.

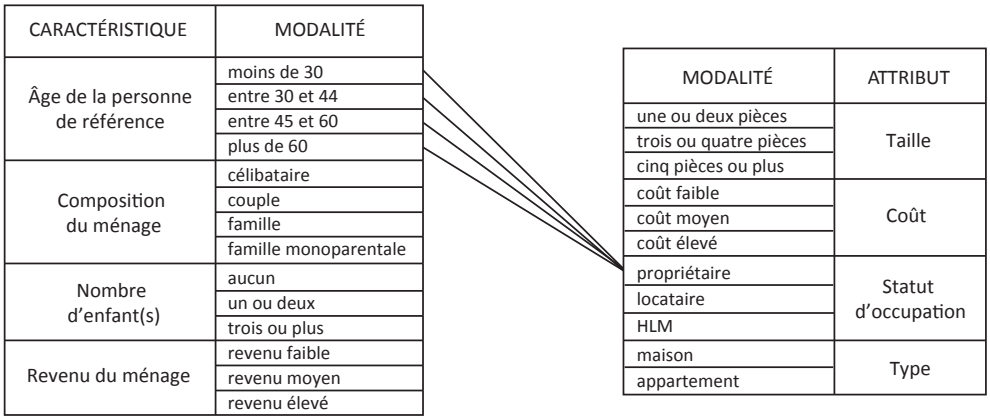


FIGURE 3.4 – Relation entre le statut « propriétaire » de l'attribut du logement « statut d'occupation » et chacune des quatre possibilités d'âge du ménage

Tous les attributs n'ont pas la même importance aux yeux des ménages. Cette importance peut varier selon les caractéristiques des ménages. Par exemple, l'importance de la taille du logement dans son évaluation sera potentiellement différente pour les personnes célibataires et pour une famille monoparentale. A la différence de l'appréciation, ce sont les attributs du logements eux-mêmes qui sont concernés et non leur modalité (Fig. 3.5). Chacun des liens est qualifié par un niveau d'importance. Par souci de simplification, quatre niveaux ont été définis [10].

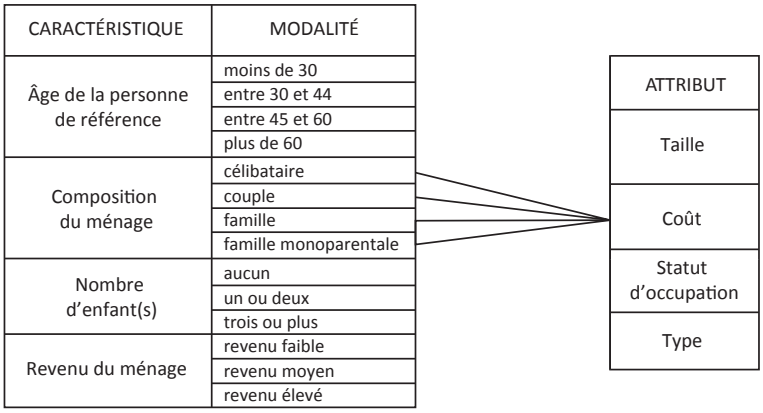


FIGURE 3.5 – Relation entre l'attribut du logement « coût » et chacune des quatre possibilités de composition du ménage

L'importance d'un attribut d'un logement D_θ pour un ménage H est notée : $\omega_H(D_\theta)$.

Comme pour les appréciations, les importances des attributs du logement actuel I et ceux du futur logement potentiel J sont différents.

Les valeurs d'appréciations et les importances interviennent conjointement dans l'évaluation d'un attribut donné pour un logement D. Ces évaluations seront ensuite combinées pour calculer l'évaluation du logement (section 3.2.3.1). Deux cas de figure sont possibles, illustrés par l'exemple suivant de l'appréciation d'une maison (attribut λ_1) du logement D_I pour un jeune ménage (a_1) avec un ou deux enfants (c_2) :

1. Admettons que pour la modalité a_1 (jeune ménage) de la caractéristique « âge », le type du logement n'a pas grande importance, mais qu'il en ait pour la modalité c_2 (présence d'enfants) de la caractéristique « nombre d'enfant(s) ». Par conséquent, le type du logement aura moins d'importance pour la caractéristique « âge » que pour la caractéristique « nombre d'enfant(s) » : $\omega_{a_1}(D_{I_\lambda}) < \omega_{c_2}(D_{I_\lambda})$. Dans ce cas, la satisfaction gagnée à vivre dans une maison découlera de l'appréciation

10. Les quatre niveaux sont les suivants : très peu important, peu important, important et très important. Le détail de la construction des paramètres est exposé dans le chapitre 5.

de la caractéristique « enfants », et non de celle de l'âge :

$$S_H(D_{I\lambda_1}) = A_{Hc_2}(D_{I\lambda_1})$$

2. Par contre, si le ménage a attribué autant d'importance à l'attribut λ pour l'âge a_1 et pour le nombre d'enfant(s) c_2, en d'autres termes, si $\omega_{a_1}(D_{I_\lambda}) = \omega_{c_2}(D_{I_\lambda})$, alors l'attribut λ_1 du logement sera jugé sur la caractéristique du ménage ayant la plus faible appréciation A_H pour lui :

$$s_H(D_{I\lambda_1}) = MIN[A_{H_{a_1}}(D_{I\lambda_1}), A_{H_{c_2}}(D_{I_{\lambda_1}})]$$

Ainsi, pour résumer, le ménage H évalue sa satisfaction vis-à-vis d'un attribut donné de son logement actuel au regard uniquement de sa caractéristique la plus importante. En cas de plusieurs caractéristiques d'égale importance, le ménage considère sa caractéristique la plus mal évaluée.

3.2.2.2 Appréciation et importance des attributs de l'environnement résidentiel

Contrairement aux logements, les valeurs d'appréciation de l'environnement résidentiel sont identiques pour tous les ménages, à deux exceptions : l'appréciation de la distance à la bordure urbanisée $A_{H_{t_1}}[E_{ub}|D]$ qui varie selon le mode de transport dominant pour le ménage (caractéristique H_{t_i} du style de vie), et l'appréciation de la part des ménages à hauts revenus dans un rayon de 200m autour du logement, qui dépend du revenu du ménage [11]. Les fonctions d'appréciation des ménages relatives au futur environnement résidentiel et à l'environnement résidentiel actuel sont identiques. C'est l'importance donnée aux attributs dans chacun des deux cas qui génère la différence dans les appréciations. Par exemple, les variables caractérisant l'accessibilité aux aménités locales sont moins importantes dans le choix du nouveau logement $[E|D_J]$ que ceux déterminant la satisfaction vis-à-vis de l'environnement résidentiel actuel $[E|D_I]$. Les valeurs d'importance des attributs de l'environnement résidentiel de chaque cas (I et J) sont présentées dans le chapitre 5.

Dans la composition de l'environnement résidentiel, deux types de commerces, services et équipements de loisir sont distingués selon le niveau de fréquentation (Tannier *et al.*, 2012b) : les commerces, services et équipements de loisir fréquentés de manière quotidienne - boucher, boulanger, école, bureau de tabac et supermarché, les parcs et

11. Cette appréciation n'est valable que pour les ménages aux revenus élevés et les revenus faibles.

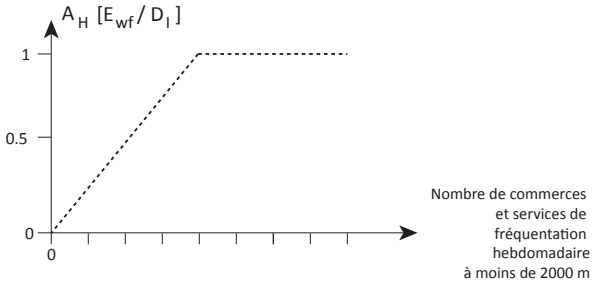


FIGURE 3.6 – Exemple d'appréciation vis-à-vis de l'environnement résidentiel : appréciation du nombre de commerces et services fréquentés de manière hebdomadaire situés à moins de 2000m du logement.

les squares -, et ceux dont le recours est hebdomadaire - hypermarché, médecin, marché, pharmacie, postes, cafés et la campagne (*via* la bordure urbanisée).

La bordure urbanisée est définie comme la limite des différentes zones construites dans la zone d'étude. Certaines de ces zones peuvent être vraiment étalées et correspondent alors à la zone urbaine centrale d'une agglomération (ou agglomération morphologique). D'autres zones sont plutôt petites, dans le cas par exemple de petits groupements de maisons en bordure de la ville. L'enveloppe de chaque zone construite est identifiée selon la méthode présentée dans Tannier et al. (2011).

Concernant les variables de la qualité paysagère, des études menées dans le secteur de Besançon ont quantifié le rôle joué par certains éléments du paysage dans la satisfaction résidentielle (Youssoufi et Foltête, 2013). La présence de forêt est perçue positivement, alors que la présence d'autres logements est perçue négativement (Fig. 3.6). Un point important à souligner est que la satisfaction liée aux éléments paysagers ne dépend pas des classes sociales.

Les règles pour les appréciations des variables caractérisant l'environnement résidentiel global (coût d'accès aux centre ville en voiture $[E_{ccar}|D]$ ou en transport en commun, vélo et marche à pied $[E_{cpt}|D]$, accessibilité généralisée aux zones d'emplois *via* les réseaux routiers $[E_{wcar}|D]$ ou *via* les réseaux de transport en commun $[E_{wpt}|D]$), sont fixées relativement à l'accessibilité de tous les individus de la zone d'étude à l'état initial. Le minimum et le maximum des valeurs des fonctions d'appréciations correspondent, respectivement, aux premiers et troisièmes quartiles des distributions des coûts d'accessibilité calculés à partir des résultats simulés des mobilités quotidiennes (Fig. 3.7).

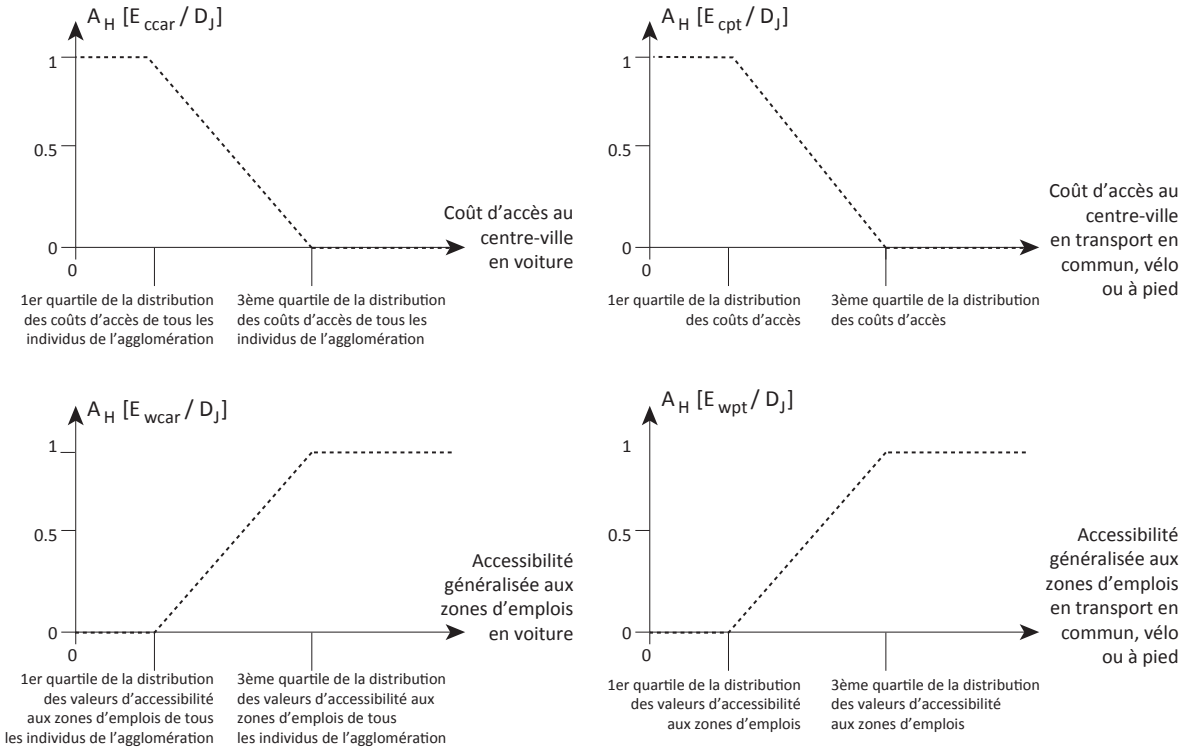


FIGURE 3.7 – Appréciations des attributs de l'environnement résidentiel global

3.2.3 La satisfaction et l'intérêt d'un ménage H vis-à-vis des localisations résidentielles I et J

L'objectif ici est de formaliser, à partir des évaluations résidentielles précédemment décrites, la satisfaction que chaque ménage retire de son logement et de son environnement résidentiel actuels I, et l'intérêt qu'il aurait à vivre dans chaque potentielle future localisation résidentielle J (Fig. 3.8).

3.2.3.1 $S_H(I)$: satisfaction résidentielle du ménage dans son logement actuel I

Au temps t, la satisfaction du ménage dans son logement revêt deux aspects : la satisfaction vis-à-vis de l'environnement résidentiel $S_H[E|D_I]$ et la satisfaction vis-à-vis de son logement $S_H(D_I)$ (Fig. 3.8). Les principales motivations à déménager sont dans les faits assez variables, mais généralement liées à des caractéristiques du logement (taille et confort), à la volonté de déménager d'un appartement à une maison, d'acheter un logement ou de quitter un environnement résidentiel qui se serait dégradé (Dieleman et Mulder, 2002; Onaka et Clark, 1983; van Ommeren *et al.*, 1999). C'est pourquoi la pondération de la satisfaction au logement est de 0.6 dans le calcul de la satisfaction totale, et celle de l'environnement résidentiel de 0.4 (Fig. 3.8).

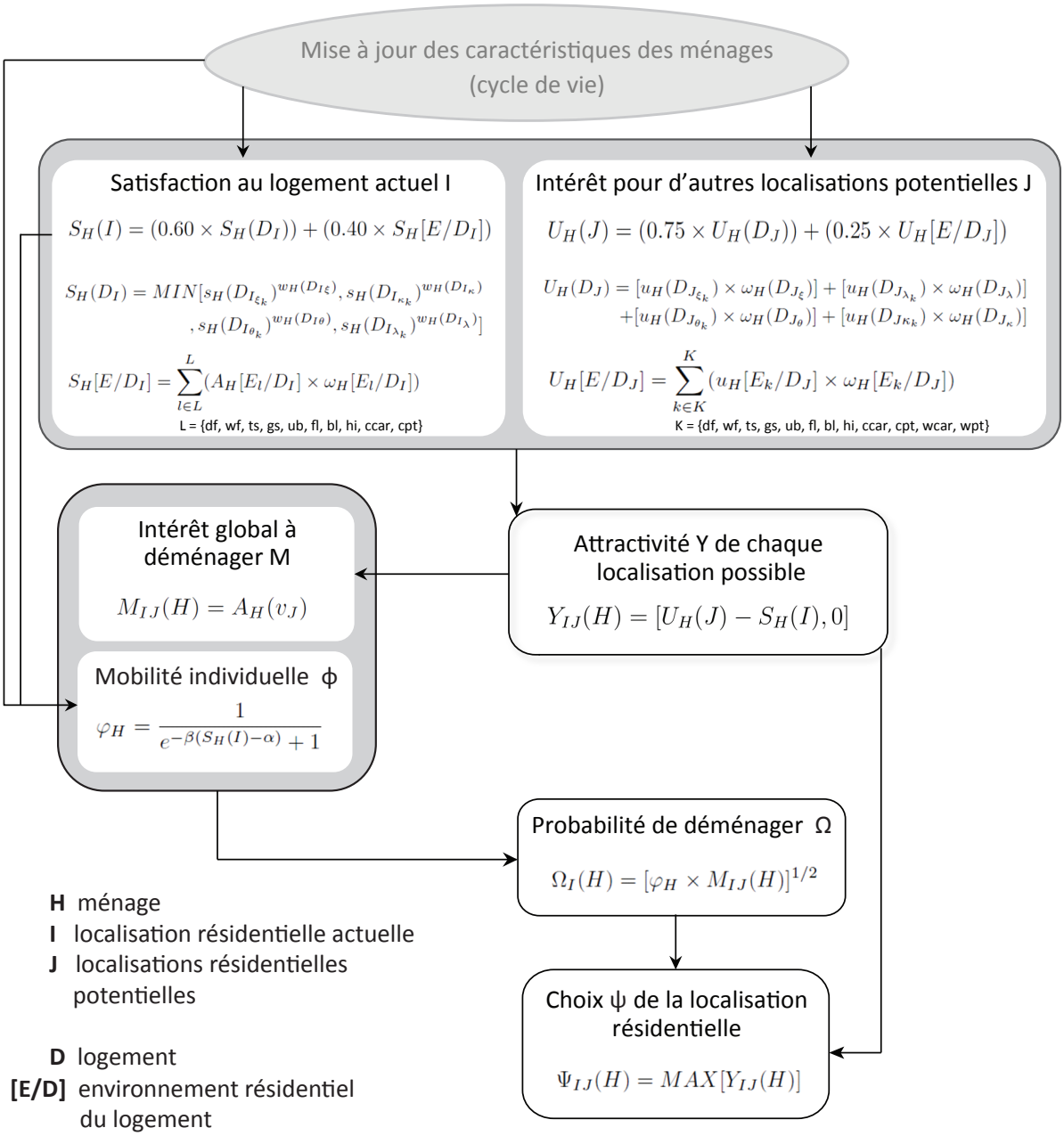


FIGURE 3.8 – Formalisation du modèle

Satisfaction actuelle du ménage vis-à-vis de son logement $S_H(D_I)$

La satisfaction du ménage pour son logement actuel correspond à l'attribut du logement qui est le moins satisfaisant pour le ménage, compte tenu de son appréciation pondérée par son importance (Yager, 1977). Dans ce calcul uniquement, la valeur d'importance est une puissance de l'appréciation, ce qui accentue son rôle : plus l'importance est forte, plus la valeur de satisfaction de l'attribut sera diminuée.

L'attitude du ménage est plutôt pessimiste lorsqu'il évalue son logement. Est ainsi modélisé le fait, souvent, un attribut donné du logement d'origine I particulièrement

insatisfaisant pousse le ménage à déménager.

Rappelons que selon les types de ménages, seuls certains attributs du logement entrent en compte dans le calcul de la satisfaction vis-à-vis du logement (section 3.2.2.1).

Satisfaction actuelle du ménage vis-à-vis de son environnement résidentiel $S_H[E|D_I]$

La satisfaction vis-à-vis de l'environnement résidentiel actuel consiste en la moyenne arithmétique des valeurs d'appréciation des attributs de l'environnement résidentiel pondérées par les importances ω de chaque attribut. Ce faisant, nous supposons que certains aspects négatifs de l'environnement résidentiel du ménage sont compensés par d'autres aspects positifs de celui-ci (Fig. 3.8).

3.2.3.2 $U_H(J)$: intérêt des destinations résidentielles J pour le ménage H

L'intérêt manifesté par un ménage H pour une autre localisation résidentielle J est la mesure de ce que le ménage pourrait ressentir s'il habitait dans un logement J, J étant différent de ce qu'il vit actuellement en I. Le calcul de l'intérêt utilise les mêmes caractéristiques des ménages et les mêmes attributs des logements que ceux du calcul de la satisfaction résidentielle. Par contre, les attributs de l'environnement résidentiel sont en partie différents. De plus, l'importance donnée par chaque ménage au logement est plus importante (0.75) que pour la satisfaction (0.6). Inversement, l'importance donnée à l'environnement résidentiel est plus faible (0.25 au lieu de 0.4) (Fig. 3.8). Ces poids correspondent aux valeurs généralement évoquées dans la littérature sur les préférences révélées qui considèrent les variables déterminant le prix des logements pour les agglomérations françaises (Baumont, 2009; Benabou, 1993; Descamps et Gaschet, 2013; Nguyen-Luong, 2011; Nicolas *et al.*, 2009).

Intérêt $U_H(D_J)$ du ménage H pour un autre logement D_J

L'intérêt du logement D_J pour le ménage H est la moyenne arithmétique des appréciations données à chaque attribut du logement, pondérées par leur importance ω. Ainsi, il est supposé que certains aspects négatifs du logement sont compensés par d'autres aspects positifs de celui-ci. Cette compensation intervient ici alors qu'elle n'intervient pas dans le calcul de la satisfaction globale vis-à-vis du logement d'origine D_I. Le ménage compare en effet différentes destinations possibles J tandis qu'il n'évalue

qu'une seule origine I : l'hypothèse sous-jacente est qu'il effectue un compromis entre les différents attributs de chaque destination J pour les comparer entre elles, tandis qu'il n'effectue aucun compromis entre les différents attributs son lieu d'origine I. Le ménage H a donc une attitude pessimiste (il est exigeant) vis-à-vis de son logement actuel I et une attitude optimiste vis-à-vis des logements de destination J.

Intérêt $U_H[E|D_J]$ du ménage H pour un autre environnement résidentiel E_J

Cette valeur résulte de la moyenne arithmétique des valeurs d'appréciation des attributs de l'environnement résidentiel, pondérées par les importances ω de chaque attribut (Fig. 3.8). Une fois encore, cela suppose que certains aspects négatifs de l'environnement résidentiel du ménage sont compensés par d'autres aspects positifs de celui-ci. Les attributs d'accessibilité généralisée à l'emploi (E_{wcar} et E_{wpt}) interviennent dans le calcul de l'intérêt $U_H[E|D_J]$ tandis qu'ils n'interviennent pas dans le calcul de la satisfaction $S_H[E|D_I]$.

3.2.4 L'attractivité $Y_{IJ}(H)$ de chaque destination : *push-pull*

$Y_{IJ}(H)$ représente l'attractivité de chaque destination résidentielle potentielle J. C'est un indicateur *push-pull* qui résulte de la confrontation entre la satisfaction au logement actuelle $S_H(D_I)$ et l'intérêt de chaque destination résidentielle $U_H(D_J)$. Pour chaque destination résidentielle étudiée, l'attractivité de J par rapport à I est égale à :

$$Y_{IJ}(H) = MAX[U_H(J) - S_H(I), 0]$$

Les valeurs négatives d'attractivité sont exclues : lorsque la satisfaction est supérieure à l'intérêt, l'attractivité $Y_{IJ}(H)$ est nulle.

L'attractivité de chaque lieu permet à chaque ménage de comparer son lieu de vie actuel aux différents lieux de vie potentiels, le tout en regard de ses caractéristiques propres. La variable $Y_{IJ}(H)$ constitue ainsi un état des lieux complet d'une situation résidentielle, que le ménage fait, uniquement en fonction de ses besoins résidentiels sans se préoccuper de facteurs autres que les localisations résidentielles elles-mêmes. Cela étant, l'attractivité ne suffit pas à elle seule à déclencher le déménagement d'un ménage : elle le prépare à déménager, mais sans savoir encore si il va passer à l'acte ou non. Ce sont d'autres éléments (section 3.2.5 et 3.2.6) qui vont permettre d'affiner cette décision.

3.2.5 La mobilité individuelle φ_H, ou mobilité intrinsèque du ménage

La mobilité individuelle φ_H d'un ménage mesure sa propension individuelle à déménager. Elle représente l'attitude d'un ménage vis-à-vis d'un déménagement, compte tenu de sa situation actuelle (*via* sa satisfaction résidentielle $S_H(I)$), ou en d'autres termes, la facilité qu'a un ménage à envisager un déménagement en fonction de sa satisfaction résidentielle actuelle. Cette attitude dépend fortement de sa position dans son cycle de vie (Ioannides, 1987; Baker, 2002) : à insatisfactions égales, un jeune ménage aura une propension à déménager plus élevée qu'un ménage retraité.

La mobilité individuelle varie donc selon deux éléments :

- la valeur de satisfaction du ménage dans son logement, qui dépend des caractéristiques des ménages (style de vie, étape dans le cycle de vie, revenus) ;
- sa position dans son cycle de vie : la fonction transformant la satisfaction en une mobilité est différente selon la position dans le cycle de vie.

$$\varphi_H = \frac{1}{e^{-\beta(S_H(I)-\alpha)} + 1}$$

La valeur de φ_H est comprise entre 0 et 1. Les paramètres α et β sont estimés à partir de données sur les taux de migrations résidentielles intra-urbaines en fonction de la position des ménages dans leur cycle de vie (cf. chapitre 5).

φ_H constitue une variable individuelle au sens où elle est centrée sur la situation du ménage (personnelle et résidentielle), de manière absolue.

3.2.6 L'intérêt global à déménager $M_{IJ}(H)$ dans l'agglomération : une référence collective

L'intérêt global à déménager représente le bénéfice espéré dans un déménagement dans l'agglomération pour un type de ménage donné. Cette variable prend en compte tous les logements attractifs de l'agglomération : plus il y a de logements attractifs pour un ménage, plus celui-ci a de chance d'améliorer sa satisfaction résidentielle en déménageant, et donc plus il a intérêt à déménager.

Un logement jugé « intéressant » dans Mobisim-MR est un logement vacant, avec une valeur d'attractivité supérieure à zéro. Parmi les logements vacants attractifs,

seul un certain nombre n_J est connu du ménage [12], ce qui permet de représenter la connaissance imparfaite du marché du logement (Fig. 3.9).

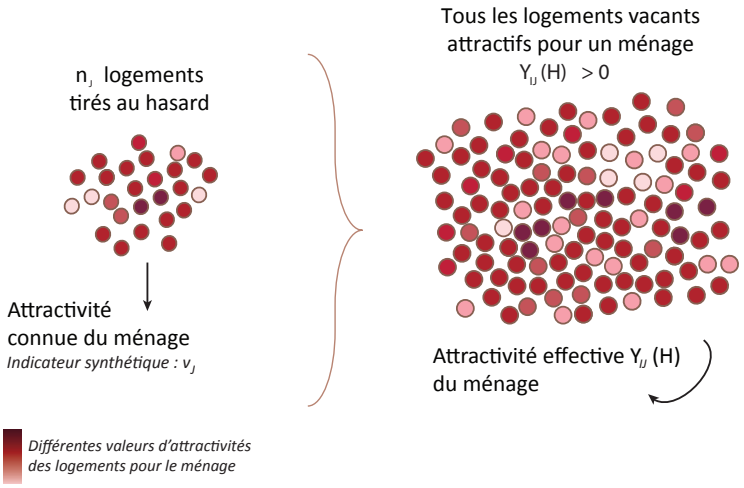


FIGURE 3.9 – Connaissance imparfaite des logements vacants par les ménages

Chacun des logements « connus » par le ménage a pour lui une certaine attractivité. L'ensemble de ces attractivités constitue l'attractivité connue pour ce ménage, puisqu'elle est l'attractivité des logements dont il a connaissance. Elle est donc différente de l'attractivité effective $Y_{IJ}(H)$ (Fig. 3.9) puisqu'elle ne concerne pas l'ensemble des attractivités dont le ménage peut effectivement bénéficier sur l'agglomération. D'ailleurs, étant donné que le ménage ne visite à aucun moment l'ensemble des logements vacants qui lui sont attractifs, il n'a jamais connaissance de son attractivité effective $Y_{IJ}(H)$. Dans Mobisim-MR, on synthétise cette attractivité connue par la valeur v_J (Fig. 3.9). Cette dernière peut être vue comme une perception globale, une idée, unique, que le ménage a de son attractivité effective à partir d'un échantillon.

L'opportunité globale à déménager $M_{IJ}(H)$ correspond à l'appréciation de cette valeur v_J du ménage H par rapport à l'attractivité Y_{IJ} de tous les ménages de toute l'agglomération (Fig. 3.10). Cette attractivité, l'attractivité générale, représente une référence collective sur la zone d'étude : le caractère favorable ou non, à l'échelle globale (tous les logements vacants pour tous les ménages) du marché du logement. Comparer son attractivité connue v_J à cette référence Y_{IJ} permet au ménage de se positionner (de positionner son attractivité connue) dans le marché du logement, par rapport à l'ensemble des ménages.

L'intérêt global à déménager $M_{IJ}(H)$ est une valeur comprise entre 0 et 1. Si la valeur d'attractivité connue v_J des n_J logements connus par le ménage est élevée, alors

12. Ce nombre peut s'apparenter au nombre de logements visités par le ménage.

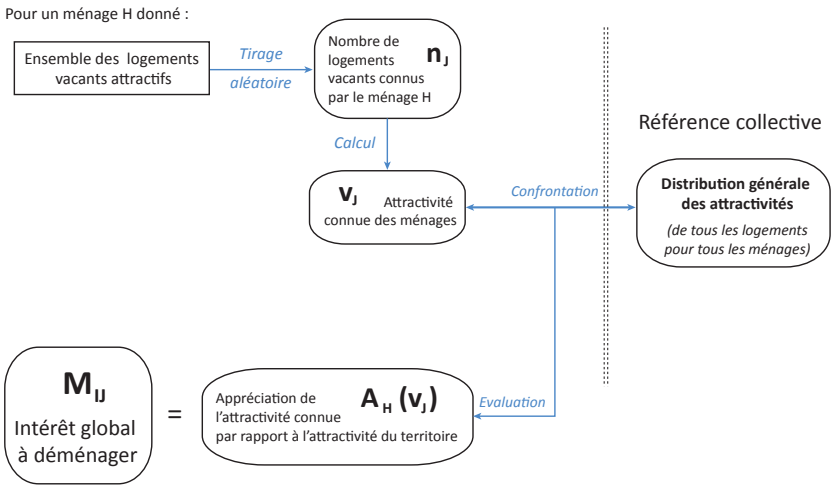


FIGURE 3.10 – Variables intervenant dans le calcul de l'intérêt global à déménager M

son appréciation sera bonne (proche de 1), et représentera pour lui un fort intérêt à déménager (Fig. 3.11). Dans le cas contraire, son appréciation de son attractivité sera faible (proche de 0) et son intérêt global à déménager $M_{IJ}(H)$ sera également faible.

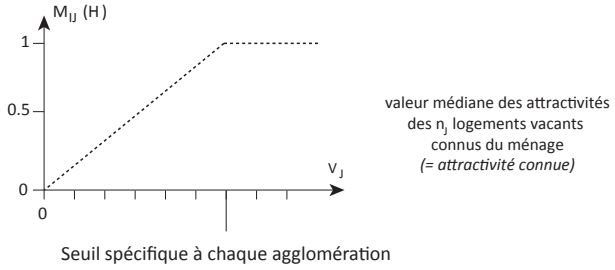


FIGURE 3.11 – Variable d'appréciation de l'attractivité définie pour le calcul de l'intérêt global à déménager M

La variable M caractérise bien un contexte global, positionnant le ménage de manière relative dans le contexte résidentiel de l'agglomération.

3.2.7 La probabilité de déménager $\Omega_J(H)$

La probabilité de déménager du ménage est particulièrement importante dans Mobisim-MR. Elle représente la part de l'inconnu dans le choix de déménager ou non, en plus des choix connus. Par définition, ces facteurs inconnus ne peuvent qu'être estimés. La probabilité dépend ici conjointement de deux termes indépendants - l'intérêt à déménager $M_{IJ}(H)$ et la mobilité individuelle φ_H - via une moyenne géométrique :

$$\Omega_I(H) = [\varphi_H \times M_{IJ}(H)]^{1/2}$$

Un ménage est par conséquent plus ou moins encouragé à déménager de sa loca-

lisation résidentielle I (mobilité individuelle) et à la fois plus ou moins attiré par un ensemble de localisations potentielles J (intérêt global à déménager). Parce que nous considérons la satisfaction vis-à-vis du logement actuel I à travers φ_H et l'intérêt global des différentes destinations possibles J à travers $M_{IJ}(H)$, la probabilité de déménager $\Omega_I(H)$ est une variable d'interactions *push-pull*.

Les valeurs $\Omega_J(H)$ (probabilité pour le ménage H de quitter I) et $1 - \Omega_I(H)$ (probabilité pour le ménage H de rester en I) définissent la probabilité des évènements « je déménage » et « je ne déménage pas ». A partir de là, le modèle effectue un tirage aléatoire (*Random Drawing*) selon la fonction de probabilité qui détermine la réalisation d'un des deux évènements.

Ainsi, dans cette formalisation, les ménages dont l'attractivité la plus élevée reste faible peuvent tout de même déménager, alors qu'un ménage dont l'attractivité maximale est élevée peut très bien ne pas déménager. La condition pour déménager est d'avoir au moins une attractivité supérieure à zéro.

3.2.8 Le choix de la nouvelle destination $\Psi_{IJ}(H)$

Une fois que le ménage déménage (c'est-à-dire qu'il a été tiré au sort dans l'étape précédente), il choisit sa nouvelle localisation résidentielle. Pour cela, il identifie simplement la localisation J la plus attractive par rapport à I parmi les n_J logements visités (Fig. 3.8).

3.3 La simulation des mobilités résidentielles avec Mobisim-MR : fonctionnement du modèle

3.3.1 Déroulé d'une simulation

La figure 3.12 représente synthétiquement le déroulé d'une simulation des mobilités résidentielles dans Mobisim :

1. Mise à jour des caractéristiques des ménages (évolution dans le cycle de vie), et création/disparition de nouveaux ménages (cf. chapitre 2).

2. Pour les ménages existants antérieurement, calcul de leur satisfaction vis-à-vis de leur environnement résidentiel et des caractéristiques de leur logement occupé. Les

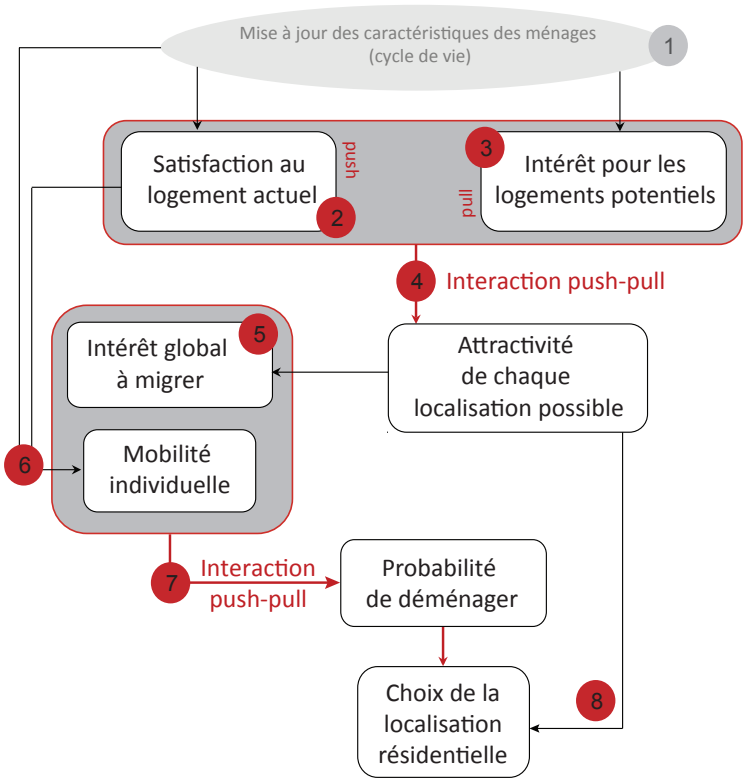


FIGURE 3.12 – Séquence des différentes étapes dans la simulation

ménages nouvellement créés n'ont pas de satisfaction résidentielle s'ils proviennent du réservoir ou s'ils résultent d'une émancipation. Pour les ménages nouvellement créés à l'issue d'une séparation, leur satisfaction résidentielle équivaut à leur satisfaction vis-à-vis de l'environnement résidentiel de leur localisation résidentielle avant la séparation.

3. Calcul de l'intérêt manifesté par chaque ménage pour les localisations résidentielles potentielles, compte-tenu des appréciations des ménages pour les attributs des logements et des environnements résidentiels.

4. Pour chaque ménage, calcul de l'attractivité des destinations résidentielles possibles (indicateur *push-pull*). Ce calcul tient compte de (2) et (3). Pour les ménages issus du réservoir ou résultant d'une émancipation, l'attractivité d'un logement est égale à l'intérêt $U_H(J)$ du logement J (puisqu'ils n'ont pas de satisfaction).

5. Calcul de l'intérêt global à déménager dans l'agglomération en fonction de l'attractivité connue v_J des ménages.

6. Calcul de la mobilité individuelle des ménages, en fonction de leur étape dans le cycle de vie (1) et de leur satisfaction résidentielle (2).

7. Calcul de la probabilité de déménager des ménages, à partir de la mobilité individuelle des ménages (6) et de leur intérêt global à déménager dans la ville (5) (indicateur *push-pull*). Tirage au sort, selon cette probabilité, des ménages qui déménagent.

8. Pour chaque ménage qui déménage, choix d'un logement en fonction de (4).

Les calculs se font de manière asynchrone : les ménages procèdent à leurs évaluations résidentielles chacun à leur tour, dans un ordre aléatoire. Les calculs sont également effectués de manière parallèle, ce qui veut dire que plusieurs ménages procèdent à leurs évaluations parallèlement, ce qui peut conduire à des « concurrences » de calculs sur un logement : deux ménages peuvent choisir le même logement comme nouvelle destination résidentielle. Lorsque c'est le cas, l'un ou l'autre déménage effectivement dans le logement, et l'autre ne déménage pas. La concurrence évoquée n'intervient que dans le calcul ; thématiquement, il n'y a pas de concurrence entre les ménages dans le marché du logement.

La nature probabiliste du modèle implique qu'en répétant plusieurs simulations avec exactement les mêmes paramètres, les ménages qui déménagent à chaque itération ne seront pas forcément les mêmes et les configurations spatiales simulées peuvent varier. Cependant, on s'attend à ce que les résultats de chaque simulation soient identiques à une échelle globale. Ceci illustre en quoi le modèle Mobisim n'est pas un modèle prédictif, mais bien un modèle prospectif, dédié à l'exploration de scénarios d'aménagement ou de futurs possibles.

3.3.2 Évolutions simulées

Plusieurs variables évoluent à travers Mobisim-MR :

- les appréciations des ménages *via* leurs évolutions dans le cycle de vie ;
- le profil général des préférences résidentielles à l'échelle de l'agglomération, *via* l'évolution du nombre de ménages de différents types ;
- l'environnement résidentiel de chaque logement évolue, mais les attributs du logement lui-même sont fixes ;
- la satisfaction résidentielle des ménages *via* la modification de leur environnement résidentiel et leurs évolutions dans le cycle de vie ;
- l'attractivité des logements pour les ménages en raison de l'évolution de leurs appréciations et de l'évolution de l'environnement résidentiel (caractéristiques sociales), des accessibilités généralisées calculées *via* les modules de simulation

des mobilités quotidiennes, qui dépendent de l'offre de transport (fixée au départ) et de la localisation des ménages (qui évolue au fil des itérations) ;
- la mobilité individuelle φ des ménages *via* leur évolution dans le cycle de vie ;
- l'évaluation de l'offre globale M en logements pour les mêmes raisons que citées précédemment.

A chaque itération du modèle, il peut y avoir peu ou beaucoup de logements correspondant aux préférences des ménages. Ceci dépend des configurations qui émergent (quantité et caractéristiques de l'offre vacante) des choix effectués lors des itérations précédentes.

3.3.3 Récapitulatif du rôle des variables dans le modèle

3.3.3.1 Qui fait quoi ?

Satisfaction résidentielle et intérêt sont des indicateurs de l'adéquation du ménage vis-à-vis d'un logement ; ils sont à considérer comme des facteurs de décision. Ils permettent chacun de résumer une situation résidentielle à un moment donné de la vie du ménage, et un ressenti à l'idée de ce qu'il pourrait avoir au même moment. Comparé l'un à l'autre, ils permettent de positionner le ménage dans la différence entre ce qu'il a et ce qu'il pourrait avoir.

L'attractivité des localisations résidentielles est une notion clé dans le modèle, puisqu'elle permet ensuite au ménage de réfléchir non plus uniquement par rapport à lui, mais dans un contexte plus global où il évalue en quelque sorte dans quelle mesure ses attractivités sont des opportunités ou non. Les n_J logements évalués constituent la base de sa réflexion, à travers l'attractivité qui en ressort pour le ménage : son attractivité connue, v_J, unique connaissance de ses opportunités. On comprend alors aisément que le tirage au sort des n_J logements joue un rôle non négligable dans la décision du ménage.

En plafonnant à 1 et par leur interaction *via* une moyenne géométrique, les variables φ et M ne peuvent que participer à la diminution de la probabilité de déménager Ω : soit sa valeur est maximale (parce que les valeurs des deux variables le sont également), soit l'une seulement est au maximum, insinuant que l'autre diminue la valeur de Ω. L'interaction entre φ et M est donc importante dans les résultats de simulation, puisqu'elle détermine la probabilité à déménager de chacun des ménages : si, collectivement, les probabilités sont élevées, alors le taux de migration intra-urbain le sera également, et réciproquement. Ω est le résultat final de simulation de la dynamique de décision.

En d'autres termes, l'interaction des deux variables φ et M participe directement au résultat final du nombre de déménagements total de la simulation.

3.3.3.2 Hétérogénéité des comportements

L'hétérogénéité entre les ménages dans Mobisim-MR provient de plusieurs sources, à commencer par la désagrégation de la description des ménages : quatre variables décomposées chacune en trois ou quatre modalités permettent de représenter 72 types de ménages différents. Les quatre possibilités de style de vie élèvent cette valeur à 288 types de ménages. Mais la formalisation permet beaucoup plus que 288 types de comportements dans la décision résidentielle, et plus encore, elle permet aussi à des ménages différents d'aboutir aux mêmes décisions, à savoir le déménagement.

En effet, l'hétérogénéité des comportements entre les différents ménages émane de chacune des étapes dans la formalisation. Le processus de décision commence par différentes évaluations résidentielles (satisfaction en I et intérêts pour les J) auxquelles les ménages procèdent en fonction de leurs caractéristiques. Ainsi, les appréciations et les importances sont les premières garantes de l'hétérogénéité entre les ménages. Deux ménages identiques (dont les quatre caractéristiques socio-économiques et les deux variables du style de vie sont identiques) auront une satisfaction identique *si et seulement si* ils habitent dans des logements identiques localisés dans des environnements résidentiels identiques. Cette probabilité étant très faible, on peut considérer que l'hétérogénéité est le fondement même de Mobisim-MR.

Les n_J logements visités par le ménage sont tirés au sort parmi l'ensemble des logements vacants attractifs du ménage. Là encore, l'aléa dans la sélection des logements connus conforte l'hétérogénéité entre les ménages dans leur perception de leur attractivité effective (*via* l'attractivité connue) : certains ménages peuvent visiter les « meilleurs logements » (i.e. les plus attractifs), tandis que d'autres peuvent très bien ne sélectionner que des logements faiblement intéressants pour eux compte tenu de leur situation actuelle. S'ensuit une hétérogénéité dans la perception des opportunités globales à déménager : le positionnement de v_J par rapport à l'attractivité Y_{IJ} dépendra de l'attractivité de chacun des n_J logements tirés au sort.

La mobilité individuelle φ distingue différentes catégories de comportements face au déménagement, et même au sein d'une même catégorie, elle varie en fonction de la satisfaction des ménages. Le calcul de la probabilité de déménager implique donc deux variables garantes de l'hétérogénéité dans la réflexion résidentielle menée par le ménage.

Ainsi, deux ménages strictement identiques en début d'itération présentent une probabilité très faible d'effectuer leur décision résidentielle de la même manière, mais comme nous l'avons vu dans la section 3.2.7, cela ne veut pas dire pour autant qu'ils n'effectueront pas tout de même l'un et l'autre une mobilité résidentielle.

Seules les valeurs d'intérêt des différentes localisations résidentielles potentielles sont identiques pour deux ménages identiques, puisqu'elles ne dépendent que des caractéristiques du ménage. Par ailleurs, les appréciations de l'environnement résidentiel sont les moins génératrices de diversification de comportements. En effet, contrairement aux logements, les appréciations de l'environnement résidentiel local sont identiques pour tous les ménages (à quelques exceptions près comme la bordure urbanisée et la part des hauts revenus dans le voisinage). Des logements localisés à différents endroits auront des attributs différents, ce qui engendrera des appréciations différentes. Inversement, deux ménages complètement différents auront les mêmes appréciations de l'environnement résidentiel de logements situés au même endroit (dans le cas de logements collectifs par exemple). Les possibilités de diversification d'évaluations de l'environnement résidentiel entre les ménages dépendent majoritairement des importances, puisqu'elles sont différenciées, elles, selon les caractéristiques des ménages.

Ainsi, l'hétérogénéité entre les agents dans Mobisim provient des interactions entre les agents (les ménages) et leur environnement (logement et environnement résidentiel) *via* les appréciations combinées aux importances, mais elle vient également de l'imprécision et de l'incertitude injectées à différents niveaux dans la formalisation de la décision résidentielle.

3.4 Conclusion

Mobisim-MR est un modèle de simulation des mobilités résidentielles, à travers la décision des ménages. Il permet de déterminer, à chaque année d'itération, quels ménages de Mobisim déménagent et pour aller où, tout en tenant compte des différentes variables impactant leurs choix. La modélisation choisie est individu-centrée, et les ménages interagissent indirectement entre eux, *via* les modifications de l'environnement résidentiel qu'ils évaluent. Les règles de décision sont fixes, elles ne changent pas au cours du temps ; les modifications de comportement des ménages sont dues à leur évolution dans le cycle de vie (grâce au modèle démographique de Mobisim) ainsi qu'aux

interactions qu'ils ont avec l'environnement dans lequel ils habitent. Ce module fonctionne en interaction avec le module de simulation des mobilités quotidiennes : quand un ménage change de localisation résidentielle, ses déplacements quotidiens sont modifiés. De plus, deux données nécessaires au fonctionnement du module de simulation des mobilités résidentielles proviennent du module de simulation des mobilités quotidiennes (les coûts d'accès au centre-ville, et les accessibilités généralisées aux zones d'emplois, selon le mode de transport dominant des ménages).

Le modèle est un compromis entre la simplicité (faits stylisés et règles de décision simples) et une représentation la plus réaliste possible des comportements. La représentation du marché du logement en est un exemple : le fonctionnement économique du marché n'est certes pas représenté, mais la structure spatiale urbaine et la différenciation entre les lieux reposent sur les attributs des différentes localisations résidentielles et les appréciations qu'en font les différents types de ménages.

Les choix de formalisation des différentes variables intervenant dans la décision résidentielle des ménages ont fortement été conditionnés par les données, ou l'absence de données, les concernant. En effet, nous ne connaissons pas, en sciences sociales, de sources de données sur la dynamique de la décision résidentielle à l'échelle de l'individu. Les données existantes permettent d'évaluer des phénomènes observés (une situation résidentielle dans une agglomération à un moment donné), mais pas de donner une information précise sur les processus qui y conduisent. Des solutions doivent alors être trouvées en conséquence. La probabilité de déménager de Mobisim-MR en est une ; elle permet d'estimer la part de l'inconnu dans le choix résidentiel des ménages, à l'aide de variables *proxy* : l'intérêt global à déménager et la mobilité individuelle. Ces deux variables permettent de rapprocher l'inconnu de la décision de facteurs plus tangibles comme la capacité à envisager un déménagement facilement ou non (mobilité individuelle) ou la perception du marché du logement. On touche néanmoins ici encore à des éléments qui ne sont pas aisément modélisables, et qui nécessitent l'utilisation de l'imprécision (variables continues) notamment. Le choix de la formalisation des appréciations a été également été fortement conditionné par la connaissance des données dont nous pouvions disposer plus tard pour le paramétrage.

Le grand nombre de paramètres, l'hétérogénéité en cascade, et le caractère probabiliste du modèle font de Mobisim-MR l'outil adéquat pour confronter des choix de formalisation aux données empiriques et explorer le fonctionnement d'un modèle individu-centré.

Conclusion de la première partie

Mobisim est une plateforme de simulation exploratoire, mais en aucun cas de prédiction, et ce en raison de la complexité des phénomènes qu'elle modélise, et de l'incertitude liée à l'exercice en lui-même. Elle n'a pas non plus vocation à produire des résultats directifs : son objectif est d'explorer des solutions en aménagement, et de les comparer entre elles pour enrichir les débats. La simulation *via* Mobisim permet un examen structuré des dynamiques complexes à l'œuvre dans une ville, proposant ainsi une assistance aux réflexions qui peuvent être menées en aménagement, plutôt qu'un substitut à cette réflexion.

La plateforme Mobisim est une plateforme plurielle : elle combine plusieurs modèles, mais surtout plusieurs approches. Le développement résidentiel est *top-down*, les évolutions démographiques sont *bottom-up* mais sans formaliser d'interactions entre les individus, alors que les modèles de mobilités relèvent explicitement des interactions entre les agents, et entre les agents et leur environnement. Ces différentes approches se combinent et se complètent pour constituer un outil de simulation cohérent et flexible pour répondre aux questions posées. Chacun des modèles de Mobisim est construit selon ses objectifs propres, tout en suivant la cohérence de l'objectif de la plateforme elle-même. La modélisation individu-centrée dynamique, caractéristique commune à l'ensemble de modèles qui composent Mobisim, permet de capter les interactions, les mouvements, les trajectoires temporelles et l'hétérogénéité des comportements des individus.

La complexité n'est pas optionnelle dans les processus en œuvre dans les dynamiques urbaines, et Mobisim permet, à travers chacun des modèles de la plateforme, de représenter simplement des réalités complexes. La formalisation probabiliste permet de modéliser l'incertain et l'imprécision et intégrer ainsi cette complexité sans la nier. Les modèles de simulation des évolutions démographiques et des mobilités résidentielles présentés dans les chapitre 2 et 3 l'illustrent respectivement.

Le développement d'une telle plateforme de simulation prend du temps, et constitue un projet à long terme (1999 à 2012). De la conceptualisation des différents modèles, dans un ensemble cohérent, à la validation des résultats en passant par l'acquisition des données, la génération de la population synthétique et le calibrage de chaque modèle, chaque étape requiert du temps, de nombreuses compétences et des connaissances interdisciplinaires. Chacun des modèles a connu des évolutions dans le temps, synonymes à la fois d'une volonté d'améliorer la représentation des processus et de préciser les capacités de la plateforme. Le projet Mobisim a commencé en 2008 au sein du laboratoire ThéMA, et les premières simulations pour l'aménagement ont été exécutées en 2013.

Deuxième partie

Paramétrage des modèles

"Prediction is very difficult,
especially about the future"
Niels Bohr

"An approximate answer to the right
problem is worth a good deal more
than an exact answer to an
approximate problem"
John Tukey

Introduction de la deuxième partie

La construction d'un modèle entraîne la définition de nombreux paramètres, décrits dans les équations du modèle. Le passage obligatoire entre la construction d'un modèle et son utilisation est l'affectation de valeurs aux différents paramètres qui le composent. C'est l'étape d'estimation des valeurs de paramètres du modèle, plus couramment appelée paramétrage.

Comme nous l'avons vu dans la première partie, la construction des modèles se fait toujours en fonction d'un objectif précis. Le paramétrage d'un modèle suit également des objectifs propres : le premier, implicite, est bien entendu de pouvoir faire fonctionner le modèle. Mais comment ? Dans quelle « direction » guider les résultats de simulation ? Selon quelles tendances ? Définir des objectifs permet d'orienter le modélisateur dans le choix même des valeurs à affecter aux paramètres.

A partir de ces objectifs, le paramétrage s'organise différemment selon la manière dont est conçu le modèle, la nature des paramètres qu'il contient et la disponibilité des données pour en définir les valeurs (Richiardi *et al.*, 2006). La nature du paramétrage d'une variable dépend principalement de la disponibilité de la donnée qui s'y réfère. Si la donnée existe, alors le paramètre peut être défini directement. Par contre, si la donnée est lacunaire ou manquante, le paramétrage nécessite des analyses exploratoires et le modélisateur procède alors au calibrage pour préciser les valeurs à affecter aux paramètres concernés.

La donnée, au sens de l'information relative au phénomène ou au processus modélisé, est ainsi au cœur de ce travail de paramétrage, puisqu'elle permet d'en préciser les objectifs et d'alimenter le modèle en orientant l'affectation d'une valeur à chacun des paramètres. On cherche comment traiter la donnée lorsqu'elle est disponible, comment l'adapter lorsqu'elle ne correspond pas exactement au paramètre et comment la pallier lorsqu'elle n'existe pas.

La notion de paramétrage d'un modèle est souvent associée à celle de calibrage, et ces deux notions, bien que différentes, sont parfois confondues dans la littérature (Richiardi *et al.*, 2006). Le calibrage consiste à tester plusieurs jeux de paramètres possibles pour une variable et à choisir l'un d'eux pour l'exécution des simulations, selon sa capacité à atteindre les objectifs définis. Il constitue ainsi une étape du paramétrage d'un modèle. Cette étape n'est pas forcément indispensable : si les valeurs initialement affectées permettent d'atteindre les objectifs du modélisateur, celui-ci n'a pas besoin de procéder à un calibrage.

À partir de ces constats, la démarche adoptée pour le paramétrage des deux modèles présentés en première partie est donc la suivante :

1. Définition d'objectifs à atteindre pour la simulation.
2. Définition des comportements, quels qu'ils soient, à simuler pour atteindre ces objectifs.
3. Choix de la donnée en fonction des comportements à simuler.

L'application de cette démarche sur Mobisim-Démo et Mobisim-MR est présentée dans les deux chapitres suivants.

Chapitre 4

Paramétrage du modèle des évolutions démographiques

"En essayant continuellement on
finit par réussir. Donc : plus ça rate
plus on a de chance que ça marche"
Jaques Rouxel, *Les Shadoks*

Mobisim-Démo a pour vocation de faire évoluer les individus dans leur cycle de vie. Il modélise plusieurs évènements démographiques, à travers la probabilité que ceux-ci se réalisent ou non dans la « vie » des individus et des ménages de la population synthétique. Chaque probabilité est un paramètre du modèle, déclinée ou non selon les caractéristiques des individus, et à chaque paramètre doivent être affectées des valeurs, afin de pouvoir simuler une évolution de la population dans le temps.

La démarche mise en place pour le paramétrage implique plusieurs éléments fondamentaux. Elle nécessite notamment de distinguer les comportements démographiques individuels (désagrégés), les tendances démographiques globales et les projections démographiques de population. Le paramétrage repose sur des hypothèses de comportements à simuler et sur la définition d'objectifs à atteindre. La simulation des comportements démographiques doit être cohérente avec ce que l'on sait des comportements actuels des individus de la population française, mais également de la réalité locale de la zone d'étude sur laquelle le modèle est appliqué. En effet, les résultats du modèle doivent être cohérents avec le terrain d'application. Dans ce travail, le modèle est paramétré sur l'agglomération du Grand Besançon, à partir de la première année de simulation avec Mobisim (2010).

4.1 La mission du paramétrage : objectifs et comportements démographiques

4.1.1 Les objectifs à atteindre avec le paramétrage : simuler un prolongement des tendances actuelles

Le modèle a été conçu pour reproduire des évolutions démographiques [1] ; la question posée pour son paramétrage est donc : quelle évolution démographique souhaite-t-on simuler avec le modèle ? La réponse à cette question est primordiale, puisqu'elle conditionne la manière dont les données seront utilisées et transformées en différentes valeurs de paramètres.

Le scénario de référence sur lequel l'ensemble des modèles a été paramétré, est un scénario de prolongement des tendances actuelles : mêmes comportements de mobilités, mêmes dynamiques dans la politique de construction de logements, et donc continuité des dynamiques démographiques actuelles. La notion d'*actuel* dépend bien entendu de la temporalité des processus en question. Les comportements et les préférences résidentiels des ménages évoluent moins rapidement que les comportements de déplacement des individus, donc les tendances à représenter peuvent concerner une période de temps plus longue dans le passé. Aussi pour chaque processus dont un prolongement de tendances est à simuler, il faut tenir compte des césures ou des évolutions remarquées dans l'observation des comportements passés.

Le choix du scénario (i.e. le prolongement des tendances actuelles) permet de définir les objectifs à atteindre dans les résultats de simulation. Ces objectifs sont à la fois qualitatifs (quelles tendances reproduire ?) et quantitatifs (quels effectifs de population simuler ?).

La description qualitative des tendances démographiques permet de les synthétiser, globalement. Par exemple, depuis une dizaine d'années la diminution progressive de la taille des ménages conduit à la croissance plus rapide du nombre de ménages que celle de la population, et ce phénomène s'accélère avec le temps (PLH, 2005 ; SCOT, 2010). De plus, on constate une augmentation du nombre de familles monoparentales, et un recul de l'âge moyen de la première grossesse chez les femmes. Enfin, on enregistre une augmentation du nombre de ménages âgés, et ce en raison de l'allongement de la durée

1. La question posée alors était « pourquoi construire un modèle de simulation des évolutions démographiques ? » - cf. Chapitre 2.

de vie. Ces différents éléments constituent les principales tendances démographiques actuelles.

Parmi ces tendances, nous nous fixons comme objectif de représenter les évolutions démographiques suivantes avec Mobisim-Démo :

- une croissance du nombre de ménages supérieure à la croissance de la population ;
- une diminution de la taille des ménages ;
- une augmentation de la part de familles monoparentales.

Cela étant, ces tendances ne suffisent pas pour définir les objectifs à atteindre par les valeurs de paramétrage du modèle. Elles sont trop floues compte tenu de l'intervalle des valeurs possibles pour chaque résultat, et doivent être complétées par des estimations numériques. Ces estimations permettent de préciser l'ordre de grandeur dans lequel les résultats de simulation doivent se situer. Ainsi, pour les trois tendances que nous avons choisies de reproduire, cela revient à estimer, pour une durée de simulation, le nombre total de ménages et l'effectif total de la population, la taille moyenne des ménages et la structure des ménages. La structure des ménages désigne la répartition des effectifs de chacun des quatre types de ménages principaux utilisés dans le modèle des mobilités résidentielles - célibataire (ou ménages seuls), couples avec enfant(s), couple sans enfant et familles monoparentales - relativement les uns par rapport aux autres. Cette estimation se fait à l'aide d'une projection démographique.

Une projection démographique est un calcul qui permet, en fonction d'un scénario et d'hypothèses de comportements démographiques, d'estimer un effectif de population future. Une projection est de fait indissociable des hypothèses de scénario sur laquelle elle est construite : elle n'a pas vocation à prédire dans l'absolu des effectifs de population pour l'avenir mais bien de les projeter, selon le scénario défini en amont. L'objectif d'une projection démographique est de répondre à la question « combien y aurait-il d'habitants dans mon département dans XX années si les hypothèses du scénario choisi se vérifiaient ? » et non « combien y aura-t-il d'habitants dans mon département dans XX années ? » (Léon et Desrivierre, 2011). La différence principale se trouve dans l'intention avec laquelle les résultats sont utilisés : "*a demographer makes a projection, and his reader uses it as a forecast*[2]" (Booth, 2006).

Dans notre cas, la question sous-jacente aux objectifs quantitatifs est : « combien y aurait-il d'habitants dans 20 ans dans la communauté d'agglomération du Grand

2. « le démographe calcule une projection, l'utilisateur s'en sert comme d'une prévision »

Besançon si les tendances démographiques actuelles se prolongent ? », équivalent dans le cas du paramétrage à « combien d'habitants le modèle doit-il simuler ? ».

Les hypothèses à l'origine des scénarios de projections démographiques dépendent de trois composantes : la mortalité, la fécondité et les migrations [3]. Le principe sous-jacent au calcul repose sur une évolution de la mortalité, de la fécondité et des migrations potentiellement élevée, moyenne (ou constante) ou faible. C'est la combinaison de chacune des possibilités entre elles qui crée le scénario (ex. hypothèses de taux de fécondité et de mortalité élevés et taux de migrations faibles). Le scénario dit central (évolutions constantes de chacune des trois composantes) est celui qui correspondrait le plus à nos objectifs.

Ainsi, pour compléter les tendances démographiques précédemment identifiées, nous devons utiliser des données de projection afin d'estimer les effectifs à simuler avec le modèle. Ces deux objectifs nous permettront ensuite de définir les valeurs à affecter aux paramètres.

4.1.2 Comportements démographiques modélisés

Les tendances démographiques globales sont le résultat de comportements démographiques individuels. Par exemple, l'accroissement du nombre de ménages d'âge avancé est une conséquence de l'allongement de la durée de vie des individus. L'INSEE évoque une « érosion des modes traditionnels de cohabitation » pour expliquer la diminution de la taille moyenne des ménages. Elle relève en effet d'une combinaison de plusieurs facteurs : les couples vivent de moins en moins ensemble, et les séparations sont plus nombreuses qu'auparavant. L'augmentation des ménages jusqu'à des âges avancés y contribue également. L'augmentation des séparations est à l'origine de cette augmentation du nombre de familles monoparentales. Les ménages sont plus petits mais ils sont également de plus en plus nombreux, du fait de ces décohabitations, ce qui explique ce décalage entre la croissance du nombre de ménages et de la population. Enfin, le recul de l'âge moyen de la première grossesse (de 24 ans dans les années 70 à presque 30 ans aujourd'hui) est dû à une évolution dans le parcours professionnel des femmes (études plus longues), ou à cette tendance à la décohabitation qui recule l'arrivée du premier enfant dans un couple.

Le cumul de ces comportements individuels fait émerger les évolutions démographiques à une échelle agrégée. La simulation des tendances évoquées précédemment

3. La méthode dite des « trois composantes » (Booth, 2006)

doit donc tenir compte de ces comportements : l'enjeu du paramétrage est de représenter ces comportements à travers les probabilités d'évènements démographiques du modèle pour atteindre nos objectifs.

En raison de la manière dont sont formalisés les évènements, il ne sera pas possible représenter tous les comportements précisément. Par exemple, dans Mobisim-Démo, la formation d'un couple entraîne automatiquement une cohabitation ; la décohabitation des couples ne pourra donc être représentée dans le modèle. Néanmoins, nous pouvons simuler une diminution de la taille des ménages par ailleurs : séparations, émancipation des enfants en ménage seul, maintien de ménages âgés dans des logements individuels et non en maison de retraite.

Par ailleurs, l'âge moyen de la première grossesse est un paramètre du modèle, et permet ainsi de représenter explicitement le décalage de la fécondité chez les femmes.

4.2 Quantifications initiales

4.2.1 Quantifier les objectifs à atteindre

4.2.1.1 Quelles données de projection utiliser ?

Les données de projections démographiques traditionnellement utilisées en France, notamment dans les collectivités territoriales, proviennent du modèle Omphale développé par l'INSEE. Omphale a été conçu pour « répondre à des demandes de projections démographiques locales de plus en plus soutenues » (Léon et Desrivierre, 2011), afin de pouvoir orienter les réflexions en matière d'aménagement du territoire. Modèle de projection, il fonctionne également sur la base d'hypothèses et de scénarios démographiques. Il produit une projection de prolongement des tendances actuelles dans son scénario dit central (Léon et Desrivierre, 2011).

Cependant, les données Omphale sont payantes et toutes les collectivités n'en disposent pas ; c'est le cas de la communauté d'agglomération du Grand Besançon [4]. Or la logique de Mobisim est d'utiliser des données suffisamment accessibles pour que le modèle puisse être appliqué à toutes les zones d'étude, en France notamment. Ne pouvant disposer de ces données pour fixer notre objectif quantitatif de paramétrage, nous

4. Il se trouve que, suite à une convention entre l'INSEE et le centre Maurice Halbwachs, les données de projections Omphale sont à présent gratuites sur demande, mais elles ne l'étaient pas au moment du calibrage du modèle. Source : http ://www.cmh.ens.fr/greco/apf.php

avons créé nos propres données de cadrage, en calculant une projection démographique propre au projet [5].

Parmi les différentes approches de projection démographique, nous avons choisi l'extrapolation, qui se base sur la seule hypothèse que « le futur sera une continuation du passé » (Booth, 2006). Au regard de la réalité, cette hypothèse est forte et plutôt risquée, puisqu'on sait que les tendances démographiques sont dépendantes de changements économiques, sociaux, politiques ou encore en santé publique, et qu'elles peuvent varier rapidement. Mais ce choix est assumé dans la modélisation démographique, et le propre de l'extrapolation est justement de ne considérer aucune variable exogène (Booth, 2006).

Nous partons du principe que l'évolution constante de chacune des composantes est reflétée à travers les effectifs de populations ou les fréquences d'évènements démographiques des derniers recensements de la population ; c'est à partir des effectifs des RGP de 1990 et 2009 que nous avons extrapolé les effectifs de population et de ménages futurs. L'appui sur un document de planification locale, le PLH de 2005 [6], a complété la démarche, ce dernier présentant des données Omphale mais de manière très succincte.

A partir de ces données, nous avons testé trois approches de calcul d'extrapolation pour obtenir des projections à échéance 20 ans. La première s'appuie sur des extraits de données Omphale disponibles dans le PLH de 2005 de la CAGB, et les deux suivantes estiment les effectifs de population de Mobisim en 2030 à partir de différentiels entre les recensements de 1990 et 2009. Pour ces dernières, nous n'avons volontairement pas considéré le recensement de 1999. Extrapoler nos projections sur la période 1990 à 2009, plutôt que 1999 à 2009, nous permet de considérer une évolution plus ancrée dans le temps, et de lisser d'éventuelles variations soudaines et ponctuelles.

4.2.1.2 Trois propositions de calcul de projection démographique

Projection démographique à l'aide des documents d'urbanisme

Pour la première extrapolation, nous avons utilisé des informations disponibles dans le PLH de l'agglomération de 2005. C'est le dernier document de planification locale

5. Par « propre au projet », il faut comprendre que de cette manière, nous pouvons axer les données de projection sur les variables dont la simulation est la plus importante dans Mobisim-Démo, à savoir la composition des ménage.

6. Le dernier PLH (Plan Local de l'Habitat) de l'agglomération a été publié pendant l'année 2014 et le paramétrage du modèle date de 2012.

à avoir présenté des données issues de la projection démographique Omphale pour le périmètre de la CAGB et il n'existe pas de projection officielle plus récente sur ce territoire.

Deux constats sont à faire concernant ces informations :

1. Elles sont succinctes, puisque seuls les effectifs de la population totale et du nombre de ménages y sont présentés. N'ayant pas accès aux données sources, nous ne pouvons nous reposer que sur ces extraits.
2. Le recensement INSEE sur lequel est basé la projection Omphale du PLH est celui de 1999, soit 10 ans avant les données sources de notre population synthétique, et la projection Omphale est à horizon 2015.

TABLEAU 4.1 – Calcul de la projection démographique à partir du PLH

Variables	Effectifs INSEE 2009	Effectif annuel extrapolé	Structure des ménages en 2009 (en %)	Projection en 2029
Population	**177016**	**+560**		**188216**
Ménages	**83766**	**+660**		**96966**
Ménages célibataires	36571		*43,66*	42335
Couples sans enfant	19343		*23,09*	22389
Couples avec enfant(s)	17964		*21,45*	20799
Familles monoparentales	7061		*8,43*	8174
Ménages sans famille	2825		*3,37*	3268

	Population	Ménages
Évolution projetée (2010-2030)	+ 6,63 %	+ 17 %
Nombre de personnes par ménage	1,92	

À partir de ces deux informations (les données de 1999 et la projection en 2015), nous avons extrapolé linéairement la croissance annuelle (en effectifs bruts) de population et de ménages : l'évolution de la population présentée dans le PLH pour la période 1999 - 2015 équivaut à une augmentation de 560 habitants et de 660 ménages par an. En reportant ces croissances sur la population de 2009, la projection estime une population de 188216 habitants en 2029, soit une augmentation de + 6,7 % (Tabl. 4.1), répartis dans presque 97000 ménages (+ 17 % entre 2009 et 2029).

La seule information concernant la structure des ménages telle que nous la définissons ici (c'est-à-dire selon la composition du ménage uniquement, alors que le PLH focalise sur le nombre de personnes dans le ménage et la structure des ménages par âge) est que « presque la moitié des ménages sont des ménages seuls en 2015 » (PLH, 2005). Ne disposant pas d'information supplémentaire permettant de déterminer quelle sera l'évolution de la structure des ménages, nous avons choisi de ne pas la faire évoluer dans cette projection. Nous avons donc distribué les 96966 ménages selon les parts de chaque type observées en 2009 ($4^{\text{ème}}$ colonne du tableau 4.1).

Projection par application des taux d'évolution annuels moyens (TEAM)

Pour la deuxième projection, nous avons utilisé les taux d'évolution annuels moyens. Ces taux sont calculés à partir des effectifs de population entre les recensements de 1990 et de 2009.

Pour des raisons mathématiques liées aux évolutions divergentes qu'a suivi chaque type de ménage, les résultats des projections des effectifs totaux (population, ménages) et des effectifs de chacun de leurs sous-ensembles ne coïncident pas, ce qui engendre de fortes incohérences entre les estimations des effectifs de ménages et la somme des estimations de tous les types de ménages. À l'image de la projection précédente, nous avons donc choisi de ne calculer que les évolutions des effectifs de population et de ménages, et de décomposer ensuite ces derniers selon la même répartition qu'en 2009 (Tabl. 4.2). La structure des ménages n'évolue donc pas non plus dans la projection TEAM.

Cette projection estime une forte évolution du nombre de ménages (+34%) comparée à celles de la population (+10%), soit une moyenne de 1,73 personne par ménage au lieu de 2,11 en 2009 (Tabl. 4.2). Compte tenu du choix de la répartition du total de ménages entre les différents types, le nombre de couples avec enfant(s) ré-augmente entre 2009 et 2029 alors qu'il diminuait auparavant.

Projection linéaire

La dernière projection que nous avons calculée est une extrapolation linéaire, c'est-à-dire une estimation des effectifs non pas *via* le taux d'évolution mais par le différentiel brut, rapporté à l'année, entre les effectifs de chaque variable des deux recensements.

Selon cette projection, la croissance de la population serait de +800 habitants chaque année, pour une croissance de +1000 ménages (Tabl. 4.3). Sur les 20 années de simulation, ceci reviendrait à une augmentation de +9% de la population entre 2009 et

Tableau 4.2 – Calcul de la projection démographique TEAM

Variables	Effectifs INSEE 1990	Effectifs INSEE 2009	Structure des ménages en 2009 (en %)	Taux d'évolution annuel moyen (90-09)	Projection en 2029
Population	**161730**	**177016**		0,00476	**194670**
Ménages	**63376**	**83766**		0,01479	**112354**
Ménages célibataires	19924	36571	*43,66*		49052
Couples sans enfant	13132	19343	*23,09*		25944
Couples avec enfant(s)	22844	17964	*21,45*		24095
Familles monoparentales	5424	7061	*8,43*		9471
Ménages sans famille	2052	2825	*3,37*		3789

	Population	Ménages
Évolution projetée (2010-2030)	+ 9,97 %	+ 34,13 %
Nombre de personnes par ménage	1,73	

Tableau 4.3 – Calcul de la projection démographique linéaire

Variables	Effectifs INSEE 1990	Effectifs INSEE 2009	Différentiel 2009-1990 annualisé	Projection linéaire en 2029
Population	**161730**	**177016**	+ 805	**193116**
Ménages	**63376**	**83766**	+ 1073	**105226**
Ménages célibataires	19924	36571	876	54094
Couples sans enfant	13132	19343	327	25881
Couples avec enfant(s)	22844	17964	− 257	12827
Familles monoparentales	5424	7061	86	8784
Ménages sans famille	2052	2825	41	3639

	Population	Ménages
Évolution projetée (2010-2030)	+ 9,1 %	+ 25,62 %
Nombre de personnes par ménage	1,84	

2029, contre +26% pour les ménages. Le nombre total d'habitants de la CAGB estimé pour 2029 est alors 193116, répartis dans 105226 ménages. Cette projection est la seule à représenter une évolution de la structure des ménages. La diminution du nombre de couples avec enfant(s) est nette, par rapport aux couples sans enfant dont l'effectif, lui,

augmente.

Ces trois calculs sont loin des approches classiques en démographie, et la fiabilité de nos projections peut être remise en question. Cela étant, elles restent cohérentes avec notre méthodologie globale, et répondent à notre besoin de créer une donnée de cadrage à laquelle confronter nos résultats de simulation.

4.2.2 Quantification des paramètres de Mobisim-Démo

4.2.2.1 Les paramètres de Mobisim-Démo

Le tableau 4.4 recense l'ensemble des évènements démographiques de Mobisim-Démo présentés dans le chapitre 2, et décrit les paramètres qui leur sont associés. Comme nous l'avons vu, chaque évènement est modélisé en une ou plusieurs étapes, représentées parfois par un ou des paramètres. Les paramètres peuvent être des valeurs fixes (ex. l'âge du départ en retraite) ou des probabilités, différemment appliquées selon les évènements ; elles peuvent en effet être constantes (ex. la probabilité d'émancipation, la probabilité d'être chômeur), différenciées selon une ou plusieurs caractéristiques de l'individu (ex. l'âge de la mère pour les primo-naissances, l'âge et le sexe pour les décès), ou selon un autre critère (ex. la durée du couple pour la séparation). Certains évènements comme la mise en couple ne relèvent pas forcément de paramètre : pour rappel, la deuxième étape de la mise en couple (association des dyades d'individus) est calculée par un algorithme dans le code du modèle.

Selon sa nature, un paramètre est donc plus ou moins dépendant d'une donnée. Les valeurs fixes comme l'âge où un individu devient étudiant, ou l'âge du départ en retraite relèvent de connaissances que l'on a des normes de la société, ou de seuils à définir arbitrairement. C'est également le cas pour les probabilités constantes (les probabilités qui concernent l'émancipation, le chômage ou encore le départ en maison de retraite) : elles peuvent être définies à partir de la littérature existante, arbitrairement ou selon un calibrage. Toutes les autres probabilités dépendent de données empiriques.

4.2.2.2 Paramétrage

Les sources de données pour le paramétrage du modèle sont les différentes enquêtes de recensement national, provenant tous de l'INSEE (Tabl. 4.4) : l'Enquête de l'Histoire Familiale (EHF) (1999), les quotients de nuptialité des célibataires (2008), les taux de

Tableau 4.4 – Paramètres des évènements modélisés dans Mobisim-Démo

Événement		Description du paramètre associé	Données source
Vie étudiante	(1)	Âge du changement de statut de « écolier » à « étudiant »	Faits stylisés
Émancipation	(2)	Probabilité d'émancipation : rester ou non dans le domicile parental	Aucune
	(3)	Probabilité d'émancipation en « hors ménage »	Aucune
	(4)	Probabilité d'émancipation en colocation	Aucune
Vie active	(5)	Conversion de l'âge de fin d'études en diplôme	Tableau créé pour la population synthétique de Mobisim
	(6)	Probabilité d'avoir une certaine CSP en fonction du diplôme	Tableau de correspondance diplômes-profession d'Affichard (1981) / INSEE (1997)
	(7)	Probabilité d'être « chômeur »	Aucune
	(8)	Probabilité d'être « inactif »	Aucune
Mise en couple	(9)	Probabilité d'un célibataire d'être en couple selon l'âge et le sexe	Quotients de nuptialité (2008) et EHF (1999)
Primo-naissance	(10)	Probabilité pour la mère d'avoir un premier enfant en fonction de son âge	EHF (1999)
Naissance suivante	(11)	Probabilité d'avoir un autre enfant, selon le rang de l'enfant, et la différence d'âge avec le précédent	EHF (1999)
Séparation	(12)	Probabilité de se séparer selon la durée du couple	Taux de divortialité (2009)
Migrations (entrées)	(13)	Probabilité d'entrer dans l'agglomération, selon l'âge du chef de ménage et la composition du ménage	MIGCOM (2008)
Migrations (sorties)	(14)	Probabilité de sortir de l'agglomération, selon l'âge du chef de ménage et la composition du ménage	MIGCOM (2008)
Retraite	(15)	Âge du départ en retraite (changement de CSP)	Faits stylisés
	(16)	Probabilité d'aller en maison de retraite (« hors ménage ») à 80 ans	Aucune
Décès	(17)	Probabilité de décéder selon l'âge et le sexe	Quotient de mortalité (2008)

divortialité (2009), les données de migrations résidentielles au niveau communal MIGCOM (2008) et les quotients de mortalité (2008). Nous partons en effet du principe que les effectifs recensés résultent des comportements démographiques actuels et récents, et qu'ils traduisent donc parfaitement une évolution constante des trois composantes évoquées précédemment. Les données telles qu'elles apparaissent dans les recensements ne peuvent pas toutes être utilisées directement, et certaines nécessitent quelques modifications. La suite de cette section présente successivement le calcul de chacune des valeurs de paramètres.

Vie étudiante

L'âge auquel le statut professionnel d'un écolier devient « étudiant » (1) est fixé à 15 ans, représentant ainsi le passage au lycée [7].

Émancipation

Lorsqu'un individu termine ses études (c'est-à-dire atteint son âge de fin d'études), il peut quitter le domicile parental. Pour cela, trois probabilités s'appliquent à lui : la probabilité de créer un ménage seul ((2) dans la tableau 4.4), de partir en colocation (3) ou en « hors ménage » (4). Ces probabilités ne dépendent d'aucune donnée extérieure. La valeur (2) a été fixée à 0.5, arbitrairement, et les deux autres ont été fixées à 0 dans un premier temps. Ces valeurs se justifient par le fait que nous n'avons aucune information sur les comportements d'émancipation des jeunes adultes ; la probabilité de réalisation de ces évènements permet davantage d'ajuster les résultats de simulation que de représenter l'évènement en lui-même.

Vie active

Une fois que l'étudiant atteint son âge de fin d'étude, il quitte la catégorie « étudiant » pour entrer dans la vie active. Ce passage se fait en deux étapes :

- La conversion de l'âge de fin d'études en diplôme ((5) dans le tableau 4.4) se fait *via* une correspondance mise au point pour la génération de la population synthétique (Antoni *et al.*, 2011). Elle tient compte de la durée des études pour obtenir chaque diplôme, et une équiprobabilité est affectée lorsque plusieurs diplômes équivalent à la même durée d'études.
- Le diplôme est ensuite converti en CSP professionnelle, de manière probabiliste, à partir du tableau de correspondance diplômes-profession d'Affichard (1981) mis

7. Les lycéens sont considérés comme des étudiants en France.

à jour par l'INSEE (Forgeot et Gautié, 1997) (Tabl. 4.1). Il estime pour chaque profession exercée si les individus sont sous-diplômés, sur-diplômés ou normalement diplômés compte tenu du niveau d'étude. De ces informations, nous n'avons conservé que les adéquations entre le diplôme et la profession (« normal ») pour les quantifier en probabilité (étapes 1 et 2 du tableau 4.2) ; partant du principe d'équiprobabilité, nous avons parfois ajusté les valeurs de manière arbitraire. Par souci de cohérence avec notre population initiale, nous avons rééquilibré les valeurs résultantes selon la structure sociale de la population synthétique de Mobisim (étapes 3 et 4 du tableau 4.2).

Diplôme	Cadre, professeur, ingénieur	Profession intermédiaire	Technicien	Employé qualifié	Employé non qualifié	Ouvrier qualifié	Ouvrier non qualifié
3ème cycle, Grand école	normal	*sur-diplômé*	*sur-diplômé*	*sur-diplômé*	*sur-diplômé*	*sur-diplômé*	*sur-diplômé*
2ème cycle universitaire	sous-diplômé	normal	*sur-diplômé*	*sur-diplômé*	*sur-diplômé*	*sur-diplômé*	*sur-diplômé*
Supérieur court (1er cycle, BTS, DUT)	sous-diplômé	normal	normal	*sur-diplômé*	*sur-diplômé*	*sur-diplômé*	*sur-diplômé*
Baccalauréats généraux et brevets de technicien	sous-diplômé	normal	normal	normal	*sur-diplômé*	*sur-diplômé*	*sur-diplômé*
Baccalauréats techniques et professionnels	sous-diplômé	normal	normal	normal	*sur-diplômé*	normal	*sur-diplômé*
CAP, BEP	sous-diplômé	sous-diplômé	sous-diplômé	normal	*sur-diplômé*	normal	*sur-diplômé*
BEPC	sous-diplômé	sous-diplômé	sous-diplômé	normal	normal	normal	normal
Certificat d'études, sans diplôme	sous-diplômé	sous-diplômé	sous-diplômé	sous-diplômé	normal	normal	normal

FIGURE 4.1 – Correspondance diplôme-profession, Affichard (1981) mis à jour par l'INSEE - Source : Forgeot & Gautié (1997)

Les valeurs des probabilités d'être chômeur (7) ou inactif (8) n'ont pas de fondement empirique. Comme celles des probabilités 2 à 4, elles ont été définies arbitrairement. Elles nous permettent de signifier que ce cas de figure existe : la présence d'individus au chômage ou sans activité professionnelle joue un rôle dans le modèle des mobilités quotidiennes. La structure professionnelle de la population ne faisant pas partie des objectifs du paramétrage, elles n'ont pas été réévaluées par la suite.

Mise en couple

La première étape dans la mise en couple ((9) du tableau 4.4) est paramétrée à partir de données empiriques. Les valeurs de probabilité de mise en couple sont le

1. Identification des liens à quantifier à partir du tableau d'Affichard / INSEE

oui = «normalement diplômé»

CSP Mobisim

Diplômes Mobisim	Agriculteurs, exploitant	Artisans, commerçants, chef d'entreprise	Cadres	Professions intermédiaires	Employés	Ouvriers
Sans diplôme	oui	oui			oui	oui
CEP	oui	oui			oui	oui
BEPC	oui	oui			oui	oui
CAP BEP	oui	oui			oui	oui
BAC BP	oui	oui		oui	oui	oui
BAC+2		oui		oui		
Sup à BAC+2		oui	oui	oui		

2. Affectation de valeurs de probabilité qu'un diplôme donné conduise à une profession

Diplômes Mobisim	Agriculteurs, exploitant	Artisans, commerçants, chef d'entreprise	Cadres	Professions intermédiaires	Employés	Ouvriers	TOTAL
Sans diplôme	0,2	0,2			0,25	0,35	*1*
CEP	0,25	0,25			0,25	0,25	*1*
BEPC	0,25	0,25			0,25	0,25	*1*
CAP BEP	0,25	0,25			0,25	0,25	*1*
BAC BP	0,2	0,2		0,2	0,2	0,2	*1*
BAC+2		0,5		0,5			*1*
Sup à BAC+2		0,3	0,4	0,3			*1*

3. A partir de la structure professionnelle de l'agglomération, calcul de la probabilité d'apprtenir à une des CSP dans la CAGB

	Agriculteurs, exploitant	Artisans, commerçants, chef d'entreprise	Cadres	Professions intermédiaires	Employés	Ouvriers
Effectif sur la CAGB	223	3500	13956	20923	20855	14564
Part (%)	*0,30*	*4,73*	*18,85*	*28,27*	*28,17*	*19,68*
Probabilité	0,0030	0,05	0,19	0,28	0,28	0,20

4. Multiplication des valeurs obtenues dans 2 et 3 pour adapter les conversions diplôme-profession à la structure professionnelle de la CAGB

Diplômes Mobisim	Agriculteurs, exploitant	Artisans, commerçants, chef d'entreprise	Cadres	Professions intermédiaires	Employés	Ouvriers	TOTAL
Sans diplôme	0,00060	0,009			0,070	0,069	*0,149*
CEP	0,00075	0,012			0,070	0,049	*0,132*
BEPC	0,00075	0,012			0,070	0,049	*0,132*
CAP BEP	0,00075	0,012			0,070	0,049	*0,132*
BAC BP	0,00060	0,009		0,057	0,056	0,039	*0,162*
BAC+2		0,024		0,141			*0,165*
Sup à BAC+2		0,014	0,075	0,085			*0,174*

5. Normalisation à 1 des valeurs obtenues en 4.

Valeurs finales de probabilité

Diplômes Mobisim	Agriculteurs, exploitant	Artisans, commerçants, chef d'entreprise	Cadres	Professions intermédiaires	Employés	Ouvriers	TOTAL
Sans diplôme	0,00404	0,063			0,472	0,461	*1*
CEP	0,00570	0,089			0,533	0,372	*1*
BEPC	0,00570	0,089			0,533	0,372	*1*
CAP BEP	0,00570	0,089			0,533	0,372	*1*
BAC BP	0,00372	0,058		0,348	0,347	0,242	*1*
BAC+2		0,143		0,857			*1*
Sup à BAC+2		0,081	0,432	0,486			*1*

FIGURE 4.2 – Calcul de la probabilité d'appartenir à une catégorie socioprofessionnelle selon le niveau de diplôme.

résultat d'une multiplication des quotients de nuptialité des célibataires en fonction de leur âge (données INSEE) par un coefficient. Ce dernier représente la part des unions libres, dont la nature ne nous permet pas d'avoir la quantification exacte par les sources officielles de recensement (Gusbin *et al.*, 2007). Nous avons estimé ce coefficient à partir de l'EHF, par le ratio entre les effectifs de couples non mariés et les couples mariés en considérant les unions de 1989 à 1999. Les valeurs ainsi obtenues sont présentées dans le tableau 4.16.

Naissances

Les femmes ne peuvent avoir des enfants que si elles sont en couple et pour rester cohérent avec cette implémentation dans le calcul des valeurs des probabilités de naissance, nous n'avons considéré dans la base de données EHF que les femmes en couple au moment du recensement. Les probabilités de primo-naissances ((10) du tableau 4.4) correspondent, pour une année donnée, au ratio entre le nombre de naissances de rang 1 dans un ménage et au nombre de femmes sans enfant la même année. Les valeurs ainsi obtenues sont présentées dans le tableau 4.16.

Les données nécessaires aux calculs des valeurs de probabilité des naissances suivantes ((11) du tableau 4.4) proviennent également de l'EHF. Elles résultent d'une association entre les effectifs d'enfants de rang $N+1$ dans un ménage, avec les effectifs des familles ayant des enfants de rang $N-1$. Les valeurs sont différenciées selon la différence d'âge entre les deux enfants et le rang de l'enfant [8]. C'est le ratio des deux effectifs, pour chaque rang et chaque différence d'âge, qui permet de calculer ces valeurs de probabilité (Tabl. 4.18).

Séparation

Les valeurs calculées pour ces probabilités (Tabl. 4.16) proviennent des taux de divortialité, qui comptabilisent le nombre de personnes ayant vécu un divorce en fonction de l'âge auquel le divorce a eu lieu. Comme pour les unions, nous avons réévalué ce taux par un coefficient afin de prendre en compte les séparations des unions libres, non recensés dans les bases officielles. Les coefficients proviennent directement de Destinie (Bonnet *et al.*, 1999).

Migrations

Les valeurs de probabilité sont calculées à partir de la base de données de migrations résidentielles intracommunales MIGCOM datant de 2008. La base MIGCOM ne recense pas strictement les déménagements, mais elle présente un différentiel des situations résidentielles des individus entre 2003 et 2008. En connaissant les communes de résidence pour ces deux dates, nous avons extrapolé les entrées et les sorties de l'agglomération du Grand Besançon [9].

8. On dispose donc d'une distribution de valeurs de probabilité par rang d'enfant (allant de 2 à 6, puisque dans Mobisim, une femme ne peut avoir avoir plus de 6 enfant).

9. Un ménage entrant est un ménage dont le lieu de résidence en 2003 était situé hors de la CAGB et dans la CAGB en 2008, et un ménage sortant résidait dans une commune de la CAGB en 2003 mais plus en 2008.

Une probabilité d'entrée ou de sortie de l'agglomération est définie en fonction de la composition du ménage (Tabl. 4.5), puis elle est distribuée pour chaque type de ménage selon l'âge de la personne de référence (Tabl. 4.6 et 4.7). Cette distribution nous permet une plus grande visibilité dans le calibrage et une certaine flexibilité dans la construction de scénarios.

Composition	Entrées	Sorties
Célibataire	0,058	0,032
Couple (sans enfant)	0,027	0,034
Couple avec enfant(s)	0,031	0,045
Famille monoparentale	0,026	0,020
Colocations	0,088	0,045
Hors ménage	0,082	0,033

Tableau 4.5 – Valeurs initiales de paramètres - Probabilités de migration selon le type de ménage

Tableau 4.6 – Valeurs initiales de paramètres - Distribution des entrées selon l'âge

Age Quinq.	Célib.	Couple	Couple AE	Fam. Monop.	Coloc.	H.M.
5						3,0
10						5,2
15	433,7	9,4		0,4	55,0	205,3
20	809,7	129,8	16,9	8,6	127,3	207,2
25	270,5	129,8	73,1	22,2	21,8	59,2
30	151,5	58,2	121,9	28,6	10,8	16,0
35	86,8	35,5	109,5	31,4	2,7	11,1
40	57,9	18,1	97,3	37,9	5,8	6,1
45	40,9	15,4	52,9	27,3	3,5	5,3
50	43,8	20,8	33,0	16,9	4,7	1,6
55	47,3	20,6	13,1	6,4	2,8	4,0
60	23,6	22,8	9,2	4,3	0,4	2,3
65	18,5	10,3	1,7	1,6		4,1
70	10,5	11,7	0,9	0,7	0,7	2,5
75	13,7	8,3	0,9		0,7	10,9
80	8,6	3,6			0,8	4,9
85	6,4	2,5				10,9

Age Quinq. : âge de la personne de référence en classes d'âge quinquennales - Célib. : Ménages célibataires - Couples : couples sans enfant - Couple AE : couples avec enfant(s) - Fam. Monop. : familles monoparentales - Coloc. : colocations - H.M. : hors ménages.

Ces valeurs sont spécifiques à chaque zone d'étude ; elles permettent ainsi de prendre en compte les particularités locales en matière de migrations (attractivité générale de la zone d'étude, répulsivité ou attirance particulière d'une catégorie spécifique de la population, etc).

Tableau 4.7 – Valeurs initiales de paramètres - Distribution des sorties selon l'âge

Age Quinq.	Célib.	Couple	Couple AE	Fam. Monop.	Coloc.	H.M.
5					0,8	
10					3,5	
15	43,5	6,5	0,7	0,7	42,6	
20	361,7	40,7	16,1	77,3	97,0	11,0
25	323,3	36,5	118,7	227,0	21,4	27,1
30	126,6	11,2	261,8	109,9	11,6	22,5
35	76,3	6,7	185,2	39,5	10,8	25,2
40	43,3	6,5	102,0	15,8	5,0	20,0
45	35,8	5,5	67,4	25,2	6,5	22,1
50	43,3	4,3	34,9	40,6	4,0	6,7
55	39,1	3,2	18,4	43,3	0,8	2,8
60	32,4	2,0	5,3	41,2	2,0	
65	16,8	0,8	0,9	23,9	1,6	0,4
70	7,9	0,8	1,6	6,9		
75	9,3			5,4	6,4	0,8
80	7,9		0,2	2,1	6,4	
85	3,2	0,7		0,8	8,2	
90	1,3	0,8			4,8	

Age Quinq. : âge de la personne de référence en classes d'âge quinquennales - Célib. : Ménages célibataires - Couples : couples sans enfant - Couple AE : couples avec enfant(s) - Fam. Monop. : familles monoparentales - Coloc. : colocations - H.M. : hors ménages.

Ces probabilités nous permettent de cibler un type de ménage, en fonction de sa composition et de sa classe d'âge. Néanmoins, elles sont à ajuster avec précaution :

1. elles expriment des tendances migratoires qui sont à la fois locales et récentes, et il est délicat de les modifier sans craindre de biaiser ou même d'inverser des réalités observées. On sait notamment que le solde migratoire de l'agglomération du Grand Besançon est négatif, et que certains types de ménages ont tendance à plus sortir de l'agglomération qu'à y entrer (c'est le cas des familles notamment) ;
2. la première probabilité (Tabl. 4.5), appliquée uniquement sur la caractéristique « composition des ménages », s'exerce comme le tirage au sort d'une part d'un type de ménage (et donc d'une certaine quantité, relative au nombre de ménages de ce type) à faire entrer ou sortir du territoire. Ainsi, pour chaque tirage, l'effectif résultant sera d'autant plus important que le nombre de ménage y est élevé. La dynamique peut donc rapidement s'amplifier.

Retraite

L'âge du départ en retraite a été fixé par rapport au contexte actuel en France (65 ans), et la probabilité de départ en maison de retraite au-delà de 80 ans a été

arbitrairement fixée à 0,1. Tout comme les probabilités d'émancipation, ce paramètre a surtout permis d'ajuster les effectifs de ménages en « hors ménage » au moment du calibrage. Et de la même manière que les probabilités d'être inactif ou au chômage, ce paramètre permet avant tout de représenter cette réalité dans Mobisim, sans pour autant y accorder du sens dans le modèle.

Décès

Les valeurs de probabilité de décéder dépendent de l'âge et du sexe des individus. Cette probabilité est directement calculée à partir des quotients de mortalité (i.e. le recensement du nombre de décès en fonction de l'âge et du sexe de la personne), divisés par l'effectif total de la population du même âge en France. Les valeurs ainsi obtenues sont présentées dans le tableau 4.17.

Les distributions de probabilités appliquées aux individus permettent d'obtenir le nombre de naissances, de mises en couples, de séparations, etc. Aucun objectif n'est implémenté dans le modèle pour limiter le nombre total de chacun des évènements, pas plus que pour l'effectif total de la population à atteindre chaque année. Les résultats sont complètement dépendants de la réalisation des évènements démographiques modélisés. Les probabilités de Mobisim-Démo sont de la forme « quelle est la probabilité qu'une femme de cet âge ait un enfant » et non « pour une naissance donnée, quelle est la probabilité que la femme ait cet âge ? ».

De ces choix découlent deux conséquences :

- il n'est pas possible de contrôler, en amont de la simulation, le résultat final de nos évolutions démographiques ;
- pour un même évènement, les probabilités ne dépendent pas les unes des autres, et il est possible d'en modifier les valeurs pour le calibrage ou la définition d'un scénario.

4.2.2.3 La donnée : constats sur la quantification initiale des paramètres

Aucune des données utilisées n'a été directement exploitable pour paramétrer les valeurs ; elles ont toutes nécessité des modifications pour représenter pertinemment l'évènement modélisé, ou des ajustements pour s'adapter à la structure de la population de Mobisim. De plus, la nature des données (population cible, date d'acquisition) nécessite quelques précautions.

Premièrement, les données de recensement sont le reflet d'enregistrements officiels. Les informations sur les unions représentent ainsi les mariages mais pas les unions libres. Il en est de même pour les séparations : seules les informations sur les divorces sont disponibles, à défaut de la totalité des séparations de couple. Ainsi, la capacité des données initiales à reproduire fidèlement les unions et les séparations telles qu'elles sont décrites dans Mobisim est contestable, malgré le recours à des coefficients utilisés pour pallier ce problème. Dès lors, avant même de procéder aux tests de validation des valeurs de paramètres, nous pouvons présumer qu'elles devront être ajustées pour simuler des effectifs supposés plus proches de la réalité.

Deuxièmement, la plupart des données utilisées pour le paramétrage sont relativement récentes (2007 ou 2008), à l'exception des probabilités de naissances dont la validité peut poser problème. Entièrement calculées à partir de l'EHF (1999 [10]), nous pensons que ces données surestiment les tendances actuelles, puisqu'elles reproduisent les observations des années 1990 et que les comportements de fécondité ont évolué à la baisse depuis. Les données de l'EHF ont également été utilisées pour réévaluer le ratio entre les couples non mariés et les couples mariés. Tout comme les naissances, nous supposons que les comportements de concubinage ont évolué (à la hausse) depuis, auquel cas les ajustements effectués manquent de pertinence.

Pour pallier un manque concernant les informations sur la conversion des diplômes en CSP (paramètre (6)), nous avons également dû procéder à la création d'une donnée, quantitative, à partir d'une information qualitative. L'estimation de ces valeurs de paramètres est plutôt sommaire, mais elle nous permet un compromis entre une conversion diplôme - CSP arbitraire et la stricte réalité professionnelle de la zone d'étude.

La plupart des valeurs définies par ce paramétrage sont valables d'un point de vue national, c'est-à-dire que les valeurs affectées aux différentes probabilités d'évènement sont générales [11], et peuvent être utilisées pour d'autres zones d'étude [12]. Seules les migrations doivent être considérées plus attentivement ; les probabilités d'entrées et sorties du territoire portent sur les migrations intra-communales, elles sont donc locales. Le paramétrage de ces évènement nécessite de reprendre systématiquement les données

10. L'EHF date de 1999, et les enquêtes ont été menées entre 1990 et 1999. Elle n'a pas été mise à jour depuis sa parution, c'est pourquoi nous n'avons pu disposer de données plus récentes.

11. Les données sont issues de recensements nationaux, donc applicables à l'ensemble du territoire français

12. On parle bien ici des valeurs initiales, ce qui n'exclut pas qu'elles puissent nécessiter d'être ajustées pour correspondre aux réalités spécifiques à chaque zone d'étude

MIGCOM de l'ensemble des communes concernées par la zone d'étude. La conversion des diplômes en CSP a elle aussi été normalisée sur la structure de la population de Besançon, et nécessiterait donc également une actualisation avec la population de chaque zone d'étude de Mobisim.

Le cas de la structure professionnelle d'une part et celui des migrations d'autre part soulignent la volonté de représenter au mieux la situation démographique de la zone d'étude. Si le caractère local des migrations est évident, celui de la structure professionnelle peut paraître plus dérisoire dans le contexte de Mobisim. Pourtant, bien que les professions ne jouent pas un grand rôle dans les différents modèles, il nous paraît important de pouvoir marquer la singularité des territoires lorsque cela est possible.

Le paramétrage des valeurs de probabilité d'évènements démographiques a été conditionné par la disponibilité des données. En effet, certaines données plus appropriées aux évènements modélisés existent mais nous n'avons pas pu y avoir accès ; c'est le cas notamment de données relatives aux PACS, dont l'INED a pu bénéficier (Mazuy *et al.*, 2011) sans possibilité de les diffuser, ces dernières étant protégées par une convention avec le ministère de la Justice.

4.2.3 Résultats de la simulation avec les valeurs initiales de paramètres

Les valeurs des paramètres ainsi définies (valeurs initiales des paramètres) permettent de simuler une augmentation globale de la population et du nombre de ménages, comme le montrent les résultats du tableau 4.8. La situation initiale de Mobisim correspond à l'année 2010, établie à partir du recensement INSEE de 2009, puisque c'est sur cette base de données qu'a été créée la population synthétique de Mobisim. Aussi une simulation de 20 ans correspond toujours à l'année 2030 dans Mobisim. C'est sur cette base que seront présentés les résultats dans l'ensemble de ce travail.

Le nombre de ménages et le nombre d'habitants augmentent tous les deux entre 2010 et 2030 ; cela étant, la croissance des ménages est nettement plus rapide, puisqu'elle est de +35% en 20 ans, alors que la population augmente de +10%. Sur les 20 années de simulation, le nombre de ménages seuls augmente fortement, tandis que l'effectif des couples, tous types confondus, diminue progressivement (Tabl. 4.8). Le nombre de familles monoparentales a plutôt tendance à diminuer. La majeure partie de cette croissance des ménages est donc due à l'augmentation du nombre de ménages seuls. Le nombre de personnes par ménage chute de 2,11 en 2010 à 1,72 en 2030. La

Tableau 4.8 – Résultats de simulation avec les valeurs initiales des paramètres

Variables	INSEE 2009 - Mobisim 2010	Mobisim 2030
Population	**177016**	**195205**
Ménages	**83766**	**113262**
Ménages célibataires	36571	70370
Couples sans enfant	19343	17219
Couples avec enfant(s)	17964	13327
Familles monoparentales	7061	6535
Ménages sans famille	2825	5725

	Population	Ménages
Évolution simulée (2010-2030)	+ 10 %	+ 35 %
Nombre de personnes par ménage	1,72	

croissance des ménages sans famille est probablement due à l'émancipation des enfants en hors ménage ou aux migrations. Ainsi, selon les objectifs qualitatifs à atteindre, seule l'augmentation du nombre de familles monoparentales n'est pas simulée par cette configuration initiale des valeurs des paramètres. Pour information, les résultats obtenus avec les valeurs initiales de paramètres présentent un taux de natalité de 8,3‰ et un taux de mortalité de 9,3‰.

En comparant ces premiers résultats avec chacune des trois projections, on remarque qu'ils se rapprochent le plus, au niveau agrégé, de la projection TEAM : l'effectif total d'habitants et le nombre de ménages en 2030 sont similaires avec ceux de cette projection ce qui implique que le nombre moyen de personnes par ménage l'est également. Cela étant, la structure des ménages obtenue avec les valeurs initiales des paramètres ne coïncide pas. Inversement, ces résultats sont assez éloignés des estimations de la projection PLH : elle estime une croissance plus lente que les deux autres projections, à l'opposé des résultats de Mobisim qui présentent une croissance globalement rapide.

Pour les trois la projections, le nombre de célibataires simulé avec les valeurs initiales de paramètres est trop élevé, ce qui créé un fort déséquilibre avec le nombre de couples (Tabl. 4.9), tous confondus. Enfin, le nombre de familles monoparentales est inférieur aux trois effectifs projetés.

TABLEAU 4.9 – Résultats obtenus avec les valeurs initiales de paramètres et effectifs des différentes projections sur 20 ans

Variables	Avec les valeurs initiales de paramètres de Mobisim	Projection PLH	Projection TEAM	Projection linéaire
Population	**195205**	**188216**	**194670**	**193107**
Ménages	**113262**	**96966**	**112354**	**105229**
Ménages célibataires	70370	42335	49052	54094
Couples sans enfant	17219	22389	25944	25881
Couples avec enfant(s)	13327	20799	24095	12827
Familles monoparentales	6535	8174	9471	8784
Ménages sans famille	5725	3268	3789	3639

	Population	Ménages
Évolution simulée avec les paramètres initiaux (2010-2030)	*+ 10 %*	*+ 35 %*
Évolution projetée PLH (2009-2029)	+ 6,63 %	+ 17 %
Évolution projetée TEAM (2009-2029)	+ 9,97 %	+ 34,13 %
Évolution projetée Linéaire (2009-2029)	+ 9,09 %	+ 24,62 %

Nb de personnes par ménage (résultats initiaux)	*1,72*
Nb de personnes par ménage (projection PLH)	1,92
Nb de personnes par ménage (projection TEAM)	1,73
Nb de personnes par ménage (projection Linéaire)	1,84

Ainsi, quelle que soit la projection choisie comme objectif quantitatif de paramétrage, il est indispensable de compléter le paramétrage par une phase de calibrage, afin d'ajuster ces valeurs de paramètres pour préciser les résultats.

4.3 Calibrage de Mobisim-Démo

Le calibrage a été effectué par essai-erreur, en modifiant les valeurs de paramètres qui nous semblaient nécessiter un ajustement les unes après les autres. Cette technique n'est généralement pas conseillée dans le cadre de variables interdépendantes : certains paramètres sont fortement liés entre eux (cf. Chapitre 2), ce qui implique qu'une variation de valeur de l'un des paramètres peut entraîner une chaîne de modifications sur les autres, et donc sur les résultats de simulation. Le calibrage par essai-erreur est néanmoins fréquemment utilisé (Evans et Unsworth, 2012), par défaut : recourir à un calibrage automatique requiert des moyens techniques dont les modélisateurs ne

disposent pas toujours.

Par ailleurs, l'analyse du fonctionnement du modèle dans le chapitre 2 (section 2.4) nous permet d'identifier les valeurs sur lesquelles agir pour certains résultats ciblés, et rendre le calibrage plus efficace. Pour rappel, les trois variables qui concernent les familles doivent être harmonisées simultanément, l'augmentation des unions occasionnant d'importantes modifications dans la structure des ménages. Elle constitue donc le premier levier sur lequel agir, réagissant de pair avec la probabilité de séparation, afin de ne pas sous estimer le nombre de familles monoparentales. La mortalité est une des seules variables relativement indépendantes en ce qui concerne l'ajustement des valeurs de résultats. Les valeurs concernant les migrations sont à modifier avec précaution, puisqu'elles peuvent entraîner un emballement dans la structure de la population.

Les modifications des valeurs de paramètres dans le calibrage ont été réalisées en fonction de la capacité du modèle à reproduire les effectifs estimés par chacune des projections. Parallèlement, nous avons également vérifié les valeurs des taux de natalité et de mortalité, non pas pour atteindre des taux présumés mais pour nous guider un peu plus dans le choix des valeurs de paramètres à modifier. Pour information, entre 1999 et 2009, le taux de natalité dans la CAGB était de 12,8‰ et le taux de mortalité était de 7,1‰ [13].

4.3.1 Calibrage pour atteindre l'objectif PLH

Selon les constats effectués précédemment, le calibrage pour le premier objectif doit permettre de ralentir la croissance des ménages et de la population (Tabl. 4.11, colonnes 2 et 3).

Objectif à atteindre pour le calibrage selon les données du PLH : 188 216 habitants et 96 966 ménages

Les effectifs de couples simulés avec les valeurs initiales des paramètres étant très faibles par rapport aux objectifs à atteindre, nous avons simulé une forte augmentation des unions. Celle-ci a entraîné une baisse radicale du nombre de célibataires, mais également du nombre de ménages. Cette dernière conséquence est due à la fois à la multiplication des cohabitations mais également au solde migratoire négatif dont les couples (avec ou sans enfant) bénéficient (Tabl. 4.5). Un compromis entre les taux de

13. Le taux de natalité est en baisse régulière depuis les années 70 et il était de 13,1‰ sur la période 1990 - 1999. Le taux de mortalité a très peu évolué depuis une vingtaine d'années.

mise en couple (multipliée par 4) et de séparation (multipliée par 1,8) a permis d'ajuster les proportions de chaque type de ménages. Nous avons ensuite ajusté les valeurs de probabilité des émancipations en colocation et des départs des personnes âgées « hors ménage » (Tabl. 4.10).

Tableau 4.10 – Modifications apportées aux valeurs de paramètres pour atteindre l'objectif 1 (PLH)

Paramètre	Modification ou nouvelle valeur
Mise en couple (9)	$\times 4$
Séparation (12)	$\times 1,8$
Émancipation en colocation (4)	$0,4$
Départ des personnes âgées en « hors ménage » (16)	$0,05$

En rouge les valeurs qui ont été augmentées
En bleu les valeurs qui ont été diminuées.

Le nombre de ménages seuls demeure supérieur à celui qui est estimé par la projection, mais dans des proportions nettement moindres que les premiers résultats (Tabl. 4.11). Le nombre de familles monoparentales est un peu plus élevé que dans la projection, à l'inverse des couples avec enfant(s) et sans enfant.

Néanmoins, si la structure des ménages semble cohérente, l'écart important en volume de population par rapport à l'estimation de la projection nous oblige à nous interroger sur le réalisme d'une telle estimation sur le territoire de la communauté d'agglomération bisontine.

Bilan

Un seul des trois objectifs qualitatifs est significativement atteint, celui du nombre de familles monoparentales. La croissance de la population et celle des ménages sont très proches l'une de l'autre, ce qui ne répond pas à l'objectif que nous nous étions fixé. Le ratio population/ménage est de 2,04 contre 2,11 en 2009, donc légèrement en baisse, ce qui reste insuffisant.

Concernant la structure des ménages, la répartition de chaque type de ménage est globalement respectée dans la simulation (Tabl. 4.11), sans avoir eu besoin de modifier un trop grand nombre de paramètres initiaux. Cela étant, après plusieurs tests de modifications de différents paramètres, nous avons dû nous résoudre au constat suivant : il n'est pas possible de simuler à la fois une structure des ménages cohérente avec cette

Tableau 4.11 – Résultats du calibrage pour atteindre la projection PLH

Variables	Résultats initiaux de Mobisim	Objectifs à atteindre	Après calibrage - Effectifs 2030
Population	195205	**188216**	**201057**
Ménages	113262	**96966**	**98559**
Ménages célibataires	70370	42335	47979
Couples sans enfant	17219	22389	20047
Couples avec enfant(s)	13327	20799	20143
Familles monoparentales	6535	8174	8253
Ménages sans famille	5725	3268	2051

	Population	Ménages
Évolution projetée (2009-2029)	*+ 6,3 %*	*+ 17 %*
Évolution simulée (2010-2030)	+ 14 %	+ 18 %

Nombre de personnes par ménage (projection)	*1,92*
Nombre de personnes par ménage (simulation)	2,04

projection, et la population totale estimée.

4.3.2 Calibrage pour atteindre l'objectif TEAM

Les résultats obtenus avec les valeurs initiales des paramètres reproduisent assez fidèlement les effectifs totaux de population et de ménages de cette projection (Tabl. 4.9 - colonnes 2 et 3), mais comme évoqué précédemment, nous constatons tout de même :

- un manque de couples et de ménages monoparentaux,
- une sur-représentation des ménages seuls.

Objectif à atteindre pour la projection avec le TEAM : 194 670 habitants et 112 354 ménages

Nous avons commencé par modifier les valeurs des composantes familiales, pour atteindre les mêmes ajustements que la première projection : stimulation des probabilités de mises en couple et de séparation (Tabl. 4.12). Les résultats les plus satisfaisants ont été obtenus grâce à la simulation de tendances migratoires inverses aux tendances observées pour les familles et les couples, en plus des ajustements précédents : les couples

sans enfant se voient attribuer des probabilités d'entrer dans la CAGB plus fortes que celles d'en sortir, et les probabilités d'entrée et de sortie des couples avec enfant(s) deviennent équivalentes pour obtenir un solde migratoire nul ; enfin, les entrées des célibataires ont été ralenties. Le taux de natalité et la taille moyenne des familles (en couple ou monoparentales) demeurant élevées [14], les probabilités de naissances de rang 2, 3 et 4 ont été limitées.

La probabilité d'émancipation des jeunes en colocation a été augmentée afin de concorder aux résultats de projection, et la probabilité de décéder a été diminuée pour freiner le taux de mortalité (qui est alors de 8,7‰).

TABLEAU 4.12 – Modifications apportées aux valeurs de paramètres pour atteindre l'objectif 2 (TEAM)

Paramètre	Modification ou nouvelle valeur
Mise en couple (9)	$\times 4$
Séparation (12)	$\times 1,8$
Entrée des célibataires (13)	$0,035$
Sortie des couples sans enfant (14)	$0,027$
Sortie des couples avec enfant (14)	$0,027$
Naissances de rangs 2, 3 et 4 (11)	$\times 0,8$
Émancipation en colocation (4)	$0,5$
Départ des personnes âgées en « hors ménage » (16)	$0,01$
Décès (17)	$\times 0,8$

En rouge les valeurs qui ont été augmentées
En bleu les valeurs qui ont été diminuées.

Bilan

Les résultats après calibrage sont globalement satisfaisants (Tabl. 4.13). Les valeurs ainsi testées coïncident avec les projections des ménages. En revanche, l'évolution de population résultant de cette structure des ménages ne correspond pas à la projection estimée : environ 233 400 habitants au lieu de 194 600 estimés, soit une évolution simulée de 32% en 20 ans au lieu des 10% estimés par la projection (Tabl. 4.13). La simulation de tels effectifs de familles et de célibataires ne permet pas de contenir le nombre d'habitants de la CAGB dans les ordres de grandeurs estimés par la projection. Le décalage entre les projections respectives (ménages d'une part, et individus d'autre part) est vérifié ici, puisque ces deux valeurs de la projection TEAM ne peuvent vraisemblablement pas être obtenues conjointement avec le modèle.

14. Le taux de natalité avoisinait alors les 14‰ et la taille moyenne des ménages de 2,11 personnes.

Tableau 4.13 – Résultats du calibrage pour atteindre la projection TEAM

Variables	Résultats initiaux	Objectifs TEAM à atteindre	Après calibrage - Effectifs 2030
Population	195205	**194670**	**233403**
Ménages	113262	**112354**	**112742**
Ménages célibataires	70370	49052	49271
Couples sans enfant	17219	25944	25724
Couples avec enfant(s)	13327	24095	25585
Familles monoparentales	6535	9471	9406
Ménages sans famille	5725	3789	2871

	Population	Ménages
Évolution projetée (2009-2029)	*+ 9,97 %*	*+ 34,13 %*
Évolution simulée (2010-2030)	+ 32 %	+ 35 %

Nombre de personnes par ménage (projection)	*1,92*
Nombre de personnes par ménage (simulation)	2,07

Ainsi, concernant les objectifs qualitatifs, nous pouvons constater que :

- La population croît de +32% en 20 ans tandis que les ménages connaissent une augmentation de +35%. La différence nous paraît trop peu marquée pour être représentative des tendances observées à l'heure actuelle dans la population.
- La taille des ménages passe de 2,11 à 2,07, en raison de la forte croissance démographique à laquelle nous assistons.
- Le nombre de ménages monoparentaux passe de 7061 à environ 9400 sur les 20 années de simulation, ce qui correspond à l'estimation de la projection.

Après plusieurs tests pour résorber les lacunes des valeurs initiales des paramètres, il apparaît que les modifications à apporter pour atteindre l'objectif TEAM concernent presque tous les paramètres (Tabl. 4.12) et surtout, s'éloignent des constats démographiques locaux. Les modifications apportées aux probabilités de migrations vont à l'encontre des réalités de la zone d'étude : le solde migratoire nul ou positif des familles et couples est dérangeant pour une agglomération qui déplore depuis plusieurs années le départ de ces ménages.

Le calibrage de cette projection souligne les mêmes problèmes que pour celui de la première projection : un décalage entre le ratio population/ménage estimé et ce qui est réalisable avec le modèle, dans ces conditions techniques.

4.3.3 Calibrage pour atteindre la projection linéaire

Les constats par rapport aux résultats obtenus avec les valeurs initiales sont globalement les mêmes que pour la projection précédente. Par rapport aux tendances à atteindre, nous pouvons constater que (Tabl. 4.9) :

- la population totale et le nombre de ménages sont surestimés ;
- les couples et les familles, toutes confondues, sont sous-représentées ;
- les ménages seuls sont surreprésentés.

Objectif à atteindre pour la projection linéaire : 195 205 habitants et 113 262 ménages

Comme pour le calibrage du TEAM, nous avons focalisé les premiers ajustements sur les effectifs des couples par rapport à celui des célibataires (probabilité de mise en couple), puis celui des couples par rapport aux familles monoparentales (probabilité de séparation). Les différents tests de calibrage valident finalement une multiplication par 3 pour les valeurs de probabilité de mise en couple et par 1,8 pour celle des séparations (Tabl. 4.14). L'ajustement de ces deux paramètres rééquilibre considérablement la structure des ménages.

Tableau 4.14 – Modifications apportées aux valeurs de paramètres pour atteindre l'objectif 3 (Linéaire)

Paramètre	Modification ou nouvelle valeur
Mise en couple (9)	$\times 3$
Séparation (12)	$\times 1,8$
Primo-naissances (10)	$\times 0,8$
Émancipation en « hors ménage » (3)	0
Émancipation en colocation (4)	0,35
Départ des personnes âgées en « hors ménage » (16)	0,03
Décès (17)	$\times 0,8$

En rouge les valeurs qui ont été augmentées
En bleu les valeurs qui ont été diminuées.

Avec ces modifications dites « profondes », la structure des familles se trouve stabilisée dans les proportions attendues (Tabl. 4.15). Seul persiste un déséquilibre entre un nombre de célibataires légèrement trop élevé et un manque de personnes hors ménage. La variable d'ajustement choisie pour ce dernier critère est la probabilité de départ des personnes âgées en « hors-ménage », passée de 0 à 0,03.

Tableau 4.15 – Résultats du calibrage pour atteindre la projection linéaire

Variables	Résultats initiaux	Objectif linéaire à atteindre	Après calibrage - Effectifs 2030
Population	195205	**193107**	**192668**
Ménages	113262	**105229**	**103319**
Ménages célibataires	70370	54094	55920
Couples sans enfant	17219	25881	20298
Couples avec enfant(s)	13327	12827	15370
Familles monoparentales	6535	8784	7974
Ménages sans famille	5725	3639	3757

	Population	Ménages
Évolution projetée (2009-2029)	*+ 9,09 %*	*+ 25,02 %*
Évolution simulée (2010-2030)	+ 9 %	+ 23 %

Nombre de personnes par ménage (projection)	*1,84*
Nombre de personnes par ménage (simulation)	1,86

Bilan

Bien que l'effectif des familles monoparentales soit un peu plus faible que celui estimé par la projection, nous considérons que le réajustement des valeurs de paramètres donne des résultats globalement satisfaisants. Il aurait néanmoins été possible de stimuler les mises en couples et les primo-naissances d'une part et les séparations d'autre part. L'idée sous-jacente est que, statistiquement, plus nous créons de couples avec enfants, plus les séparations peuvent créer des familles monoparentales plutôt que des ménages célibataires. Alors que le paramétrage précédent montre que cela est possible, on constate toutefois que les effectifs de ménages attendus sont supérieurs à ceux que nous cherchons à simuler dans le cas présent. Ainsi, pour ne pas surévaluer le nombre de couples avec enfant(s) et bien que le taux de natalité paraisse encore faible, les probabilités de naissance n'ont pas été modifiées.

Compte tenu des différents tests effectués sur cette projection, le ratio population/ménage simulé est nettement plus cohérent que dans les cas précédents ; c'est également le cas du nouveau jeu de valeurs des paramètres (Tabl. 4.14). Il est effectivement plus réaliste car, contrairement au calibrage TEAM, les valeurs estimées après les différents ajustements s'inscrivent dans les logiques démographiques de la zone d'étude, notamment en ce qui concerne les migrations. Le paramétrage peut être

considéré comme étant plus complet puisqu'il permet d'approcher franchement la totalité des objectifs quantitatifs fixés.

Un déséquilibre subsiste encore entre les couples avec enfant(s) et sans enfant (le différentiel entre les deux effectifs est plus faible que celui estimé par la projection). Une nouvelle baisse des valeurs de probabilités de primo-naissances pourrait améliorer le résultat, au risque d'avoir un taux de natalité vraiment bas par rapport au taux observé actuellement [15]. Néanmoins, il ne faut pas oublier que l'évolution linéaire ainsi calculée reproduit strictement la forte diminution de la natalité observée durant la période 1990-2009. Or, nous savons en comparant les tendances longues (1990 à 2009) avec des tendances plus courtes (1999 – 2009) que cette diminution d'effectif a récemment ralenti. La projection surestime donc certainement les tendances actuelles, n'obligeant pas à effectuer un calibrage plus strict que celui que nous avons fait. C'est pourquoi nous avons considéré 1) que le nombre total des couples et 2) la différence entre les deux effectifs de ces types de ménages, étaient acceptables pour considérer que l'objectif quantitatif était atteint.

Ce calibrage permet d'atteindre significativement deux des trois objectifs qualitatifs :

- la croissance de la population est de 9% sur les 20 années de simulation et celle des ménages de 22% ;
- le nombre de personnes par ménage passe de 2,11 à 1,86 ;
- les familles monoparentales sont plus nombreuses qu'en 2009 (environ 8000, soit +13%), même si leur augmentation est plutôt faible par rapport à la projection (8700 ménages monoparentaux estimés, soit une évolution de 24% par rapport à 2009). Cela étant, elles représentent toujours la même part dans l'effectif total des ménages.

4.3.4 Bilan du calibrage

Les différents tests ont montré que certaines configurations de valeurs de paramètres permettaient d'obtenir des effectifs globaux cohérents avec les projections, mais pas avec la structure des ménages et, inversement, que la simulation d'une structure plus

15. Avec les valeurs de paramètres issues du calibrage, le taux de natalité en fin de simulation est de 10,6‰. Cette valeur est nettement plus faible que les valeurs constatées dans la période 1999-2009 (12,8‰) mais comme nous l'avons évoqué dans la section 4.3, les indicateurs démographiques ne font pas partie des objectifs à atteindre ; ils servent juste de repères lors du calibrage pour limiter les incohérences dans les modifications de valeurs de paramètres.

cohérente n'aboutissait pas forcément à des effectifs totaux en accord avec la projection.

En effet, les résultats des trois calibrages permettent d'atteindre différemment les évolutions souhaitées. Les projections 1 (PLH) et 2 (TEAM) estiment des effectifs de population et de ménages qui paraissent difficiles à obtenir conjointement par la simulation avec Mobisim-Démo. Dans les deux cas, le respect du nombre de ménages et de leur répartition telle qu'elle est formulée entraîne nécessairement (dans les conditions des valeurs de paramètres choisies) une explosion démographique, comparée à l'estimation de la projection. Par conséquent, les taux d'évolution simulés entre 2010 et 2030 pour la population et pour les ménages sont presque équivalents (+14% pour la population et +18% pour les ménages dans le premier calibrage, et +32% contre +35% dans le deuxième calibrage), ce qui va à l'encontre des tendances démographiques actuelles.

Par ailleurs, les valeurs de migration nécessaires pour simuler le bon nombre de ménages dans la projection 2 sont contraires à ce qui est observé actuellement sur l'agglomération. Ceci signifie que Mobisim-Démo doit simuler des comportements qui ne sont pas réalistes pour atteindre (partiellement) cet objectif.

L'incapacité à reproduire correctement les deux premières projections avec Mobisim-Démo vient du décalage entre la manière dont elles ont été calculées et l'objectif premier pour lequel le modèle a été construit. En effet, les projections reposent sur l'hypothèse que la structure des ménages n'évolue pas au cours du temps, alors que Mobisim-Démo est justement conçu pour la faire évoluer. Les résultats de calibrage pour ces deux projections confirment donc que Mobisim ne peut pas simuler de telles évolutions (structure des ménages constantes).

La simulation de la troisième projection (projection linéaire), bien que celle-ci soit discutable démographiquement, paraît la plus réaliste avec les réalités de l'agglomération bisontine. Son calibrage nécessite peu de modifications : les valeurs de probabilité des évènement démographiques ont pu être modifiées à la marge, restant ainsi relativement proches des valeurs de probabilités initiales et surtout des observations actuelles. Cette projection est donc facilement reproductible avec notre modèle. Le jeu de paramètres que nous avons validé pour cette projection résulte d'un compromis : la structure des ménages estimée est globalement respectée dans la simulation, tout en assumant que la différence entre les couples avec enfant(s) et les couples sans enfant soit insuffisamment marquée, et que la part de familles monoparentales soit un peu plus faible que dans nos attentes.

Par ailleurs, nous nous sommes interrogé *a posteriori* sur l'évolution de l'âge moyen des personnes de référence des ménages : les résultats montrent que l'âge moyen augmente régulièrement de 48 ans à 52 ans durant les 20 ans de simulation. Si cette tendance démographique n'était pas inscrite dans nos objectifs, sa simulation permet néanmoins de confirmer l'intérêt de nos résultats pour simuler une évolution démographique pertinente.

4.4 Paramétrage final du modèle

4.4.1 Bilan du paramétrage du modèle d'évolutions démographiques de Mobisim

Suite aux différents résultats et constats du calibrage du modèle, nous choisissons de sélectionner la projection linéaire comme objectif à atteindre. Le jeu de valeurs des paramètres défini lors de ce calibrage (Tabl. 4.21) constitue donc les valeurs par défaut de notre modèle, pour la simulation d'un scénario en prolongement des tendances démographiques dans Mobisim.

4.4.1.1 Constats sur les modifications apportées aux valeurs initiales

Les modifications apportées aux probabilités de mise en couple traduisent la délicate estimation et le caractère inconnu du rapport entre les unions libres et les mariages ou PACS. En effet, si la documentation sur le nombre d'unions officialisées en France est abondante, l'information sur les unions libres est plus rare. Le coefficient calculé à partir de l'EHF ne permettant pas d'atteindre les tendances supposées par les différents calculs de projections (linéaire ou taux d'évolution), nous avons dû nous référer à la structure des ménages à atteindre pour définir des valeurs de probabilités plus appropriées. Le problème est le même pour les séparations. Enfin, la nécessité de stimuler ces valeurs de probabilité répond simplement aux tendances actuelles d'unions et de désunions (Frémeaux et Leturcq, 2013).

Le taux de mortalité des premières étapes de simulation est plus faible que le taux actuel et connaît une progression régulière au cours de la simulation, malgré la diminution des probabilités de décéder (nous avons considéré seulement 80% des valeurs de quotient de mortalité données par l'INSEE). Ce problème est davantage dû à l'effectif global de la population et à la répartition par âge des individus dans la population synthétique qu'aux quotients de mortalité eux-mêmes, et ne peut donc pas être résolu

directement par l'intermédiaire des paramètres. C'est pourquoi les indicateurs démographiques (taux de natalité, taux de mortalité) ne sont que des guides pour le calibrage et non des objectifs à atteindre.

Les valeurs de probabilité constantes (émancipation, départ en maison de retraite des personnes âgées) ont été choisies sur une base purement méthodologique : n'ayant pas de signification thématique dans les autres modèles de Mobisim, elles ont servi de variables d'ajustement pour rééquilibrer des déficits ou des excès dans les effectifs de certaines catégories de population. Enfin, comme cela était annoncé, l'évolution de la structure professionnelle n'a pas été vérifiée pendant ni après le calibrage.

Afin d'augmenter la précision des résultats, certains décalages résiduels pourraient probablement être révisés par la modification de probabilités de migration. Compte tenu du calibrage manuel, de la formalisation très désagrégée des probabilités de migrations et de leur potentielle sensibilité, l'entreprise nous paraît audacieuse. La volonté de garder un protocole de paramétrage le plus simple et le plus efficace possible ont encouragé cette décision.

Une faiblesse du calibrage, compte tenu des tendances actuelles et au regard des besoins pour le modèle résidentiel, est de n'avoir pu stimuler davantage l'augmentation des familles monoparentales. En effet, nous savons à l'heure actuelle qu'elles représentent une cible importante pour les aménageurs, en raison de leurs besoins en logement.

4.4.1.2 La question des étudiants bisontins

Les données de l'INSEE indiquent une surreprésentation dans la pyramide des âges pour la classe des 18-24 ans. Cette surreprésentation est dûe aux entrées et sorties des étudiants qui arrivent nombreux à Besançon à 18 ans et dont certains quittent le territoire une fois leurs études terminées. L'objectif est donc de conserver dans la simulation cette pyramide des âges par classes donnée par l'INSEE.

Les données MIGCOM utilisées pour calibrer la composante migratoire du modèle (entrées et sorties de l'agglomération) sont également basées sur des classes d'âge, mais qui sont différentes de celles du recensement général de la population de l'INSEE [16]. Après plusieurs vérifications, nous avons pu constater que le décalage entre ces deux

16. Les migrations sont définies en âge quinquennaux, tandis que la structure par âge de la population synthétique de Mobisim a été définie selon des classes d'âge de l'INSEE. Par conséquent, la classe d'âge qui concerne les étudiants est 15-20 ans et 20-25 ans, alors qu'elle correspond à 18-24 ans et 25-39 ans pour la population synthétique.

structures de données ne nous permettait pas de maintenir cette surreprésentation dans la pyramide des âges. Il en résultait de forts déséquilibres entre les différentes tranches d'âge de la population : l'effectif élevé d'individus entre 18 et 24 ans vieillissait sans sortir systématiquement du territoire, créant ainsi une sous-représentation des jeunes individus et une surreprésentation des quadragénaires après 20 ans de simulation.

Suite aux différents tests de calibrage, nous avons mis en place une option pour gérer plus précisément ces migrations étudiantes. Issue d'une réflexion spécifique à Besançon, elle peut être désactivée pour d'autre zones d'étude si besoin. Elle consiste à injecter chaque année le nombre d'étudiants de 17 ans nécessaire au maintien d'un « stock » constant pour la tranche d'âge 18-25 ans, étudiants qui sont « forcés » par le modèle à quitter le territoire à 25 ans, sous condition d'être célibataires ou en colocation. L'hypothèse sous-jacente est que les étudiants ayant créé un couple ou fondé une famille ne quitteront pas aussi systématiquement le territoire.

Une autre solution consisterait à paramétrer les deux informations selon l'âge et non par classe d'âges, afin de pouvoir être très précis sur les effectifs d'entrée et de sortie. Ne disposant pas de cette information pour le moment, ceci n'est pas envisageable.

Ce cas précis montre bien une autre faiblesse d'un modèle qui se veut généraliste. Certaines agglomérations font preuve de spécificités démographiques qu'une formalisation très générique ne peut fidèlement reproduire. Si les grandes tendances naturelles (natalité, nuptialité) peuvent être considérées comme générales et indépendantes de la zone d'étude considérée, il n'en reste pas moins des particularités locales, dont la modélisation nécessite une approche singulière. Le choix du modélisateur de Mobisim est alors de définir son seuil de tolérance quant à la précision des représentations des phénomènes dans ses simulations.

4.4.1.3 Étendue temporelle

L'étendue temporelle de 20 ans pour les tests de calibrage peut être critiquée. Pour certaines variables ou catégories de populations, les projections simulées sont correctes jusqu'à la 15ème année de simulation et deviennent ensuite plus approximatives, alors que pour d'autres variables, les valeurs commencent à être cohérentes avec les prévisions au bout de 15 ans de simulation. C'est surtout le cas de la structure par âge, dont l'agrégation par classes crée des « blocs » et donc des déséquilibres dans les résultats.

4.5 Perspectives pour le modèle et conclusion

Validation du modèle

Premièrement, les résultats de notre modèle, dont la formalisation est intégralement probabiliste, sont sujets à un potentiel de variation non négligeable à travers la réplication de simulations avec un même jeu de valeurs de paramètres. Quelques tests de stabilité ont été effectués, mais de manière anecdotique, et il serait bon de procéder à une analyse de stabilité plus complète, ne serait-ce que pour évaluer les intervalles dans lesquels les résultats de simulation évoluent.

Deuxièmement, le calibrage par essai-erreur nous a permis d'identifier l'impact de certaines modifications de valeurs de paramètres sur d'autres variables. Ces dernières sont toutes étroitement liées entre elles : les mises en couples et les séparations influencent la natalité, les migrations peuvent entraîner des changements dans la structure des ménages, les émancipations impactent les mises en couples, etc. Les variations des probabilités appliquées à des effectifs, comme les migrations, peuvent assez rapidement entraîner un emballement des évènements qu'elles cherchent à modéliser. Les connaissances que nous avons à l'heure actuelle sur la sensibilité du modèle sont trop succinctes et mériteraient d'être complétées par une analyse de sensibilité plus formelle. Celle-ci nous permettrait par ailleurs de mieux identifier les couloirs de variations possibles des valeurs de résultats simulés par le modèle, et de mesurer les interactions entre les variables. De plus, nous avons évoqué la teneur temporelle du comportement de certaines variables. Une analyse de sensibilité dans le temps permettrait d'analyser les trajectoires temporelles de chaque variable.

Les simulations de Mobisim se passent généralement sur 20 ans, d'où le choix de cette étendue temporelle pour le calcul des projections démographiques. Une manière de parachever le protocole serait de répéter chacun des calculs et tests de projections pour des laps de temps différents (10 ans, 30 ans, 50 ans etc). Ceci permettrait notamment d'identifier l'impact de cette étendue dans la précision qu'il est possible d'obtenir avec les valeurs de paramètres ; ce test participerait à l'analyse de sensibilité du modèle.

Le paramétrage mériterait également d'être complété et amélioré. Réalisé manuellement, par essai-erreur, il permet d'atteindre un objectif, sans aucune garantie sur son caractère optimal dans l'ensemble de l'espace de valeurs des paramètres (Evans et

Unsworth, 2012). Le jeu de paramètres finalement identifié n'est en aucun cas unique, ni optimal. Il est le meilleur possible compte tenu des moyens (techniques et données de référence) à disposition.

La démarche, si elle nous a permis d'arriver à nos fins, reste malgré tout dépendante de nos choix et de nos intuitions ; en cela, elle est incomplète et imprécise. La définition d'objectifs clairs et le fait que les probabilités dépendent uniquement de la configuration de la population, sans réutilisation de résultat intermédiaire, confèrent à notre modèle le profil idéal pour être soumis à un calibrage automatique, avec des algorithmes génétiques par exemple. L'outil Openmole, développé au laboratoire de géographie Géographie-Cités, paraît particulièrement adapté pour l'ensemble de ces procédures (stabilité, sensibilité et calibrage automatique) (Reuillon *et al.*, 2012 ; Schmitt *et al.*, à paraître).

La gourmandise de la donnée

La microsimulation des évènements démographiques nécessite l'utilisation d'un grand nombre de données désagrégées ou agrégées. Elles sont nécessaires non seulement en entrée, pour alimenter le modèle (calcul des valeurs de probabilités), mais également pour une orientation cohérente des résultats (définitions d'objectifs, données de cadrage). En formalisant une grande partie des évènements démographiques à partir des caractéristiques des individus, Mobisim-Démo renforce cette dépendance à la donnée, lorsque d'autres modèles font le choix d'utiliser des probabilités constantes (Geard *et al.*, 2013).

Le paramétrage de Mobisim-Démo se positionne dans un protocole à quatre jeux de données différents (Fig. 4.3) :

- les données pour définir les valeurs de paramètres. Ce sont des données désagrégées, qui permettent de quantifier les comportements démographiques individuels pour simuler les évènements démographiques. Elles peuvent également intervenir au moment de la construction du modèle puisque, comme nous l'avons vu, la formalisation de certains comportements démographiques a été conditionnée par la connaissance de la disponibilité des données ;
- les données de cadrage nécessaires à la définition des objectifs à atteindre : elles permettent d'orienter le calibrage des valeurs de paramètres et ainsi d'aboutir à un jeu de valeurs final. Dans notre cas, ce sont deux jeux de données différents :
  - les objectifs qualitatifs sont définis à partir de la connaissance sur les tendances démographiques actuelles ;

- les objectifs quantitatifs sont basés sur les projections démographiques que nous avons calculées.
- les données nécessaires à la création de ces données de cadrage, c'est-à-dire au calcul des projections, puisque nous ne disposions pas de données officielles.

Inutile de préciser que le dernier point est directement lié au fait que nous ne disposions d'aucune donnée de projection existante, comme cela aurait pu être le cas avec des données Omphale. Devenues récemment disponibles, il serait intéressant de pouvoir les utiliser pour y confronter nos estimations de projections. De plus, utiliser directement des données comme celles de Omphale pour cadrer le paramétrage du modèle nous permettrait d'avoir une base commune, officielle, pour l'application de Mobisim à d'autres terrains d'étude.

Une démarche de paramétrage aboutie

La nature des données (projection sur l'avenir) dont nous avons besoin condamne à une indispensable approximation de certaines valeurs utilisées pour les paramètres. Comme souvent en recherche, nous ne pouvons disposer exactement de toute l'information nécessaire, et pour pallier les lacunes, nous devons accepter ces approximations : les valeurs de paramètres ne bénéficient pas toutes du même niveau d'actualité ; les hypothèses sont basées sur des prolongements de tendances actuelles sans tenir compte de facteurs exogènes ; les objectifs quantitatifs sur lesquels le modèle a été calibré sont basés sur des projections élémentaires, par estimations simples d'effectifs basés sur une structure de la population. Ces approximations sont incontournables, et même plus, elles vont de paire avec la modélisation d'une part et surtout, avec l'objet du modèle : « faire une projection revient à faire des assertions sur l'avenir de la population étudiée » (van Imhoff et Post, 1998).

Ce qui compte en amont n'est pas la précision des valeurs utilisées mais le raisonnement sur lequel s'appuie le paramétrage du modèle : à partir de questions et de réponses simples (Fig. 4.3), nous parvenons à paramétrer un modèle de microsimulation dynamique selon une démarche clairement définie. La simulation des évolutions démographiques s'appuie sur trois éléments fondamentaux qui sont les comportements démographiques individuels, les tendances démographiques globales et les projections démographiques (Fig. 4.3). Ces trois éléments nous permettent de conduire un paramétrage complété d'un calibrage du modèle. De plus, par le test de ces différentes projections, nous avons pu tester ou plutôt attester de la capacité du modèle à simuler

des évolutions démographiques réalistes, à travers une évolution structurelle des types de ménages.

Le réalisme de nos résultats ne réside pas dans leur véracité (indéfinissable par nature : les données du futur n'existent pas) mais dans le réalisme des comportements simulés qui y conduisent.

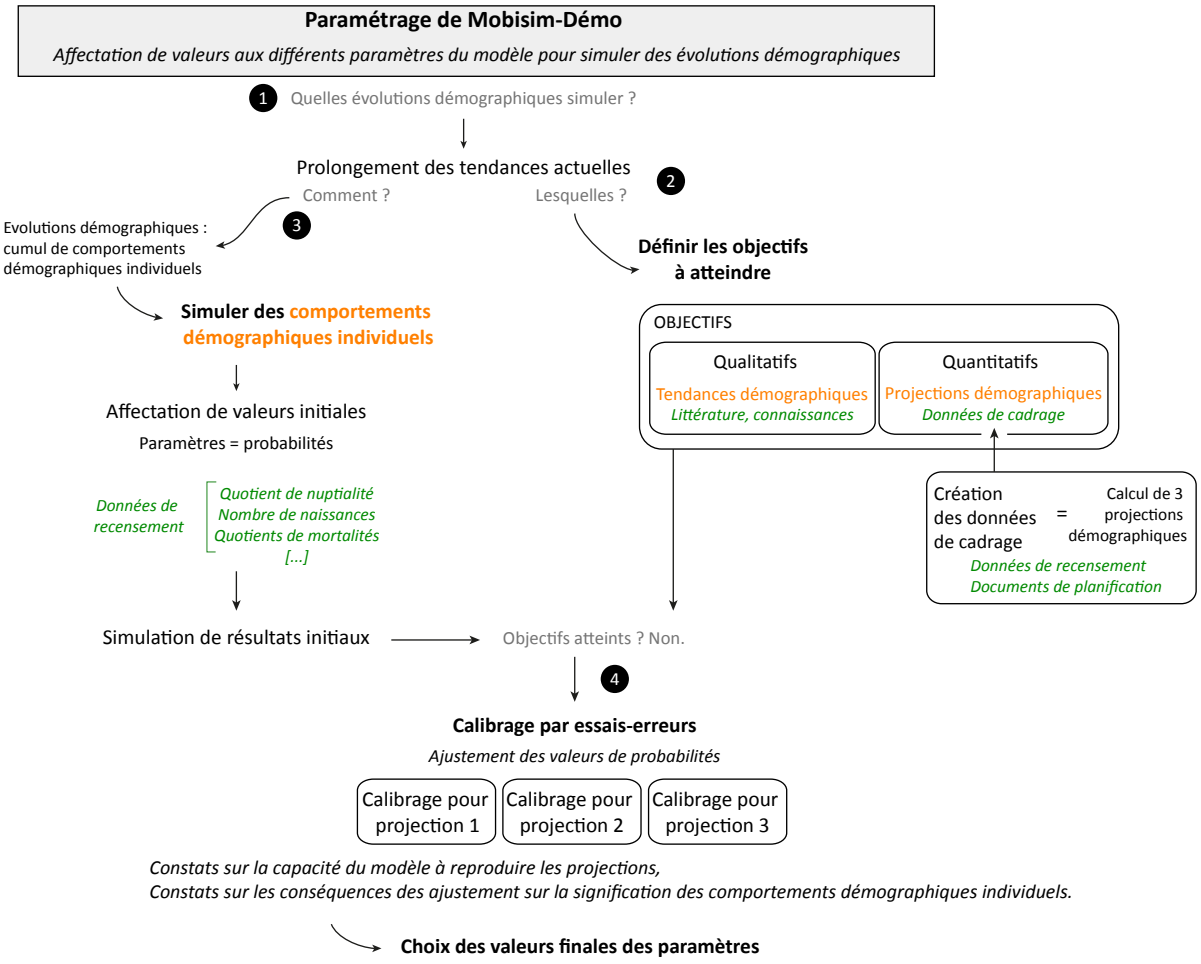


FIGURE 4.3 – La démarche de paramétrage du modèle Mobisim-Démo

L'interprétation des résultats doit néanmoins être précautionneuse, en fonction des choix qui ont été faits en amont de la modélisation, mais également de ceux qui ont jalonné notre protocole de paramétrage du modèle. Les résultats que nous défendons ici dépendent de quatre éléments : le choix de formalisation des évènement démographiques dans Mobisim, le protocole de paramétrage que nous avons mis en place, les données disponibles pour paramétrer et choisir le jeu de valeurs de paramètres, et enfin le terrain d'étude testé. A l'heure actuelle, il n'existe qu'une seule application du modèle démographique de Mobisim (Besançon), et en l'absence d'autres tests, il est impossible d'affirmer que la projection linéaire soit la plus appropriée sur une autre

agglomération compte tenu du comportement du modèle.

L'évaluation des points forts et des points faibles d'un modèle réside dans son objectif propre (van Imhoff et Post, 1998). Par sa capacité à simuler dynamiquement les cycles de vie des ménages, Mobisim-Démo remplit son rôle de générateur d'*inputs* pour les différents modèles de mobilités de Mobisim. Ces données démographiques permettront d'enrichir les analyses sur les questions de mobilités résidentielles notamment.

TABLEAU 4.16 – Valeurs initiales de paramètres - Mise en couple, primo-naissances et séparations

Âge	Mise en couple	
	(H)	(F)
18	0	0,010
19	0,004	0,013
20	0,003	0,021
21	0,011	0,028
22	0,017	0,040
23	0,029	0,051
24	0,044	0,061
25	0,054	0,075
26	0,063	0,085
27	0,072	0,094
28	0,079	0,094
29	0,082	0,089
30	0,090	0,096
31	0,084	0,081
32	0,083	0,077
33	0,075	0,073
34	0,069	0,067
35	0,066	0,065
36	0,061	0,055
37	0,055	0,053
38	0,058	0,047
39	0,051	0,044
40	0,055	0,041
41	0,043	0,038
42	0,043	0,036
43	0,037	0,034
44	0,041	0,035
45	0,036	0,038
46	0,034	0,025
47	0,038	0,026
48	0,030	0,020
49	0,029	0,019
50	0,032	0,017

Âge	Primo-naissance
15	0,012
16	0,022
17	0,060
18	0,050
19	0,064
20	0,070
21	0,077
22	0,078
23	0,095
24	0,115
25	0,141
26	0,160
27	0,183
28	0,206
29	0,216
30	0,207
31	0,207
32	0,196
33	0,171
34	0,156
35	0,141
36	0,129
37	0,129
38	0,098
39	0,072
40	0,055
41	0,044
42	0,028
43	0,013
44	0,010
45	0,021
46	0,002
47	0,002
48	0,006
49	0,004
50	0,002

Durée du couple	Séparation
1	0,0195
2	0,0435
3	0,0530
4	0,0667
5	0,0688
6	0,0596
7	0,0524
8	0,0476
9	0,0343
10	0,0312
11	0,0308
12	0,0284
13	0,0155
14	0,0143
15	0,0140
16	0,0132
17	0,0123
18	0,0121
19	0,0118
20	0,0055
21	0,0051
22	0,0049
23	0,0046
24	0,0042
25	0,0039
26	0,0037
27	0,0033
28	0,0029
29	0,0026
32	0,0039
37	0,0020
40	0,0015

TABLEAU 4.17 – Valeurs initiales de paramètres - Décès

Âge	Hommes	Femmes
<1	0,00356	0,00301
1	0,00066	0,00058
2	0,00029	0,00023
3	0,00019	0,00018
4	0,00017	0,00010
5	0,00011	0,00011
6	0,00013	0,00009
7	0,00007	0,00009
8	0,00009	0,00006
9	0,00006	0,00007
10	0,00008	0,00008
11	0,00010	0,00011
12	0,00010	0,00007
13	0,00010	0,00008
14	0,00015	0,00011
15	0,00019	0,00008
16	0,00027	0,00012
17	0,00037	0,00016
18	0,00049	0,00021
19	0,00061	0,00024
20	0,00069	0,00021
21	0,00074	0,00022
22	0,00084	0,00029
23	0,00088	0,00024
24	0,00086	0,00024
25	0,00088	0,00024
26	0,00084	0,00027
27	0,00095	0,00026
28	0,00086	0,00029
29	0,00090	0,00033
30	0,00090	0,00035
31	0,00087	0,00040
32	0,00093	0,00036
33	0,00088	0,00040
34	0,00098	0,00050
35	0,00109	0,00058
36	0,00127	0,00054
37	0,00140	0,00063
38	0,00146	0,00075
39	0,00151	0,00086
40	0,00165	0,00087
41	0,00192	0,00097
42	0,00213	0,00108
43	0,00226	0,00117
44	0,00261	0,00131
45	0,00275	0,00161
46	0,00293	0,00161
47	0,00367	0,00169
48	0,00386	0,00190
49	0,00452	0,00213
50	0,00488	0,00228
51	0,00554	0,00244
52	0,00592	0,00284
53	0,00634	0,00293
54	0,00687	0,00294
55	0,00709	0,00332
56	0,00808	0,00339
57	0,00812	0,00343
58	0,00902	0,00389
59	0,00941	0,00406
60	0,01070	0,00434
61	0,01220	0,00530
62	0,01348	0,00602
63	0,01178	0,00489
64	0,01383	0,00595
65	0,01510	0,00637
66	0,01543	0,00643
67	0,01486	0,00646
68	0,01630	0,00718
69	0,01855	0,00867
70	0,01979	0,00903
71	0,02144	0,01004
72	0,02459	0,01085
73	0,02600	0,01165
74	0,02972	0,01414
75	0,03231	0,01455
76	0,03686	0,01817
77	0,04000	0,02015
78	0,04700	0,02338
79	0,04958	0,02605
80	0,05785	0,02977
81	0,06407	0,03334
82	0,07321	0,04013
83	0,08267	0,04611
84	0,08865	0,05288
85	0,10192	0,06022
86	0,12317	0,07530
87	0,15969	0,09994
88	0,20567	0,13362
89	0,16408	0,10868
90	0,19495	0,13371
91	0,18627	0,12721
92	0,17783	0,12239
93	0,21678	0,15698
94	0,34031	0,24614
95	0,36903	0,25870
96	0,41694	0,30394
97	0,40433	0,32572
98	0,49485	0,38547
99	0,54754	0,41531
100	0,53247	0,54262

Tableau 4.18 – Valeurs initiales de paramètres - Naissances suivantes

Différence d'âge	Rang 2	Rang 3	Rang 4	Rang 5	Rang 6
0	0,020	0,016	0,016	0,022	0,015
1	0,067	0,035	0,026	0,032	0,089
2	0,222	0,079	0,064	0,089	0,107
3	0,323	0,116	0,061	0,082	0,120
4	0,304	0,097	0,046	0,064	0,075
5	0,247	0,075	0,043	0,041	0,094
6	0,200	0,056	0,035	0,032	0,055
7	0,155	0,048	0,024	0,025	0,050
8	0,113	0,035	0,027	0,022	0,026
9	0,097	0,024	0,018	0,015	
10	0,060	0,020	0,018	0,021	
11	0,037	0,016	0,008	0,008	
12	0,033	0,012	0,006	0,014	
13	0,028	0,006	0,008	0,014	
14	0,020	0,008			
15	0,022	0,003			
16	0,012	0,003			
17	0,007				
18	0,008				

Tableau 4.19 – Valeurs initiales de paramètres - Probabilités constantes

Paramètre	Valeur de probabilité
Emancipation en ménage	0,5
Emancipation en coloc.	0,2
Emancipation en H.M.	0,1
CSP Chômeur	0,1
CSP Inactif	0,1
Personnes âgées en H.M.	0,2

Tableau 4.20 – Valeurs finales (par défaut) de paramètres - Probabilités constantes

Paramètre	Valeur de probabilité
Emancipation en coloc.	0,35
Emancipation en H.M.	0
Personnes âgées en H.M.	0,03

TABLEAU 4.21 – Valeurs finales (par défaut) des paramètres - Mise en couple, primo-naissances et séparations

Âge	Mise en couple	
	(H)	(F)
18	0	0,041
19	0,017	0,053
20	0,012	0,085
21	0,044	0,113
22	0,067	0,160
23	0,115	0,203
24	0,177	0,245
25	0,214	0,299
26	0,251	0,342
27	0,288	0,375
28	0,316	0,375
29	0,328	0,354
30	0,360	0,383
31	0,337	0,323
32	0,331	0,307
33	0,298	0,293
34	0,277	0,269
35	0,263	0,261
36	0,246	0,221
37	0,221	0,214
38	0,232	0,189
39	0,205	0,175
40	0,218	0,164
41	0,171	0,153
42	0,172	0,145
43	0,147	0,138
44	0,163	0,138
45	0,143	0,151
46	0,134	0,099
47	0,151	0,106
48	0,122	0,081
49	0,118	0,078
50	0,129	0,070

Âge	Primo-naissance
15	0,009
16	0,018
17	0,048
18	0,040
19	0,051
20	0,056
21	0,061
22	0,062
23	0,076
24	0,092
25	0,113
26	0,128
27	0,147
28	0,165
29	0,173
30	0,166
31	0,166
32	0,157
33	0,136
34	0,124
35	0,113
36	0,103
37	0,103
38	0,079
39	0,058
40	0,044
41	0,035
42	0,022
43	0,011
44	0,008
45	0,017
46	0,002
47	0,002
48	0,005
49	0,003
50	0,001

Durée du couple	Séparation
1	0,035
2	0,078
3	0,095
4	0,120
5	0,124
6	0,107
7	0,094
8	0,086
9	0,062
10	0,056
11	0,055
12	0,051
13	0,028
14	0,026
15	0,025
16	0,024
17	0,022
18	0,022
19	0,021
20	0,010
21	0,009
22	0,009
23	0,008
24	0,008
25	0,007
26	0,007
27	0,006
28	0,005
29	0,005
32	0,007
37	0,004
40	0,003

Chapitre 5

Paramétrage du modèle des mobilités résidentielles

Le paramétrage de Mobisim-MR consiste en l'affectation de valeurs « initiales » à chacun des paramètres présenté dans le chapitre 3. Ces paramètres permettent de quantifier les comportements résidentiels des ménages, comportements qui impliquent des évaluations subjectives. La question sous-jacente au paramétrage de Mobisim-MR est donc de savoir comment quantifier ces évaluations subjectives. Ces dernières représentent un grand nombre de faits stylisés, et leur diversité nous confronte de nouvelles questions concernant la donnée.

La nature des paramètres est nettement plus diversifiée que pour Mobisim-Démo, et tous ne correspondent pas à des réalités explicitement identifiables ; certains paramètres sont des indicateurs synthétiques, qui nous permettent de représenter des phénomènes plus complexes. À partir de là, le paramétrage ne peut se faire aussi linéairement (c'est-à-dire directement de la donnée au paramètre) que pour les paramètres se référant explicitement à une donnée empirique : le paramétrage de ces variables appelle à des analyses complémentaires.

Ce chapitre présente tout d'abord les différents éléments de structuration du paramétrage - les objectifs à atteindre et les comportements résidentiels à simuler, ainsi que les différents paramètres et la donnée qui peut y être associée - avant de détailler le paramétrage de chacune des variables de Mobisim-MR.

5.1 Enjeux et définition du paramétrage de Mobisim-MR

5.1.1 Objectif : simuler les tendances actuelles...

Comme c'était le cas pour le modèle démographique dans le chapitre précédent, le paramétrage de Mobisim-MR nécessite la définition d'objectifs à atteindre. Ces objectifs permettent d'orienter ensuite le choix des données à utiliser et la manière dont les valeurs sont affectées aux différents paramètres.

L'objectif général de Mobisim-MR est de simuler les mobilités résidentielles à l'intérieur d'une agglomération. Dans le contexte d'un scénario de prolongement des tendances actuelles, cela signifie être capable de reproduire globalement des comportements de mobilité tels qu'ils sont observés à l'heure actuelle sur une zone d'étude. Ces *patterns* peuvent être observés à plusieurs niveaux. Par exemple, on constate aujourd'hui sur la communauté d'agglomération du Grand Besançon que certains ménages avec enfant(s) ont tendance à aller habiter dans les communes périurbaines, là où il leur est possible d'accéder à une maison individuelle avec un jardin. Alors que dans certaines grandes villes, l'étalement urbain trouve ses limites dans les distances domicile-travail à parcourir devenues trop grandes, Besançon, ville moyenne, subit encore la perte de ses habitants au profit des communes alentour. Le solde migratoire de l'agglomération est le premier facteur de croissance des autres communes (source : SCoT 2011 et PLH 2005). Au sein de la ville, les quartiers connaissent également des migrations particulières selon le type de quartiers (fort habitat social, location, appartements ou maisons, proximité aux espaces verts ou non, quartiers du centre-ville versus quartiers plus résidentiels, etc), et leur attractivité est parfois très spécifique à un type de ménage.

Parmi les tendances actuelles, nous définissons deux objectifs principaux à atteindre à travers le paramétrage.

Le premier objectif des simulations avec Mobisim-MR est quantitatif, et consiste à simuler un taux annuel de migration des ménages [1] équivalent à celui de la zone d'étude sur lequel le modèle est appliqué. Dans le cas de ce paramétrage sur l'agglomération bisontine, il est de 13,7%.

1. Sont compris dans le calcul de ce taux tous les changements de logement, quelque soit le lieu de départ et d'arrivée dans l'agglomération concernée.

La modélisation implique nécessairement une simplification, et cette simplification peut entraîner une certaine homogénéisation des comportements entre les différents ménages. Deux ménages aux caractéristiques identiques ne vont pas prendre les mêmes décisions dans des situations similaires. Notre second objectif est donc de réussir à diversifier au maximum les comportements des ménages. Une des clés pour simuler l'hétérogénéité entre les comportements résidentiels des ménages est de rechercher cette hétérogénéité dans chaque étape de la décision. En effet, en implémentant de l'hétérogénéité dans chaque résultat intermédiaire simulé par le modèle, on peut supposer que globalement, les comportements résidentiels des ménages seront diversifiés. Cet objectif est donc plutôt un objectif méthodologique, qui constituera un fil rouge dans la manière d'aborder le paramétrage des différentes variables. Il n'est pas un objectif vérifiable *via* un résultat agrégé, mais une ligne conductrice à appliquer à chaque fois que cela est possible, ou à vérifier pour chaque paramètre.

5.1.2 ... à partir des comportements résidentiels des individus.

Les mobilités résidentielles observées sur une agglomération sont le résultat de l'ensemble des comportements résidentiels individuels, qui résultent eux-mêmes des les décisions résidentielles de chacun des ménages de cette agglomération. Ce sont donc ces comportements, et les différents éléments qui interviennent dans la décision, qu'il faut quantifier dans le paramétrage, pour atteindre les deux objectifs définis précédemment.

Chaque paramètre représente une étape de la décision des ménages. Les **évaluations résidentielles** correspondent aux ressentis que vont avoir les ménages vis-à-vis de leur localisation résidentielle (un logement dans un environnement résidentiel) : « avec une famille de 3 enfants, quelle est mon appréciation d'un petit logement ? » « Le prix du logement influence-t-il ma satisfaction résidentielle ? » « Ai-je envie d'être propriétaire ? »

La **mobilité individuelle** traduit la propension intrinsèque plus ou moins grande face à l'éventualité d'un déménagement : « ma satisfaction n'est pas très élevée mais elle n'est pas si mauvaise que ça, et comme je suis âgé, un déménagement n'est peut être pas nécessaire ». Ou inversement : « oui, on se sent bien ici, mais nous pourrions très bien déménager au moindre désagrément ».

L'**intérêt global à déménager** enfin, permet au ménage d'évaluer si d'après lui, déménager dans un des logements qu'il a visité peut lui être profitable, compte tenu de l'offre totale de l'agglomération. On peut également traduire cette idée par : « ne vaudrait-il pas mieux attendre encore un peu, auquel cas des logements plus intéres-

sants (attractifs) pourraient se libérer et me permettre d'optimiser encore plus mon déménagement que si je le faisais maintenant ? ».

Chacune de ces questions participe à la décision résidentielle finale du ménage. Chacune des réponses à ces questions traduit un comportement résidentiel, différent selon les types de ménages, et selon les situations auxquelles ils sont confrontés. Ce sont ces réponses que nous devons quantifier dans Mobisim-MR, chacune étant représentée par une valeur d'un paramètre. Pour les quantifier, nous avons besoin de définir des hypothèses sur la relation du ménage à une variable ou aux paramètres qui la définissent. Ces hypothèses nous permettent également d'orienter l'utilisation de la donnée source lorsqu'elle existe.

5.1.3 Spécificités des paramètres

Notre modèle se base sur la formalisation de faits stylisés qui, dans le cas des mobilités résidentielles, sont nombreux. En découlent un certain nombre de variables et de paramètres. La partie supérieure du tableau 5.1 recense les variables qui permettent le calcul des évaluations résidentielles (satisfaction et intérêt). Les paramètres qui y sont liés peuvent être considérés comme factuels. On dispose d'une information relativement précise pour ces paramètres, ce qui nous conduit à considérer ce paramétrage comme étant plutôt « direct » : fixer ces valeurs ne nécessite pas de calibrage ou d'analyse exploratoire.

Les paramètres de la partie inférieure du tableau présentent les variables de la dynamique du modèle. Nous ne disposons pas d'information précise quant aux ordres de grandeur des valeurs que peuvent prendre ces paramètres. La mobilité individuelle et l'intérêt global à migrer sont des facteurs de mobilité, qui synthétisent différents éléments de la décision résidentielle. Ces variables ne renvoient à aucune données précisément, et c'est la première raison pour laquelle il est difficile de leur attribuer une valeur. La seconde raison est que leur dépendance à des résultats intermédiaires de simulation, dont on ne connaît pas à l'avance les valeurs. Le paramétrage de ces variables est donc indirect, puisqu'il nécessite des analyses exploratoires de résultats intermédiaires de simulation, ainsi qu'un calibrage pour affiner la précision de la valeur à affecter au paramètre.

Quant au nombre de logements visités, il est possible de le définir thématiquement, à partir de la littérature. Cependant, ce paramètre participe aux résultats intermédiaires évoqués précédemment, et l'impact de sa valeur doit être évalué sur les résultats du modèle afin d'attester de la pertinence du choix de cette dernière.

TABLEAU 5.1 – Paramètres et données de Mobisim-MR

Variables	Paramètre	Données	Paramétrage	Calibrage
Appréciations	Appréciations du logement	Faits stylisés	Évaluations subjectives tirées de la littérature	Aucun
	Appréciations de l'environnement résidentiel local	Faits stylisés	Évaluations subjectives tirées de la littérature	Aucun
	Appréciations de l'environnement résidentiel global	Données simulées dans Mobisim (MQ)	Étude de la distribution des accessibilités généralisées simulées	Aucun
Importances	Importance des attributs du logement et de l'environnement résidentiel	Faits stylisés	Comparaisons par paires	Aucun
Mobilité individuelle	α et β	MIGCOM (2008)	Ordre de grandeur inconnu	Analyses exploratoires
Intérêt global à déménager	Attractivité connue v_J	Ordre de grandeur inconnu		Analyses exploratoires
	Appréciation de $v_J : A_H(v_J)$	Ordre de grandeur inconnu		Analyses exploratoires
Nombre de logements visités n_J		Faits stylisés	Évaluations subjectives tirées de la littérature	Analyses exploratoires

5.1.4 Une démarche de paramétrage itérative

Pour résumer, une majeure partie des valeurs à affecter aux paramètres sont comprises dans des ordres de grandeur que nous connaissons, ce qui veut dire que nous n'avons pas besoin de procéder à un calibrage pour le paramétrage des variables concernées. Nous savons en revanche que les valeurs de α, β (cf. section 3.2.5) et $A_H(v_J)$ ne correspondent à aucune donnée, et que la valeur de n_J, bien que pouvant être déduite de la littérature, mérite d'être évaluée selon son impact sur les résultats de simulation. Le paramétrage de ces variables ne peut se contenter d'une transformation de donnée en valeurs ; il nécessite potentiellement d'être complété, après exploration des résultats de simulation, par un calibrage.

Dans le cas de modèles individu-centrés, le calibrage automatique est souvent préconisé (Ngo et See, 2012), avec notamment l'utilisation d'algorithmes génétiques (Rogers et von Tessin, 2004 ; Heppenstall *et al.*, 2007 ; Reuillon *et al.*, 2012 ; Schmitt *et al.*, à paraître). La force du calibrage automatique est de pouvoir tester une multitude de valeurs de paramètres, simultanément, permettant ainsi de mieux rendre compte de l'impact de toutes les interactions entre les valeurs de variables sur le résultat. Ces tests sont conduits pour atteindre un objectif ou des fonctions d'objectif définies en amont. La démarche est donc linéaire : tester des valeurs et des combinaisons de valeurs de paramètres en entrée pour produire un ou des résultats le(s) plus proche(s) possible(s) de cet objectif.

Mobisim-MR génère un grand nombre de résultats intermédiaires, impliqués dans la simulation des résultats finaux (nouvelles localisation résidentielles des ménages, taux annuel de migration, satisfaction résidentielle). L'intérêt global à migrer, par exemple, dépend de l'offre locale en logement dans l'agglomération en question. Or ce contexte est simulé : c'est un résultat intermédiaire qui émerge des simulations, et nous n'avons aucune connaissance *a priori* des valeurs ou de la structure de ce contexte local. Il résulte d'autres modèles (développement résidentiel), de la structure de la population et des comportements simulés au cours des itérations précédentes. Chacun de ces résultats intermédiaire a une signification thématique, qui renvoie à une réalité. Ainsi, au-delà d'atteindre des objectifs de simulation pour valider le paramétrage du modèle, nous devons nous assurer qu'ils sont simulés de manière cohérente, à travers la cohérence des résultats intermédiaires. L'exploration de chacun de ces résultats nécessite des analyses spécifiques, qui ne peuvent être automatisé ; l'évaluation de leur cohérence nécessite également un jugement humain, ce qui n'est pas compatible avec un calibrage

systématique. Cette solution n'est donc pas envisageable dans le cas de Mobisim-MR.

Cette particularité nous a conduit à organiser le paramétrage de Mobisim-MR de manière itérative, en considérant tout d'abord les paramètres pour lesquels nous disposons d'information permettant l'attribution de valeurs (les évaluations résidentielles), et d'assigner des valeurs dites « initiales » aux autres paramètres.

5.2 Paramétrage des évaluations résidentielles : quantification floue d'évaluations subjectives

Appréciations et importances participent aux calculs des évaluations résidentielles, que ce soit pour le lieu de vie actuel (dans le calcul de la satisfaction), ou pour le lieu de vie potentiel (dans le calcul de l'intérêt du logement pour le ménage). Elles permettent de traduire des préférences ou des aversions (ex. une famille nombreuses ne sera pas à l'aise dans un studio, pas plus qu'un ménage aux revenus faibles ne se satisfera de payer un loyer élevé).

Le point commun entre les paramétrages de ces différentes composantes (appréciations du logement, de l'environnement résidentiel et de leurs importances) est la nécessité de quantifier des ressentis ou des préférences des ménages, à travers une évaluation subjective des informations dont on dispose. La nature des données disponibles diffère selon les paramètres considérés, et chaque paramétrage est spécifique à chaque paramètre. Pour faciliter la lecture, nous nommerons désormais « appréciations » les appréciations du lieu de vie actuel, et « préférences » les appréciations des lieux de vie potentiels.

5.2.1 Appréciations et préférences du logement et de l'environnement résidentiel local

5.2.1.1 Le logement D : quantifier des variables discrètes

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, les informations permettant de calculer les appréciations du logement ne sont pas disponibles à l'échelle des types de ménages (appréciation d'un logement pour un ménage), c'est pourquoi leur formalisation s'effectue de manière désagrégée : appréciation d'un attribut du logement pour une caractéristique du ménage (Ref. figure chap. 3 - 3.4). Cette désagrégation entraine un besoin conséquent en données, puisqu'il s'agit d'affecter une valeur à chaque relation entre un attribut du logement et une caractéristique du ménage.

Ces appréciations traduisent des faits stylisés. Les données se rapportant à ces faits stylisés proviennent de résultats d'enquêtes ; les résultats sont d'autant plus fiables que le nombre d'enquêtés est important, ce qui rend coûteuses ces enquêtes coûteuses. Pour le paramétrage, nous avons pris le parti de ne pas faire d'enquête, mais de procéder à des assignations de valeurs d'évaluations subjectives à partir d'une analyse de la littérature existante dans le domaine de recherche. Ces valeurs ne sont donc pas issues directement de résultats d'enquêtes spécifiques à notre modèle, mais s'inspirent de données statistiques (ou d'enquêtes) réalisées dans d'autres contextes.

Les données bibliographiques utilisées peuvent concerner des zones géographiques et des échelles variées. Nous avons cependant veillé, autant que possible, à minimiser les différences de culture potentielles en ciblant des sources françaises ou européennes.

La démarche adoptée est la suivante : à partir d'un important corpus d'articles, nous avons synthétisé les occurrences de chaque caractéristique des ménages selon sa relation avec chaque attribut du logement, pour ensuite attribuer subjectivement des valeurs à chacune des appréciations. Nous avons choisi de ne conserver que les correspondances entre caractéristiques du ménage et attributs du logement les plus pertinentes, d'après la littérature. Les valeurs assignées à chaque lien « caractéristique du ménage - attribut logement » sont différentes pour les appréciations du logement actuel (calcul de la satisfaction) et pour les appréciations des logements potentiels (calcul d'un intérêt).

Ce paramétrage est valable pour toutes les zones d'étude sur lesquelles le modèle sera appliqué puisqu'elles sont issues d'informations générales. Des mises à jour sont possibles par une veille bibliographique, ou la publication de nouvelles enquêtes par exemple.

Exemples d'informations disponibles dans les sources bibliographiques :

« Jeune, vivant seul, on habite plus souvent en appartement (47% des 18-24 ans vivent en immeuble, tout comme 60% des personnes seules) » (Bigot et Hoibian, 2009)

« La moitié des ménages retraités dispose d'au moins quatre pièces, alors que ce n'est le cas que de trois ménages sur dix dans l'ensemble de la population. En outre, les personnes âgées vivent plus fréquemment en maison individuelle (67%) que l'ensemble de la population (57%)» (ENA, 2005)

« [...] on constate que les couples sans enfant habitent des appartements quasiment aussi spacieux que les familles avec enfants : 4,2 pièces pour les premiers, contre 4,6 pièces pour les seconds. Cette proximité tient pour partie au fait que la moitié des couples sans enfant est âgée, et a souvent conservé le logement qui hébergeait auparavant sa famille » (Bigot et Hoibian, 2009)

"*[...] first-time buyers are concentrated in the 25-45 year age cohorts [...]*" (Clark *et al.*, 1994)

"*Resources being equal, couples are considerably more likely to become homeowners than people living without a partner*" (Clark et Mulder, 2000), à propos de l'installation des jeunes adultes

"*singles and single-parent households [...] who are renters, are quite unlikely to initiate a move to ownership*" (Clark *et al.*, 1994).

« La mise en couple et l'arrivée des enfants nécessitent un logement plus spacieux » (Bigot, 2010).

« [...] les familles dont les deux membres du couple sont actifs — appartenant plutôt aux classes moyennes supérieures — et ayant des enfants ont plutôt quitté le parc locatif privé : ils représentaient 31% des effectifs en 1984, contre 19% en 2006 » (Bigot, 2010), à propos d'une étude sur la région Île de France.

« Les familles monoparentales, plus démunies [...], consentent à des efforts en termes d'espace : elles se logent dans des habitations plus petites que les couples sans enfant (3,8 pièces, contre 4,2 en valeur absolue). » (Bigot et Hoibian, 2009)

« Les catégories favorisées (9e et 10e déciles) vivent aujourd'hui dans des habitations 1,36 fois plus grandes que les personnes en bas de l'échelle des revenus (1er et 2e décile) » (Bigot et Hoibian, 2009)

« Le pouvoir financier se transforme en pouvoir de l'espace occupé » (Thomas *et al.*, 2011) - étude sur l'agglomération franco-genévoise.

"[...] low-income households are not capable of realizing their preference" (Zondag et Pieters, 2005)

[Les ménages de moins de 30 ans] « cherchent à se localiser dans des zones qui offrent une bonne accessibilité au centre [...] où la desserte en transports collectif est également meilleure et le statut de locataire prédominant » (Homocianu, 2009) - informations extrapolées de recensements INSEE (1999).

[les ménages aux revenus élevés] « leur situation économique (revenus) leur permet de se procurer un logement ayant une superficie plus grande (de préférence, une maison individuelle) » (Homocianu, 2009).

« Le désir d'accession à la propriété constitue une motivation déterminante pour les familles monoparentales, les couples sans enfant et surtout les personnes seules à faibles revenus. Inversement, le désir d'agrandir ou d'améliorer son logement croît à mesure que le revenu augmente. » (Kestens *et al.*, 2008), à partir d'une enquête réalisée au Québec sur les ménages récemment propriétaires (1993 à 2001).

"*Low-income households are forced to stay in the locative park*" (Tannier et Vidberg, 1999)

"*[...] combining age and household situation might be a better predictor for the probability of becoming a homeowner than household situation alone.*" (Feijten *et al.*, 2003)

(ENA, 2005) : 3/4 des personnes âgées sont propriétaires - 1/4 des personnes âgées vit en zone rurale (où 85% sont propriétaires) - Ceux qui déménagent entre 60 et 75 ans : 50% achètent sans dettes, 50 % va en locatif

(Dodier, 2004) : Hauts revenus cherchent à rester entre eux ; pas de localisation particulière mais des quartiers précis.

TABLEAU 5.2 – Appréciations des attributs du logement actuel I (en colonne) pour chaque caractéristique du ménage (en lignes)

		Taille du logement			Coût du loyer			Statut		Type d'habitat	
		Petit 1 à 2 pièces	Moyen 3 à 4 pièces	Grand 5 pièces et plus	Faible	Moyen	Elevé	Prop.	Locat.	Maison	Appart.
Age	Moins de 30							1	0,9		
	30 à 44							1	0,4		
	45 à 59							1	0,3		
	Plus de 60							1	0,4		
Statut	Célibataire										
	Couple										
	Famille									1	0,3
	Famille monoparentale									0,8	0,7
Revenu	Faible				1	0,2	0,05	1	0,7		
	Moyen				0,8	0,7	0,05	1	0,5		
	Elevé	0,05	0,5	1	0,05	0,8	0,8	1	0,6		
Enfants	Aucun	0,6	0,8	0,5							
	1 ou 2	0,1	0,8	0,9							
	3 ou plus	0,05	0,5	1							

TABLEAU 5.3 – Appréciations des attributs de chaque logement potentiel J (en colonne) pour chaque caractéristique du ménage (en lignes)

		Taille du logement			Coût du loyer			Statut		Type d'habitat	
		Petit 1 à 2 pièces	Moyen 3 à 4 pièces	Grand 5 pièces et plus	Faible	Moyen	Elevé	Prop.	Locat.	Maison	Appart.
Age	Moins de 30							0,2	0,9		
	30 à 44							0,7	0,4		
	45 à 59							0,9	0,4		
	Plus de 60										
Statut	Célibataire									0.2	0.8
	Couple										
	Famille									0,7	0,3
	Famille monoparentale									0,3	0,7
Revenu	Faible				1	0,2	0,05	0,05	0,95		
	Moyen				0,8	0,7	0,05	0,8	0,7		
	Elevé	0,05	0,5	1	0,05	0,8	0,8	1	0,3		
Enfants	Aucun	0,6	0,8	0,5							
	1 ou 2	0,1	0,8	0,9							
	3 ou plus	0,05	0,5	1							

Les valeurs données aux appréciations des attributs sont comprises entre 0 et 1, valeurs qui représentent respectivement une très faible appréciation et une appréciation très élevée. Les cellules vides du tableau correspondent aux relations qui nous parais-

saient négligeables dans la décision résidentielle, au regard des informations disponibles dans la littérature (Tabl. 5.2). Les valeurs affectées aux préférences des attributs du logement potentiel sont différentes de celles données aux appréciations (Tabl. 5.3).

5.2.1.2 L'environnement résidentiel local : quantifier des variables continues

Les appréciations des attributs de l'environnement résidentiel local sont définies par des fonctions d'évaluation (cf. chapitre 3 - section 3.2.2), selon des distances à ces aménités, ou selon la quantité de ces aménités dans un rayon défini. Chaque paramètre est une variable floue continue (Fig. 5.1). Les valeurs d'appréciation sont comprises entre 0 et 1, selon l'état de la caractéristique considérée. À la différence des attributs du logement, elles sont identiques pour tous les ménages et pour les deux aspects de l'évaluation résidentielle (satisfaction et intérêt), à deux exceptions près [2]. Leur choix et leur paramétrage ont été réalisés de la même manière pour les appréciations du logement, par évaluations subjectives à partir d'une analyse de la littérature existante.

Une distance seuil de 400 m pour évaluer l'**accessibilité aux commerces et services fréquentés quotidiennement** (Fig. 5.1 - 1) correspond au seuil souvent identifié dans la littérature, notamment dans les travaux de (Handy *et al.*, 2005; Jago *et al.*, 2005; Föbker et Grotz, 2006; Cao *et al.*, 2009; Forsyth *et al.*, 2008; Kweon *et al.*, 2010; Hoshino, 2011). Pour les commerces et services de fréquentation hebdomadaire (Fig. 5.1 - 2), le seuil de 2 km découle de connaissances empiriques d'experts (acteurs territoriaux principalement), qui considèrent que 2 km est la distance maximum acceptable à parcourir en vélo. Les distances sont calculées à vol d'oiseau. Le nombre de commerces et services pour définir l'appréciation a été fixé empiriquement, à partir d'une moyenne observée dans le voisinage des logements considérés [3].

Les **stations de transport en commun** sont comptées en nombre d'arrêts par ligne. Les arrêts des lignes allant dans un sens ou dans l'autre sont différenciés. Par exemple, à Besançon, l'arrêt de bus « République » compte deux stations, l'une en face de l'autre, correspondant chacune à un sens de circulation. En 2010, 10 lignes de bus passent à cet endroit dans chaque sens de circulation, ce qui équivaut dans Mobisim-

2. Rappel du chapitre 3 : l'appréciation de la distance à la bordure urbanisée varie selon le mode de transport dominant pour le ménage, et l'appréciation de la part des ménages à hauts revenus dans le voisinage diffère entre les ménages modestes et les ménages plus aisés. Elle n'influence pas les choix résidentiels des ménages aux revenus moyens.

3. Travaux menés dans le cadre de la thèse de Maxime Frémond « Pour une approche normative de la croissance résidentielle, une application par la modélisation spatiale au Luxembourg ».

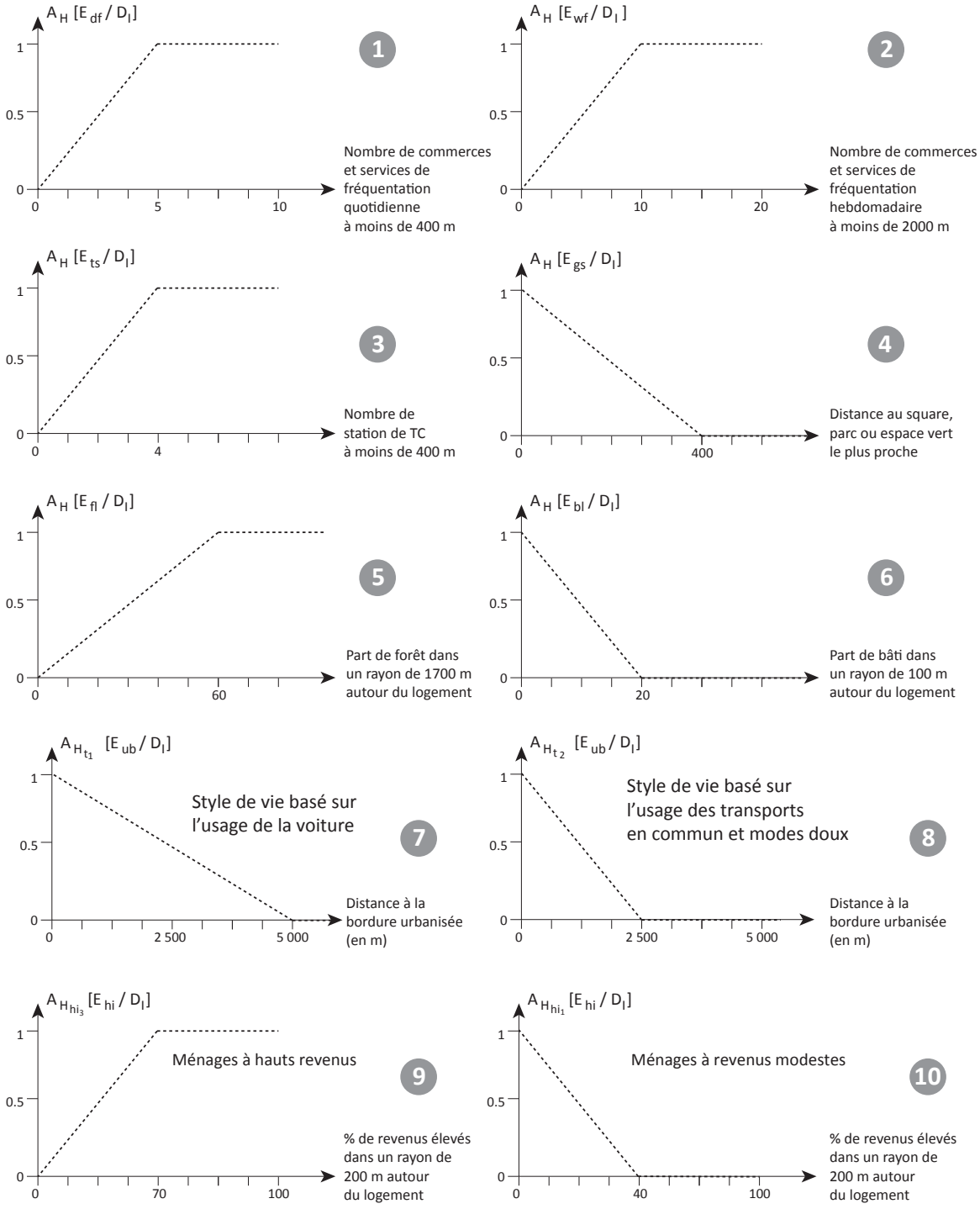


FIGURE 5.1 – Valeurs d'appréciations des attributs de l'environnement résidentiel local

MR à 20 stations. La variable continue a été définie selon cette donnée, et on considère que l'appréciation est maximale à partir de quatre arrêts de transport en commun dans un périmètre de 400 m (Fig. 5.1 - 3) ; ceci correspond en général à deux lignes de transport en commun.

Sont définis comme **espaces verts, parcs ou squares**, les espaces verts dont la surface est supérieure à 2500 m^2 [4]. La donnée d'entrée pour Mobisim-MR est un *shapefile* créé à partir de la couche « Végétation » de la BD Topo de l'IGN. On ne retient que les espaces verts internes aux différentes taches urbaines (pour la ville-centre, la tache urbaine correspond à l'agglomération morphologique). Plus le logement est proche de l'espace vert, plus l'appréciation du ménage est élevée, et au-delà de 400 m, son appréciation est nulle (Fig. 5.1 - 4).

Les valeurs des paramètres 5 et 6 (**part de forêt et part de bâti dans un certain voisinage**) sont issues d'une enquête menée sur un secteur périurbain de l'agglomération de Besançon (Youssoufi, 2011; Youssoufi et Foltête, 2013) : environ 1000 ménages ont été interrogés sur leur degré de satisfaction vis-à-vis du paysage, et les résultats de l'enquête révèlent :

- l'influence positive de la forêt dans un rayon de 1700 m du logement : l'appréciation du ménage augmente à mesure que la part de la forêt augmente, jusqu'à une valeur seuil de 60% dans l'occupation du sol (Fig. 5.1 - 5). Au-delà de 60%, l'appréciation est maximale ;
- l'influence négative du bâti, à une distance de 100 m du logement (Fig. 5.1 - 6). L'appréciation diminue à mesure que la part du bâti augmente dans le paysage : lorsque la part du bâti est d'au moins 20%, l'appréciation est nulle.

La **bordure urbanisée** est définie à partir d'une méthode développée par Tannier et al. (2011). Pour l'agglomération bisontine, on identifie la distance de 276 m entre les bâtiments comme seuil pour définir une continuité morphologique du bâti : cela veut dire que tous les bâtiments éloignés de moins de 276 m sont considérés comme faisant partie d'une même enveloppe bâtie. La distance entre le logement du ménage et cette bordure urbanisée définit l'appréciation (Fig. 5.1 - 7 et 8). La valeur de ce paramètre est différente pour les ménages préférant utiliser leur voiture et pour les ménages préférant les transports en commun ou d'autres modes de transport.

La **part des ménages à revenus élevés** dans l'environnement résidentiel permet de représenter la volonté de se rapprocher de ses pairs (capitalisation de l'entre-soi (Filippi *et al.*, 2007)). Dans Mobisim-MR, l'effet « pair » est différencié en fonction de la classe sociale d'appartenance. Nous avons choisi de considérer uniquement l'effet de la présence de ménages aisés dans le voisinage, défini comme une zone-tampon de 400 m de diamètre autour du logement : une part élevée de ménages aisés dans le voisinage

4. Cette restriction permet d'éliminer les jardins privés.

est un facteur attractif pour les ménages aisés et répulsif pour les ménages modestes (Fig. 5.1 - 9 et 10).

5.2.1.3 Appréciations de l'environnement résidentiel global

Les appréciations de l'environnement résidentiel global concernent les accessibilités au centre-ville et aux zones d'emplois. Tout comme pour l'environnement résidentiel local, ces variables sont également des variables floues continues, mais leurs valeurs sont définies à l'aide de données simulées par Mobisim, et non à partir de la littérature. En effet, pour identifier nos valeurs d'appréciation, nous utilisons directement des résultats de simulation du module des mobilités quotidiennes à savoir les distributions de fréquence de coûts d'accès au centre-ville et d'accessibilités généralisées aux zones d'emplois en début de période de simulation (Fig. 5.2).

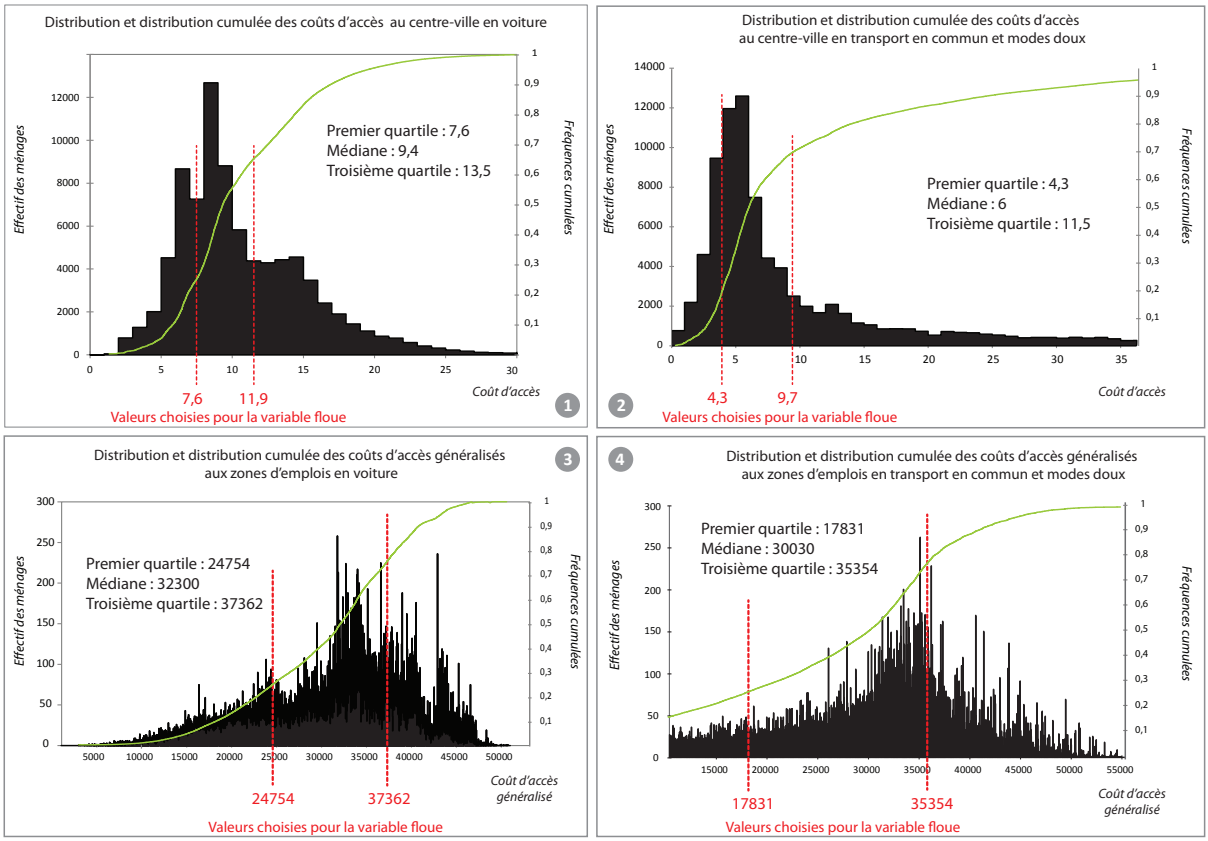


FIGURE 5.2 – Valeurs seuil d'appréciations des attributs de l'environnement résidentiel global

Nous avons attribué les variations d'appréciation aux partie la plus importante de la distribution de fréquence, ce qui correspond à la pente forte des courbes de fréquences cumulées. Les quatre distributions montrent un premier seuil au niveau du premier quartile (Fig. 5.2). Pour les accessibilités au centre-ville, nous avons choisi en

deuxième seuil une valeur intermédiaire entre la médiane et le troisième quartile (11,9 pour l'accessibilité en voiture et 9,7 pour les transports en commun et modes doux - respectivement 1 et 2 sur la figure). Concernant l'accessibilité aux zones d'emploi, le troisième quartile a servi de seuil pour répondre aux objectifs fixés (respectivement 37362 et 35354, en 3 et 4 sur la figure).

Ces valeurs nous ont servi de repères pour la définition des variables floues d'appréciation de l'environnement résidentiel global. Pour l'accessibilité au centre-ville, le coût augmente avec la distance, quel que soit le mode de transport. Plus celui-ci augmente et moins le ménage est satisfait. Ainsi, jusqu'à la première valeur (premier quartile) l'appréciation du ménage est maximale, puis elle diminue jusqu'à la seconde valeur (Fig. 5.3 – 1 et 2).

L'accessibilité aux zones d'emplois étant calculée à l'aide d'un modèle gravitaire (masse d'emplois par rapport à la distance), l'appréciation augmente avec la mesure. Le premier seuil correspond à la valeur à partir de laquelle l'appréciation du ménage augmente, et au-delà de la seconde l'appréciation est maximale (Fig. 5.3 - 3 et 4).

Le calibrage de ces variables est propre au terrain d'étude, ces valeurs ne sont donc valables que pour l'agglomération du Grand Besançon, zone sur laquelle nous avons testé le modèle.

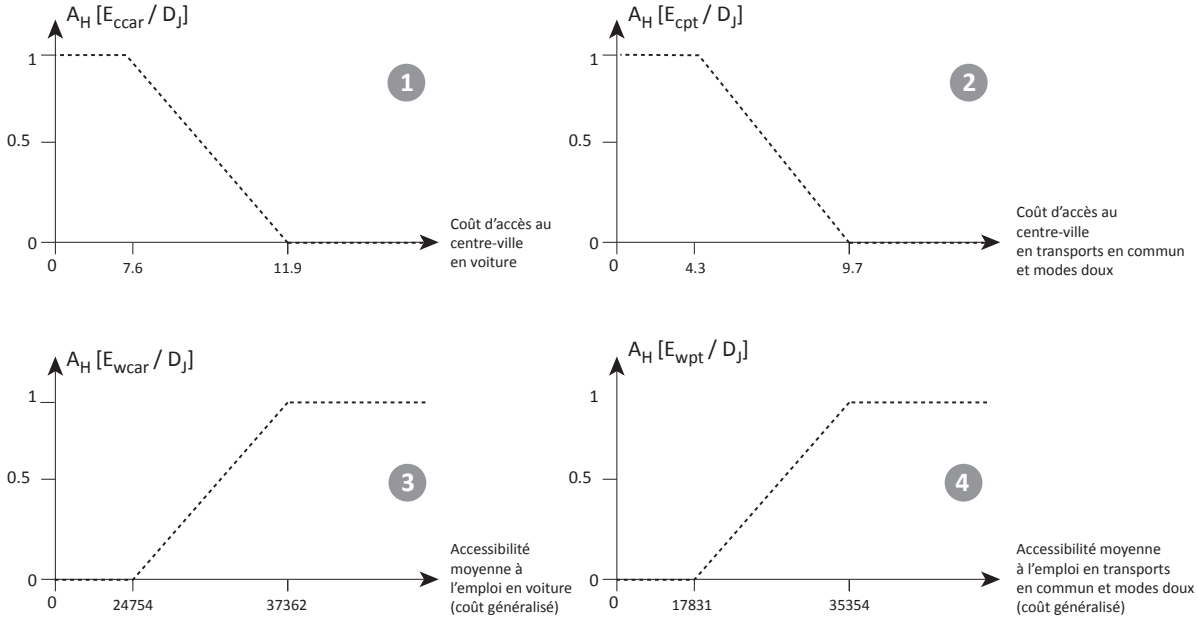


FIGURE 5.3 – Valeurs d'appréciations des attributs de l'environnement résidentiel global

5.2.2 Quantification des importances

Les informations disponibles dans la littérature concernent principalement les facteurs de choix ou de satisfaction, mais plus rarement sur le poids de chacun dans l'évaluation des variables. La définition absolue des importances de chacun des attributs s'avère donc délicate. Néanmoins, il est possible de contourner cette difficulté en définissant les importances des attributs de façon relative les unes par rapport aux autres.

La comparaison par paires de Yager et Saaty

Saaty (1977 ; 1990) et Yager (1977) présentent, avec la méthode des comparaisons par paires, un moyen de traduire quantitativement des classements qualitatifs de manière relative. Avec leur méthode, chaque attribut est comparé à un autre, *via* une échelle de niveaux d'importance, niveaux auxquels Yager (1977) et Saaty (1990) attribuent des valeurs numériques (Tabl. 5.4), selon une échelle de neuf valeurs (cinq valeurs principales et quatre valeurs intermédiaires). La comparaison par paires permet alors de construire une matrice de comparaisons, et c'est par le calcul de son vecteur propre normalisé de cette matrice que sont déterminées les valeurs de poids absolu de chaque attribut considéré.

Tableau 5.4 – Table des comparaisons de Yager (1977) : poids associés à l'importance de l'attribut A comparée à celle de l'attribut B

Importance w_{AB}	**Définition**
1	Les attributs A et B sont d'égales importances
3	L'attribut A est un peu plus important que l'attribut B
5	L'attribut A est plus important que l'attribut B
7	L'attribut A est beaucoup plus important que l'attribut B
9	L'attribut A d'une importance absolue par rapport au critère B
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires entre deux évaluations successives

L'exemple suivant illustre cette démarche, en déterminant les importances deux à deux de trois critères X, Y et Z. Si l'attribut X est un peu plus important que l'attribut Y, on affecte à X une valeur d'importance ω_{XY} du tableau 5.4 et on affecte à Y la valeur $[1/(\omega_{XY})]$ (Tabl. 5.5).

À partir du tableau 5.5 ci-dessus, nous créons une matrice de comparaison des importances ((X, Y, Z) en lignes et en colonnes ; $\omega_{XX} = \omega_{YY} = \omega_{ZZ} = 1$)

TABLEAU 5.5 – Exemple de comparaisons de trois attributs deux à deux

Importance d'un critère par rapport à un autre	**Valeur d'importance pour un critère**	**Valeur d'importance correspondante pour l'autre critère**
Y est un peu plus important que X	$w_{XY} = 1/3$	$w_{YX} = 3$
Z est entre égal et légèrement plus important que X	$w_{XZ} = 1/2$	$w_{ZX} = 2$
Y est légèrement plus important que Z	$w_{YZ} = 3$	$w_{ZY} = 1/3$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 \\ 3 & 1 & 3 \\ 2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

Le calcul du vecteur propre de cette matrice donne le poids ω de chaque critère : $\omega_X = 0.16$, $\omega_Y = 0.59$ et $\omega_Z = 0.25$. Dans certains cas (Fig. 3.1 dans chapitre 3), plutôt que le poids ω, on utilise le poids w correspondant au vecteur propre multiplié par le nombre d'attributs considérés (égale à trois dans l'exemple ci-dessus), ce qui donnerait : $w_X = 0.48$, $w_Y = 0.1.77$ et $w_Z = 0.75$.

$$\omega = \begin{pmatrix} 0,16 \\ 0,59 \\ 0,25 \end{pmatrix}$$

Quantification relative d'importances qualitatives

Nous nous sommes inspirés de la comparaison par paires pour paramétrer les importances dans Mobisim-MR, puisqu'il n'est *a priori* pas possible de les paramétrer autrement.

Notre modèle, et les caractéristiques choisies pour décrire les ménages, nous amènent à représenter 72 types de ménages selon les variables socio-économiques, et 288 en ajoutant un style de vie aux ménages (4 styles de vie possibles). Chaque ménage établit 4 évaluations (satisfaction et intérêt, du logement et de l'environnement résidentiel), de 4 variables maximum pour le logement et 11 pour l'environnement résidentiel, soit potentiellement 6336 importances à définir à travers les comparaisons par paires. Le travail que cela représente nous oblige à automatiser cette tâche. Les principales étapes de la démarche mise en place sont présentées sur la figure 5.4.

Plutôt que de comparer directement les attributs (des logements ou de l'environnement résidentiel) deux à deux en définissant l'importance de l'un par rapport à l'autre, nous avons attribué, à partir de la littérature, une importance absolue mais imprécise pour chacun des attributs, considérant chaque caractéristique des ménages. C'est la première étape du paramétrage des importances (Fig. 5.4 – étape A). Elle nous permet de synthétiser l'information disparate disponible dans la littérature en une première qualification des importances. Pour simplifier, nous avons choisi de ne garder que 4 niveaux d'importance : très peu important, peu important, important et très important. Ces 4 niveaux ne sont que des valeurs intermédiaires pour rendre l'automatisation possible. Il en résulte alors 4 tableaux d'importances : un pour le logement et un pour l'environnement résidentiel, pour les deux aspects de l'évaluation résidentielle (satisfaction et intérêt) (Tabl. 5.6, 5.7, 5.8, 5.9).

Tableau 5.6 – Importances des attributs du logement actuel I (en colonne) pour chaque caractéristique du ménage (en lignes)

		Taille du logement	Coût du loyer	Statut	Type d'habitat
Age	Moins de 30			Peu important	
	30 à 44			Important	
	45 à 59			Important	
	Plus de 60			Très important	
Statut	Célibataire				
	Couple				
	Famille				Important
	Famille monoparentale				Peu important
Revenu	Faible		Très important	Peu important	
	Moyen		Très important	Important	
	Elevé	Très important	Peu important	Peu important	
Enfants	Aucun	Très peu important			
	1 ou 2	Important			
	3 ou plus	Important			

Lorsque l'importance d'un même attribut est évaluée par plusieurs caractéristiques du ménage, nous retenons la valeur d'importance la plus élevée (Fig. 5.4 – étape B). Par exemple, pour un ménage de moins de 30 ans aux revenus faibles, le statut d'un logement potentiel est à la fois « Important » et « Très important » (Tabl. 5.7). L'importance du statut du logement pour ce ménage sera finalement « Très important ». En effet, si une variable caractérisant le logement (ou l'environnement résidentiel) est importante considérant une des caractéristiques du ménage, alors on considère qu'elle est importante pour le ménage, même si d'autres caractéristiques lui attribuent un degré d'importance moindre.

TABLEAU 5.7 – Importances des attributs de chaque logement potentiel J (en colonne) pour chaque caractéristique du ménage (en lignes)

		Taille du logement	Coût du loyer	Statut	Type d'habitat
Age	Moins de 30			Important	
	30 à 44			Peu important	
	45 à 59			Important	
	Plus de 60				
Statut	Célibataire				Important
	Couple				
	Famille				Important
	Famille monoparentale				Important
Revenu	Faible		Très important	Très important	
	Moyen		Très important	Peu important	
	Elevé	Très important	Important	Peu important	
Enfants	Aucun	Très peu important			
	1 ou 2	Important			
	3 ou plus	Important			

Contrairement à Saaty et Yager, nos comparaisons ne s'effectuent donc pas directement sur les attributs même (du logement ou de l'environnement résidentiel) mais sur ces niveaux d'importance définis *a priori* ; ce sont eux qui deviennent objets des comparaisons. En les comparant les uns par rapport aux autres (Fig. 5.4 – étape C) nous pouvons convertir l'information qualitative en une valeur quantitative. *Via* ces niveau d'importance, les attributs sont comparés deux à deux, afin d'identifier dans chaque paire lequel est le plus important, et dans quelle mesure il est plus important.

TABLEAU 5.8 – Importances des attributs de l'environnement résidentiel actuel I (en colonne) pour chaque caractéristique du ménage (en lignes)

		Comm. & serv. quotidiens	Comm. & serv. hebdomadaires	Stations de transport	Espaces verts	Bordure urbaine
Age	Moins de 30	Peu important				
	30 à 44	Peu important				
	45 à 59	Peu important				
	Plus de 60	Important				
Statut	Célibataire					
	Couple					
	Famille					
	Famille monoparentale					
Revenu	Faible					
	Moyen					
	Elevé					
Enfants	Aucun					
	1 ou 2				Important	
	3 ou plus				Important	
Style de vie	Non rural	Très important	Très important	Important	Important	Très peu important
	Rural					Très important
Mode transp.	VP Dominant	Peu important	Très peu important			Très peu important
	Autres	Très important	Important	Très important		Important

		Paysage forestier	Paysage bâti	Hauts revenus	Access. au CV en voiture	Access. au CV en TC et autres
Age	Moins de 30					Important
	30 à 44					
	45 à 59					
	Plus de 60					
Statut	Célibataire					
	Couple					
	Famille					
	Famille monoparentale					
Revenu	Faible			Important		
	Moyen					
	Elevé			Important		
Enfants	Aucun					
	1 ou 2					
	3 ou plus					
Style de vie	Non rural	Très peu important	Peu important			
	Rural	Important	Très important			
Mode transp.	VP Dominant				Très important	
	Autres					Très important

Chaque niveau de comparaison est associé à une valeur (Tabl. 5.10). Les valeurs ainsi obtenues créent une matrice, appelée matrice réciproque de comparaison (Fig. 5.4 – étape D). C'est le calcul du vecteur propre normalisé de cette matrice qui définit les valeurs finales des importances (Fig. 5.4 – étape E).

TABLEAU 5.9 – Importances des attributs des environnements résidentiels potentiels J (en colonne) pour chaque caractéristique du ménage (en lignes)

		Comm. & serv. quotidiens	Comm. & serv. hebdomadaires	Stations de transport	Espaces verts	Bordure urbaine	Paysage forestier
Age	Moins de 30						
	30 à 44						
	45 à 59						
	Plus de 60						
Statut	Célibataire						
	Couple						
	Famille						
	Famille monoparentale						
Revenu	Faible						
	Moyen						Peu important
	Elevé						Important
Enfants	Aucun						
	1 ou 2						
	3 ou plus						
Style de vie	Non rural	Important	Important	Important	Peu important		
	Rural		Peu important			Très important	Important
Mode transp.	VP Dominant						
	Autres	Important	Important	Très important			

		Paysage bâti	Hauts revenus	Access. au CV en voiture	Access. au CV en TC et autres	Access. aux emplois en voiture	Access. aux emplois en TC et autres
Age	Moins de 30				Important		
	30 à 44						
	45 à 59						
	Plus de 60						
Statut	Célibataire						
	Couple						
	Famille						
	Famille monoparentale						
Revenu	Faible		Important				Important
	Moyen	Peu important					
	Elevé	Important	Très important	Important			
Enfants	Aucun						
	1 ou 2						
	3 ou plus						
Style de vie	Non rural						
	Rural	Très important					
Mode transp.	VP Dominant			Très important		Important	
	Autres				Important		Important

Pour résumer, les étape B, C, D et E de la figure 5.4 sont implémentées dans le code du modèle pour automatiser le calcul des importances. Les paramètres définis par l'utilisateur sont surtout l'étape A (la définition des niveaux d'importance de chaque attribut pour chaque caractéristique du ménage - tableaux 5.6, 5.7, 5.8, 5.9) et les

Tableau 5.10 – Table de comparaisons, adaptée de Saaty (1990)

Colonne 1	Colonne 2	Comparaison	Exemple de valeurs d'importance
Très peu important	Très peu important	Egalement important	1
	Peu important	Un peu plus important	3
	Important	Beaucoup plus important	5
	Très important	Importance absolue	7
Peu important	Peu important	Egalement important	1
	Important	Un peu plus important	3
	Très important	Beaucoup plus important	5
Important	Important	Egalement important	1
	Très important	Un peu plus important	3
Très important	Très important	Egalement important	1

valeurs à associer à chaque comparaison des importances entre elles (Tabl. 5.10). Pour l'instant, ces valeurs sont fixées selon une adaptation de l'échelle de valeurs de Saaty et Yager, à savoir : 1, 3, 5 et 7.

L'affectation d'importances aux attributs *a priori* court-circuite considérablement la méthode de Saaty et nous pouvons légitimement nous demander si l'affectation directe de poids numériques à ces niveaux d'importance n'aurait pas été plus pertinente. D'un point de vue méthodologique, l'attribution directe de valeurs, quelles qu'elles soient, reste une question délicate. La comparaison par paires nous permet d'assumer cette incapacité à allouer aux différents attributs des niveaux d'importance de manière fiable, et de souligner la notion d'imprécision qui découle de la variable.

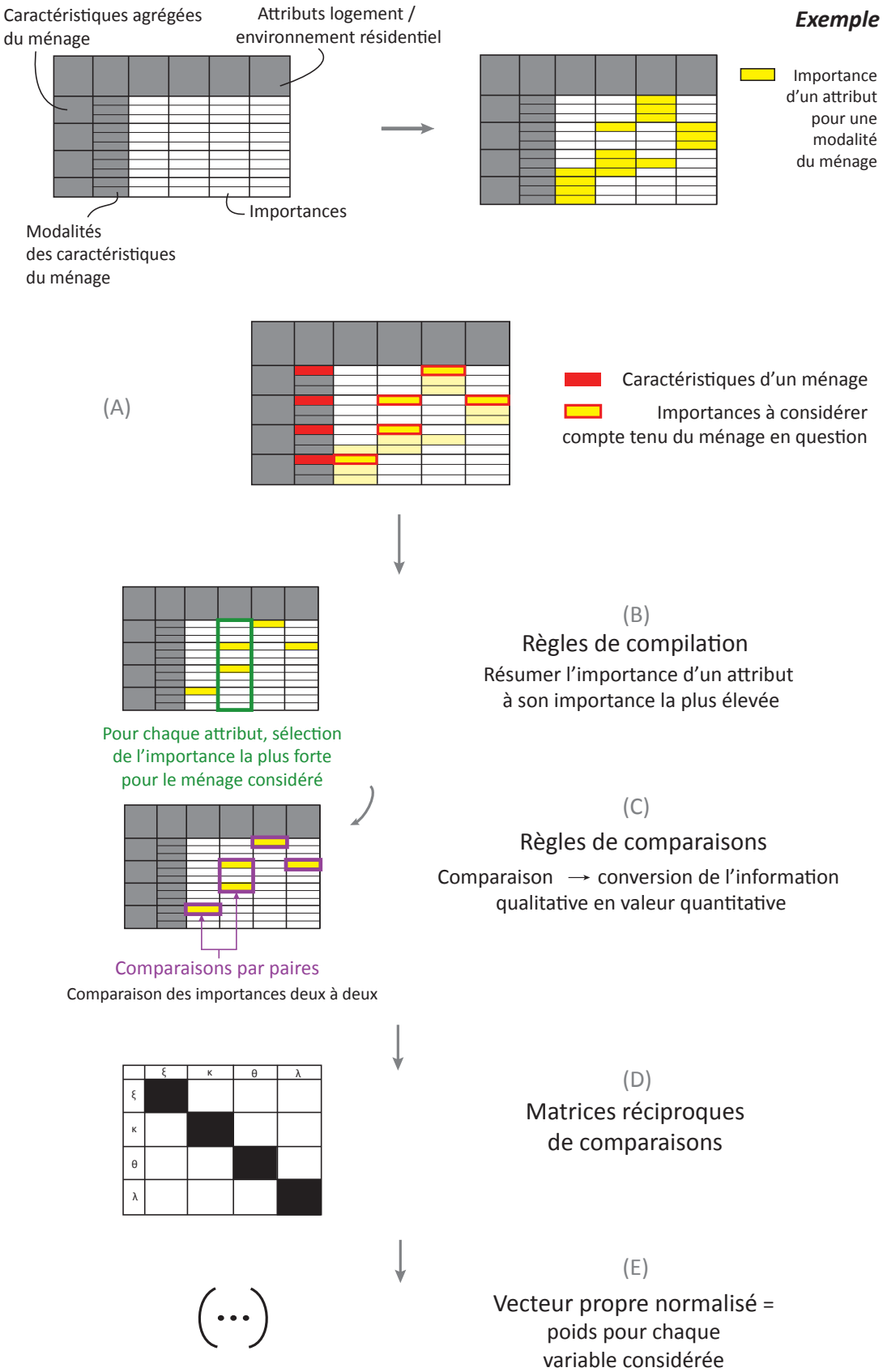


FIGURE 5.4 – Quantification des valeurs d'importance

5.3 Paramétrage initial des variables de la dynamique de la décision

Il n'existe pas, en sciences sociales, de source de données sur la dynamique de la décision résidentielle à l'échelle de l'individu. Les données existantes permettent d'évaluer des phénomènes observés (ex. une situation résidentielle dans une agglomération à un moment donné), mais pas de donner d'informations précises sur les processus qui y mènent. Nous savons néanmoins que plusieurs éléments intervenant dans la décision spatiale dépendent conjointement des caractéristiques des individus, des attributs des lieux et du contexte socio-économique au sens large d'une agglomération (marché du logement, dynamiques démographiques, prix du carburant...) (Tannier *et al.*, 2012a).

Dans Mobisim, les variables φ (mobilité individuelle) et M (intérêt global à déménager) permettent de représenter ces différents éléments. Leur formalisation dépend donc à la fois du ménage lui-même et de son inscription dans le contexte résidentiel de l'agglomération. C'est sur ces informations que nous devons nous appuyer pour affecter des valeurs aux différents paramètres qui participent à leur calcul.

Puisque ces variables représentent des indicateurs synthétiques de phénomènes plus complexes, il n'est pas possible de les paramétrer directement : aucune donnée empirique ne leur correspond spécifiquement. Pour leur attribuer des valeurs, nous devons nous appuyer sur des hypothèses thématiques ou statistiques. L'impact de ces valeurs sur les résultats devra ensuite être exploré, et être réévalué par un calibrage (cf. troisième partie de la thèse).

5.3.1 Paramètres de la mobilité individuelle : quantifier α et β

La mobilité individuelle φ est une fonction logistique dont les valeurs (à travers les paramètres α et β) dépendent des caractéristiques socio-économiques du ménage et de la satisfaction qu'il retire de son logement actuel. Elle permet de distinguer la manière dont les ménages vont réagir face à une insatisfaction de leur situation résidentielle : à insatisfactions équivalentes, deux types de ménages différents n'auront pas les mêmes prédispositions pour envisager une démarche de déménagement. φ représente donc un comportement de mobilité, que nous faisons varier en fonction de la satisfaction au logement.

Ce sont les valeurs de paramètres α et β de la fonction logistique que nous devons définir ici. Le paramètre α représente la valeur de la satisfaction pour une mobilité individuelle φ égale à 0,5 (Fig. 5.5 - a et b). Ainsi, plus α est élevé, plus le ménage sera naturellement mobile, c'est-à-dire prêt à déménager quand sa valeur de satisfaction résidentielle est faible. Les variations de α permettent d'ajuster l'intervalle de satisfaction pour lequel la mobilité individuelle du ménage est maximale. β correspond à l'inclinaison de la courbe dans la fonction logistique. Thématiquement cette inclinaison peut se traduire comme une réactivité face aux variations de satisfaction dans le comportement de mobilité :

- Si la pente est forte, la transition entre une mobilité élevée et une mobilité faible est brutale pour des valeurs de satisfaction légèrement différentes. Cela signifie que lorsque la valeur de satisfaction est autour de α, la mobilité varie très rapidement (Fig. 5.5 – c).
- Si la pente de la courbe logistique est douce, cela traduit un comportement plus progressif, et donc une attitude moins radicale vis-à-vis des variations de satisfaction (Fig. 5.5 – d).

Pour le paramétrage, nous partons du principe que les ménages qui déménagent le plus dans la réalité (fréquences observées) sont ceux qui déménagent le plus facilement. Ces derniers auront donc, si l'on transpose cela à Mobisim-MR, une mobilité individuelle globalement plus importante, c'est-à-dire une valeur de α plus élevée. Dans un premier temps, nous choisissons de fixer un β identique pour les cinq classes.

Les données de référence pour identifier les types de ménages les plus mobiles sont les données de migration intra-urbaines MIGCOM, de l'INSEE. Déjà utilisées pour le paramétrage des migrations dans le modèle des évolutions démographiques (cf. chapitre 4 - section 4.2.2.2), elles sont en fait un différentiel des situations de 2003 et de 2008 pour chaque individu de la population française, à savoir, sa commune de résidence en 2003 et sa commune de résidence en 2008. Cette fois-ci, ce ne sont plus les entrées et les sorties de l'agglomération qui nous intéressent mais les migrations qui ont eu lieu au sein de l'agglomération entre ces cinq années. Parce qu'elles présentent un différentiel entre deux temps T, les données ne tiennent pas compte des déménagements multiples pendant cette période, et nous pouvons donc supposer que le nombre de déménagements qu'elles traduisent est sous-estimé. Cependant, ces informations nous apportent une base sur laquelle nous reposer pour définir nos valeurs de paramètres : pour obtenir des informations sur les taux annuels de migration au sein de l'agglomération, nous avons donc annualisé le nombre de déménagements observés entre les cinq années,

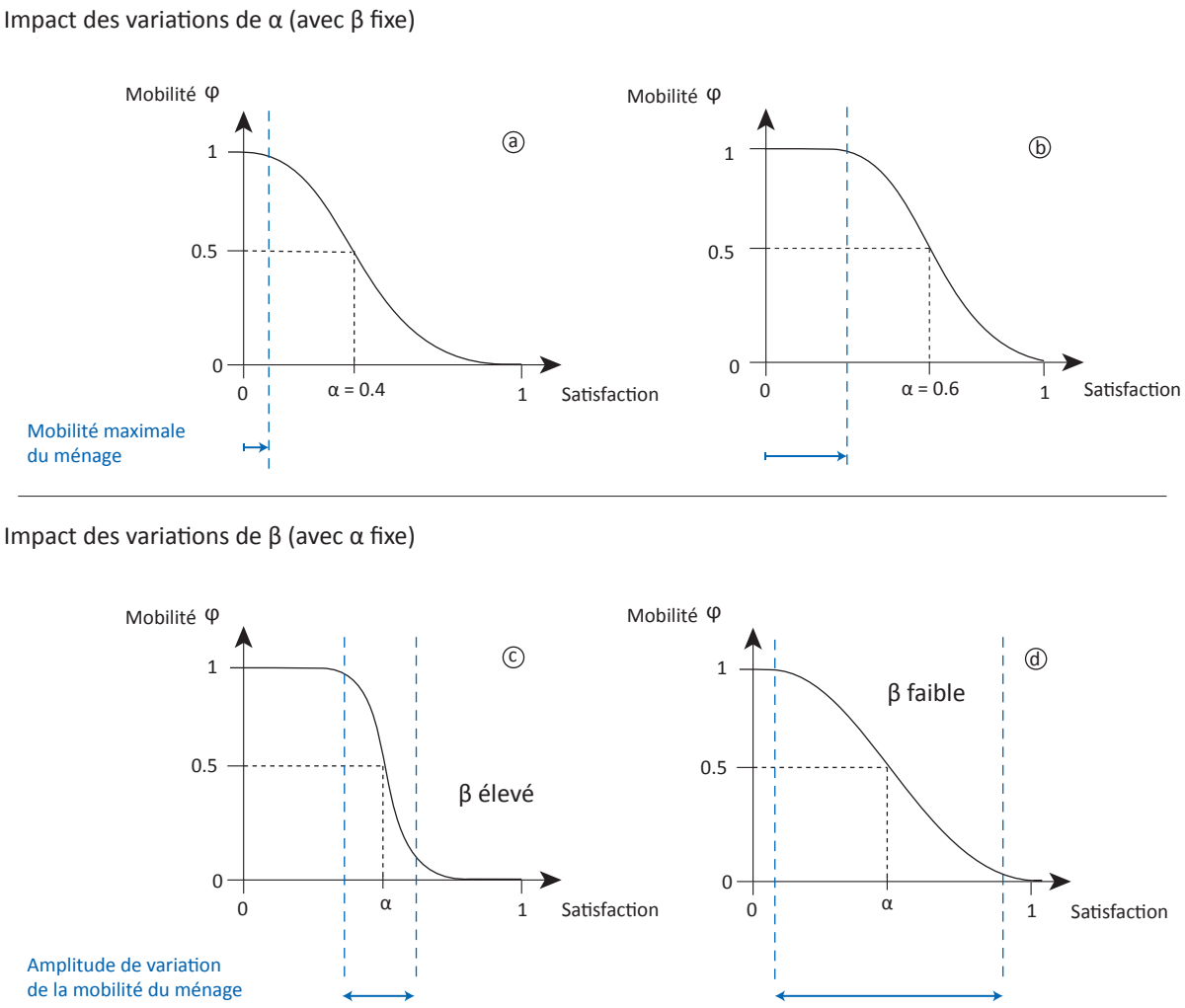


FIGURE 5.5 – Impacts des variations des paramètres α et β sur la fonction logistique φ

conscients de l'inexactitude potentielle du résultat ainsi obtenu (Royer, 2007; Donzeau et Shon, 2009).

Afin de rendre compte de l'hétérogénéité des comportements, il aurait été opportun d'assigner un couple de valeurs α et β à chaque type de ménage. Néanmoins, en raison du grand nombre de types de ménages possible dans Mobisim-MR, il était souhaitable d'éviter un surparamétrage. Nous avons donc regroupé les types de ménages en quelques grandes classes seulement. Pour cela, nous avons tout d'abord cherché à identifier la/les caractéristique(s) des ménages les plus aptes à distinguer des comportements différents en ce qui concerne les taux annuels de migration.

Après plusieurs explorations des données MIGCOM, il se trouve que les critères qui discriminent le plus les comportements de mobilités résidentielles intra-urbaines entre les ménages sont l'âge de la personne de référence, et la présence ou non d'enfant(s). Selon ces résultats, nous avons établi une typologie des ménages en 5 classes (Tabl.

5.11). Les ménages de moins de 30 ans, déclinés en deux classes selon la présence ou non d'enfant, sont les plus mobiles. Les trois autres catégories dépendent strictement de l'âge, la mobilité diminuant à mesure que celui-ci augmente. Ces 5 classes sont synthétiques comparées aux possibilités de changement dans le cycle de vie des ménages : dans notre cas, seules quelques variations (passage de 30 à 31 ans pour la personne de référence par exemple) dans le cycle de vie impliquent un changement de classe. Les variations des valeurs de satisfaction auront donc potentiellement l'impact le plus important sur les variations de φ pour un ménage au cours des itérations.

Tableau 5.11 – Classement des cinq classes de ménages par taux annuel de migration

Type de ménage	Part de migrants par classe (MIGCOM 2008)	Classe
Moins de 30 ans avec enfant(s)	16,83 %	**1**
Moins de 30 ans sans enfant	14,28 %	**2**
30 à 44 ans	10,03 %	**3**
45 à 59 ans	4,22 %	**4**
Plus de 60 ans	2,08 %	**5**

Ne disposant pas d'autres données de cadrage que MIGCOM, nous fixons comme objectif d'obtenir pendant les premières années de simulation des résultats cohérents avec le classement présenté dans le tableau 5.11 ci-dessus. À partir de là, notre objectif n'est pas d'approcher les valeurs de taux annuel de migration mais seulement de maintenir le classement relatif de ces cinq classes de ménages entre elles, en présupposant que ce classement reste le même au cours des années.

Toujours dans l'idée de souligner l'hétérogénéité entre les comportements, le premier jeu de valeurs que nous avions choisi présentait une forte amplitude entre les différentes valeurs de classes (Tabl. 5.12). Néanmoins, les premiers résultats de taux annuel de migration simulés par Mobisim-MR avec ces valeurs étaient beaucoup trop élevés pour être réalistes (aux alentours de 28%), aussi avons-nous réévalué les valeurs de α de chaque classe pour parvenir aux valeurs initiales suivantes : α est égal à 0,4 pour les ménages les plus mobiles (ménages jeunes avec enfant(s) - Classe 1), 0,3 pour les ménages jeunes sans enfant, 0,2 pour les ménages entre 30 et 44 ans, 0,1 pour les ménages entre 45 et 59 ans et 0,05 pour les moins mobiles (plus de 60 ans - Classe 5). Comme nous l'avons précisé, la valeur de β reste la même pour l'ensemble des classes. Elle a été fixée à β = -10.

TABLEAU 5.12 – Valeurs de α issues du paramétrage

Classe	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Premières valeurs	*0.85*	*0.65*	*0.5*	*0.35*	*0.3*
Valeurs initiales	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05

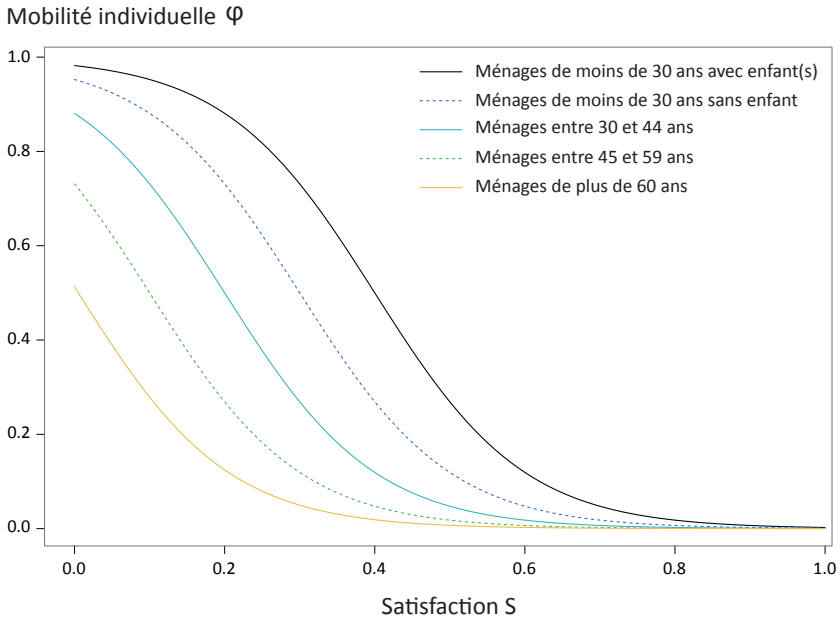


FIGURE 5.6 – Relation entre la satisfaction S des ménages et leur mobilité individuelle φ

La figure 5.6 présente graphiquement les fonctions logistiques φ résultantes pour chacune des cinq classes. On peut constater que, hormis les ménages de moins de 30 ans avec enfant(s), aucune des classes ne bénéficie d'une mobilité individuelle maximale (égale à 1). Les ménages de plus de 60 ans ont une mobilité individuelle maximale (c'est-à-dire en cas d'insatisfaction la plus totale) de 0,5.

5.3.2 L'intérêt global à déménager : trois paramètres pour une variable

L'intérêt global à déménager M est une fonction continue (cf. chapitre 3 - section 3.2.6), qui dépend des attractivités des logements du territoire considéré pour un ménage donné, relativement aux attractivités des autres ménages. Ainsi, trois paramètres sont à définir pour le calcul de cette variable :

– La taille de l'échantillon n_J sur lequel chaque ménage évalue son attractivité connue. Ces logements sont tirés aléatoirement parmi les logements vacants attractifs pour chaque ménage.

– L'indicateur de distribution qui définit pour chaque ménage sa valeur d'attractivité connue v_J.
– La valeur de référence de l'attractivité globale à laquelle chaque ménage se réfère pour évaluer son intérêt global à migrer M.

A partir d'une évaluation de la littérature, nous avons fixé le nombre n_J de logements visités par défaut à 30. Cette valeur présente en outre l'avantage d'être statistiquement le seuil minimal à partir duquel un échantillon peut être un tant soit peu considéré comme représentatif d'une population.

Pour quantifier l'attractivité connue v_J d'un ménage, il est nécessaire de recourir à un indicateur qui permette de synthétiser la distribution des $n_J = 30$ attractivités des logements qu'il évalue. Bien que réductrice, la médiane de la distribution a été choisie comme indicateur synthétique de l'attractivité connue v_J. La valeur résultante diffère pour chaque ménage, en fonction de la distribution des 30 attractivités dont il a connaissance. Cette valeur a été fixée à partir des travaux de Ettema et al. (2011), qui estiment à 10 le nombre de logements visités ; dans Mobisim ce sont plus généralement des logements connus, incluant ceux des amis, de la famille, ceux connus par le bouche-à-oreille.

De la même manière, nous avons choisi de synthétiser l'attractivité générale de l'agglomération par la valeur médiane de l'ensemble des attractivités de tous les logments (vacants ou non) pour tous les ménages. Ce paramètre est bien une valeur unique, fixée en amont de la simulation, à laquelle chaque ménage compare sa valeur v_J. Afin de définir cette valeur par défaut, nous avons étudié la distribution de toutes les attractivités de tous les ménages à la première année de simulation (Fig. 5.7). La valeur est la médiane de cette distribution, équivalente à 0,12.

Synthèse de la distribution des valeurs d'attractivité de tous les logements pour l'ensemble des ménages à la première année de simulation

Indicateur de distribution	Valeur
Minimum	0
1er quartile	0,056
Médiane	0,117
3eme quartile	0,188
Maximum	0,764

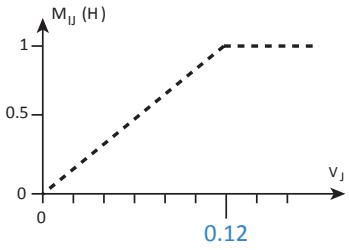


FIGURE 5.7 – Paramétrage de l'intérêt global à migrer

L'affectation de ces deux dernières valeurs (v_J et la référence collective) soulève le constat suivant : ces paramètres sont des indicateurs qui symbolisent des faits plus complexes. Ceci implique qu'il n'y a aucun moyen de vérifier leur pertinence en les comparant à des données empiriques, et qu'il nous appartient de définir si les valeurs choisies sont pertinentes. La vérification de ces valeurs ne se fait pas thématiquement mais plutôt statistiquement, par interprétation de la cohérence des résultats de simulation avec des connaissances expertes ou des faits stylisés.

5.4 Résultats obtenus avec les valeurs initiales des paramètres

Parmi les deux objectifs décrits au début de ce chapitre, le premier - obtenir des valeurs de taux annuel de migration semblables à celles observées actuellement sur l'ensemble de l'agglomération - est vérifiable immédiatement. La figure 5.8 représente l'évolution des taux annuel de migration au sein de l'agglomération, et on peut constater que les valeurs des premières années de simulation sont assez lointaines des taux actuels (pour rappel : 13,7 % en 2005).

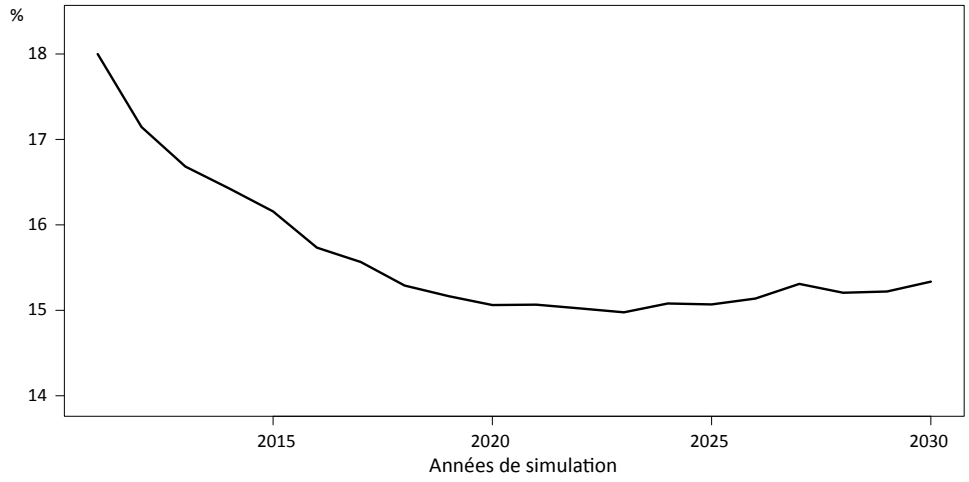


FIGURE 5.8 – Taux de migration annuel dans l'agglomération bisontine simulé avec les valeurs initiales des paramètres de Mobisim-MR

L'aboutissement du second objectif - l'hétérogénéité des comportements résidentiels entre les ménages de Mobisim - nécessite des analyses plus approfondies pour être vérifié. Il faudra pour cela explorer les résultats simulés aux différentes étapes de la décision ; ce sera l'objet de la troisième partie de la thèse.

5.5 Conclusion

La démarche mise au point répond non seulement à des objectifs de paramétrage, mais également à une contrainte en matière de données. Définir les valeurs d'appréciation du logement à partir d'une évaluation subjective permet de répondre au besoin du modèle ; cela nécessite un suivi bibliographique régulier ou des enquêtes de terrain plus précises pour être mis à jour. La comparaison par paires permet à la fois de retranscrire l'imprécision de la variable et de pallier le déficit d'information. Les importances peuvent ainsi être formalisées et combler un manque thématique. Les paramètres α et β sont estimés à partir d'hypothèses de comportement, complétées par des données de recensement. Ce travail souligne finalement l'importance des hypothèses formulées en amont et à chaque étape du paramétrage, toujours en lien avec les objectifs du modèle.

Tous les paramètres ne peuvent être considérés de la même manière, et tous n'impliquent pas la même méthodologie de travail (Fig. 5.9). Certains, par leur nature et les données nécessaires pour les paramétrer, peuvent être considérés comme généraux, c'est-à-dire valables pour toutes les zones d'étude françaises (une grande partie des appréciations). D'autres sont spécifiquement paramétrés pour une zone d'étude en particulier puisque l'on dispose de données typiquement locales (les appréciations des accessibilités généralisées). D'autres enfin dépendent surtout du fonctionnement du modèle et des résultats émergents au sein même de la simulation même, et ne peuvent être comparés à aucune valeur empirique. C'est le cas des paramètres décrivant l'intérêt global à déménager M.

Le figure 5.9 permet de synthétiser la démarche de paramétrage de Mobisim-MR.

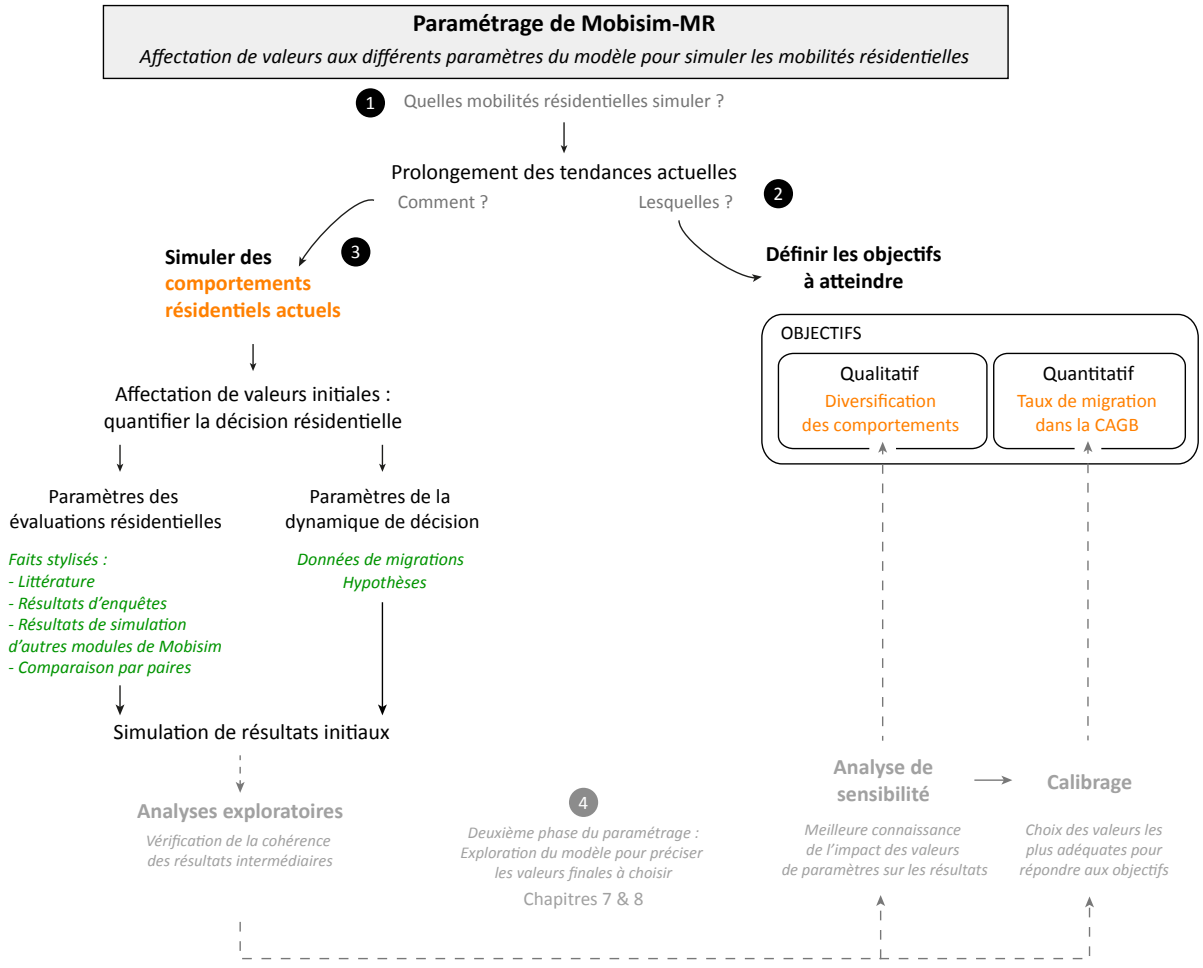


FIGURE 5.9 – La démarche de paramétrage du modèle Mobisim-MR

Conclusion de la deuxième partie

La plateforme de simulation Mobisim fait preuve d'« un décalage systématique entre les niveaux de modélisation et de validation/évaluation » (Mathian et Tannier, à paraître) : la modélisation est individu-centrée et les résultats de simulation sont analysés à une échelle agrégée. Au niveau du paramétrage, cela signifie que nous ne cherchons pas à reproduire exactement la réalité mais, en modélisant des comportements réalistes, à obtenir des résultats approchant une certaine réalité. Pour Mobisim-Démo, cela veut dire quantifier des probabilités des comportements démographiques réalistes, et pour Mobisim-MR, quantifier des comportements résidentiels individuellement cohérent avec ce qui est observé pour simuler les mobilités résidentielles sur une agglomération.

Les deux paramétrages des deux modèles reposent sur des bases communes, à savoir la définition d'objectifs à atteindre avec les résultats de simulation, l'identification des comportements simulés qui permettent d'atteindre ces objectifs et la définition de valeurs pour transcrire ces comportements à travers la simulation. Le paramétrage de ces deux modèles pour simuler un scénario de prolongement des tendances actuelles sur une zone d'étude ne peut pas être uniquement généraliste. Il nécessite de considérer à la fois les aspects généralistes des processus simulés tout en intégrant les spécificités locales. Pour Mobisim-Démo, il s'agit de représenter à la fois les tendances démographique actuelles en France, et les particularités des migrations avec l'extérieur de l'agglomération. Pour Mobisim-MR, cela consiste à simuler des comportements observés globalement (préférences en général) pour chaque type de ménage, tout en intégrant les caractéristiques de la zone d'étude dans la prise de décision (ex. les accessibilités généralisées à différentes zones).

Cependant, chacun des paramétrages présentés revêt des spécificités relatives à trois éléments :

- la formalisation sur laquelle repose le modèle ;
- la nature des comportements à modéliser, et donc des variables à paramétrer ;
- la nature des objectifs définis, et leur possibilité de vérification.

La microsimulation des évènements démographiques dans Mobisim-Démo repose sur des comportements relativement objectifs, factuels. De plus, les paramètres du modèle sont uniformes dans leur nature : les probabilités sont individuelles et chacune est identifiable à un évènement concret (ex. naissance, décès, migrations etc). La modélisation de la décision résidentielle est elle plus complexe, faisant appel à des notions plus subjectives (préférences, satisfaction, interprétation d'une référence collective), dont la traduction paramétrique est plus difficile. De plus, la nature des différents paramètres de Mobisim-MR est plus diversifiée : certains traduisent des faits stylisés, trouvant une adéquation directe avec de l'observable, alors que d'autres synthétisent de manière plus abstraite des éléments intervenant dans la décision. Enfin, la vérification de l'objectif qualitatif du paramétrage de Mobisim-MR nécessite des explorations de chacun des résultats de simulation intermédiaires (ex. quelle est la distribution des valeurs des attractivités connues v_J des ménages ? Cette valeur est-elle représentative de l'attractivité effective des ménages ?).

Ainsi, les deux paramétrages nécessitent d'être complétés par un calibrage pour atteindre les objectifs de simulation, mais selon des protocoles différents (Fig. 4.3 et 5.9) : le calibrage de Mobisim-MR ne peut pas être réalisé directement après l'affectation des valeurs initiales, il nécessite avant tout une cohérence dans les résultats du modèle entre eux et donc une exploration des résultats. Mobisim-Démo quant à lui pouvait être calibré immédiatement à partir des résultats initiaux par modifications des valeurs initialement définies.

Enfin, les paramétrages des deux modèles sont fortement dépendants à la donnée, ce qui soulève de nombreuses questions auxquelles chaque démarche a dû répondre, la principale étant « comment gérer l'absence de donnée ? ». Cette question renvoie à la construction du modèle, puisqu'elle est souvent anticipée à ce moment-là, afin d'en minimiser l'impact au moment du paramétrage.

Troisième partie

Exploration et validation du modèle de mobilités résidentielles

"Remember that all models are wrong ; the practical question is how wrong do they have to be to not be useful"

George E.P. Box

Introduction de la troisième partie

La formalisation du modèle Mobisim MR présentée dans le chapitre 3 définit la relation entre les différents éléments qui participent au processus de mobilité résidentielle. Elle décrit ces relations de manière technique : la satisfaction intervient dans le calcul des attractivités, l'intérêt global à déménager permet à chaque ménage de se positionner par rapport à une offre en logement dans l'agglomération. Le paramétrage, décrit dans le chapitre 5, a ensuite permis de donner vie à ces relations, en affectant à chaque paramètre une valeur numérique. Cela a permis de passer d'une représentation abstraite du processus à une représentation appliquée, chacune des valeurs permettant d'expliciter l'élément du processus des mobilités résidentielles auquel elle se rapporte (satisfaction résidentielle, attractivité des localisations résidentielles pour les ménages, mobilité résidentielle individuelle des ménages).

Le paramétrage de Mobisim-MR nous a permis d'affecter des valeurs par défaut aux différents paramètres, et de faire fonctionner le modèle. Toutefois, deux tâches restent encore en suspens :

1. Vérifier que les résultats simulés sont cohérents par rapport aux hypothèses sous-jacentes à leur formalisation, c'est-à-dire explorer la cohérence du modèle.
2. Compléter le paramétrage : s'assurer que les objectifs sont effectivement atteints, notamment en ce qui concerne la modélisation de comportements hétérogènes entre les ménages simulés et la simulation d'un taux de migration annuel réaliste, et fixer les dernières valeurs de paramètres (calibrage du modèle) selon ces objectifs.

La vérification du bon fonctionnement du modèle après son élaboration est souvent négligée dans les démarches de modélisation, dû au manque de temps et de moyens techniques (Deffuant *et al.*, 2003), alors même que connaître le fonctionnement de son modèle est une fin en soi (Amblard *et al.*, 2007), au même titre que de l'utiliser pour produire des résultats de simulation. Cette étape est d'autant plus importante qu'elle

permet de garantir la fiabilité de ces résultats.

Mobisim-MR contient une grande part d'incertitude dûe au manque de données ou de connaissance sur certains processus, dont on a besoin d'évaluer les impacts sur les résultats de simulation. Pour simuler les déménagements des ménages, Mobisim-MR génère un grand nombre de résultats intermédiaires, et il paraît primordial de pouvoir attester leur cohérence pour valider la pertinence de nos résultats finaux (taux de migration annuel sur l'agglomération, satisfaction résidentielle des ménages). Mobisim-MR implique aussi de nombreux tirages aléatoires et nous souhaitons évaluer dans quelle mesure ces tirages génèrent de la stochasticité entre différentes simulations.

Pour lever ces zones d'ombre sur le fonctionnement du modèle, nous avons mis en place la démarche suivante :

1. Analyse de stabilité : tester la stochasticité induite par la formalisation. Quelle fiabilité le modélisateur peut-il accorder aux résultats de simulation de Mobisim-MR ?
2. Analyse de sensibilité : explorer le fonctionnement du modèle à travers la variation des valeurs de ses paramètres. Quelle est la sensibilité des résultats de simulation aux variations de différents paramètres ?
3. Calibrer le modèle : en fonction des résultats obtenus dans l'analyse de sensibilité, modifier les valeurs initiales des paramètres pour atteindre certains les objectifs définis lors du paramétrage.

Encart technique

Les simulations avec Mobisim impliquent plusieurs contraintes, qui conditionnent fortement le choix d'un protocole d'analyses de stabilité et de sensibilité :

Le temps de calcul

Réalisée avec la totalité des modules, une simulation Mobisim de 20 itérations (i.e. 20 années simulées) sur l'agglomération bisontine nécessite 15 Go de mémoire, et le temps d'exécution est d'environ 75h CPU (Central Processing Unit - unités de calcul) en séquentiel, soit 6h30 en parallèle sur une machine de 12 cœurs (unités de calculs), et 5h30 en parallèle sur une machine de 16 cœurs. Il est évident qu'exécuter un grand nombre de simulations ne peut se faire sur un simple ordinateur. Dans le cadre de cette thèse, nous avons bénéficié de l'accès à un centre de calcul - le mésocentre de Franche-Comté [5] - et exécuter les simulations sur des machines de 12 ou 16 cœurs selon les périodes, en parallèle c'est-à-dire que plusieurs simulations pouvaient être effectuées en même temps (dans un maximum de 6 ou 8 simulations simultanément selon les périodes).

Les *outputs*

Mobisim est un grand générateur d'*outputs* : chaque modèle de la plateforme de simulation Mobisim produit de nombreux résultats pour chaque année de simulation, d'autant plus nombreux que le caractère individu-centré de la modélisation implique des résultats totalement désagrégés. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux (ou tables, en base de données), dont chaque ligne correspond à une entité spécifique (individu dans le cas des mobilités quotidiennes, ménage pour les mobilités résidentielles, logement ou bâtiment pour les tables recensant les entités spatiales). Dans chaque table, il y a autant de lignes que d'entités par année de simulation. À titre indicatif, la table des résultats de la mobilité résidentielle comprend 1 843 570 lignes,

5. http ://meso.univ-fcomte.fr/

et celle des logements 2 082 190, pour les 20 années de simulation. L'enregistrement des résultats s'effectue dans une base de données, sur un serveur.

Pour optimiser l'espace sur le serveur, toutes les données générées lors d'une simulation ne sont pas systématiquement sauvegardées. Les variables intermédiaires dans les étapes de formalisation (vecteurs propres des importances, valeurs d'intérêts pour tous les logements potentiels - seule est conservée automatiquement la valeur d'intérêt maximal pour chaque ménage -, valeurs d'attractivités, etc) ne sont pas enregistrées dans la base de données des résultats de simulation.

Malgré cela, la totalité des résultats d'une simulation représente plusieurs dizaines de giga octets de données. Ce nombre important d'*outputs* est la principale limite à l'exécution d'un grand nombre de simulations avec Mobisim : il n'est pas possible de stocker sur le serveur les résultats d'un grand nombre de simulations.

Un moyen de contourner cette difficulté est d'identifier précisément à l'avance les résultats de simulation que l'on souhaite analyser. En effet, il est possible, par le langage xml dans le fichier des paramètres de la simulation, de programmer l'enregistrement d'une sélection de résultats de simulation dans un fichier texte sans passer par l'enregistrement dans la base de données. Cela permet d'exécuter un grand nombre de simulations sans aucune contrainte concernant le stockage des données sur le serveur. Mais cela entraîne deux conséquences :

- en dehors des résultats choisis, aucune autre sortie de Mobisim n'est sauvegardée. Dans ces conditions de simulation, il n'est pas possible de procéder à des analyses supplémentaires si les premiers résultats soulèvent des questions particulières, à moins d'exécuter de nouvelles simulations.
- les résultats ne sont pas simplement extraits et présentés tels qu'ils l'auraient été dans la base de données. Leur extraction implique une agrégation, programmée dans le fichier xml : on ne dispose pas alors de l'ensemble des valeurs pour tous les ménages mais d'une somme, d'une médiane de distribution, etc.

Ainsi, deux cas de figure sont possibles pour mener des analyses avec Mobisim :

- exécuter un nombre restreint de simulations pour lesquelles on peut disposer de l'intégralité des résultats bruts, c'est-à-dire complètement désagrégés ;
- exécuter un grand nombre de simulations pour lesquelles on ne dispose que d'un nombre fini de résultats agrégés.

Le traitement des *outputs*

Les données, telles qu'elles sont enregistrées dans les tables de la base de données, sont désagrégées. Cependant, la plupart des résultats de Mobisim sont analysés à une échelle agrégée, par type de ménage ou à l'échelle des entités spatiales agrégées (communes, agglomération morphologique). Cela nécessite un travail conséquent de traitement de l'information *a posteriori*.

Les données sont traitées grâce à un système de gestion de base de données relationnelle ; les traitements se font en langage sql ou avec le logiciel R, pour les analyses statistiques des résultats. Chaque analyse requiert une certaine réflexion sur le traitement des *outputs* (identification des champs nécessaires aux calculs, des tables dans lesquels la donnée se trouve, des jointures éventuelles à effectuer entre les tables), et du temps pour l'écriture des codes informatiques permettant leur transformation en résultats.

Chapitre 6

Analyse de stabilité : objectifs, outils et résultats

"On peut satisfaire 1000 ménages
une fois mais on ne peut pas
satisfaire 1000 fois un ménage"
Devise Mobisimienne

Pour pallier le manque de connaissance sur la dynamique de décision résidentielle, la formalisation de Mobisim-MR a recours à un certains nombre de variables probabilistes. Il en résulte une variabilité entre les réplications d'un même scénario. Afin de mieux connaître la mesure de cette variabilité et son impact sur les valeurs des résultats de simulation, nous avons besoin de la quantifier à travers une analyse de stabilité des résultats du modèle.

L'analyse de stabilité est la première étape dans le processus de validation de notre modèle. Au-delà d'une meilleure connaissance du fonctionnement de Mobisim-MR, elle constitue un travail préparatoire pour l'analyse de sensibilité et les analyses thématiques, à travers l'identification d'un seuil acceptable pour le nombre de simulations à répliquer permettant d'obtenir un résultat moyen stable.

6.1 Tester la stabilité dans Mobisim-MR : pourquoi ? comment ?

6.1.1 De la nécessité de tester la stabilité des résultats d'un modèle de simulation

Mobisim-MR est un modèle de simulation individu-centré, dont les résultats de simulation émergent des différentes interactions entre les ménages d'une part, et entre les ménages et leur environnement d'autre part. Cela signifie qu'à partir d'une situation initiale identique (configuration des paramètres, de la population et de l'espace), les valeurs des résultats ne seront pas nécessairement les mêmes. De plus, la formalisation de Mobisim-MR (et des autres modules qui participent aux résultats de simulations) utilise beaucoup de probabilités et il en découle de la stochasticité dans les résultats, dont nous ne connaissons pas l'ampleur.

Le premier objectif de notre analyse de stabilité est donc d'identifier l'impact de cette stochasticité dans les valeurs des résultats de simulation en sortie du modèle. Le besoin sous-jacent est de qualifier la confiance que l'on peut accorder aux résultats d'une simulation. L'objectif est de pouvoir répondre aux questions suivantes :

- Avec un même jeu de paramètres, quelle est la dispersion des valeurs des différents résultats entre plusieurs simulations, compte tenu de la stochasticité du modèle ?
- Comment évolue cette variabilité au fil des itérations ?
- Les différents résultats et variables du modèle sont-ils uniformément stables ou instables ?

La variabilité à laquelle sont soumis les différents résultats du modèle implique qu'une valeur de résultat issue d'une seule exécution de simulation n'est pas suffisante pour être considérée comme fiable (Crooks, 2010; Huang *et al.*, 2013). Le problème est classique en modélisation individu-centrée, et il est coutume de répliquer plusieurs fois un même scénario (i.e. une même configuration de paramètres), permettant de calculer une moyenne de valeurs pour produire un résultat moyen, plus représentatif et surtout plus stable (Wegener, 2014). Le calcul de cette moyenne permet de réduire la variabilité intrinsèque de la valeur finalement considérée pour le résultat. Plus le nombre de réplications est important, plus cette variabilité est réduite. Quoiqu'il en soit, elle ne peut être supprimée (van Imhoff et Post, 1998).

Le nombre de réplications nécessaire n'est pas forcément important, l'essentiel étant

qu'il y en ait plusieurs (Amblard, 2003; Huang *et al.*, 2013). Il n'existe d'ailleurs pas de protocole standard pour définir le nombre de réplications nécessaires. Le second objectif de l'analyse de stabilité de Mobisim-MR est d'identifier un seuil, dans le nombre de simulations à répéter, au-delà duquel l'ajout de réplications n'augmente pas significativement la stabilité de la valeur moyenne de chacun des résultats. Ce ne sont alors plus les valeurs de résultats qui sont ciblées spécifiquement mais le nombre de réplications nécessaires pour obtenir un résultat moyen stable. Convenir d'un seuil minimum pour calculer un résultat moyen nous permettra par la suite de standardiser chacune de nos analyses.

6.1.2 Quels résultats analyser ?

Pour apporter des réponses les plus pertinentes aux objectifs définis, nous souhaitons tester la stabilité d'un maximum de résultats, sur un maximum de réplications possibles. Cette dernière exigence implique que nous ne pourrons pas disposer de résultats de simulation désagrégés (cf. section « contraintes techniques de simulation avec Mobisim »), mais d'une information synthétique (somme, indicateurs de distributions statistiques) des résultats une échelle agrégée.

Concernant les résultats à étudier, nous avons sélectionné un ensemble de variables dont l'analyse de la stabilité nous paraît pertinente. Comme tous les résultats ne sont pas dépendants directement d'un tirage aléatoire selon une distribution de probabilités, nous avons choisi de ne considérer que ceux qui en sont directement issus. Ont été ajoutés à ceux-ci des résultats plus généraux, résultats émergents du modèle, pour visualiser la stabilité à un niveau beaucoup plus agrégé.

Les résultats testés ont donc des rôles différents dans la simulation (résultat méthodologique intermédiaire ou résultat thématique final) et représentent différents niveaux d'agrégation : stabilité de résultats au niveau macro (c'est-à-dire pour tous les ménages) ou méso (différenciées par types de ménages). Le niveau micro n'est pas étudié, puisqu'il correspond à l'échelle de modélisation (modèle individu-centré). L'ensemble des variables choisies pour cette analyse est présenté dans le tableau 6.1.

Les analyses portent sur des valeurs de résultats de simulation très diverses, du résultat plus général qui est le nombre annuel de déménagements [1] (en bas du tableau 6.1), à des résultats très spécifiques comme l'intérêt maximal qu'un ménage peut

1. Cette valeur correspond à tous les changements de logement, quelque soit le lieu de départ et d'arrivée dans la communauté d'agglomération. Elle nous permet de calculer le taux annuel de migration.

Tableau 6.1 – Variables observées dans l'analyse de stabilité

Variable considérée	Résultat observé
Appréciations de l'environnement résidentiel global	3ème quartile des accessibilités au centre-ville (CV) en voiture
	3ème quartile des accessibilités aux zones d'emplois en voiture
	3ème quartile des accessibilités au centre-ville en transports en commun
	3ème quartile des accessibilités aux zones d'emplois en transports en communs (TC)
Coût des logements	3ème quartile des revenus des ménages
	Nombre de logements à coût faible
	Nombre de logements à coût moyen
	Nombre de logements à coût élevé
Satisfaction et intérêt résidentiels	Médiane des valeurs des satisfaction S
	Médiane des valeurs d'intérêt maximal $U_{(max)}$ pour une autre localisation
Intérêt global à déménager M	Médiane des valeurs d'attractivité connue v_J
	Médiane du nombre de logements attractifs nby
Mobilité résidentielle individuelle φ	Nombre de ménages de moins de 30 ans avec enfants
	Nombre de ménages de moins de 30 ans sans enfant
	Nombre de ménages 30-44 ans
	Nombre de ménages 45-59 ans
	Nombre de ménages de plus de 60 ans
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages de moins de 30 ans avec enfants
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages de moins de 30 ans sans enfant
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages 30-44 ans
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages 45-59 ans
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages de plus de 60 ans
Résultats finaux	Nombre de migrants internes aux communes périurbaines
	Nombre de migrants des communes périurbaines à Besançon
	Nombre de migrants de Besançon aux communes périurbaines
	Nombre de migrants intra-urbains
	Nombre de ménages préférant la voiture
	Nombre de ménages préférant les TC
	Nombre total de déménagements

manifester pour une autre localisation résidentielle que la sienne. Certains résultats, comme le nombre de logements dans chaque classe de coût, sont des valeurs uniques à chaque étape de simulation (ex. nombre de logements à coût faible) alors que d'autres sont, en revanche, spécifiques à chaque ménage (ex. une valeur par ménage, soit autant de valeurs que de ménages). C'est le cas de la satisfaction résidentielle, de l'intérêt

maximal [2] d'un ménage pour une localisation résidentielle ou du nombre de logements attractifs pour chaque ménage. Cela implique l'analyse non pas d'une valeur de résultat mais d'une distribution de valeurs pour l'ensemble des ménages. Nous choisissons d'en étudier la stabilité à travers la médiane seulement, conscients des limites que cela représente quant aux conclusions qui pourront être faites. La question sous-jacente est « est-ce que la valeur médiane de la distribution est stable entre les réplications ? ».

Les valeurs des 3$^{\text{ème}}$ quartiles des distributions d'accessibilités globales sont les seules appréciations simulées à évoluer au fil des itérations, et en connaître la variabilité permet de mieux apprécier leur impact sur les calculs de satisfaction ou d'utilité.

Le coût des logements est estimé à partir de deux variables : la taille des logements, et le voisinage social, représenté par le revenu médian dans un rayon de 200 mètres autour du logement (section 3.2.1). Par défaut, cette valeur du voisinage social est fixée au 3$^{\text{ème}}$ quartile de la distribution des revenus. C'est la variabilité de cette valeur qui nous intéresse ici.

La stabilité de l'intérêt global à déménager M est analysée à travers les valeurs des attractivités connues (v_J) de l'ensemble des ménages [3] puisque l'intérêt global à déménager dans le modèle est une appréciation de cette valeur *via* la fonction d'évaluation $A_H(v_J)$.

Les n_J logements « connus » par un ménage sont tirés au sort parmi les logements vacants attractifs (nby) de ce ménage, aussi avons-nous souhaité tester la stabilité globale de la distribution du nombre total de logements vacants attractifs (à travers, une fois encore, la valeur médiane de la distribution).

La variable φ, qui représente la mobilité résidentielle individuelle des ménages, est modélisée par une fonction logistique qui dépend des deux paramètres α et β, dont les valeurs sont fixes, et de la satisfaction résidentielle des ménages. Pour différencier les comportements des ménages en termes de mobilité résidentielle individuelle, nous

2. Chaque ménage évalue un intérêt par localisation résidentielle potentielle, ce qui lui confère une multitude de valeurs d'intérêts à chaque étape de simulation. Pour simplifier l'analyse, nous n'avons conservé parmi cette ensemble de valeur que la valeur maximale pour chaque ménage, c'est-à-dire la valeur de la localisation résidentielle qui présente l'intérêt le plus fort pour le ménage.

3. Comme pour les valeurs de satisfaction et d'intérêt résidentiels, ce résultat est spécifique à chaque ménage, et il en résulte une distribution de valeurs pour l'ensemble des ménages. Nous choisissons également la valeur médiane de cette distribution pour évaluer la stabilité de ce résultat.

avons identifié cinq classes de ménages dont la fonction logistique φ se singularise avec la valeur d'α. Nous étudions la stabilité de la variable φ à travers la variabilité de sa composante, à savoir la satisfaction des ménages de chacune des cinq classes. En complément de cela, sera également testée la stabilité des effectifs de population de chacune de ces classes, stabilité dont nous n'avons pas connaissance puisqu'aucune analyse n'a été conduite sur Mobisim-Démo.

Enfin, au nombre total annuel de déménagements s'ajoutent deux résultats : les nombres de ménages migrants selon le sens de migration [4] (résultat thématique final), et le nombre de ménages selon le mode de transport dominant (résultat émergent des simulations, puisque le mode de transport dominant dépend des comportements simulés dans le modèle de mobilités quotidiennes de Mobisim).

6.1.3 Un outil statistique unique fondé sur la variabilité

Il existe peu de littérature traitant du protocole à suivre pour conduire une analyse de stabilité. La stabilité renvoyant à la notion de variabilité entre les valeurs d'un même résultat, c'est sur celle-ci que nous avons construit notre démarche d'analyse.

Le protocole mis en place privilégie des analyses statistiques simples, en se référant aux notions de base de la statistique descriptive afin de produire des informations synthétiques. Malgré la diversité des résultats et des ordres de grandeur des valeurs dont la variabilité est à étudier, nous avons choisi un unique indicateur statistique pour établir des comparaisons de stabilité entre les variables.

Pour étudier la variabilité entre les valeurs de résultats de chaque réplication, nous avons utilisé le coefficient de variation qui paraît le plus pertinent car il met en relation la dispersion relative des valeurs considérées par rapport à la moyenne de leur distribution. Il correspond au rapport entre l'écart-type d'une distribution et sa moyenne : plus il est élevé, plus la dispersion autour de la moyenne d'une distribution statistique est importante, et donc plus la variabilité entre ses valeurs est élevée. Aucune valeur seuil du coefficient n'est spécifiquement désignée pour définir si une distribution doit

4. La communauté d'agglomération du Grand Besançon est composée d'une commune centre qu'est la ville de Besançon et de communes périurbaines. Pour cette analyse, nous regroupons les migrants selon quatre grandes catégories : les migrants allant de Besançon aux communes périurbaines, ceux allant des communes périurbaines à Besançon, les migrants intra-urbains, c'est-à-dire déménageant au sein de la ville de Besançon et enfin les ménages déménageant d'une commune périurbaine à une autre.

être considérée comme dispersée ou non, et il revient à l'utilisateur de définir lui-même son seuil de tolérance par rapport à son objet d'étude. Le coefficient de variation, exprimé en pourcentage, est donc notre indicateur de base pour l'analyse de stabilité de Mobisim-MR.

Le nombre de simulations à effectuer pour procéder à ces analyses doit permettre un compromis entre les contraintes techniques induites par le temps de calcul d'une simulation Mobisim et la nécessité d'un nombre de simulations suffisamment élevé pour être statistiquement valable. Ainsi, nous avons choisi d'effectuer l'analyse de stabilité du modèle des mobilités résidentielles de Mobisim sur les résultats de 100 simulations.

Synthèse technique de l'analyse de stabilité de Mobisim-MR

Les 100 simulations réalisées pour l'analyse de stabilité présentée dans le chapitre 6 ont été exécutées en continu - l'exécution des simulations est programmée *via* des files d'attentes - sur une durée de 3 jours.

L'ensemble des résultats de simulation nécessaires à l'analyse de stabilité (Tabl. 6.1) a été identifié avant d'exécuter les simulations, et leur enregistrement dans un fichier csv a été programmé dans le fichier xml des paramètres de simulation. Ce fichier comporte au total 140501 lignes, correspondant chacune à une valeur de résultat.

Ces analyses ont été conduites avec une version antérieure de Mobisim, légèrement différente de celle présentée dans le chapitre 3. La différence provient de l'ordre d'exécution entre les évaluations résidentielles et les évènements démographiques.

6.2 Objectif 1 : tester la variabilité des résultats sur 100 simulations.

Cet objectif peut être décomposé en deux points de vue :

1. L'étude de la dispersion entre les 100 valeurs de chaque résultat à temps T. Pour cela, seront considérées pour chaque résultat les valeurs du coefficient de variation de la première itération après la situation initiale (2011) et à la dernière étape de la simulation (2030). L'objet d'étude est ici l'ordre de grandeur des valeurs des coefficients.
2. L'évolution de la variabilité au fil des itérations. L'idée est d'évaluer non seulement les caractéristiques de l'évolution entre le début et la fin de la simulation (uniformité et régularité dans le temps), mais également l'amplitude de variation

entre les 100 valeurs de chacun des résultats à travers les différentes simulations. Cette dernière permettra de mieux rendre compte de la variabilité spécifique à chaque résultat, comparée au coefficient de variation qui se veut plus synthétique. Pour chaque variable, deux éléments graphiques permettent de répondre à ces besoins :

- la courbe représentant l'évolution du coefficient de variation au cours des 20 années de simulation ;
- l'évolution de la distribution des valeurs mêmes des résultats, à travers la construction de diagrammes en boîte ou boîtes à moustaches.

La combinaison de ces analyses fournit une information globale sur les amplitudes de variabilités que l'on peut observer pour chacune des grandes composantes du modèle pour les résultats finaux.

6.2.1 Axe 1 : variabilité en début et en fin de simulation

En 2012, la quasi totalité des coefficients de variation est inférieure à 1% de variation autour de la moyenne (Tableau 6.2). L'année 2012 correspond à la deuxième année de simulation dans Mobisim, et les situations initiales des simulations sont toutes identiques : la proximité de 2012 avec la situation initiale peut expliquer cette variabilité quasiment inexistante. Seuls les nombres de migrants selon le sens de migration (en bas du tableau) présentent une variabilité comprise entre 1 et 2,2% entre les 100 simulations.

En fin de simulation, la grande majorité des résultats en sortie présente un coefficient de variation inférieur à 6,4%. Parmi eux, la moitié des coefficients reste inférieure à 1% et les trois quarts sont inférieurs à 3% de variation autour de la moyenne, même après 20 années de simulation. Un seul résultat présente une plus grande variabilité entre les simulations en 2030 : la médiane du nombre de logements attractifs pour chaque ménage, qui présente un coefficient de variations de 12,1% (Tableau 6.2). Cette valeur, si elle se démarque nettement des autres, reste néanmoins suffisamment faible pour considérer que la variable est stable également. On peut en déduire que, à une échelle agrégée, l'instabilité relative de ce résultat de simulation n'influence pas la stabilité des autres résultats considérés dans cette analyse. Hormis ce résultat, les valeurs de variabilité les plus fortes concernent surtout des résultats finaux de simulation, comme les nombres de migrants selon le sens de migration, et non des variables intermédiaires.

TABLEAU 6.2 – Coefficients de variation entre les 100 simulations

Catégorie	Variable considérée	CoVa[1] 2012	CoVa[1] 2030
Appréciations de l'environnement résidentiel global	3ème quartile des accessibilités au CV en voiture	0,04	0,85
	3ème quartile des accessibilités aux zones d'emplois en voiture	0,06	1,71
	3ème quartile des accessibilités au CV en TC	0,00	0,41
	3ème quartile des accessibilités aux zones d'emplois en TC	0,00	0,39
Coût des logements	3ème quartile des revenus des ménages	0,18	0,42
	Nombre de logements à cout faible	0,54	0,71
	Nombre de logements à cout moyen	0,19	0,21
	Nombre de logements à cout élevé	0,17	0,23
Satisfaction et intérêt résidentiels	Médiane des valeurs des satisfaction S	0,05	0,53
	Médiane des valeurs d'intérêt maximal $U_{(max)}$ pour une autre localisation	0,11	0,32
Intérêt global à déménager M	Médiane des valeurs d'attractivité connue v_J	0,82	2,43
	Médiane du nombre de logements attractifs nby	0,05	**12,14**
Mobilité résidentielle individuelle φ	Nombre de ménages de moins de 30 ans avec enfants	0,66	4,93
	Nombre de ménages de moins de 30 ans sans enfant	0,45	1,17
	Nombre de ménages 30-44 ans	0,25	1,42
	Nombre de ménages 45-59 ans	0,14	0,39
	Nombre de ménages de plus de 60 ans	0,17	0,88
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages de moins de 30 ans avec enfant(s)	0,16	1,20
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages de moins de 30 ans sans enfant	0,17	1,50
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages 30-44 ans	0,13	1,24
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages 45-59 ans	0,05	1,09
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages de plus de 60 ans	0,07	0,87
Résultats finaux	Nombre de migrants internes aux communes périurbaines	2,18	5,60
	Nombre de migrants des communes périurbaines à Besançon	1,46	6,41
	Nombre de migrants de Besançon aux communes périurbaines	**2,21**	5,04
	Nombre de migrants intra-urbains	1,20	2,48
	Nombre de ménages préférant la voiture	0,19	0,73
	Nombre de ménages préférant les TC	0,16	0,40
	Nombre total de déménagements	0,59	1,88

[1] Coefficient de variation

6.2.2 Axe 2 : évolution de la variabilité

La double visualisation de l'évolution des coefficients de variation pour chaque résultat et de l'évolution des distributions de valeurs (Fig. 6.1) permet de combiner plusieurs

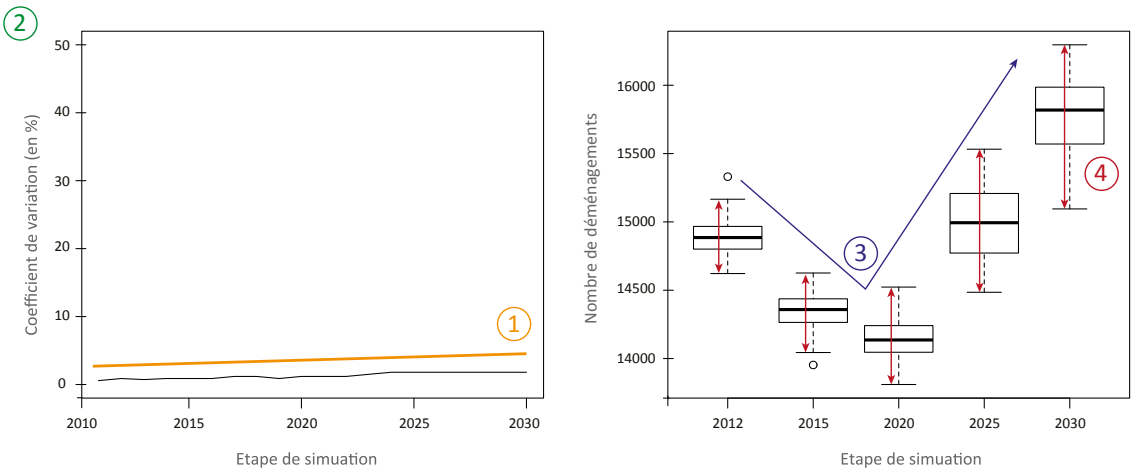


FIGURE 6.1 – Exemple de visualisation de résultats pour étudier l'évolution de la variabilité au fil des années de simulation

informations :

- l'évolution générale des coefficients de variations au fil des itérations (1) ;
- l'ordre de grandeur des valeurs de coefficients de variations (2), déjà étudiée dans l'analyse précédente ;
- la tendance générale de l'évolution des valeurs de la variable au fil des itérations (3) ;
- l'évolution des distributions de valeurs des différentes simulations, c'est-à-dire une homogénéisation ou dispersion des valeurs au sein des 100 simulations (4).

Ce qui nous intéresse particulièrement ici sont les points 1, 2 et 4 (sachant que 1 et 4 représentent la même information - la dispersion des 100 valeurs d'un résultat de simulation - mais avec une visualisation différente).

Premièrement, pour la totalité des variables, les variations entre les résultats des 100 simulations augmentent avec le temps, systématiquement, dans des proportions différentes selon les variables [5]. Les courbes du nombre de déménagements par année (Fig. 6.2) et de la médiane des satisfactions résidentielles (Fig. 6.3) l'illustrent bien. Dans les deux cas, la moitié de la simulation marque souvent une étape au-delà de laquelle la variabilité a tendance à augmenter. Le constat est assez net concernant la satisfaction résidentielle (Fig. 6.3), pour laquelle l'amplitude des boîtes à moustaches augmente à partir de 2020.

5. Seule une sélection de quelques résultats graphiques est présentée dans ce chapitre, les autres se trouvant dans les annexes.

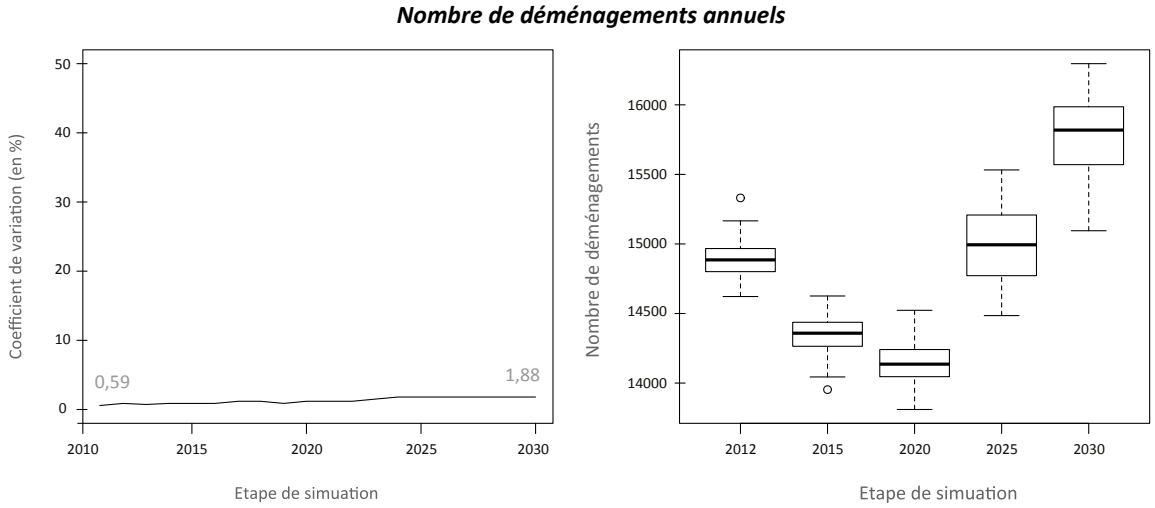


FIGURE 6.2 – Évolution de la stabilité du nombre de déménagements annuels

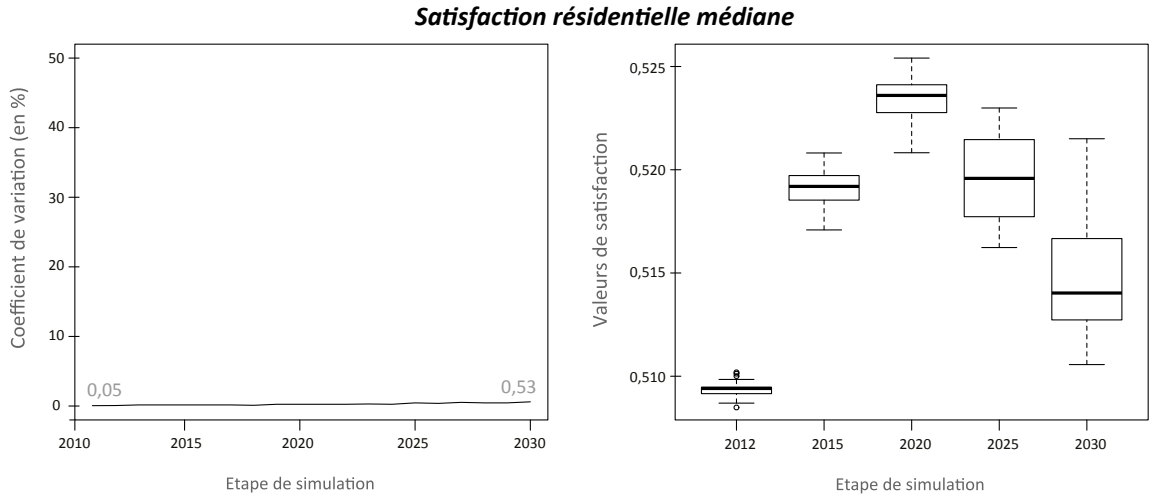


FIGURE 6.3 – Évolution de la stabilité de la médiane des satisfactions résidentielles

Les évolutions des variations entre les effectifs de migrants selon le sens de migration présentent des comportements discontinus au fil des itérations, avec des ruptures assez marquées. Cela est visible sur les courbes des coefficients de variation (Cf. (a), (c) et (e) sur la figure 6.4). Leurs valeurs étant plus élevées que pour l'ensemble des variables étudiées, les amplitudes des boîtes à moustaches deviennent particulièrement conséquentes avec les itérations (Cf. (d) et (f), fig. 6.4).

Les migrations résidentielles représentent l'aboutissement du processus de décision résidentielle, puisqu'elles sont un résultat final du modèle, en « bout de chaîne » du processus de simulation. Si un ménage est tiré au sort pour déménager (selon sa probabilité Ω), il emménage dans le meilleur logement des 30 (n_J) qu'il a évalué. Les flux de migrations représentés par ces effectifs de migrants selon le sens de migration dépendent donc de la localisation de ces 30 logements, qui sont aléatoirement sélectionnés

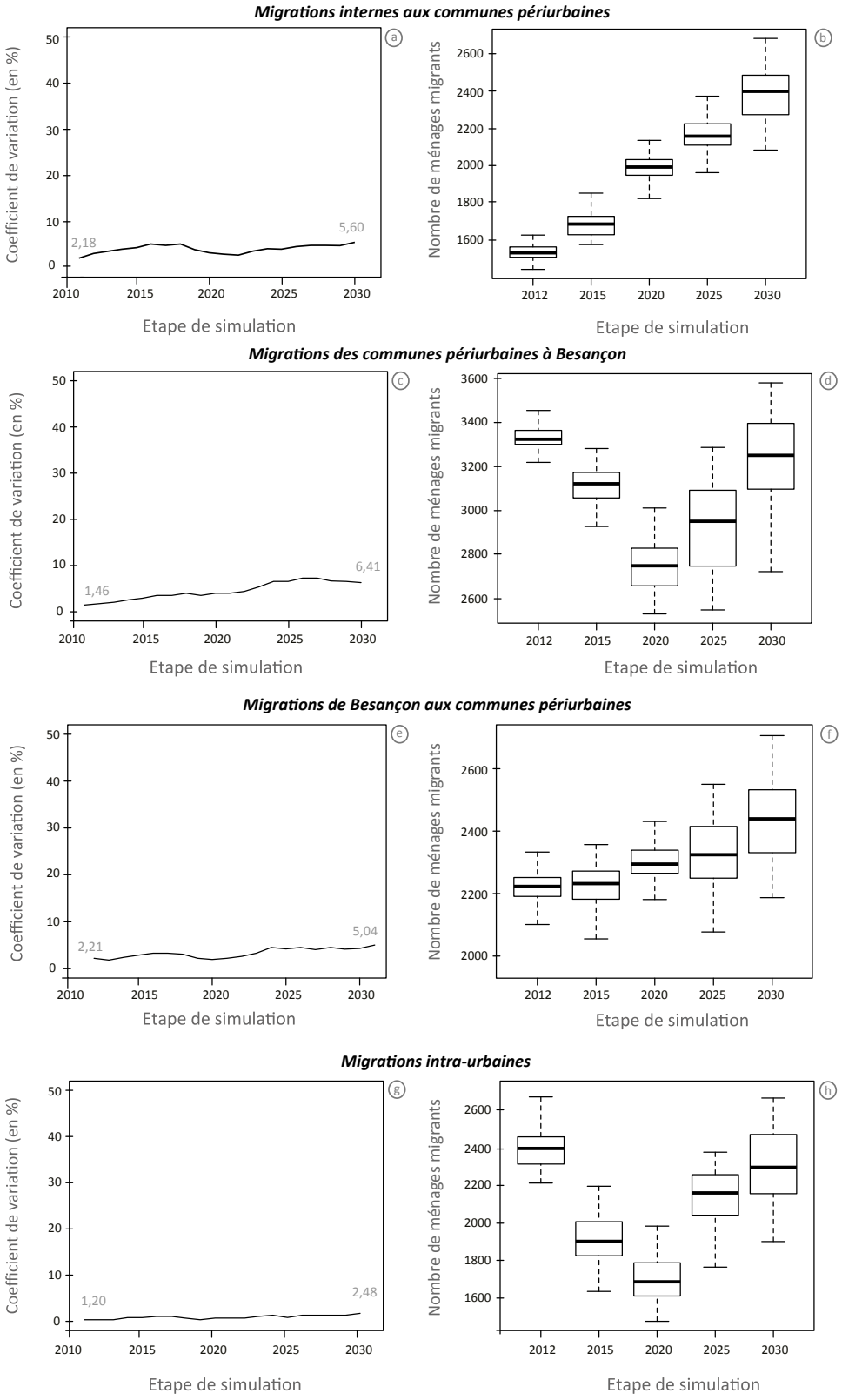


FIGURE 6.4 – Évolution de la stabilité du nombre de migrants selon le sens de migration

dans le modèle. Ce tirage peut expliquer pourquoi ces valeurs sont plus sujettes à la variabilité entre deux simulations que d'autres résultats.

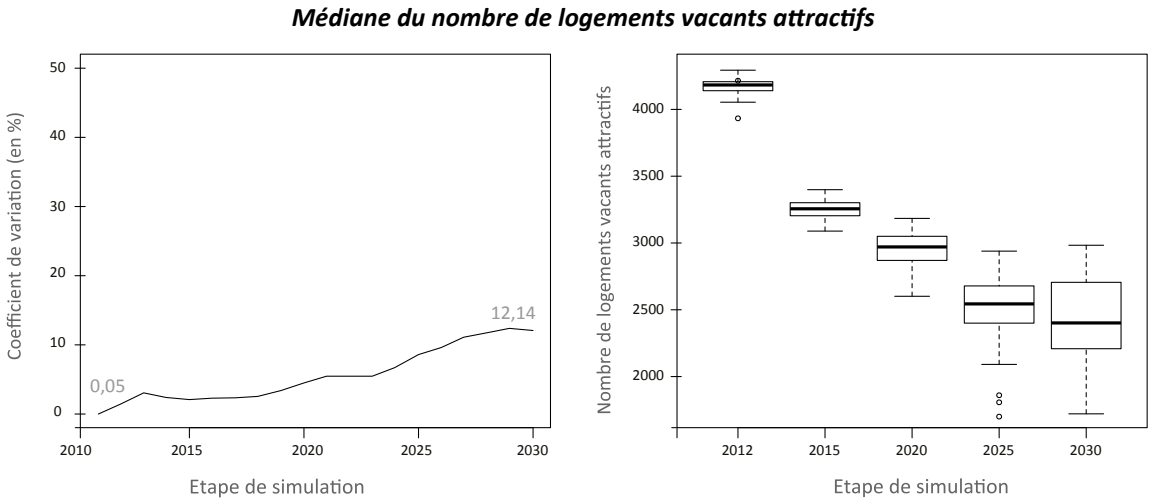


FIGURE 6.5 – Évolution de la stabilité du nombre de logements vacants attractifs

La plus forte variabilité est observée pour les valeurs médianes des distributions du nombre de logements vacants attractifs pour chaque ménage (Fig. 6.5). Les valeurs de coefficient de variation augmentent régulièrement pour dépasser les 10% de variation en 2030. Le nombre de logements vacants attractifs dépend de l'adéquation entre deux facteurs : les caractéristiques des ménages, et les caractéristiques des logements qui peuvent les accueillir. Le premier facteur résulte donc indirectement du modèle d'évolutions démographiques et le second, du module de simulation du développement résidentiel. Ainsi, considérer la stabilité de cette variable implique indirectement de questionner la stabilité de chacun des deux modules. L'attractivité d'un logement pour un ménage dépend également du logement dans lequel il réside, et cette localisation fluctue inévitablement entre les simulations. Enfin, la vacance des logements résulte des choix résidentiels effectués lors des itérations précédentes et, compte tenu du nombre de ménages (et donc du nombre de « choix » qui ont été effectués), il est logique que les écarts entre les simulations se creusent avec le temps de simulation.

Les accessibilités généralisées présentent toutes les quatre un comportement similaire : la variation entre les simulations croît lentement et régulièrement (Fig. 6.6 et 6.7). Il est néanmoins possible de distinguer un unique saut dans les valeurs de variabilité (toutes proportions gardées) entre la première et la deuxième itération. Nous pouvons supposer qu'il s'agît ici d'un ajustement entre l'initialisation des simulations et les quelques premières étapes qui suivent.

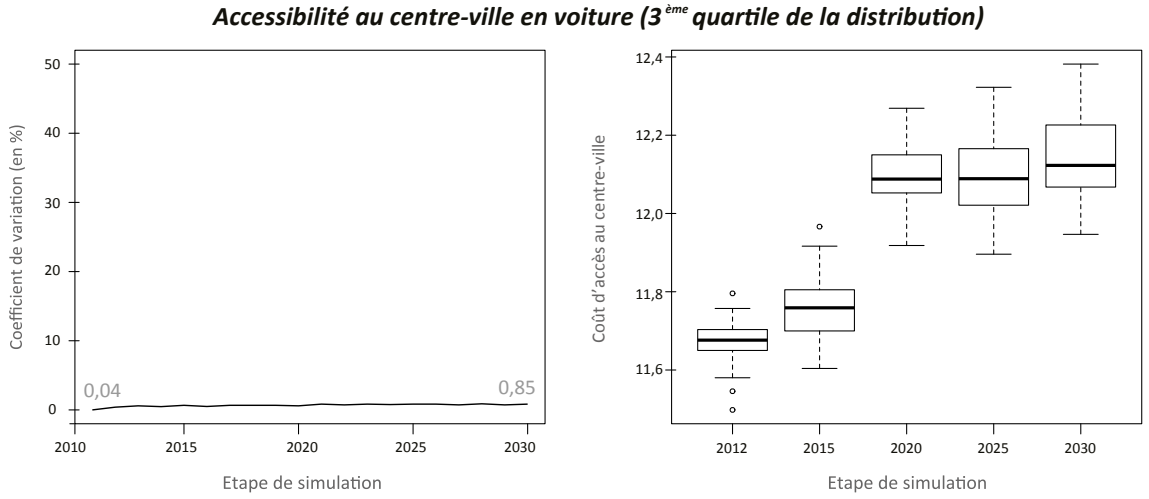


FIGURE 6.6 – Évolution de la stabilité de l'accessibilité au centre-ville en voiture

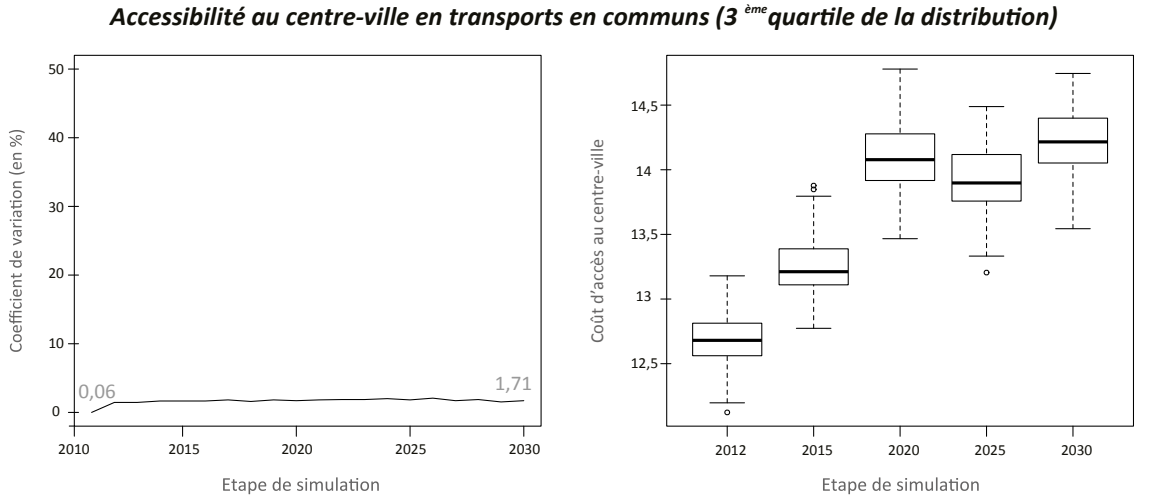


FIGURE 6.7 – Évolution de la stabilité de l'accessibilité au centre-ville en transports en commun

Les effectifs des ménages selon l'âge donnent une information non pas sur la stabilité des résultats du modèle résidentiel mais sur ceux du modèle des évolutions démographiques. Il est important de considérer la variabilité des effectifs des cinq classes de ménages utilisées pour calculer la mobilité individuelle φ. Les effectifs de chacun des types de ménages sont tous stables (Fig. 6.8 – cas des ménages dont la personne de référence a entre 30 et 44 ans), au regard de l'ensemble des variables du modèle.

Seuls les effectifs des ménages de moins de 30 ans avec enfant(s) présentent une variabilité davantage élevée en fin de simulation (Fig. 6.9). Celle-ci est plus visible sur la courbe que sur les boîtes à moustaches.

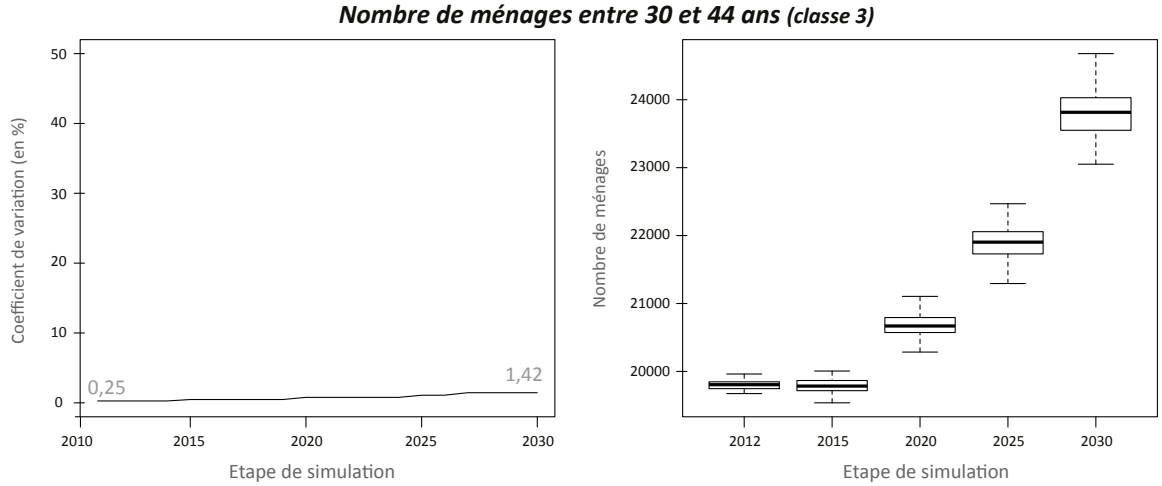


FIGURE 6.8 – Évolution de la stabilité du nombre de ménages entre 30 et 44 ans

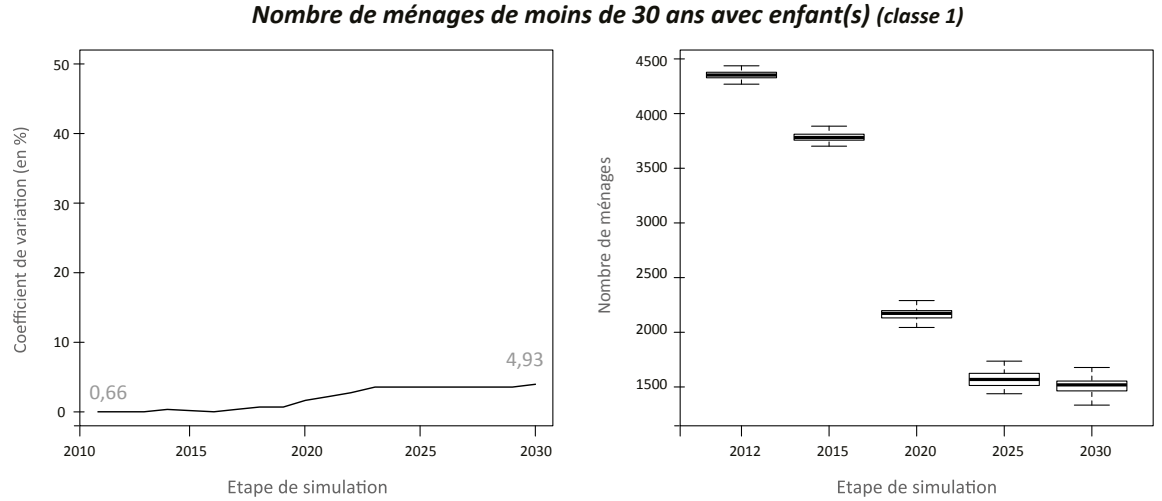


FIGURE 6.9 – Évolution de la stabilité du nombre de ménages de moins de 30 ans avec enfant

Si les valeurs mêmes de chaque résultat ne sont pas l'objet du chapitre, il est néanmoins intéressant de constater une baisse significative de l'effectif de ces ménages entre le début et la fin des simulations. Notre hypothèse est que ce résultat est une conséquence directe des taux de fécondité attribués aux femmes dans Mobisim-Démo. Pour reproduire les tendances actuelles (naissance du premier enfant de plus en plus tardive), ce taux est maximal autour de 29 ans, et entraîne donc une baisse régulière des couples avec enfant en-deçà de 30 ans au fil des itérations. Cette information, bien que parallèle à l'analyse de stabilité, est à souligner pour la suite de ce travail, notamment pour les analyses thématiques, puisque cette catégorie de ménage est la plus mobile d'après les données de migration Migcom (INSEE, 2008).

6.2.3 Bilan de la variabilité entre les 100 simulations

Les valeurs de coefficients de variations sont globalement basses voire insignifiantes, ce qui signifie une faible variabilité entre les valeurs des différents résultats issus des 100 simulations et traduit donc des comportements de variables qui sont globalement identiques entre les différentes réplications. En général, cette variabilité augmente faiblement au fil des itérations. Elle présente parfois des discontinuités de comportements, notamment à partir de la moitié de la période de simulation. Cette analyse atteste la stabilité générale des résultats du modèle, pour cet ensemble de 100 simulations et pour les paramètres définis par défaut.

6.3 Objectif 2 : définir un seuil de stabilité dans la variabilité

Techniquement, il n'est pas possible de procéder à des analyses des résultats de simulation de Mobisim à partir d'un échantillon de 100 simulations (temps de calculs longs, nombre d'*outputs* élevé), pour calculer les valeurs moyennes des résultats (cf. 6.1.1). La deuxième étape de l'analyse de stabilité consiste donc à savoir si le niveau de stabilité précédemment reconnu ne peut être obtenu qu'à partir de 100 simulations, ou bien si le modèle est suffisamment stable pour que l'utilisateur puisse se fier à des résultats issus d'un ensemble de simulations moins conséquent. En d'autres termes, cette étape consiste à identifier le nombre minimal de réplications nécessaires pour obtenir des résultats moyens qui soient stables.

6.3.1 Une démarche par l'échantillonage multiple

La démarche proposée consiste à tester la variabilité entre les valeurs de résultats issus d'échantillons de différentes tailles N, et à analyser visuellement l'évolution de cette variabilité au cours de la simulation. La figure 6.10 permet de décrire ce protocole : à partir des 100 simulations initiales, des tirages aléatoires en "*bootstrap*" ont été réalisés pour créer des échantillons de tailles différentes (étape 1). L'expérience a été reproduite 1000 fois pour chaque taille d'échantillon.

Au sein de chaque échantillon, la mesure de variabilité entre les N valeurs de résultats est toujours le coefficient de variation (étape 2). Étant données les 1000 réplications pour chaque taille N d'échantillon, les résultats à interpréter ne seront pas une valeur

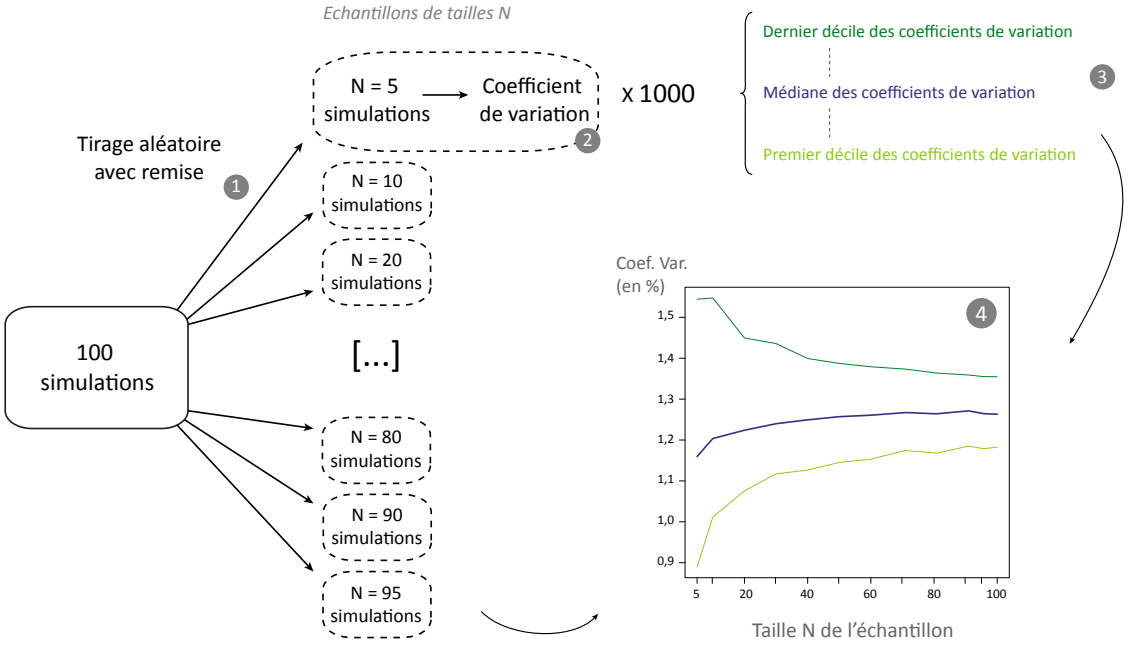


FIGURE 6.10 – Échantillonnage systématique des simulations pour définir le seuil de stabilité des résultats du modèle

unique mais une distribution de 1000 coefficients de variations, dont les indicateurs retenus sont la médiane, encadrée des premiers et derniers déciles (étape 3). Nous comparons donc l'évolution des valeurs de ces indicateurs à mesure que la taille de l'échantillon augmente (étape 4). L'objectif est d'identifier du seuil dans la taille de l'échantillon au-delà duquel l'ajout de simulations n'améliore pas significativement la stabilité des moyennes calculées.

Les tailles d'échantillons N varient par dizaines de 10 à 90, en ajoutant deux tailles d'échantillons supplémentaires de 5 et de 95 simulations, soit un total de 11 tailles d'échantillons testées. Afin de maintenir une certaine diversité dans la composition des échantillons, nous autorisons la sélection multiple d'une simulation dans un même échantillon. Ce choix a été conditionné par les échantillons dont la taille approche 100 : plus l'échantillon est grand, moins il est possible d'en faire varier la composition sur les 1000 tirages. Autoriser la sélection multiple permet de démultiplier les combinaisons de groupes de simulations au sein d'un même échantillon, et donc de ne pas biaiser nos résultats de coefficients de variations. [6]

6. Sélectionner aléatoirement 1000 fois 95 simulations dans un ensemble de 100 simulations sans remise (i.e. une simulation peut être sélectionnée plusieurs fois) conduit assez rapidement à considérer plusieurs fois un échantillon composé strictement des mêmes simulations, et donc une même valeur de coefficient de variation. Ainsi, à mesure que la taille d'échantillon augmenterait, les valeurs des indicateurs convergeraient vers une même valeur, ce qui n'apporterait rien à notre analyse.

6.3.2 Des résultat unanimes : un seuil unique pour l'ensemble des résultats

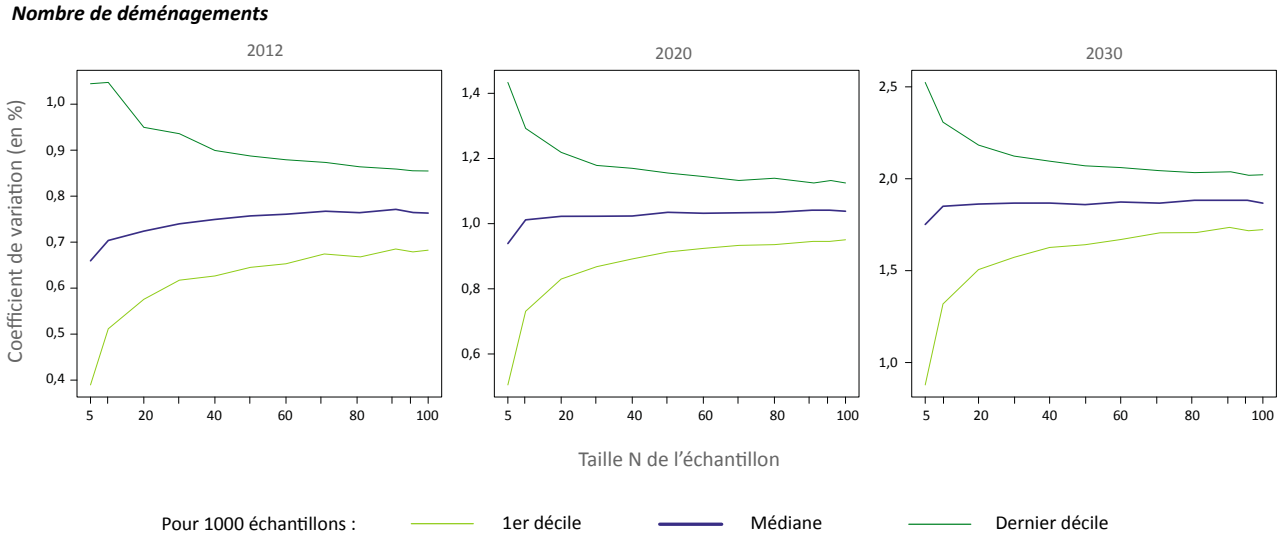


FIGURE 6.11 – Evolution des valeurs de coefficients de variation entre les 1000 échantillons selon la taille de l'échantillon - Nombre de déménagements.
NB. Les échelles des ordonnées sont différentes sur les trois graphiques.

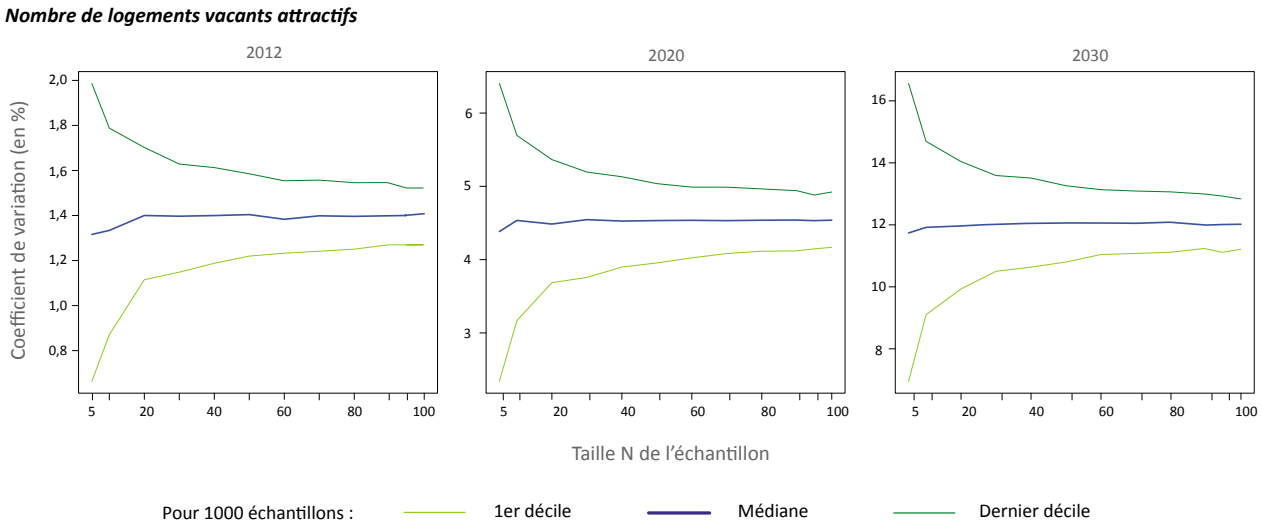


FIGURE 6.12 – Evolution des valeurs de coefficients de variation entre les 1000 échantillons selon la taille de l'échantillon - Nombre de logements vacants attractifs
NB. Les échelles des ordonnées sont différentes sur les trois graphiques.

Les résultats sont unanimes pour l'ensemble des variables considérées : les distributions des coefficients de variation s'homogénéisent à mesure que la taille de l'échantillon augmente, et ce à plus forte raison à partir des échantillons de taille N = 50 simulations. Les figures 6.11 et 6.12 illustrent ce constat, concernant le nombre total de déménagements et le nombre de logements vacants attractifs. On voit en effet les valeurs des

premiers déciles et derniers déciles converger vers la valeur médiane des 1000 coefficients de variation. Les différences de variabilité entre deux tailles d'échantillons s'amenuisent à mesure que celles-ci augmentent. Bien que toujours en diminution, le gain de stabilité entre deux tailles d'échantillons devient faible à partir de 30 simulations et anecdotique au-delà de 50. Nous pourrions donc situer le seuil de stabilité pour le calcul d'un résultat moyen aux alentours de 30 réplications [7].

Si ce seuil apparaît comme un bon compromis, il reste encore contraignant compte tenu des temps de simulation avec Mobisim. Répliquer 30 fois un scénario pour chaque étude ou analyse nous paraît encore très couteux en temps de calcul [8]. Cependant, on peut voir sur les figures 6.11 et 6.12 que la variabilité entre les résultats de simulation au sein d'un échantillon de petite taille (i.e. inférieure à 30 simulations), bien qu'améliorable, est déjà similaire à celle observée pour les 100 simulations initiales. Le rapport entre les valeurs de médiane pour 10 simulations et 100 simulations ne sont pas si différents. Cela est valable pour l'ensemble des résultats (cf. Annexes).

Ces résultats attestent donc une variabilité acceptable entre les valeurs des résultats de simulation au sein de petits échantillons. Sur la figure 6.11, on peut voir qu'en 2012, les valeurs de coefficients de variation entre cinq simulations sont comprises entre 0,4 et 1% de variation, et entre 0,9 et 2% en 2030. Pour le nombre de logements attractifs, l'amplitude de variation entre les cinq simulations est un peu plus grande en 2030 - entre 8 et 16% de variation selon les simulations, mais elle reste mesurée. Ainsi, bien que cette solution ne soit pas optimale, il est possible de se fier à un résultat issu d'échantillons plus restreints ; 10 simulations nous paraissent être un bon compromis entre la considération explicite de la variabilité intrinsèque du modèle et un temps total raisonnable d'exécution des simulations (11h de temps de calcul en tout, selon les conditions énoncées précédemment).

6.4 Conclusion : des résultats stables

Les valeurs de coefficients de variation entre les simulations sont suffisamment faibles pour que l'on considère que le modèle est stable. Compte tenu des interactions avec les autres modules de la plateforme Mobisim avec le modèle Mobisim-MR, cette stabilité du modèle des mobilités résidentielles peut permettre d'extrapoler une stabilité plus

7. Ce seuil rappelle par ailleurs la valeur du seuil statistique considéré pour qualifier qu'un échantillon statistique est suffisamment grand pour être considéré comme fiable.

8. Le temps d'exécution pour 30 simulations est de 25h en faisant fonctionner simultanément des machines de 12 et 16 cœurs (quatre simulations peuvent être exécutées en simultané sur le serveur de calcul de 12 cœurs et deux sur celui de 16 cœurs.)

générale de l'ensemble des modèles en interaction [9].

Il est important de garder à l'esprit que la stabilité résultant de cette analyse dépend bien sûr des 100 simulations calculées spécifiquement mais surtout de la configuration des paramètres définie par défaut. Il ne faut donc pas exclure qu'elle soit différente avec d'autres valeurs de paramètres.

Concernant la taille de l'échantillon nécessaire pour obtenir des résultats moyens fiables, un seuil de stabilité semble se dessiner à partir de 30 simulations. Compte tenu du grand nombre de calculs à effectuer pour les analyses à conduire dans la suite de ce travail (notamment pour l'analyse de sensibilité) et des contraintes techniques précédemment évoquées, ces effectifs sont encore trop ambitieux. Étant données les faibles valeurs de variation dès les plus petites tailles d'échantillons, il est tout à fait possible de se contenter de quelques simulations seulement pour la production de résultats thématiques fiables. Ainsi, le rapport entre le nombre de simulations et la fiabilité des résultats moyens plaide en faveur de l'utilisation d'un nombre restreint de simulations, 10 dans notre cas, pour calculer des résultats moyens suffisamment fiables.

9. Cela n'est qu'une supposition, et n'exclut pas la nécessité de procéder aux mêmes types d'analyses pour les autres modèles pour la confirmer.

Chapitre 7

Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité d'un modèle renvoie à l'exploration de la relation entre les différents composants d'un modèle et les résultats obtenus en sortie du simulation (*outputs*) (Saltelli *et al.*, 2000; Monod *et al.*, 2006; Richiardi *et al.*, 2006; Schouten *et al.*, 2014). Parmi les composants du modèle, on identifie les données d'entrée (*inputs*) et la formalisation des variables du modèle. Le terme d'*inputs* est à comprendre au sens large, à savoir toutes les valeurs qui participent à la simulation d'un processus : il s'agit donc aussi bien des conditions initiales de la simulation (Gilbert et Terna, 2000; Ginot et Monod, 2007) (ex. nombre d'habitants, nombre de logements, configuration initiale de la vacance) que des valeurs attribuées aux différents paramètres (ex. appréciations, importances, nombre de logements connus). La formalisation renvoie aux équations, aux choix mathématiques qui ont été faits pour représenter les différents processus modélisés (ex. une somme, une multiplication, une variable discrète ou floue) et aux variables intermédiaires qui sont calculées. L'objectif de l'analyse de sensibilité est d'identifier et de comprendre l'impact de chacun des composants, individuellement et dans leurs interactions les uns avec les autres, sur les résultats de la simulation.

Deux caractéristiques, intrinsèques à ces composants, constituent le socle des analyses de sensibilité : l'incertitude et la variabilité (Monod *et al.*, 2006). L'incertitude peut être liée à la structure du modèle (équations), aux données d'entrée (situation initiale) ou aux valeurs de paramètres (Klepper, 1997; Monod *et al.*, 2006). Elle provient généralement d'un manque de connaissance ou d'information (Cariboni *et al.*, 2007), qui contraint à estimer des valeurs de paramètres à partir de données imprécises, ou à hésiter entre deux opérateurs mathématiques pour représenter au mieux un processus. La variabilité renvoie quant à elle plus précisément à la stochasticité induite par les choix de la formalisation (ex. formalisation probabiliste ou émergences à partir

d'interactions individu-centrées), et à son impact sur les valeurs de résultat, à savoir une variation entre les *outputs* de deux simulations issues d'une même configuration d'*inputs* (Schmitt *et al.*, à paraître).

Pour interpréter convenablement les résultats de simulation, il est indispensable d'identifier et d'évaluer les effets de ces incertitudes et de cette variabilité sur les *outputs* du modèle (Cariboni *et al.*, 2007). Procéder à une analyse de sensibilité est un moyen parmi d'autres (Refsgaard *et al.*, 2007; Schouten *et al.*, 2014) pour caractériser et évaluer ces incertitudes dans les *outputs* d'un modèle ; l'analyse de stabilité, focalisée sur la variabilité, en est un autre. Inversement, l'analyse de l'incertitude n'est qu'une partie de l'analyse de sensibilité. La définition de (Crosetto *et al.*, 2000) permet de résumer les nuances qui les distinguent : *"Uncertainty analysis allows to assess the uncertainty associated with the model response as a result of uncertainties in the model input. Sensitivity analysis studies how the variation in the model output can be apportioned to different sources of variations and how the given model depends upon the information fed into it."*

Concrètement, la sensibilité d'un modèle s'étudie à travers la réaction des *outputs* aux différentes sources de variations dans le modèle (Kleijnen, 1999; Crosetto *et al.*, 2000; Evans et Unsworth, 2012; Barros, 2012) : valeurs des *inputs*, choix dans la formalisation des processus (ex. une somme ou une multiplication). Les questions sous-jacentes sont les suivantes : les valeurs des résultats de simulation changent-elles lorsqu'un ou plusieurs *inputs* varient (Happe, 2005), et si oui, dans quelle mesure ? Ces variations sont-elles régulières dans le temps ? L'analyse de sensibilité permet à ce titre d'approfondir la connaissance d'un modèle.

En améliorant la connaissance sur le fonctionnement d'un modèle, l'analyse de sensibilité permet de :

- simplifier le modèle : en étudiant l'impact des différents composants du modèle, elle permet de classer et quantifier l'importance relative de chacun dans la simulation d'un processus [1], et d'alléger si besoin la structure du modèle (Cariboni *et al.*, 2007; Ngo et See, 2012) ;
- aider au calibrage, par l'exploration des espaces de valeurs atteints selon les valeurs de paramètres testées (Crosetto *et al.*, 2000; Richiardi *et al.*, 2006; Barros, 2012) ;
- déterminer les amplitudes de variations et des intervalles de confiance des valeurs

1. On parle aussi de la contribution d'un paramètre au modèle.

de résultats selon les amplitudes de variation des valeurs de paramètres (Monod *et al.*, 2006; Schouten *et al.*, 2014) ;
– identifier les zones de transition dans les résultats selon les variations des valeurs de paramètres : les modèles complexes avec des dynamiques non-linéaires peuvent connaître subitement des zones de transition abruptes très localisées correspondant à des combinaisons des valeurs de paramètres précises. Ces changements radicaux ne peuvent être mis en avant que par une exploration approfondie du comportement du modèle, à travers l'ensemble des variations possibles des valeurs de paramètres (Cariboni *et al.*, 2007; Schouten *et al.*, 2014).

Seule l'incertitude liée aux valeurs de paramètres est étudiée dans l'analyse de sensibilité de Mobisim-MR. L'incertitude liée à la formalisation [2] a été étudiée dans le chapitre précédent *via* l'analyse de stabilité, et celle liée aux conditions initiales ne fera pas l'objet d'exploration dans ce travail. Ainsi, parmi les quatre objectifs précédemment décrits, seuls deux constitueront l'armature de notre travail : l'aide au calibrage et l'évaluation de la sensibilité des résultats (i.e. l'amplitude des valeurs prises par les résultats) selon différentes valeurs testées pour les paramètres.

7.1 Conduire une analyse de sensibilité pour Mobisim-MR : objectifs, approches et mise en œuvre

7.1.1 Méthodes d'analyse de la sensibilité

7.1.1.1 Approches d'analyses

Les nombreux objectifs et motivations d'une analyse de sensibilité ont conduit les chercheurs à proposer plusieurs approches. Il est possible d'en distinguer quatre, opposées deux à deux : les approches quantitatives et qualitatives, et les approches locales et globales.

Est considérée comme quantitative toute analyse impliquant une quantification de la variance induite par chaque valeur testée des paramètres dans les valeurs de résultats en sortie du modèle (Cariboni *et al.*, 2007; Campolongo *et al.*, 2011), information que ne donne pas l'approche qualitative. Il est également possible de déterminer des seuils de fiabilité ou intervalles de confiance des valeurs de résultats de simulation selon les

2. Pour une certaine configuration de valeurs des paramètres.

valeurs de paramètres testées. L'approche qualitative ne représente en revanche que graphiquement la sensibilité de chacun des tests. Le graphique met fréquemment en relation les valeurs d'un résultat de simulation selon les différents tests réalisés (Laperrière *et al.*, 2009; Schouten *et al.*, 2014).

La distinction entre les approches locales et globales se fait sur le nombre de paramètres considérés simultanément dans chaque test. La sensibilité locale étudie les réponses du modèle face aux variations de valeurs d'un facteur à la fois, toutes choses égales par ailleurs (Laperrière *et al.*, 2009; Confalonieri *et al.*, 2010; Schouten *et al.*, 2014). Elle se focalise donc sur les impacts de chacun des paramètres ou *inputs*, indépendamment les uns des autres, sur les résultats en sortie du modèle (Monod *et al.*, 2006). Sa particularité est de ne pas considérer les interactions entre les différents facteurs du modèle, ce qui lui est vaut d'être déconseillée pour les modèles non-linéaires [3]. Les analyses locales ne testent qu'une modification de valeur de paramètre à la fois (Fig. 7.1) ; la technique utilisée est donc radiale et la méthode est couramment nommée *"one-at-a-time"*, ou OAT, dans la littérature. Les analyses locales sont souvent plus rapides à réaliser, et elles permettent de comparer l'impact direct de chacun des *inputs* sur un résultat (Schouten *et al.*, 2014).

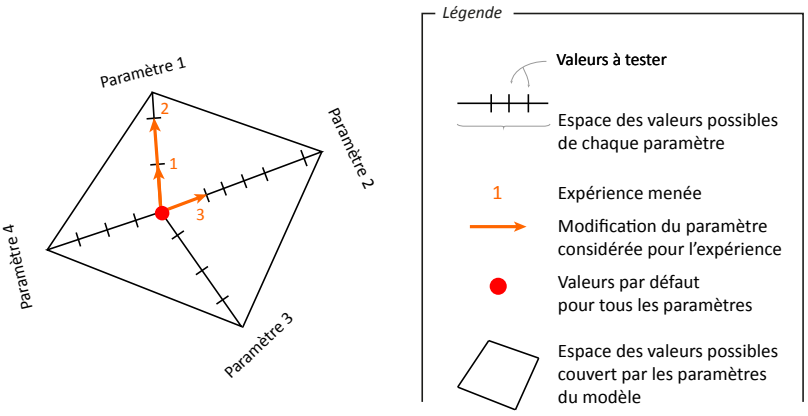


FIGURE 7.1 – Raisonnement suivi pour l'analyse de sensibilité "one-at-a-time"

La sensibilité globale, par opposition, se veut plus complète en étudiant le plus grand espace possible de valeurs couvert par les résultats de simulation, via des combinaisons de variations des facteurs (Hamby, 1994). Les valeurs de paramètres ne sont plus modifiées une par une mais simultanément, ce qui permet d'étudier l'impact des interactions entre valeurs d'*inputs*, ainsi que d'identifier d'éventuels comportements locaux [4], ne se produisant que dans une combinaison de valeurs de paramètres bien

3. Elles ne sont en tout cas pas appropriées pour l'identification des zones de transitions, puisqu'elles ne permettent pas l'exploration globale des comportements du modèle

4. i.e. les zones de transition comme la stabilité ou l'emballement du système par exemple

spécifique (Schmitt *et al.*, à paraître ; Schouten *et al.*, 2014). Différentes configurations des valeurs de paramètres sont donc testées, de manière exhaustive ou par échantillonnage sur l'ensemble des configurations possibles. La plupart des auteurs valorisent cette approche, spécialement pour les systèmes non-linéaires, puisqu'elle permet une analyse plus complète des comportements des modèles (Saltelli *et al.*, 2000; Monod *et al.*, 2006; Richiardi *et al.*, 2006). L'autre atout des analyses globales est qu'elles permettent de mesurer quantitativement l'importance relative de chaque *input* dans les résultats du modèle, à travers leurs interactions.

7.1.1.2 Méthodes

De ces distinctions découlent plusieurs méthodes d'analyses. La méthode OAT en analyse locale permet d'évaluer l'impact de chaque paramètre individuellement sur les résultats du modèle. La mesure quantitative associée est appelée indice (ou coefficient) de sensibilité locale. Ce dernier calcule la dérivée partielle d'un résultat de simulation dans l'intervalle de variation des valeurs du paramètre. Il peut s'apparenter à un taux d'évolution des valeurs du résultat entre deux valeurs de paramètres (Hamby, 1994).

Différentes méthodes existent pour les analyses de sensibilité globales ; il est possible de les grouper en 3 grandes familles (Confalonieri *et al.*, 2010) :

- Les méthodes basées sur l'analyse de la variance (*"Variance based methods"*), parmi lesquelles les méthodes FAST ou Sobol sont les plus couramment utilisées. Elles sont décrites comme étant les plus performantes, puisqu'elles permettent de décomposer quantitativement la variance totale des résultats selon l'impact de chaque paramètre, individuellement et en interaction, et donc de classer les paramètres selon leur contribution au modèle (Cariboni *et al.*, 2007; Confalonieri *et al.*, 2010). Elle est malgré tout déconseillée pour les modèles composés de nombreux facteurs en raison d'un temps de calcul trop coûteux (Cariboni *et al.*, 2007) ;

- Les méthodes basées sur l'analyse de régression (*"Regression-based methods"*), systématiquement précédée d'un échantillonnage des valeurs à tester (Schouten *et al.*, 2014) : l'idée sous-jacente est de tirer aléatoirement un échantillon de différentes configurations de valeurs de paramètres du modèle, d'en calculer les résultats correspondants et de trouver une régression entre les valeurs d'entrée et les résultats en sortie permettant d'en identifier la relation. La création d'un méta-modèle, plus simple, à partir des résultats de simulation (Happe, 2005) permet

d'approfondir le comportement des paramètres, l'objectif étant d'expliquer la plus grande part possible de la variance (Klepper, 1997; Schouten *et al.*, 2014) ;

– Les méthodes de *screening* dont la méthode dite des *"Elementary Effects"* (par opposition aux *"individuals effects"* de l'analyse OAT), développée par Morris (1991) puis améliorée par Compolongo et al. (2007), est la plus fréquemment utilisée. Proche de l'analyse OAT, elle permet de tester plusieurs valeurs de paramètres simultanément, en les faisant varier un par un aléatoirement (Fig. 7.2). La sensibilité est quantifiée à travers deux mesures : μ pour l'importance générale de chaque facteur sur le résultat du modèle, et σ pour les interactions avec les autres facteurs (Campolongo *et al.*, 2007).

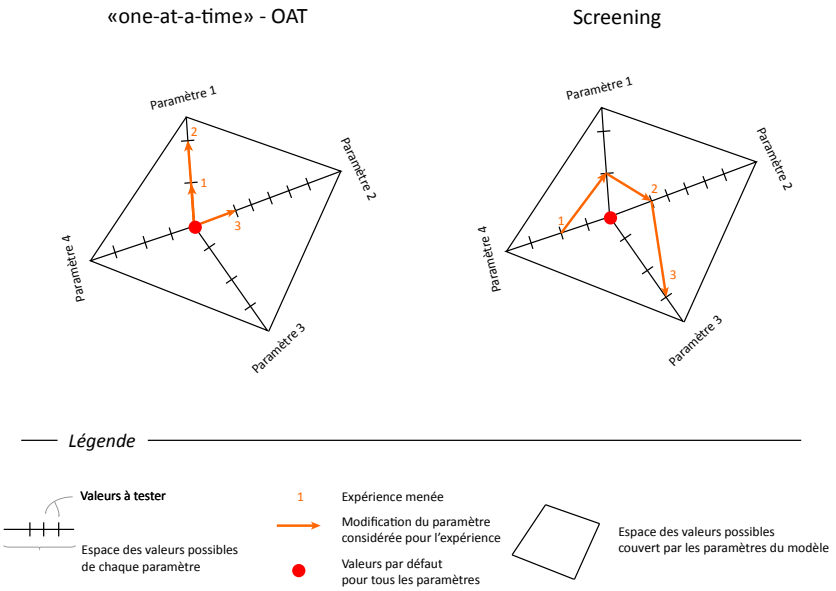


FIGURE 7.2 – Comparaison des méthodes OAT et Elementary Effects

La méthode de *screening* est souvent utilisée lorsque les modèles sont « volumineux », c'est-à-dire composés d'un grand nombre d'*inputs* ou de paramètres, parce qu'elle permet d'obtenir rapidement une connaissance globale sur l'espace des résultats en sortie du modèle, tout en restant raisonnable en temps de calcul (Saltelli *et al.*, 2000; Campolongo *et al.*, 2011). Elle se substitue aux autres analyses globales dans sa capacité à étudier les interactions entre les *inputs*, et à classer les paramètres selon leur importance relative dans la sensibilité des résultats ; néanmoins, elle ne permet pas de décomposer la variance des résultats selon les paramètres (Cariboni *et al.*, 2007).

7.1.1.3 Échantillonnage

Lorsque les modèles comportent un nombre d'*inputs* trop élevé, les analyses de variance ou les régressions nécessitent un échantillonnage des valeurs à tester (Kleijnen, 1999; Plischke *et al.*, 2013). En effet, étudier l'ensemble des valeurs possibles pour chaque facteur d'un modèle sur tous les résultats calculés peut vite devenir exponentiel, et difficilement maîtrisable (Hamby, 1994; Klepper, 1997). Pour reprendre les termes de Klepper (1997), cela reviendrait à considérer une matrice de valeurs de la dimension suivante : nombre de paramètres × nombre d'itérations × nombre de variables en sortie × nombre de possibilités de conditions initiales.

Là encore, deux grandes méthodes sont utilisées : les échantillonnages statistiques ou les plans d'expérience. L'échantillonnage aléatoire de Monte-Carlo est le plus fréquemment cité dans les travaux (Cariboni *et al.*, 2007; Plischke *et al.*, 2013; Schouten *et al.*, 2014) ; il permet de tirer aléatoirement des combinaisons de valeurs de paramètres, dans les intervalles ou distributions connus. La méthode des *"Latin Hypercube Sampling"* (LHS) ou le *Quasi-Random LpTau* sont également proposés.

Les plans d'expérience peuvent être complets [5] ou partiels. Les plans d'expérience les plus restrictifs ne considérent, outre la valeur centrale ou par défaut, que les valeurs minimales et maximales possibles pour chaque paramètre (Happe, 2005; Schouten *et al.*, 2014), tandis que d'autres considèrent des intervalles réguliers autour de la valeur par défaut (Hamby, 1994), comme l'écart-type lorsque la distribution des valeurs possibles est connue.

7.1.1.4 Bilan des méthodes d'analyse de sensibilité

Le choix de l'approche et de la méthode n'est ni évident, ni systématique. Il revient au modélisateur et dépend souvent, outre les objectifs qu'il souhaite atteindre, des moyens techniques dont il dispose, les méthodes qualitatives ou locales étant les moins chronophages (Cariboni *et al.*, 2007). Les méthodes les plus complètes sont souvent très coûteuses en temps de calculs, et ce d'autant plus que le modèle comporte un nombre élevé de facteurs (Cariboni *et al.*, 2007). Ainsi, chaque méthode présente des forces et des faiblesses et il est souvent conseillé d'en utiliser plusieurs en parallèle pour garantir une analyse complète et rigoureuse (Schouten *et al.*, 2014).

5. Faire varier tous les niveaux des facteurs, toutes les valeurs des paramètres simultanément. L'exploration des combinaisons de valeurs des paramètres est donc exhaustive, mais ils ne sont pas optimaux pour les modèles composés de nombreux facteurs (Hamby, 1994; Happe, 2005; Ginot *et al.*, 2006; Ngo et See, 2012; Reuillon *et al.*, 2012)

Le principal reproche qui est fait à l'analyse locale (OAT) est de ne pas permettre la détection des interactions entre les facteurs et donc de les exclure de la sensibilité du modèle (Kleijnen, 1999; Manson, 2003; Happe, 2005; Cariboni *et al.*, 2007; Campolongo *et al.*, 2007; Saltelli et Annoni, 2010; Campolongo *et al.*, 2011). Kleijnen (1999), Saltelli et Annoni (2010) et Monod et al. (2006) déconseillent même son utilisation pour des modèles non-linéaires, en préconisant d'utiliser plutôt la méthode des *elementary effects* de Morris, pour un temps de calcul similaire.

Cependant, d'autres auteurs, tout en reconnaissant ses limites, soulignent l'importance de ne pas la négliger. Elle se révèle tout à fait utile en amont d'une analyse plus globale (Hamby, 1994; Monod *et al.*, 2006), puisqu'elle permet de dresser un « profil de réponses » du modèle, en ciblant des points de paramètres bien spécifiques. Par sa simplicité d'exécution, ce profil peut être dressé pour chaque étape de la simulation, permettant ainsi une évaluation continue d'une sensibilité des résultats de simulation imputable à chaque paramètre. Ces qualités se révèlent utiles pour la configuration d'une analyse plus globale. Ainsi, si l'analyse globale paraît incontestablement la plus performante pour étudier rigoureusement la sensibilité d'un modèle, et plus particulièrement d'un modèle aux dynamiques non-linéaires, certains auteurs soulignent néanmoins la complémentarité des deux approches (Ginot et Monod, 2007), l'analyse locale permettant de préparer le protocole de l'analyse globale.

7.1.2 L'analyse de sensibilité de Mobisim-MR : choix méthodologiques

7.1.2.1 Objectifs et méthode choisie

Nous rappelons que l'analyse de sensibilité de Mobisim-MR ici présentée se focalise sur l'impact des valeurs de paramètres sur les valeurs d'*outputs* du modèle, les autres sources de variation n'étant pas considérées dans ce travail.

Son objectif est double :

1. Évaluer la sensibilité de différents résultats du modèle aux principaux paramètres pour mieux connaître son fonctionnement. C'est une exploration *a posteriori* des résultats : quels sont les résultats de simulation du modèle lorsque la configuration des paramètres est modifiée ?
2. Explorer localement la réponse du modèle à certaines valeurs de paramètres, identifiées à l'avance, pour préparer un éventuel travail de calibrage.

Ces deux objectifs peuvent être conduits simultanément. Le premier renvoie à l'objet de l'analyse de sensibilité qui est d'approfondir la connaissance sur le comportement du modèle : faire varier plusieurs valeurs de paramètres, plus ou moins proches de la valeur par défaut, pour explorer la relation entre ces derniers et les résultats du modèle. Le second précise le premier, puisqu'il implique de mieux cibler des valeurs *a priori* pertinentes pour les paramètres nécessitant d'être calibrés, et d'en étudier la réponse sur les résultats. Cette analyse permet de mieux cerner par quelles valeurs de ces paramètres certains objectifs définis lors du paramétrage peuvent être atteints.

Le modèle MR de Mobisim est composé d'un grand nombre de paramètres et de variables, en interactions les uns avec les autres (cf. chapitre 3). Compte tenu de la dynamique implémentée dans le modèle et au regard de tout ce qui a été évoqué dans le paragraphe 7.1.1, une exploration globale du modèle paraît de prime abord la plus appropriée pour répondre au premier objectif, afin de prendre en compte ces interactions et leur impact sur les résultats du modèle. *"an ideal sensitivity analysis [...] should operate simultaneously on all uncertain inputs, so that the interactions among factors can be detected"*[6] (Cariboni *et al.*, 2007). Cependant, ces variables et paramètres sont de natures diverses et interviennent à différents niveaux dans la formalisation du modèle, et notre priorité est avant tout d'identifier des profils de comportements pour chacun d'entre eux, indépendamment des interactions dont ils dépendent. De plus, le second objectif se focalise sur certains paramètres seulement ce qui pencherait plutôt en faveur d'une analyse plus localisée, dans un premier temps du moins.

Par ailleurs, les temps de calcul et de traitements *a posteriori* des résultats bruts de simulation doivent être pris en compte dans le choix de la méthode d'analyse. Ces contraintes techniques freinent la mise en place d'analyse globales pour Mobisim-MR : étant donné le nombre de paramètres, il faudrait tester un trop grand nombre de combinaisons de valeurs pour que l'analyse soit pertinente, ce qui rendrait l'expérience très coûteuse en temps de calcul. De plus, l'automatisation des tâches de post-traitement n'est pas possible : elles sont toutes différentes selon les paramètres et les variables du modèle testés. Les traitements doivent être pensés et effectués indépendamment les uns des autres.

Ces différents constats nous ont conduit à procéder à des analyses de sensibilité locales, avec la méthode OAT, en modifiant les valeurs de chacun des paramètres les unes

6. « L'analyse de sensibilité idéale devrait être effectuée simultanément sur tous les *inputs* incertains, de manière à détecter les interactions entre les différents facteurs. »

après les autres, toutes choses égales par ailleurs, c'est-à-dire tous les autres paramètres étant fixés à leur valeur par défaut (cf. chapitre 5). Ce choix n'est pas unique dans la modélisation individu-centrée : la méthode OAT est utilisée dans plusieurs travaux en géographie ou en écologie (Ginot *et al.*, 2006; Sanders *et al.*, 2006; Laperrière *et al.*, 2009; Schouten *et al.*, 2014).

Nous n'avons pas jugé indispensable le calcul d'indices de sensibilité pour étudier la sensibilité des résultats de simulation aux différents paramètres du modèle. Une analyse graphique à la manière de Sanders et al. (2006a), Laperrière et al. (2009) ou encore Schouten et al. (2014) nous a paru suffisante, dans un premier temps. Ainsi, pour reprendre les termes évoqués dans les deux sous-parties précédentes, l'analyse de sensibilité présentée dans ce chapitre est une analyse locale (OAT), avec des évaluations qualitatives de l'impact de l'incertitude émanant des valeurs de paramètres sur différents résultats de simulation. La sensibilité aux conditions initiales et aux autres modèles de Mobisim ne sera pas étudiée ici.

7.1.2.2 Protocole mis en place

Trame générale

L'analyse de sensibilité de notre modèle porte sur sept paramètres, choisis selon leur rôle dans la formalisation et leur impact supposé sur les résultats du modèle. Ils permettent de représenter dans cette analyse toutes les étapes de la modélisation des mobilités résidentielles dans Mobisim-MR. Il est possible de les scinder en deux groupes :

1. Les paramètres ne nécessitant pas de calibrage : l'objectif est simplement de tester leur impact localement, sur le résultat de simulation intermédiaire auquel ils contribuent. Il s'agit des valeurs d'appréciations du logement et de l'environnement résidentiel (pour les variables « satisfaction » et « intérêt » dans le calcul des évaluations résidentielles), ainsi que les valeurs d'échelle de la quantification des importances.
   Nous intégrons également à cette analyse la variable « coût du logement », qui est un des attributs caractérisant le logement. Elle est discrétisée en trois classes, et estimées *via* plusieurs paramètres dans le modèle. Les valeurs des paramètres choisies pour définir ces classes sont testées afin d'en évaluer l'impact sur la variable.

2. Les paramètres nécessitant un calibrage, distingués selon la variable qu'ils définissent :
   (a) l'intérêt global à migrer M, composé de paramètres portant sur l'attractivité des localisations résidentielles pour les ménages (nombre de logements connus n_J et valeur de référence collective $A_H(v_J)$) ;
   (b) la mobilité individuelle φ, à travers le paramètre α de chaque classe de ménages considérée pour cette variable.

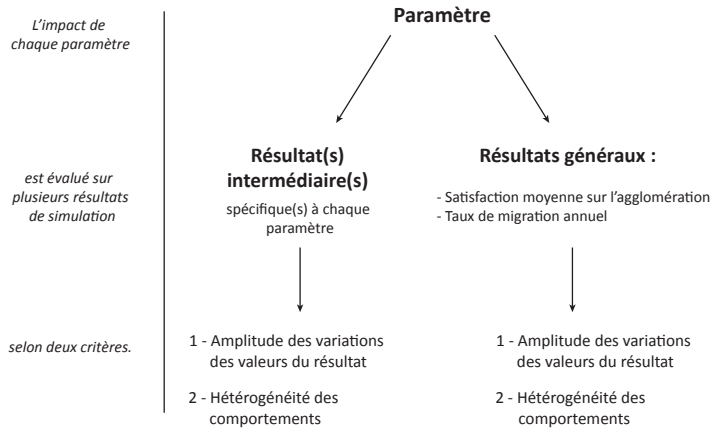


FIGURE 7.3 – Trame générale du protocole de l'analyse de sensibilité de Mobisim-MR

Nous avons défini deux critères d'évaluation pour analyser l'impact des valeurs de paramètres sur les résultats de simulation (Fig. 7.3).

1. Observer visuellement la différence entre chacun des résultats de simulation obtenus pour chaque valeur de paramètre testée.
2. Constater l'hétérogénéité des comportements résidentiels simulés selon les valeurs de paramètres testées. Ce second point renvoie au second objectif du paramétrage de Mobisim-MR (cf. chapitre 5, 5.1.1).

Nous prêterons également attention aux valeurs du taux annuel de migration selon les différentes valeurs des paramètres testées, en vue du calibrage à venir du modèle. L'objectif fixé lors du paramétrage de Mobisim-MR est d'atteindre un taux de migration moyen de 13,7% sur l'agglomération dans les premières années de simulation, et nous chercherons à savoir si, parmi les valeurs de paramètres testées dans notre analyse de sensibilité, il est possible de simuler ce taux de migration. Cela ne concerne que les paramètres nécessitant un calibrage, c'est pourquoi nous ne considérons pas cette observation comme un critère d'évaluation à part entière.

TABLEAU 7.1 – Paramètres testés et résultats de simulation analysés dans l'analyse de sensibilité de Mobisim-MR

Paramètres	Résultat intermédiaire	Satisfaction moyenne	Taux de migration annuel	Flux de migrations
Appréciation du logement actuel $A_H(D_I)$	Satisfaction au logement actuel $S_H(D_I)$			
	Satisfaction résidentielle $S_H(I)$			
Appréciation d'un autre logement $u_H(D_J)$	Intérêt maximal pour un autre logement $U_H(D_J)$			
	Intérêt maximal pour une autre localisation résidentielle $U_H(J)$			
Appréciations de l'environnement résidentiel actuel $A_H[E/D_I]$	Satisfaction à l'environnement résidentiel actuel $S_H[E/D_I]$			
	Satisfaction résidentielle $S_H(I)$			
Appréciation d'un autre environnement résidentiel $u_H[E/D_J]$	Intérêt maximal pour un autre environnement résidentiel $U_H[E/D_J]$			
	Intérêt maximal pour une autre localisation résidentielle $U_H(J)$			
Échelle des valeurs d'importances	Satisfaction résidentielle $S_H(I)$			
	Intérêt maximal pour une localisation résidentielle $U_H(J)$			
Coût du logement	Nombre de logements dans chaque classe de coût	×	×	
Nombre de logements connus n_J	Attractivité connue $v_J(H)$			
	Intérêt global à migrer M	×	×	×
	Probabilité de déménager Ω			
Référence collective $A_H(v_J)$	Intérêt global à migrer M	×	×	×
	Probabilité de déménager Ω			
α	Mobilité individuelle φ intra-classe			
	Mobilité individuelle φ			
	Probabilité de déménager Ω intra-classe	×	×	
	Probabilité de déménager Ω			
	Taux de migration annuel intra-classe			

Hormis les paramètres des évaluations résidentielles (appréciations et importances) dont la sensibilité est analysée uniquement sur les résultats intermédiaires, l'impact de

chaque paramètre est testé à deux niveaux (Fig. 7.3) :

- sur le résultat intermédiaire auquel il participe directement, pour connaître son impact local (ex. le nombre de logements par classes de coût pour les paramètres de l'estimation du coût des logements ou l'intérêt à migrer M pour le nombre de logements connus n_J) ;
- sur deux résultats plus généraux, à savoir le taux annuel de migration et la satisfaction résidentielle moyenne sur l'agglomération, pour connaître l'impact du paramètre à un niveau plus agrégé.

L'impact des paramètres d'attractivités n_J et $A_H(v_J)$ sera également testé sur les parts de migrants selon leur sens de migration, à savoir la dichotomie entre l'espace considéré comme « urbain » qu'est la ville de Besançon, et les communes périurbaines (migrations intra-urbaines, migrations internes aux communes périurbaines, migrations de Besançon en direction des communes périurbaines et migrations des communes périurbaines en direction de Besançon). En effet, nous supposons que ces deux paramètres, de par leur participation dans le calcul de l'intérêt global à migrer, peuvent avoir un impact sur le sens des migrations. Le nombre de logements connus n_J est par ailleurs le seul paramètre qui concerne directement la localisation des logements (puisqu'il résulte d'un tirage aléatoire de 30 logements dans l'agglomération), et qui peut donc jouer un rôle dans ce résultat de simulation.

Le tableau 7.1 synthétise les résultats de simulation analysés pour chaque paramètre. L'analyse de sensibilité de Mobisim-MR par les paramètres testés et les résultats choisis pour l'évaluation est de fait ni homogène ni uniforme : l'impact de chaque paramètre n'est pas analysé sur les mêmes résultats et les résultats considérés dans l'analyse ne répondent pas tous aux mêmes objectifs :

- l'analyse de chaque résultat intermédiaire met en lumière leur sensibilité directe (ou locale) par rapport aux paramètres correspondants ;
- l'évolution du taux annuel de migration est analysé en anticipation du calibrage du modèle ;
- le taux annuel de migration et la satisfaction moyenne des ménages de l'agglomération permettent de comparer les impacts indirects des différents paramètres sur des résultats agrégés finaux. C'est également le cas du nombre de migrants selon le sens de migration pour les paramètres n_J et $A_H(v_J)$.

Pour évaluer la sensibilité du modèle tout au long d'une simulation, nous analysons systématiquement l'ensemble de ces résultats à trois dates simulées : 2015 ($t_0 + 5$), 2020 ($t_0 + 10$) et 2030 ($t_0 + 20$). Enfin, pour tenir compte de la stochasticité du modèle,

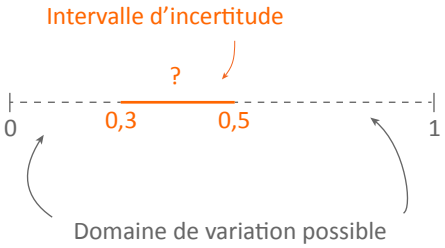
nous reproduisons chaque test 10 fois. Ainsi, pour chaque variable étudiée, les valeurs des résultats de simulation considérées sont des moyennes des dix valeurs des résultats de chacune des réplications.

Le choix des valeurs de paramètres à tester

Le choix des valeurs à tester est fondamental dans l'analyse locale : étant donné que l'impact des paramètres n'est pas évalué sur leurs interactions, c'est d'elles-seules que dépend la sensibilité des résultats de simulation que nous analysons (Ginot *et al.*, 2006; Richiardi *et al.*, 2006). Classiquement, les paramètres sont testés dans l'intervalle d'incertitude des valeurs qu'ils peuvent prendre. On parle d'intervalle d'incertitude ou d'intervalle théorique pour désigner toutes les valeurs possibles pour un paramètre [7]. Cela suppose que cet intervalle soit nettement délimité, et dans le cas contraire, il est préconisé de tester un intervalle assez large (Schouten *et al.*, 2014).

Lorsque la distribution des valeurs de paramètres est connue, il est courant d'utiliser une valeur centrale comme valeur nominale (ou valeur par défaut), et de la faire varier de l'équivalent d'un écart type de la distribution possible (Hamby, 1994) pour définir les valeurs à tester. D'autres travaux ne considèrent que les valeurs minimum et maximum pouvant être prises par le paramètre (Happe, 2005; Schouten *et al.*, 2014).

Cet intervalle d'incertitude est lié à la signification du paramètre. Il est souvent compris dans un intervalle plus large, qui comprend toutes les valeurs que le paramètre peut prendre mathématiquement (Ginot *et al.*, 2006) : borné entre 0 et 1, ou non. On parle alors de domaine de variation possible des valeurs du paramètre (Schmitt *et al.*, à paraître). Cette distinction est illustrée ci-dessus : un paramètre compris entre 0 et 1 peut prendre toutes les valeurs entre ces deux bornes tout en étant thématiquement compris entre 0,3 et 0,5.



Dans le cas de Mobisim-MR, les valeurs à tester ont été choisies différemment pour chaque paramètre, et leur sélection résulte de plusieurs compromis. Tout d'abord, nous

7. *"The uncertainty range of values represents the set of possible values for an input factor* " (Monod *et al.*, 2006) - « L'intervalle d'incertitude des valeurs représente l'ensemble des valeurs possibles pour un *input*. »

TABLEAU 7.2 – Valeurs testées pour chaque paramètre dans l'analyse de sensibilité de Mobisim-MR.
NB. En gras : les valeurs par défaut.

Variable	Paramètre	Domaine de variation possible	Valeurs testées
Évaluations résidentielles	**Appréciation du logement actuel** $A_H(D_I)$	0 - 1	0.3 0.4 **0.5** 0.6 0.7
	Appréciation d'un autre logement $u_H(D_J)$	0 - 1	0.3 0.4 **0.5** 0.6 0.7
	Appréciation de l'environnement résidentiel actuel $A_H[E/D_I]$	0 - 100%	40% 50% 60% 65% **70%** 75% 80% 85%
	Appréciation d'un autre environnement résidentiel $u_H[E/D_J]$	0 - 100%	40% 50% 60% 65% **70%** 75% 80% 85%
	Valeurs de quantification des importances	illimité	1-4 **1-7** 1-10 1-13 1-16 1-31 1-76 1-100 Géom.
Coût du logement	**Paramètre « taille du logement »** $\mu(cout\|taille)$	illimité	5 **6**
	Paramètre « revenu médian dans le voisinage » $\mu(cout\|voisinage)$	illimité	22025 26642 **31260**
	Pondération du coût de la taille	0 - 100%	60% 65% **70%** 75% 80%
	Affectation des coûts dans les classes de coût	N.C.	Plus déterministe **Défaut** Plus aléatoire
Nombre de logements connus n_J		illimité	**30** 35 40 50 100 500 1500
Référence collective $A_H(v_J)$		0 - 1	Analyses exploratoires préalables
Paramètre α **de la fonction logistique** φ	**Classe 1 : moins de 30 ans avec enfant(s)**	0 - 1	0.35 0.375 **0.4** 0.45 0.5
	Classe 2 : moins de 30 ans sans enfant	0 - 1	0.25 0.275 **0.3** 0.325 0.35 0.4
	Classe 3 : 30 à 44 ans	0 - 1	0.15 0.175 **0.2** 0.225 0.25 0.3
	Classe 4 : 45 à 59 ans	0 - 1	0.075 **0.1** 0.125 0.15 0.2
	Classe 5 : plus de 60 ans	0 - 1	0.01 **0.05** 0.1

avons dû restreindre le nombre total de tests à effectuer en raison des contraintes de temps de calcul et de traitement des données évoquées précédemment. Une simplifica-

tion de notre analyse pourrait se borner à ne considérer que des valeurs « extrêmes » pour chaque paramètre, c'est-à-dire les bornes soit de l'intervalle d'incertitude, soit du domaine de variation possible. Cela réduirait le temps de calcul, tout en permettant un tour d'horizon succinct de la sensibilité. Mais cette solution ne contribuerait pas efficacement à cibler les valeurs pertinentes pour le calibrage des paramètres. Afin d'aider au calibrage, des attentions particulières ont été portées autour des valeurs pressenties comme adéquates pour répondre aux objectifs de paramétrage ; le nombre de valeurs testées n'est donc pas le même pour chaque paramètre.

Deuxièmement, pour permettre d'explorer assez largement le comportement du modèle, certaines valeurs ont été volontairement désignées hors de l'intervalle d'incertitude du paramètre, afin de pousser le modèle dans ses « limites » et d'identifier des résultats potentiellement plus extrêmes.

Enfin, l'écart entre les valeurs choisies pour les paramètres du modèle n'est pas nécessairement régulier : nous avons souhaité tester à la fois des variations assez fines dans l'intervalle des valeurs tout en explorant ce dernier assez largement. Le choix de chacune des valeurs s'explique principalement par les objectifs poursuivis par l'analyse de sensibilité de chacun des paramètres.

Les valeurs testées dans l'analyse de sensibilité de Mobisim-MR sont présentées dans le tableau 7.2. Pour chaque test effectué, les valeurs des autres paramètres sont fixées à leur valeur par défaut (signalées en gras dans le tableau).

Le détail du choix des valeurs pour chacun des paramètres sera justifié dans les sections respectives. Concernant le paramètre $A_H(v_J)$ (référence collective en termes d'attractivités des logements pour les ménages), variable fortement dépendante de résultats intermédiaires du modèle, nous n'avons aucune connaissance *a priori* des valeurs qui peuvent être pertinentes, c'est pourquoi la sélection des valeurs à tester fera l'objet d'une analyse exploratoire préalable.

Une analyse graphique de la sensibilité

L'impact de chaque paramètre est analysé sur plusieurs résultats en sortie (Tabl. 7.1). Selon la nature du résultat de simulation, nous intégrons les 10 réplications différemment :

– les résultats de simulation à valeur unique (ex. le nombre de logement dans chaque classe de coût, la satisfaction moyenne sur l'agglomération) : pour chaque valeur de paramètre testée (axe des abscisses), seule la valeur moyenne de l'ensemble des 10 réplications est représentée (axe des ordonnées) (Fig. 7.4). En effet, glo-

balement, les résultats de simulation de la satisfaction résidentielle moyenne, du taux annuel de migration, du nombre de logements dans chaque classe de coût et du nombre de migrants selon le sens de migration ne présentent pas beaucoup d'écart entre les valeurs minimum et maximum des 10 réplications (en dessous de 2% de variation). Nous avons donc choisi de simplifier les résultats graphiques en ne présentant d'une seule valeur, synthétique et représentative des 10.

– les distributions de valeurs (une valeur par ménage - ex. la satisfaction au logement S_D, l'intérêt global à migrer M, la mobilité individuelle φ) : ne pouvant enregistrer l'intégralité des valeurs de tous les ménages à chaque itération souhaitée, les distributions de valeurs ont été discrétisés en 1000 classes. Cela nous permet de garder une certaine précision dans la structure de la distribution tout en allégeant le poids des sorties dans la base de données. Pour analyser les résultats de simulation, nous avons calculé la moyenne des 10 réplications pour chaque classe de la distribution. Le résultat de l'analyse de sensibilité se présente donc de la manière suivante :
  – l'axe des abscisses des graphiques représente les valeurs de chaque variable analysée en résultat (ex. satisfaction S_D, intérêt à migrer M) ;
  – l'axe des ordonnées représente le nombre de ménages ;
  – chaque courbe représente une distribution moyenne des 10 réplications pour une valeur de paramètre testée (Fig. 7.4).

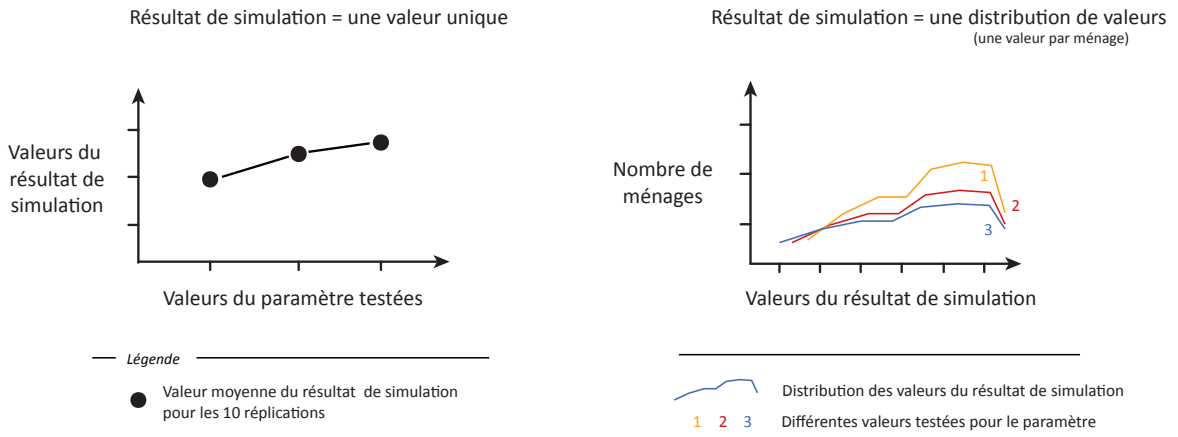


FIGURE 7.4 – Présentation et lecture des résultats de l'analyse de sensibilité selon la nature du résultat de simulation analysé

À la manière de Ginot et al. (2006) et de Schouten (2014), nous souhaitons également comparer le rôle de chacun des paramètres testés sur les valeurs d'une même variable, en vue d'identifier les différents impacts des paramètres, individuellement les uns des autres. Pour cela seront synthétisés à la fin du chapitre, pour plusieurs va-

riables, les résultats de tous les paramètres. Ceci n'est pas une nouvelle analyse, mais simplement un point de vue différent (celui des résultats de simulation et non des paramètres), qui permettra d'apporter de nouvelles informations sur le fonctionnement du modèle.

L'ensemble des tests présentés dans le tableau 7.2 a été réalisé selon ce protocole, à l'exception des tests de sensibilité des échelles de valeurs de quantification des importances. L'analyse de sensibilité des valeurs d'importance a été menée bien avant celle des autres paramètres de manière indépendante et selon un protocole différent : une seule simulation a été effectuée pour chacun des neuf tests. Les valeurs de résultats de simulation présentées dans ce chapitre correspondent à la valeur résultante de l'itération 1 (année 2012 simulée) d'une simulation unique, et non d'une moyenne de 10 valeurs. Les informations concernant les matrices d'importance ne font pas partie des données de simulation enregistrées par défaut dans la base de données, et pour traiter ces valeurs, il a fallu spécifiquement programmer leur enregistrement.

7.1.2.3 Synthèse technique de l'analyse de sensibilité de Mobisim-MR

Au total, ce sont 79 [8] valeurs de paramètres qui ont été testées dans cette analyse de sensibilité, soit 790 simulations.

Ces simulations ont été effectuées sur le mésocentre de calcul de l'Université de Franche-Comté. Nous avons pu bénéficier de l'accès simultané à huit machines, permettant d'exécuter huit simulations en même temps, sur des machines de 12 et 16 cœurs. La durée totale des simulations, entre le lancement de la première et la finalisation de la 790$^{\text{ème}}$ a été de 25 jours. Chaque simulation nécessitant environ 75 heures CPU pour s'exécuter, le temps de calcul effectif total pour l'analyse de sensibilité telle qu'elle est présentée ici est d'environ 60000 heures CPU, soit l'équivalent de sept ans.

Compte tenu des contraintes techniques évoquées précédemment, nous avons finalisé le protocole de l'analyse de sensibilité avant de commencer l'exécution des simulations. Cela nous a permis d'identifier précisément les résultats de simulation que nous souhaitions analyser pour évaluer la sensibilité du modèle et ainsi, préparer les fichiers de simulation en conséquence. En effet, compte tenu du grand nombre de simulations à effectuer, il était inconcevable d'enregistrer l'intégralité des *outputs* du modèle dans la

8. 26 pour les évaluations résidentielles, 10 pour le coût - l'ensemble des valeurs par défaut des différents paramètres du coût correspond à la même simulation -, 7 pour le nombre de logements connus n_J, 25 pour les différentes valeurs d'α et une prévision de 11 valeurs à tester pour la référence collective $A_H(v_J)$.

base de données, aussi avons-nous choisi l'enregistrement sélectif des résultats dans un fichier à part. Cela se justifiait d'autant plus que nous n'utilisons dans cette analyse que quelques résultats de simulation du modèle, au regard de la quantité de données sauvegardées pendant une simulation avec Mobisim.

L'enregistrement sélectif des *outputs* de Mobisim se programme en langage xml dans le fichier de paramètres de la simulation [9], c'est-à-dire dans le fichier qui contient l'ensemble des informations sur la configuration de tous les paramètres du modèle. La programmation de l'enregistrement ne permet pas de sauvegarder certaines données brutes telles qu'elles l'auraient été dans la base de données sur le serveur ; elle implique une première agrégation des *outputs* en résultats de simulation : compte d'effectifs selon certains champs et distribution de valeurs. Cela présente l'avantage d'anticiper, voire de suppléer, le traitement des données *a posteriori* auquel il faudrait procéder si les données étaient sauvegardées classiquement sur le serveur (désagrégation complète des *outputs*). Par ailleurs, cette programmation ne permet aucune jointure entre les différentes tables, ce qui limite les possibilités d'analyse dans ce contexte de sauvegarde des données de simulation.

La majorité des résultats de simulation que nous souhaitons analyser (Tabl. 7.1) sont des distributions de valeurs (une valeur par ménage), discrétisées en 1000 classes, comme nous l'avons évoqué précédemment. Peu sont des valeurs uniques (le nombre de logements dans chaque classe de coût, les taux de migrations annuels, la satisfaction moyenne et le nombre de migrants selon le sens de migration), et parmi elles, seul le calcul des taux de migrations annuels (tous ménages confondus, et par distinction des classes de la mobilités individuelle) ne peut être programmé dans le fichier de simulation. Cela signifie simplement que les résultats nécessaires au calcul des taux (nombre de migrants et nombre de ménages) doivent être enregistrés pour être ensuite traités. L'intégralité des résultats de simulation nécessaires à l'analyse de sensibilité de Mobisim-MR est présentée dans le tableau 7.3.

Ainsi, si nous n'avons besoin au total que de 43 résultats de simulation (Tabl. 7.3), l'ensemble des données à sauvegarder dans le fichier représente 20 020 enregistrements pour une année simulée. L'enregistrement automatique des résultats s'effectue par pas de temps de cinq années (2015, 2020, 2025 et 2030), soit un total de 80080 lignes par fichier de simulation. Au total, la quantité de données stockées pour l'analyse de sensibilité avoisine 3,5 Go.

9. Cette programmation a été faite par Gilles Vuidel, informaticien au laboratoire ThéMA, pour les besoins de l'analyse.

TABLEAU 7.3 – Nombre d'enregistrements par résultat de simulation pour l'analyse de sensibilité

***Outputs* nécessaires**	**Nature**	**Nombre d'enregistrements**
Satisfaction au logement actuel $S_H(D_I)$	Distribution de valeurs	1000
Satisfaction à l'environnement résidentiel actuel $S_H[E/D_I]$	Distribution de valeurs	1000
Satisfaction résidentielle actuelle $S_H(I)$	Distribution de valeurs	1000
Intérêt maximal pour un autre logement $U_H(D_J)$	Distribution de valeurs	1000
Intérêt maximal pour un autre environnement résidentiel $U_H[E/D_J]$	Distribution de valeurs	1000
Intérêt maximal pour une autre localisation résidentielle $U_H(J)$	Distribution de valeurs	1000
Nombre de logements à coût faible	Valeur unique	1
Nombre de logements à coût moyen	Valeur unique	1
Nombre de logements à coût élevé	Valeur unique	1
Attractivité connue $v_J(H)$	Distribution de valeurs	1000
Intérêt global à migrer M	Distribution de valeurs	1000
Probabilité de déménager Ω (tous ménages confondus)	Distribution de valeurs	1000
Mobilité individuelle φ intra-classe pour la classe 1	Distribution de valeurs	1000
Mobilité individuelle φ intra-classe pour la classe 2	Distribution de valeurs	1000
Mobilité individuelle φ intra-classe pour la classe 3	Distribution de valeurs	1000
Mobilité individuelle φ intra-classe pour la classe 4	Distribution de valeurs	1000
Mobilité individuelle φ intra-classe pour la classe 5	Distribution de valeurs	1000
Mobilité individuelle φ (tous ménages confondus)	Distribution de valeurs	1000
Probabilité de déménager Ω intra-classe pour la classe 1	Distribution de valeurs	1000
Probabilité de déménager Ω intra-classe pour la classe 2	Distribution de valeurs	1000
Probabilité de déménager Ω intra-classe pour la classe 3	Distribution de valeurs	1000
Probabilité de déménager Ω intra-classe pour la classe 4	Distribution de valeurs	1000
Probabilité de déménager Ω intra-classe pour la classe 5	Distribution de valeurs	1000
Nombre de migrants dans la classe 1	Valeur unique	1
Nombre de migrants dans la classe 2	Valeur unique	1
Nombre de migrants dans la classe 3	Valeur unique	1
Nombre de migrants dans la classe 4	Valeur unique	1
Nombre de migrants dans la classe 5	Valeur unique	1
Nombre total de ménages la classe 1	Valeur unique	1
Nombre total de ménages la classe 2	Valeur unique	1
Nombre total de ménages la classe 3	Valeur unique	1
Nombre total de ménages la classe 4	Valeur unique	1
Nombre total de ménages la classe 5	Valeur unique	1
Nombre de migrants	Valeur unique	1
Nombre total de ménages	Valeur unique	1
Satisfaction moyenne sur l'agglomération	Valeur unique	1
Nombre de migrants intra-urbains	Valeur unique	1
Nombre de migrants au sein des communes périurbaines	Valeur unique	1
Nombre de migrants des communes périurbaines à Besançon	Valeur unique	1
Nombre de migrants de Besançon aux communes périurbaines	Valeur unique	1

7.2 Les paramètres des évaluations résidentielles

Les évaluations résidentielles constituent la première étape dans la décision résidentielle des ménages (cf. chapitre 3, section 3.2.2). Elles sont le résultat d'une combinaison entre les appréciations que les ménages peuvent avoir de chacun des attributs d'un logement ou de son environnement résidentiel, et de l'importance de ce même attribut pour le ménage. Les valeurs de ces paramètres (appréciation et importances) ne sont jamais considérées individuellement mais sont toujours agrégées en une évaluation résidentielle, du logement actuel ou d'un autre logement. Les intégrer à l'analyse de sensibilité permet d'observer l'impact de chaque paramètre sur le calcul des variables auxquelles elles participent.

7.2.1 Les valeurs d'appréciations

7.2.1.1 Sur quelles appréciations tester la sensibilité du modèle ?

Compte tenu du grand nombre d'appréciations intervenant dans le calcul des évaluations résidentielles (tableaux 5.2 et 5.3, et figure 5.1 - Chapitre 5), nous avons choisi d'en tester une seule pour chaque cas de figure (appréciation au lieu de vie actuel I et appréciation d'un lieu de vie potentiel J, logement et environnement résidentiel).

Le choix de la valeur d'appréciation à tester dans chacun des cas a été orienté par la formalisation de ces évaluations résidentielles. L'évaluation d'un logement ou d'un environnement résidentiel qui est faite par un ménage dépend respectivement de l'évaluation de chacun des attributs du logement ou de l'environnement résidentiel, elle-même conditionnée par l'importance accordée aux différents attributs (cf. encadré). Cette double agrégation dont le paramètre fait l'objet pour participer au calcul de l'évaluation finale (satisfaction résidentielle ou intérêt pour une autre localisation résidentielle) laisse penser que l'impact d'une variation de sa valeur peut être imperceptible sur la valeur du résultat de simulation.

Rappels du chapitre 3

Les importances telles qu'elles sont formalisées dans Mobisim permettent aux ménages d'accorder davantage d'importance à certains attributs du lieu de vie qu'ils évaluent plutôt qu'à d'autres. Définies au niveau de chaque caractéristique du ménage, elles peuvent entrer en conflit lorsqu'elles sont plusieurs à pondérer un même attribut : la taille d'un logement peut être à la fois « très importante » et « importante » selon les caractéristiques du ménage (Tabl. 5.6).

Pour les évaluations des logements, les valeurs d'appréciations des différents attributs dépendent des caractéristiques des ménages, ce qui signifie qu'un ménage peut avoir plusieurs appréciations pour

un même attribut. Dans ces cas là, il convient de définir quelle appréciation prévôt sur la ou les autre(s). Dans la formalisation du modèle, c'est l'importance relative à l'attribut pour chacune des caractéristiques du ménage concernées qui permet de faire ce choix, et l'unique valeur d'appréciation retenue pour chaque attribut est :

- la valeur d'appréciation relative à la caractéristique du ménage qui confère à cet attribut la plus forte importance, parmi les quatre caractéristiques du ménage (âge, composition, revenus et nombre d'enfant(s)) ;
- la valeur d'appréciation la plus faible en cas d'importances maximales égales pour ce même attribut.

La valeur d'évaluation du logement (la satisfaction au logement actuel ou l'intérêt porté à un autre logement) équivaut à cette valeur. Les autres valeurs d'appréciation de cet attribut par le ménage ne sont pas prises en compte.

En d'autres termes, quand un ménage évalue un attribut du logement (ou de l'environnement résidentiel), il cherche à être le plus satisfait possible : il se focalise sur ce qui fait que cet attribut est important pour lui (ex. le fait d'avoir des enfants ou d'avoir des revenus faibles). En cas d'importances égales pour un même attribut, il se focalise sur ce qui fait que cet attribut pourrait ne pas lui convenir, afin de tenir compte des inadéquations potentielles entre les attributs du lieu de vie auquel il prête attention et ses besoins.

Pour les évaluations de l'environnement résidentiel, les valeurs d'appréciations des différents attributs dépendent simplement des lieux et sont identiques pour tous les ménages. Les importances n'ont pas d'autre vocation que de relativiser ces attributs les uns par rapport aux autres dans la réflexion du ménage vis-à-vis d'une localisation résidentielle.

Si l'on souhaite que la variation de la valeur du paramètre testé puisse potentiellement avoir un impact sur les résultats de simulation, il est nécessaire que l'appréciation considérée parmi l'ensemble des appréciations paramétrées dans Mobisim ait du poids dans le calcul de ces résultats. Ainsi :

1. pour le logement, l'appréciation de l'attribut doit être la plus importante parmi toutes les appréciations de cet attribut au regard de toutes les caractéristiques du ménage (cf. encadré).
2. pour le logement et pour l'environnement résidentiel, l'importance de l'attribut choisi doit être forte (« importante » ou « très importante ») pour avoir un certain poids dans le calcul de la satisfaction résidentielle ou de l'intérêt pour une autre localisation [10].

On suppose ainsi que, si le résultat de simulation est sensible au paramètre, la variation de la valeur d'appréciation sera visible sur la valeur du résultat de simulation, malgré

10. Dans la comparaison par paires, la valeur d'importance de cet attribut sera parmi les plus fortes. Pour la quantification des importances, se référer au chapitre 5.

les agrégations dont le paramètre est l'objet.

L'impact des valeurs d'appréciations sur les résultats de simulation est analysé sur :
- les valeurs de satisfaction au logement (ou à l'environnement résidentiel) et de satisfaction résidentielle totale du ménage ;
- les valeurs de l'intérêt maximal d'un ménage pour un autre logement (ou environnement résidentiel) et de l'intérêt maximal d'un ménage pour une autre localisation résidentielle, parmi l'ensemble des intérêts portés à toutes les autres localisations résidentielles possibles.

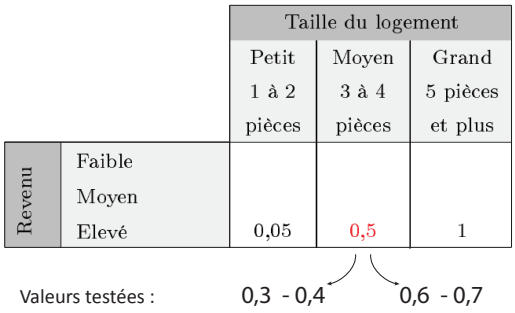
7.2.1.2 Sensibilité vis-à-vis de la modification d'un paramètre d'appréciation du logement actuel $A_H(D_I)$

Le paramètre choisi pour étudier l'impact des appréciations du logement actuel sur les résultats du modèle est l'appréciation des logements de taille moyenne pour les ménages aux revenus élevés :

1. c'est pour la caractéristique « Revenus » que l'attribut « taille du logement » est le plus important (Tabl. 5.6 du chapitre 5).
2. l'attribut est « très important » pour ces ménages lorsqu'ils évaluent leur propre logement.

La valeur par défaut de ce paramètre est 0,5, et nous avons testé quatre valeurs en tout, deux inférieures et deux supérieures. Les valeurs choisies permettent de maintenir cette appréciation inférieure à celle d'un logement grand et supérieure à celle d'un logement petit (Fig. 7.5), tout en faisant varier suffisamment la valeur par défaut.

FIGURE 7.5 – Valeurs choisies pour tester l'impact de la modification de l'appréciation d'un logement de taille moyenne par les ménages aux revenus élevés sur les résultats de simulation



À partir de ces valeurs, nous testons la sensibilité de deux résultats de simulation :
- la distribution des valeurs de satisfaction au logement de tous les ménages aux revenus élevés ;

– la distribution des valeurs de satisfaction résidentielle (un logement dans un environnement résidentiel) de tous les ménages aux revenus élevés.

Impact sur la satisfaction au logement $S_H(D_I)$

Pour rappel, la satisfaction au logement est égale à la satisfaction de l'attribut du logement le moins satisfaisant pour le ménage parmi les quatre (taille, statut d'occupation, coût et type de logement). Les trois autres sont évincés du calcul. Le ménage est donc pessimiste lorsqu'il évalue la satisfaction à son logement actuel.

Comme la taille du logement est « très importante » pour ces ménages, la valeur numérique de l'importance qu'ils lui accordent sera parmi les plus élevées. De plus, pour le calcul de la satisfaction au logement, la valeur d'importance est un exposant de la valeur d'appréciation, donnant ainsi plus de poids aux attributs importants : plus la valeur de puissance est élevée, plus la valeur résultante pour l'évaluation de l'attribut sera faible et donc potentiellement décisive dans le calcul de la satisfaction au logement.

À importances égales (comme c'est le cas dans l'analyse de sensibilité puisque seule varie la valeur d'appréciation), la valeur de satisfaction d'un attribut va diminuer avec sa valeur d'appréciation testée. On peut donc supposer que :

– lorsque la valeur du paramètre est élevée (0,7), la satisfaction résultante ne sera pas forcément la plus faible parmi les 4 valeurs de satisfaction des attributs du logement, malgré son importance élevée, et qu'elle n'aura donc pas d'impact sur la satisfaction du logement [11] ;
– à l'inverse, lorsque la valeur d'appréciation est faible (0,3), elle entraîne une diminution de la valeur de satisfaction de l'attribut. Plus faible, cette dernière peut devenir déterminante dans le calcul de la satisfaction du logement, et donc avoir un impact sur les résultats de simulation.

a) Amplitude des variations de $S_H(D_I)$ à la modification du paramètre $A_H(D_I)$ Comme nous pouvons le voir sur la figure 7.6, l'impact des variations de la valeur de l'appréciation d'un logement de taille moyenne pour les ménages aux revenus élevés sur la distribution des valeurs de satisfaction au logement est quasiment nul : quelle que soit la valeur testée, la satisfaction au logement de ces ménage reste globalement la même, et ce de manière constante au cours de la simulation.

Étant donnée la manière dont la satisfaction au logement est calculée, on peut supposer que la valeur de satisfaction de la taille moyenne du logement actuel n'est

11. La satisfaction au logement ne considère que l'attribut le moins satisfaisant.

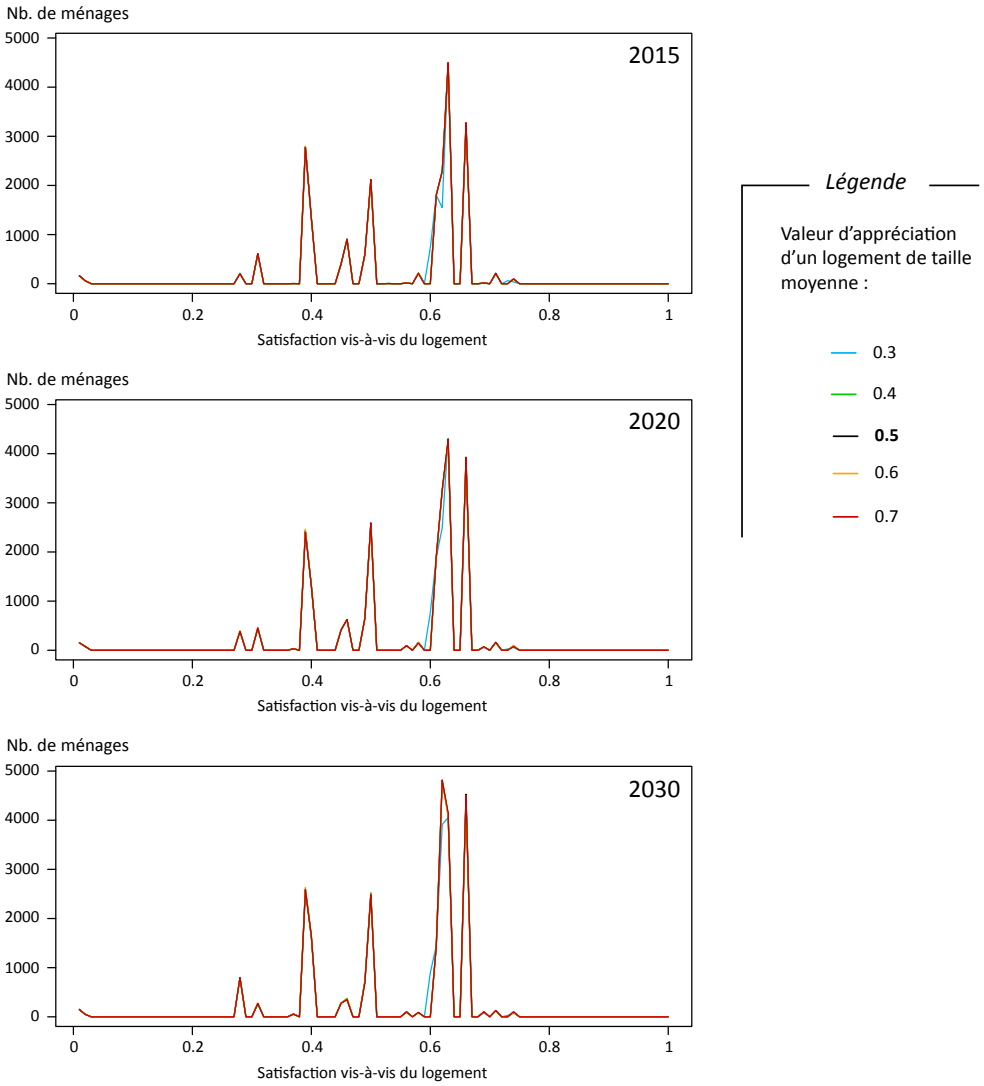


FIGURE 7.6 – Sensibilité de la satisfaction des ménages aux revenus élevés vis-à-vis de leur logement actuel : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis d'un logement de taille moyenne

jamais la plus faible : même en diminuant l'appréciation jusqu'à 0,3, et malgré sa forte importance, la taille n'est pas l'attribut le moins satisfaisant pour ces ménages.

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements simulés des ménages L'allure des différentes courbes de distribution des valeurs de satisfaction au logement est très similaire : modifier la valeur d'appréciation que les ménages aux revenus élevés ont pour la taille moyenne d'un logement n'influe pas sur la diversité des valeurs de satisfaction au logement entre ces ménages.

Impact sur la satisfaction résidentielle des ménages $S_H(I)$

a) Amplitude des variations de $S_H(D_I)$ à la modification du paramètre $A_H(D_I)$ Les différentes courbes de distribution des valeurs de satisfaction totale (Fig. 7.7) présentent exactement la même structure : quelle que soit la valeur testée pour le paramètre, le nombre de ménages aux revenus élevés pour chaque valeur de satisfaction résidentielle est le même. L'effet des variations des valeurs du paramètre est nul sur ce résultat de simulation. Ceci découle directement du résultat précédent : la modification de la valeur de l'appréciation considérée n'a quasiment aucune incidence sur les valeurs de satisfaction du logement et celle-ci intervient à hauteur de 60 % dans le calcul de la satisfaction résidentielle des ménages aux revenus élevés, n'impliquant ainsi aucune modification sur cette dernière.

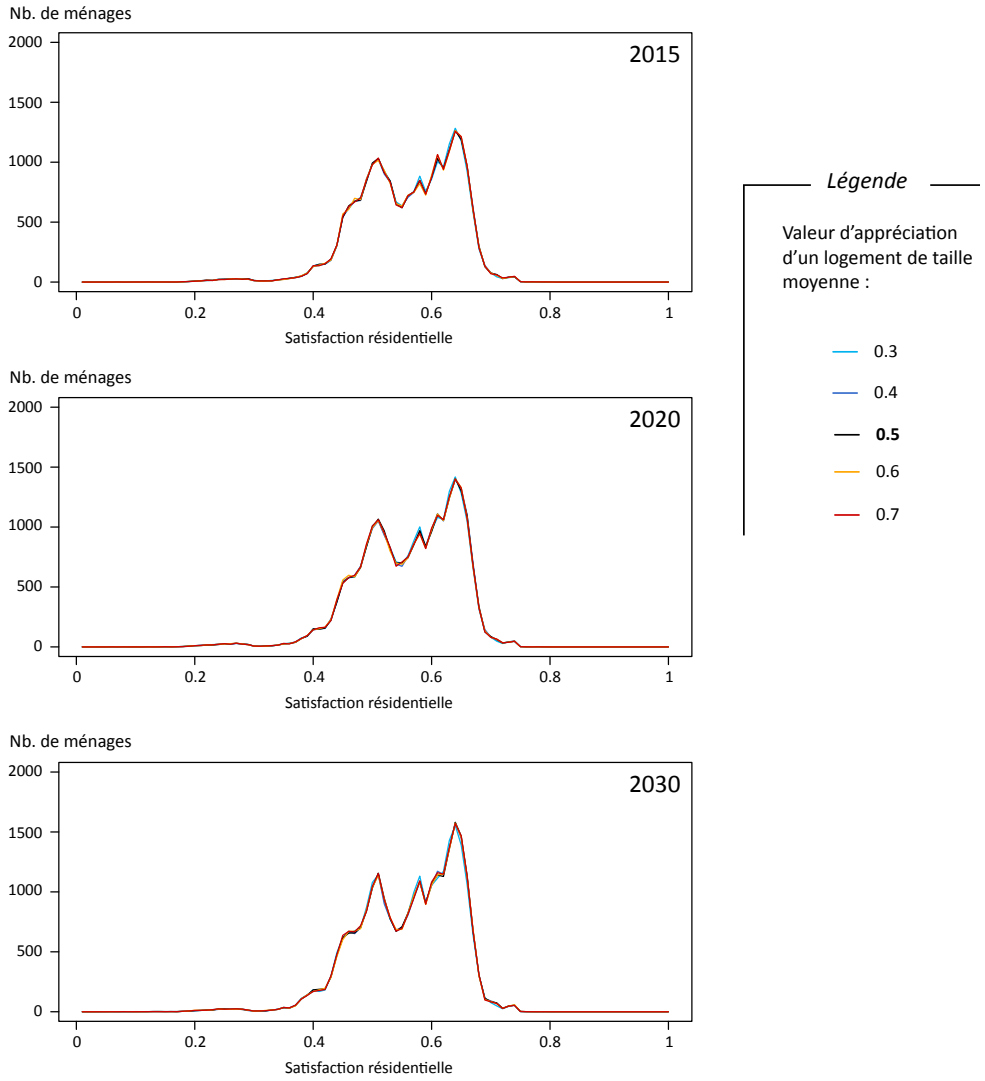


FIGURE 7.7 – Sensibilité de la satisfaction résidentielle actuelle des ménages aux revenus élevés : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis d'un logement de taille moyenne

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements des ménages simulés Le fait que les distributions de valeurs restent visiblement les mêmes, malgré les modifications apportées à la valeur du paramètre, signifie que les ménages aux revenus élevés conservent globalement le même comportement en termes de satisfaction résidentielle. La modification de leur appréciation d'un logement de taille moyenne n'influe pas sur la diversité des valeurs de satisfaction résidentielle entre ces ménages.

Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation du paramètre

Que leur appréciation pour un logement de taille moyenne augmente ou diminue, la satisfaction au logement et, par répercussion, la satisfaction résidentielle des ménages aux revenus élevés ne changent globalement pas. On peut donc en déduire que, compte tenu des valeurs testées, ces deux résultats de simulation ne sont pas sensibles aux variations de ce paramètre.

Ces tendances se maintiennent dans le temps puisque les conclusions sont les mêmes pour les trois années de simulation.

Compte tenu de la formalisation de la satisfaction au logement, il conviendrait de vérifier si la taille du logement est l'attribut le moins satisfaisant pour ces ménages ou non. Nous pourrions également reproduire ce test avec d'autres valeurs du paramètre ou sur une autre appréciation, pour identifier dans quelle mesure il est possible de rendre un attribut du logement le moins satisfaisant possible, et d'évaluer ainsi son impact sur les valeurs de satisfaction résidentielle des ménages.

7.2.1.3 Sensibilité vis-à-vis de la modification d'un paramètre d'appréciation d'un autre logement $u_H(D_J)$

Le paramètre choisi pour évaluer l'impact des appréciations d'un autre logement sur les résultats de simulation de Mobisim-MR est le même que pour l'analyse précédente : appréciation d'un logement de taille moyenne pour les revenus élevés. Il remplit en effet les mêmes conditions de sélection que nous avons définies.

La valeur par défaut de cette appréciation est également 0,5, et nous testerons les mêmes valeurs que pour l'appréciation au logement actuel : 0,3, 0,4, 0,6 et 0,7.

La sensibilité vis-à-vis de ce paramètre est étudiée sur deux résultats de simulation :

- la distribution des valeurs d'intérêt maximal des ménages aux revenus élevés pour un autre logement que le leur ;

– la distribution des valeurs d'intérêt maximal des ménages aux revenus élevés pour une autre localisation résidentielle (un logement dans un environnement résidentiel) que la leur.

Impact sur l'intérêt des ménages pour un autre logement que le leur $U_H(D_J)$

Le calcul de l'intérêt qu'un autre logement présente pour un ménage diffère de celui de la satisfaction au logement : il résulte d'une moyenne arithmétique des valeurs d'intérêt que le ménage porte aux différents attributs de ce logement pondérées par leur importance respective. Cette moyenne signifie que, contrairement au cas précédent, qu'elles soient élevées ou faibles, les valeurs de l'intérêt que le ménage témoigne pour chacun des attributs d'un autre logement que le sien (et donc indirectement les valeurs d'appréciations des attributs) participent toutes au calcul de l'intérêt que le ménage a pour ce logement.

À importances égales, plus la valeur d'appréciation pour un logement de taille moyenne est faible, plus l'intérêt du ménage pour la taille du logement sera faible. Par ailleurs, on peut intuitivement supposer que son importance élevée lui confère un poids non négligeable dans la moyenne arithmétique, quelle que soit la valeur d'appréciation.

a) Amplitude des variations de $U_H(D_J)$ à la modification du paramètre $u_H(D_J)$ Les graphiques de la figure 7.8 confirme cette supposition : globalement, les forts effectifs de ménages observés pour certaines valeurs d'intérêt manifesté pour un autre logement se décalent légèrement vers la droite, c'est-à-dire vers des valeurs d'intérêt élevées, à mesure que la valeur de l'appréciation augmente. Cela signifie que, globalement, plus les ménages aux revenus élevés apprécient les logements de taille moyenne, plus ils témoignent de l'intérêt pour les logements de taille moyenne ; bien qu'il ne soit pas flagrant sur les résultats de la figure 7.8, le lien de cause à effet est tout de même immédiat et linéaire.

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements des ménages simulés Si les valeurs d'intérêt pour un autre logement se décalent vers des valeurs plus élevées, la structure globale des distributions n'est pas modifiée par les variations du paramètre : la modification de leur appréciation pour un logement de taille moyenne ne permet pas de diversifier les intérêts pour un autre logement des ménages aux revenus élevés.

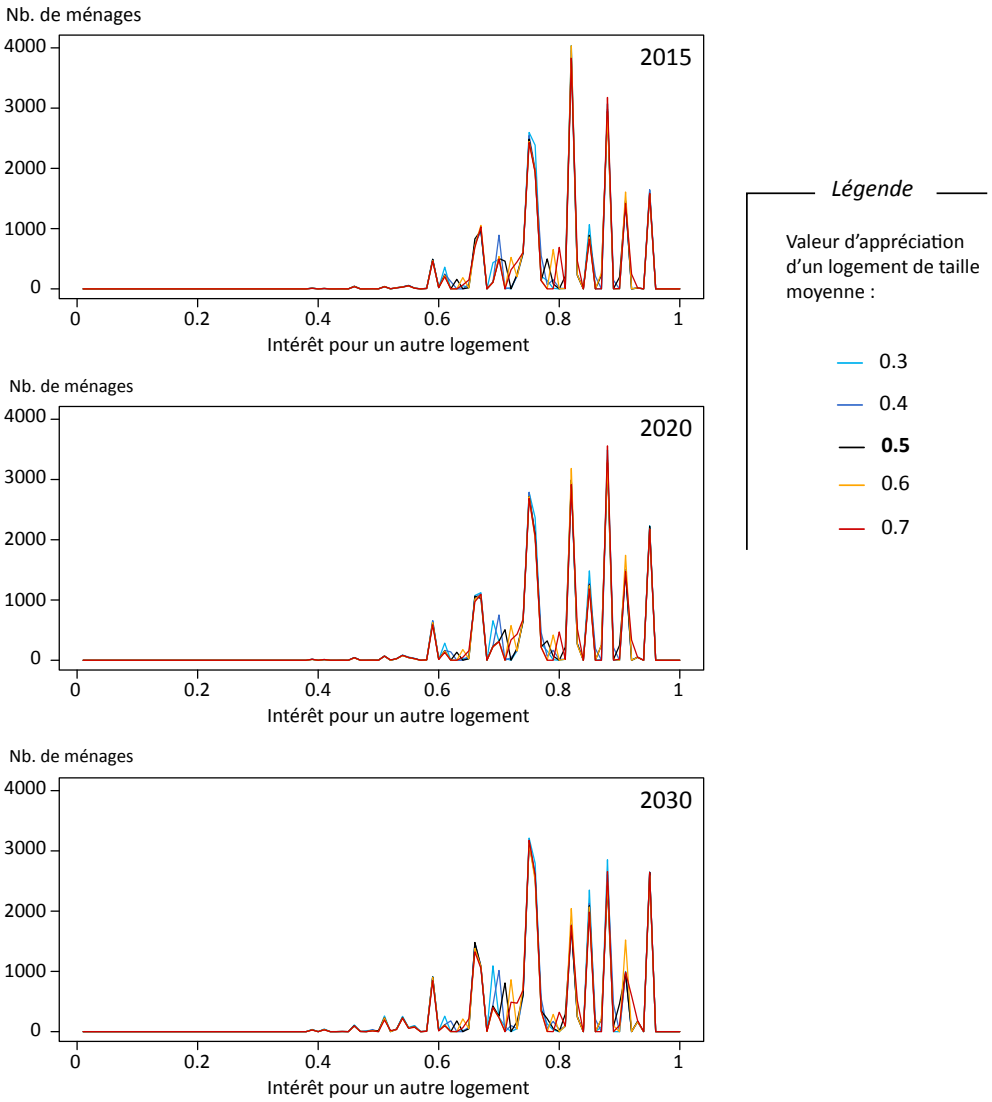


FIGURE 7.8 – Sensibilité de l'intérêt maximal des ménages aux revenus élevés pour un autre logement que le leur : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis d'un logement de taille moyenne

Impact sur l'intérêt pour une autre localisation résidentielle $U_H(J)$

a) Amplitude des variations de $U_H(J)$ à la modification du paramètre $u_H(D_J)$ L'augmentation de l'intérêt pour les logements de taille moyenne à mesure que l'appréciation pour ces logements augmente se répercute très faiblement sur l'intérêt des ménages aux revenus élevés pour une autre localisation résidentielle (Fig. 7.9). L'intérêt d'un ménage pour un autre logement intervient à hauteur de 75% dans le calcul de l'intérêt général pour une autre localisation résidentielle, mais les incidences des modifications du paramètre sur l'intérêt de ces ménages pour des logements autre que le leur est trop faible pour pouvoir influencer également les valeurs d'un intérêt plus général vis-à-vis d'une autre localisation résidentielle.

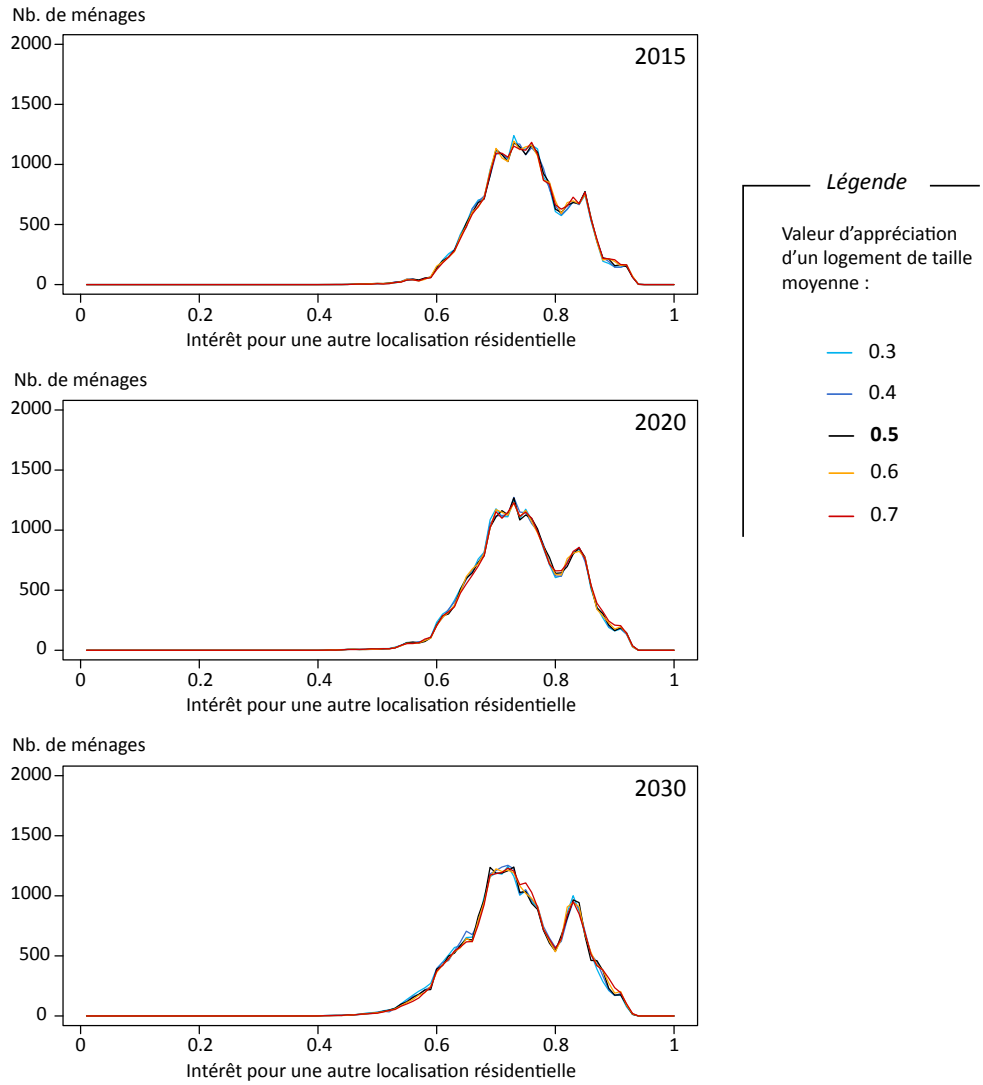


FIGURE 7.9 – Sensibilité de l'intérêt maximal des ménages aux revenus élevés pour une autre localisation résidentielle : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis d'un logement de taille moyenne

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements des ménages simulés L'impact des modifications du paramètre est quasi nul sur les valeurs d'intérêt des ménages aux revenus élevés pour une autre localisation résidentielle que la leur, ce qui n'entraîne aucune modification dans les comportements des ménages simulés.

Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation du paramètre

Collectivement, plus ils apprécient qu'un logement différent du leur soit de taille moyenne, plus l'intérêt des ménages aux revenus élevés pour ces logements augmente. Cette incidence est faible mais bien visible entre les différents résultats de simulation. Elle permet également de constater que le modèle réagit intuitivement à la modification de cette valeur de paramètre : en augmentant une valeur dans une moyenne arithmé-

tique, la valeur du résultat augmente, collectivement. Néanmoins, cette incidence reste trop discrète pour influencer les valeurs d'un résultat davantage agrégé, à savoir les valeurs globales de l'intérêt de ces ménages aux autres localisations résidentielles.

Enfin, cette sensibilité est constante dans le temps puisque l'ensemble des résultats des figures 7.8 et 7.9 appellent aux mêmes conclusions.

Au final, ce paramètre influence peu les résultats de simulation, et ne paraît pas être un levier approprié pour modifier efficacement les résultats du modèle, à moins peut être de tester des valeurs encore plus élevées de l'appréciation en question.

7.2.1.4 Sensibilité vis-à-vis de la modification d'un paramètre d'appréciation de l'environnement résidentiel actuel $A_H[E/D_I]$

Le paramètre choisi pour analyser l'impact d'une modification d'une appréciation de l'environnement résidentiel sur les résultats de simulation est l'appréciation de la part des ménages à hauts revenus dans un voisinage de 200 mètres autour du logement pour les ménages à revenus élevés. Elle est considérée comme « importante » par ce type de ménage.

Par défaut, la valeur d'appréciation maximale de cette variable est fixée à 70% : les ménages ont une appréciation maximale de leur voisinage social lorsque 70% de leurs voisins ont des revenus élevés, c'est-à-dire lorsque 70% de leurs voisins appartiennent au même rang social qu'eux. Nous avons choisi de tester sept valeurs en plus de celle-ci : 40%, 50%, 60%, 65%, 75%, 80% et 85%.

Augmenter les valeurs de cette appréciation (valeurs testées de 75% à 85%) signifie que nos ménages cibles sont plus exigeants vis-à-vis de leur voisinage social : il leur faut davantage de voisins appartenant à la même catégorie sociale qu'eux pour que cet attribut leur convienne pleinement (i.e. que leur appréciation soit égale à 1 - Fig. 7.10). En dessous de cette valeur, leur appréciation vis-à-vis de cet attribut de l'environnement résidentiel sera mitigée (i.e. comprise entre 0 et 1), et elle diminuera d'autant plus que la part des ménages aux revenus élevés sera faible dans leur voisinage. Inversement, en diminuant la part de ménages aux revenus élevés nécessaire pour que leur appréciation soit maximale - valeurs testées de 65% à 40% -, on accroît la tolérance des ménages ciblés vis-à-vis d'une certaine mixité sociale dans le voisinage (Fig. 7.10).

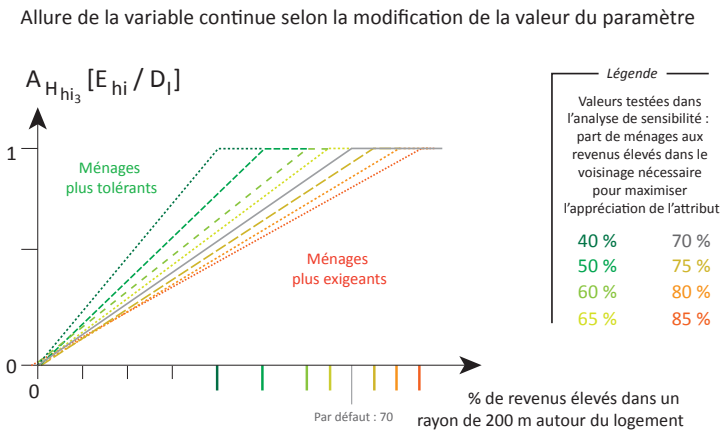


FIGURE 7.10 – Les différentes formes prises par la variable continue de l'appréciation de la part des hauts revenus dans un voisinage de 200m autour du logement par les ménages aux revenus élevés en fonction des valeurs choisies pour tester l'impact de la modification d'une appréciation de l'environnement résidentiel sur les résultats de simulation

À l'image des tests concernant les appréciations du logement, nous testons la sensibilité de deux résultats :

- la distribution des valeurs de satisfaction vis-à-vis de l'environnement résidentiel actuel des ménages aux revenus élevés ;
- la distribution des valeurs de satisfaction résidentielle actuelle des ménages aux revenus élevés.

Contrairement aux attributs du logement, les attributs de l'environnement résidentiel ne sont pas fixes dans le temps, ils évoluent au cours de la simulation. L'environnement résidentiel évolue à travers les nouvelles constructions et les déménagements des ménages dans les itérations passées. Ainsi, il est important de souligner que les variations potentielles sur les valeurs des résultats ne dépendent pas uniquement des variations des valeurs du paramètre. Néanmoins, l'analyse est considérée comme étant toutes choses égales par ailleurs.

Impact sur la satisfaction à l'environnement résidentiel actuel $S_H[E/D_I]$

a) Amplitude des variations de $S_H[E/D_I]$ à la modification du paramètre $A_H[E/D_I]$ La satisfaction de l'environnement résidentiel est une moyenne arithmétique des appréciations des attributs pondérées par leur importance respective ; le nombre d'attributs potentiellement considérés est plus important que dans le cas du logement. L'impact de la variation d'une valeur de paramètre, s'il existe, peut donc être davantage dilué dans le résultat de simulation.

Plus les valeurs de l'appréciation sont élevées (c'est-à-dire plus le ménage est exigeant vis-à-vis de son voisinage social), plus les valeurs de satisfaction à l'environnement résidentiel diminuent globalement, comme en témoigne le décalage, net et régulier, des courbes de distribution vers les valeurs de satisfaction plus faibles sur la figure 7.11.

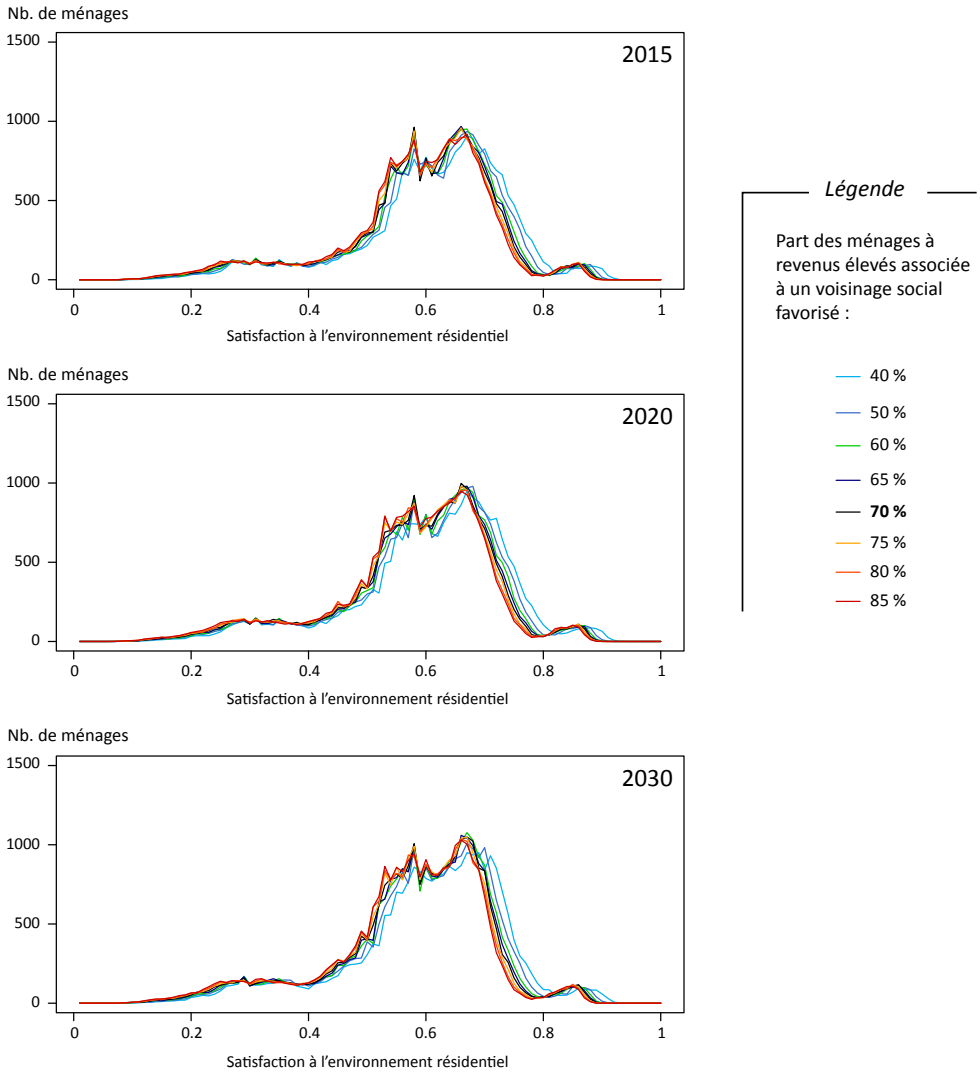


FIGURE 7.11 – Sensibilité de la satisfaction des ménages aux revenus élevés vis-à-vis de leur environnement résidentiel actuel : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis de la part des ménages aux revenus élevés associée à un voisinage social favorable

Cette évolution est linéaire : les ménages suivent un comportement assez régulier de réévaluation de leur satisfaction à l'environnement résidentiel à mesure que leur exigence vis-à-vis de leur voisinage social s'accentue. Cette sensibilité est constante dans le temps de simulation puisque les graphiques des trois dates étudiées présentent les mêmes tendances.

L'amplitude couverte par ce décalage entre les différentes distributions est faible. Lorsque les ménages aux revenus élevés sont très tolérants vis-à-vis d'une certaine mixité sociale dans leur voisinage (appréciation maximale à 40%), la satisfaction à l'environnement résidentiel d'une grande majorité des ménages est comprise entre 0,58 et 0,73, approximativement. Dans le cas de figure opposé, c'est-à-dire lorsque les ménages

ciblés sont très exigeants quant à la composition de leur voisinage social, la majorité des ménages a une valeur de satisfaction à l'environnement résidentiel comprise entre 0,53 et 0,70. Ainsi, malgré les constats précédents, l'appréciation de la part des hauts revenus est signifiante pour les valeurs de satisfaction à l'environnement résidentiel.

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements des ménages simulés L'impact de la modification des valeurs de l'appréciation de la part des hauts revenus sur la distribution des valeurs de satisfaction à l'environnement résidentiel n'est autre qu'une translation des valeurs : les distributions des valeurs de satisfaction, à l'environnement résidentiel, présentent la même forme globale. Cela nous permet de conclure que modifier l'exigence des ménages aux revenus élevés vis-à-vis de la composition de leur voisinage social ne permet pas de diversifier leurs valeurs de satisfaction à l'environnement résidentiel.

Impact sur la satisfaction résidentielle actuelle $S_H(I)$

a) Amplitude des variations de $S_H(I)$ à la modification du paramètre $A_H[E/D_I]$ Cet impact sur la satisfaction à l'environnement résidentiel se répercute également sur les valeurs de la satisfaction vis-à-vis de la localisation résidentielle actuelle du ménage, bien que l'environnement résidentiel ne participe à son calcul qu'à hauteur de 40%. Cette seconde agrégation dont le paramètre testé fait l'objet (i.e. la moyenne pondérée de la satisfaction au logement avec la satisfaction à l'environnement résidentiel) n'a pas complètement lissé les effets de l'appréciation et la satisfaction résidentielle des ménages est sensible à la variation du paramètre. Les ménages aux revenus élevés sont plus exigeants et cela se ressent globalement dans leur valeurs de satisfaction résidentielle : les distributions de valeurs de satisfaction résidentielle se décalent vers des satisfactions plus faibles à mesure que la part des hauts revenus correspondant à l'appréciation maximale de l'attribut par les ménages augmente (Fig. 7.11).

L'amplitude des variations de $S_H(I)$ à la modification du paramètre $A_H[E/D_I]$ n'est pour autant pas importante. Quand la satisfaction résidentielle d'une majorité de ces ménages est égale à 0,65 avec une valeur d'appréciation à 40% (courbe beige sur la figure 7.12), elle est de 0,62 environ avec une appréciation à 85% (courbe noire), ce qui reste très faible.

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements des ménages simulés Nous pouvons faire à nouveau le même constat que pour le résultat de simulation précédent : la variation des valeurs du paramètre n'a pour effet qu'une diminution gé-

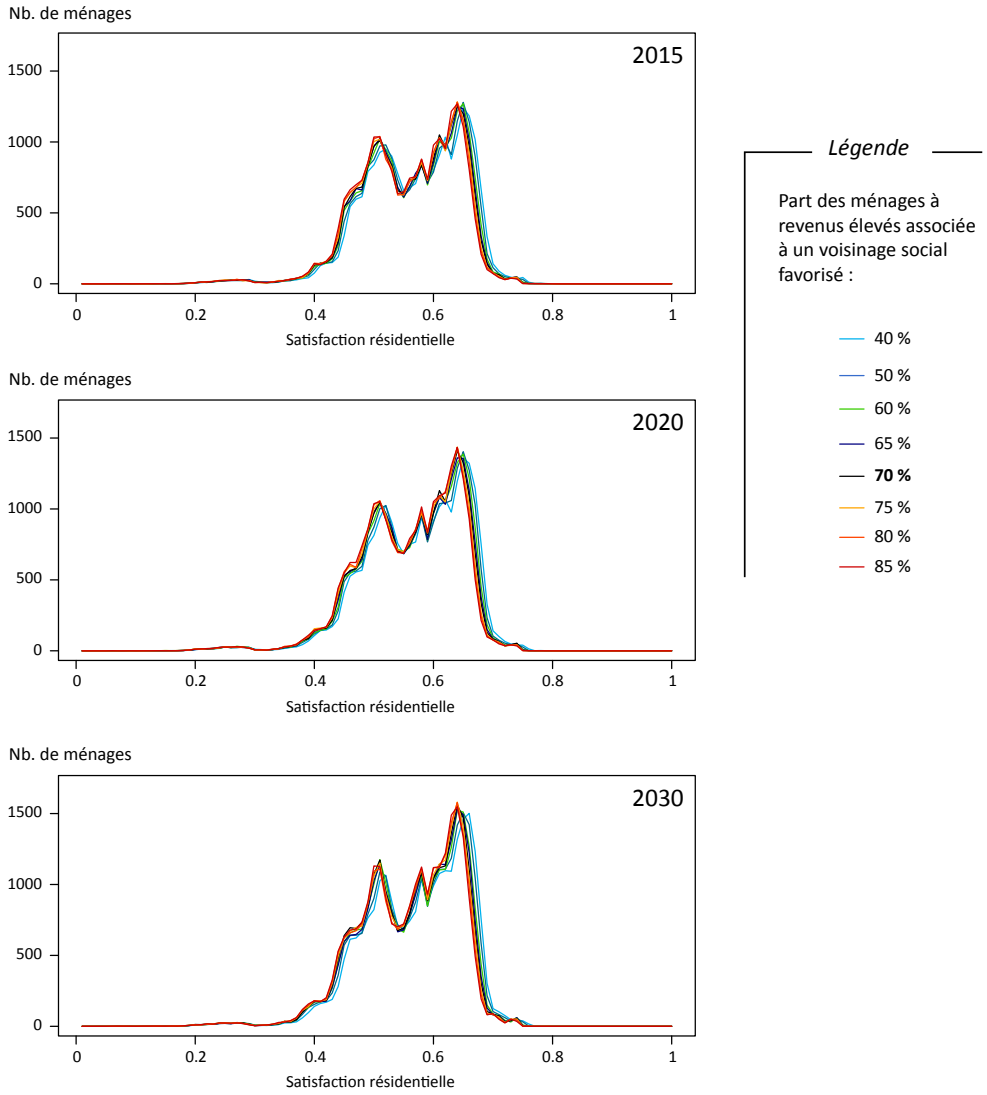


FIGURE 7.12 – Sensibilité de la satisfaction résidentielle actuelle des ménages aux revenus élevés : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis de la part des ménages aux revenus élevés associée à un voisinage social favorable

néralisée des valeurs de satisfaction résidentielle des ménages aux revenus élevés, mais n'a pas d'incidence sur l'hétérogénéité qui marque leurs comportements respectifs. Ces constats sont les mêmes aux trois dates analysées.

Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation du paramètre

En augmentant leur exigence vis-à-vis de la composition de leur voisinage social, les ménages aux revenus élevés diminuent collectivement la satisfaction qu'ils ont pour leur environnement résidentiel, et dans une moindre mesure, diminuent plus généralement leur satisfaction résidentielle actuelle.

La sensibilité de ces deux résultats de simulation est régulière lorsque les ménages

augmentent leur exigence vis-à-vis de la composition de leur voisinage social, et elle s'atténue à mesure que le paramètre est un peu plus agrégé dans un résultat : elle est moins manifeste dans les valeurs de satisfaction résidentielle que dans celles de satisfaction à l'environnement résidentiel. On peut donc supposer qu'elle deviendrait quasiment nulle lors d'une nouvelle transformation des résultats intermédiaires comme ce pourrait être le cas lors du calcul de l'attractivité d'un logement pour les ménages (i.e. soustraction de la valeur de satisfaction résidentielle à une valeur d'intérêt pour une autre localisation résidentielle).

7.2.1.5 Sensibilité vis-à-vis de la modification d'un paramètre d'appréciation d'un autre environnement résidentiel $u_H[E/D_J]$

L'appréciation choisie pour tester cette sensibilité est la même que pour l'environnement résidentiel actuel des ménages : nous faisons varier les valeurs de l'appréciation de la part des hauts revenus dans un voisinage de 200 mètre autour d'un autre logement que celui des ménages, et ce pour les ménages à revenus élevés également. Les valeurs choisies pour tester cette sensibilité sont les mêmes que dans le cas précédent : elles s'échelonnent de 40% à 85% de présence de ménages à hauts revenus.

Les résultats de simulation qui nous permettront d'évaluer cette sensibilité sont les suivants :

- la distribution des valeurs de l'intérêt maximal manifesté par les ménages ciblés vis-à-vis d'un autre environnement résidentiel que le leur ;
- la distribution des valeurs de l'intérêt maximal manifesté par les ménages ciblés pour une autre localisation résidentielle que la leur.

Impact sur l'intérêt pour un autre environnement résidentiel $U_H[E/D_J]$

Le calcul de l'intérêt qu'un ménage peut avoir pour un environnement résidentiel différent du sien est le même que celui de la satisfaction qu'il a de son propre environnement résidentiel, et les constats que l'on a pu faire dans le cas précédent sont valables pour cette analyse également ; le nombre d'attributs considérés dans la moyenne arithmétique pour calculer cet intérêt est même potentiellement plus élevé, puisque sont également considérées comme attribut d'un autre environnement résidentiel les accessibilités généralisées aux zones d'emploi, alors qu'elles ne prennent pas part au calcul de la satisfaction à l'environnement résidentiel.

a) Amplitude des variations de $U_H[E/D_J]$ à la modification du paramètre $u_H[E/D_J]$ Les graphiques de la figure 7.13 représentent les tendances observées pour

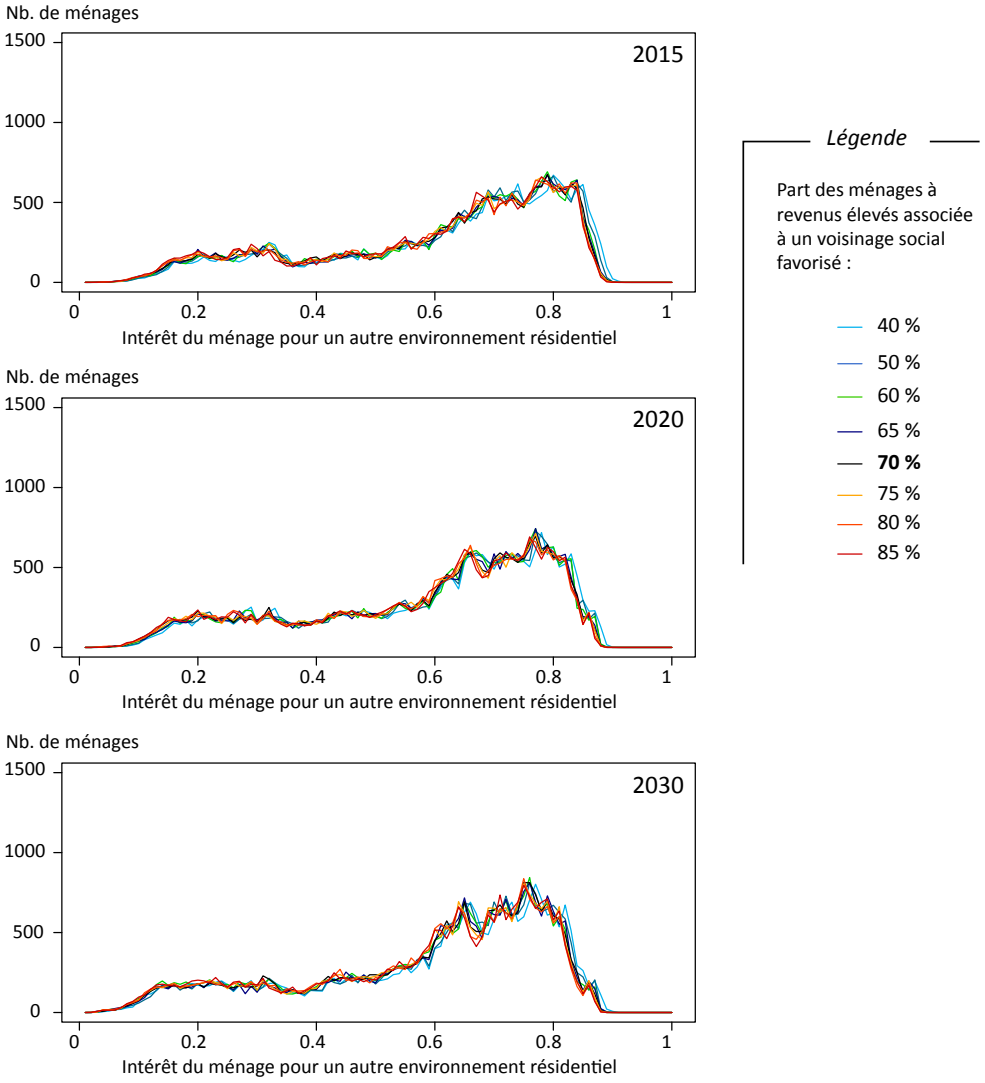


FIGURE 7.13 – Sensibilité de l'intérêt maximal des ménages aux revenus élevés vis-à-vis d'un autre environnement résidentiel : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis de la part des ménages aux revenus élevés associée à un voisinage social favorable

les valeurs de l'intérêt porté par les ménages aux revenus élevés à un environnement résidentiel différent du leur, selon les valeurs de l'appréciation testées. Quelle que soit la valeur donnée au paramètre d'appréciation de la part des hauts revenus dans un voisinage de 200 mètres autour d'un autre logement, le nombre de ménages pour chaque valeur d'intérêt manifesté pour l'environnement résidentiel est globalement le même. L'amplitude des variations de $U_H[E/D_J]$ à la modification du paramètre $u_H[E/D_J]$ est quasiment nulle.

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements des ménages simulés L'impact des variations du paramètre sur les valeurs de l'intérêt des ménages aux revenus élevés pour un environnement résidentiel différent du leur est très faible,

et ces variations des valeurs du paramètre ne permettent pas d'attester d'une quelconque diversification des comportements des ménages en termes d'évaluation d'un environnement résidentiel autre que celui dans lequel ils résident actuellement.

Impact sur l'intérêt pour une autre localisation résidentielle $U_H(J)$

a) Amplitude des variations de $U_H(J)$ à la modification du paramètre $u_H[E/D_J]$ Les variations des valeurs de l'appréciation semblent n'avoir aucun impact visible sur les valeurs de l'intérêt final qu'un ménage manifeste pour une localisation résidentielle différente de celle qu'il occupe.

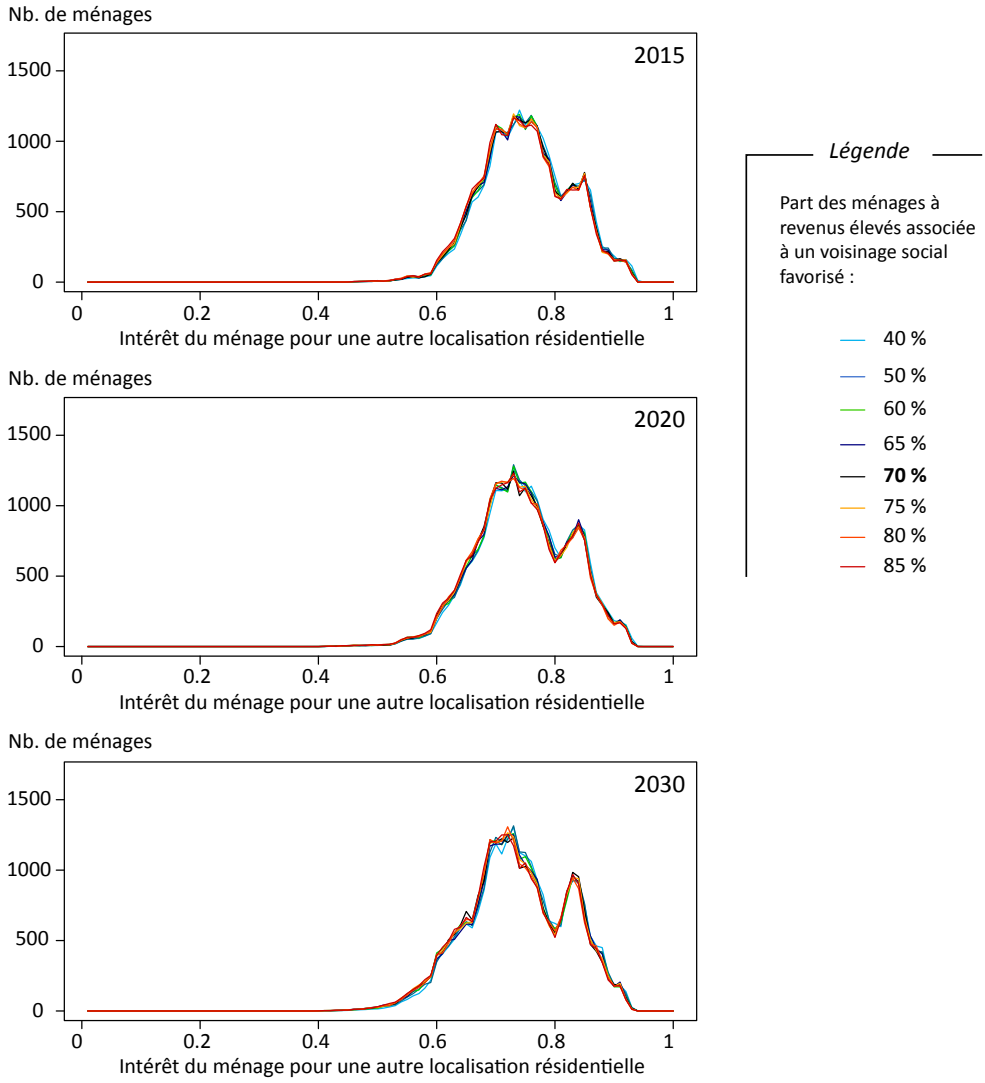


FIGURE 7.14 – Sensibilité de l'intérêt maximal des ménages aux revenus élevés vis-à-vis d'une autre localisation résidentielle : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis de la part des ménages aux revenus élevés associée à un voisinage social favorable

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements des ménages simulés En augmentant leur exigence vis-à-vis de la composition du voisinage sociale d'une localisation résidentielle potentielle, les ménages aux revenus élevés ne modifient pas, collectivement en tout cas, leur comportement dans l'évaluation d'une localisation résidentielle différente de celle qu'ils occupent actuellement.

Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation du paramètre

Devenir plus exigeants dans l'évaluation de leur environnement résidentiel social n'entame en rien l'intérêt que les ménages aux revenus élevés peuvent montrer pour des localisations résidentielles potentielles. À l'échelle globale, et compte tenu des valeurs de paramètre testées, la sensibilité des deux résultats de simulation étudiés aux modifications des valeurs de l'appréciation du voisinage social d'une autre localisation résidentielle que celle des ménages est nulle.

7.2.2 Sensibilité vis-à-vis de la modification des valeurs de l'échelle des importances ω_H

Pour quantifier les importances accordées par les ménages à chacun des attributs du logement ou de l'environnement résidentiel, nous utilisons la méthode de comparaisons par paires de Saaty (1977) et Yager (1977) ; les importances qualitatives accordées par les ménages aux différents attributs sont comparées deux à deux, selon une échelle nominale de quatre niveaux de comparaison. C'est en associant une valeur à chacun de ces niveaux de comparaisons que nous parvenons à quantifier l'importance de chaque attribut pour chaque ménage [12]. Par défaut, nous avons adapté à nos besoins les valeurs initialement définies par Saaty (1977) - cinq valeurs impairs de 1 à 9, avec quatre valeurs paires intermédiaires comme valeurs complémentaires si besoin - en ne retenant que les quatre premières valeurs impaires : 1 ; 3 ; 5 ; 7. Notre analyse de sensibilité est l'occasion de questionner la pertinence de ce choix pour Mobisim-MR ; l'objet de l'analyse dans cette section est donc l'échelle des valeurs choisies pour quantifier les niveaux de comparaisons des importances qualitatives accordées par les ménages aux différents attributs des localisations résidentielles. Pour simplifier, nous parlerons de « valeurs de l'échelle des importances » ou de « valeurs de l'échelle ».

L'échelle par défaut dans Mobisim-MR pour les valeurs d'importances est donc une suite de nombres impairs, ou suite arithmétique de raison 2, allant de 1 à 7, et c'est sur

12. Rappel : la quantification des importances est décrite dans la section 5.2.2 du chapitre 5.

cet écart de valeurs, ou raison mathématique, que nous avons souhaité baser l'analyse (échelle B dans le tableau 7.4). Il n'est techniquement pas possible, ni thématiquement pertinent, de tester tous les écarts de valeurs possibles, c'est pourquoi nous avons sélectionné huit possibilités : nous faisons varier l'écart entre les valeurs de l'échelle, d'un écart de 1 à 5, puis de 10, 25 et 33 (Tabl. 7.4). L'échelle A est une suite de raison 1 (valeurs de 1 à 4), et l'échelle H une suite arithmétique de raison 33, constituée de quatre valeurs bornées entre 1 et 100. Nous avons également ajouté le test d'une échelle géométrique, afin de comparer les résultats entre deux types de modélisation du jugement humain, l'échelle géométrique représentant une transitivité parfaite dans les comparaisons des importances entre elles, soit un classement des attributs parfaitement cohérent. L'échelle géométrique testée est la plus simple compte tenu de nos quatre niveaux de comparaison : c'est une suite géométrique de raison 2 dont les valeurs s'échelonnent de 1 à 8.

Tableau 7.4 – Valeurs des neufs échelles d'importance testées

Comparaisons	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**Géom.**
Raison (ou écart) entre les valeurs d'importance	+1	+2	+3	+4	+5	+10	+25	+33	×2
Également important	1	**1**	1	1	1	1	1	1	1
Un peu plus important	2	**3**	4	5	6	11	26	34	2
Beaucoup plus important	3	**5**	7	9	11	21	51	67	4
Importance absolue	4	**7**	10	13	16	31	76	100	8

Pour les valeurs de l'échelle des importances, un troisième point s'ajoute aux deux critères d'évaluation considérés au début de ce chapitre : il est induit directement par l'hypothèse sous-jacente à leur quantification ; cette hypothèse concerne la cohérence du jugement des ménages. Le classement relatif des attributs (du logement ou de l'environnement résidentiel) les uns par rapport aux autres se fait *via* une échelle de valeurs que Saaty a définie linéairement : les ratios entre les valeurs deux à deux ne sont volontairement pas les mêmes selon les comparaisons. Ce choix est justifié par le fait que les jugements humains ne sont jamais parfaitement cohérents dans un classement de préférences (Saaty, 1977) : *"despite their best efforts, people's feelings and preferences remain inconsistent and intransitive"*. En d'autres termes, le classement peut ne pas être parfaitement transitif. Mais ce choix de modélisation ne doit pas aller à l'encontre de la cohérence mathématique de la matrice. Pour s'assurer que celle-ci reste suffisamment cohérente, Saaty (1990) propose un indicateur que nous appliquerons dans l'analyse de sensibilité comme troisième critère d'évaluation.

Pour définir la sensibilité du modèle aux valeurs de l'échelle des importances, nous avons choisi d'analyser les résultats de simulation suivants :

- les vecteurs propres résultant des matrices de comparaison pour chaque ménage. Ce sont des résultats bruts, intermédiaires dans Mobisim-MR : ils ne constituent à aucun moment un résultat en soi, puisqu'ils permettent simplement d'affecter une valeur à chaque importance qualitative accordée par un ménage aux attributs d'un logement ou d'un environnement résidentiel. C'est avec ces valeurs, que nous nommerons « valeurs d'importance », que les ménages pondèrent ensuite leurs appréciations de ces mêmes attributs. En étudier la variation liée aux modifications des valeurs de l'échelle permet de vérifier la cohérence des résultats intermédiaires au calcul des évaluations résidentielles.
- les valeurs de satisfaction résidentielles des ménages d'une part et de l'intérêt maximal des ménages pour une autre localisation résidentielle que la leur d'autre part.

Ces résultats sont analysés à l'étape 1 de la simulation seulement.

7.2.2.1 Impact sur les vecteurs propres des matrices de comparaison

Pour analyser l'impact des valeurs de l'échelle des importances sur les vecteurs propres issus des matrices de comparaisons par paires des importances qualitatives, nous avons choisi d'étudier la distance entre les vecteurs propres de tous les ménages, dans chacune des situations d'évaluations résidentielles : satisfaction ou intérêt du ménage, pour le logement ou l'environnement résidentiel.

Nous utilisons pour cela le calcul de la distance euclidienne entre deux vecteurs propres. Ce calcul est illustré par l'exemple ci-dessous. Soit deux vecteurs propres pour les valeurs d'importances accordées par deux ménages différents aux attributs du logement ω_1 et ω_2 tels que :

$$\omega_1 = (a, b, c, d)$$

et

$$\omega_2 = (e, f, g, h)$$

La distance euclidienne entre ω_1 et ω_2 équivaut alors au produit scalaire des deux vecteurs propres :

$$d(\omega_1, \omega_2) = \sqrt{(a-e)^2 + (b-f)^2 + (c-g)2 + (d-h)^2}$$

Nous répétons cette opération jusqu'à ce que l'ensemble des distances entre tous

les vecteurs propres deux à deux ait été calculé. Le résultat pour notre analyse de sensibilité est la distribution des valeurs de distances entre les vecteurs propres, pour chaque échelle de valeurs testée.

Les vecteurs propres sont une traduction numérique des tableaux d'importances qualitatives, ils ne dépendent donc que des caractéristiques des ménages et non des logements habités ou évalués. Deux ménages ayant les mêmes caractéristiques (appartenant au même type de ménage) ont les mêmes vecteurs propres de valeurs d'importance.

Les vecteurs propres de chaque type de ménage sont également invariants dans le temps : l'importance d'un attribut pour chaque caractéristique du ménage ne change pas pendant la simulation (ex. la taille du logement est un attribut « très peu important » pour les ménages sans enfant, et elle le restera pendant toute la simulation). Par contre, le comportement du ménage vis-à-vis de ce qui est important pour lui ou non évolue lorsque ses caractéristiques sont modifiées (ex. lorsqu'un ménage a des enfants, la taille du logement devient pour lui importante alors qu'elle ne l'était pas lorsqu'il n'en avait pas).

a) Amplitude des variations des vecteurs propres des matrices de comparaisons à la modification du paramètre ω_H Mathématiquement, augmenter l'écart entre les valeurs de l'échelle d'importances signifie que l'on diminue les valeurs des ratios au moment des comparaisons. Par exemple, si pour un type de ménage donné le coût du logement présente une importance absolue par rapport à la taille du logement, le ratio entre les deux sera de $\frac{1}{4} = 0.25$ avec l'échelle A (le coût est quatre fois plus important que la taille, et la taille quatre fois moins importante que le coût) alors qu'il sera de $\frac{1}{31} = 0.03$ avec l'échelle F (le coût est 31 fois plus important que la taille du logement). Thématiquement, cela signifie que, au moment de comparer les différents attributs d'une localisation résidentielle pour évaluer leurs importances respectives, les ménages accentuent la différence entre les valeurs d'importances qu'ils vont accorder à chaque attribut : plus on augmente l'écart entre les valeurs de l'échelle, plus un attribut important aura du poids pour ces ménages, et *vice versa*.

Cette augmentation des distances entre les vecteurs propres des types de ménages est régulière avec l'augmentation de l'écart de valeurs des échelles - valeurs médianes et valeurs maximales des distributions augmentent régulièrement -, et elle paraît se stabiliser pour les échelles G et H (écart de 25 et de 33) (Fig. 7.15).

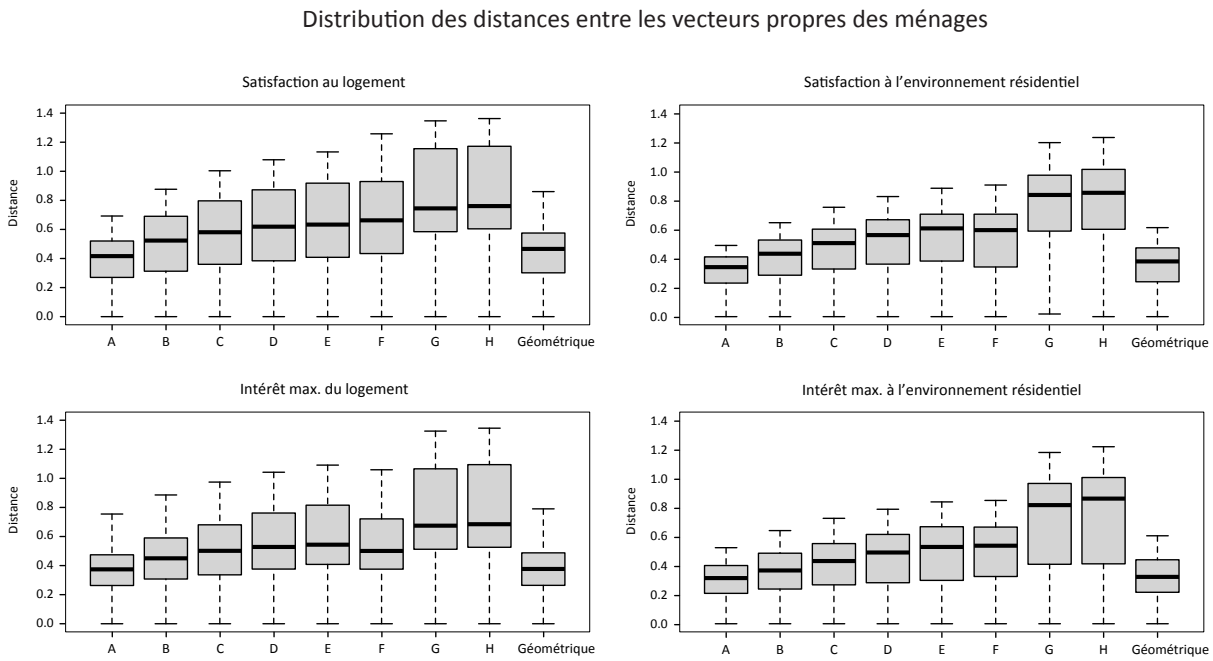


FIGURE 7.15 – Sensibilité de l'hétérogénéité entre les vecteurs propres des ménages par rapport aux échelles de valeurs testées pour les importances

L'amplitude des variations entre les différentes distributions de valeurs de distance est assez importante puisque les distances entre les vecteurs propres sont comprises entre 0 et 0.7 pour l'échelle A, et entre 0 et 1.3 pour les échelles G et H (Fig. 7.15). Nous pouvons également constater que l'échelle géométrique présente systématiquement des résultats assez proches de l'échelle A, dont l'écart entre deux valeurs d'importances est le plus faible.

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements des ménages simulés Cette augmentation manifeste de l'amplitude des distributions de valeurs de distances entre les vecteur propres des types de ménages traduit une diversification plus grande entre les valeurs d'importances accordées aux attributs des localisations résidentielles entre les types de ménage. Ainsi, en accentuant les différences entre les importances qu'ils accordent aux différents attributs, les types de ménages se différencient les uns des autres.

7.2.2.2 Impact sur la satisfaction résidentielle $S_H(D_I)$

Les vecteurs propres ne sont qu'un résultat intermédiaire et il est important de pouvoir évaluer également l'impact des modifications des valeurs de l'échelle des importances sur les comportements des évaluations résidentielles des ménages. Nous avons donc comparé pour chaque échelle de valeurs testée, toutes choses égales par ailleurs, les

distributions des valeurs de satisfaction résidentielle et d'intérêt maximal des ménages vis-à-vis d'une autre localisation résidentielle que la leur.

a) Amplitude des variations de $S_H(I)$ à la modification du paramètre ω_H Nous pouvons voir sur le graphique des distributions de valeurs de satisfactions résidentielles moyennes (Fig. 7.16) que les résultats des échelles A, B d'une part et G et H d'autre part se distinguent des autres, avec notamment des valeurs médianes de satisfaction plus faibles. Les distributions ne couvrent pas exactement les mêmes intervalles de valeurs de satisfaction, mais l'amplitude des variations entre chaque distribution reste relativement faible : les valeurs minimales de satisfaction résidentielle des ménages restent concentrées autour de 0.41 et 0.45 et les valeurs maximales entre 0.69 et 0.72 selon les échelles testées.

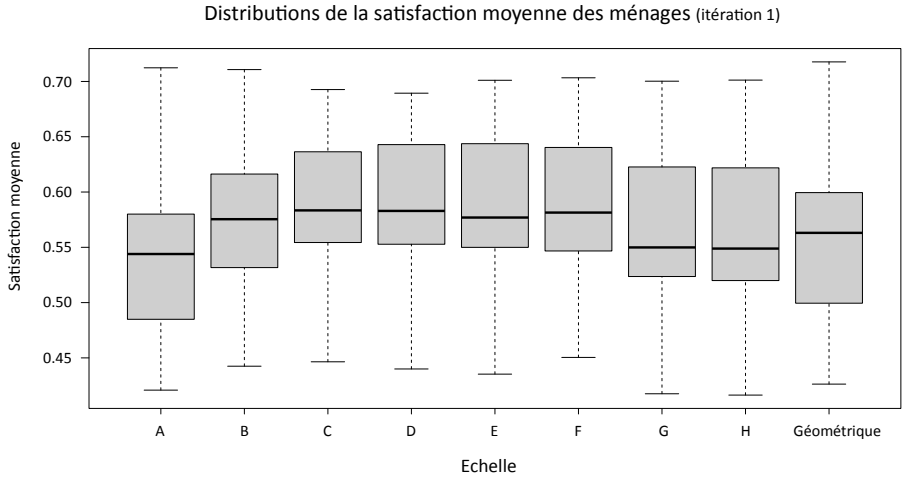


FIGURE 7.16 – Sensibilité de la distribution des valeurs de satisfaction résidentielle aux échelles de valeurs testées pour la quantification des importances

Globalement, les ménages paraissent plus satisfaits de leur localisation résidentielle lorsqu'ils accentuent les différences entre les importances accordées aux différents attributs : les valeurs médianes de satisfaction résidentielle sont plus élevées avec les échelles C, D, E et F (elle avoisinent 0.57, contre 0.54 avec les autres échelles). La satisfaction résidentielle médiane des ménages augmente à mesure qu'ils accentuent les différences entre les importances accordées aux différents attributs, pour se stabiliser puis diminuer à nouveau lorsque l'accentuation de ces différences est au plus fort, c'est-à-dire lorsqu'ils sont radicaux dans leurs comparaisons.

Les résultats des échelles G et H sont très similaires. Leur forte ressemblance provient de la proximité des valeurs de l'échelle testées, et des ratios qui en résultent

au moment des comparaisons. Ainsi, au-delà d'un certain écart entre les valeurs de l'échelle, il n'y a plus d'impact de cet écart sur les valeurs de satisfaction résidentielle des ménages.

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements des ménages simulés L'amplitude de valeurs couverte par chacune des distributions n'est pas tout à fait la même, ce qui traduit globalement quelques différences dans les comportements des ménages. Lorsque les ménages n'accentuent pas beaucoup les différences entre les valeurs d'importances qu'ils accordent aux différents attributs (échelle A), l'amplitude des valeurs de satisfaction résidentielle est particulièrement grande : ces valeurs s'échelonnent entre 0.41 et 0.72 ; c'est également le cas pour l'extrême inverse, c'est-à-dire lorsqu'ils radicalisent leur comparaisons des importances des attributs entre elles (échelles G et H). Entre ces deux extrêmes, les distributions des valeurs de satisfaction résidentielle sont moins larges, ce qui signifie que les comportements en termes de satisfaction vis-à-vis de la localisation résidentielle actuelle sont un peu plus homogènes.

Bilan de l'analyse de sensibilité de ce résultat à la variation du paramètre

Les distributions des valeurs de satisfaction résidentielle selon les modifications des valeurs de l'échelle ne sont pas les mêmes que celles de la distance entre les vecteurs propres. Il peut y avoir plusieurs explications à cela : les valeurs des appréciations qui participent au calcul de la satisfaction résidentielle d'une part, et la formalisation des composantes de la satisfaction résidentielle d'autre part. En effet, si la satisfaction à l'environnement résidentiel est une moyenne arithmétique où les importances pondèrent les valeurs d'appréciations des attributs correspondants, la satisfaction au logement est calculée différemment. Elle correspond en effet à la satisfaction d'un attribut seulement, et la valeur d'importance que le ménage accorde à cet attribut n'est pas une simple pondération mais un exposant, ce qui accentue le caractère extrême des valeurs faibles et élevées. Globalement, ces distributions restent relativement similaires, et on peut supposer que les valeurs de satisfaction résidentielle ne sont pas vraiment sensibles aux valeurs de l'échelle des importances.

Par ailleurs, le comportements des ménages lorsqu'ils évaluent leurs importances avec l'échelle A ou avec l'échelle géométrique est relativement similaire, ce qui signifie que l'échelle A, bien que linéaire, permet de simuler un comportement proche du comportement parfaitement cohérent. Cela s'explique par la forte proximité des ratios entre les valeurs de l'échelle des importances au moment des comparaisons par paires.

7.2.2.3 Impact sur l'intérêt des ménages pour une autre localisation résidentielle $U_H(J)$

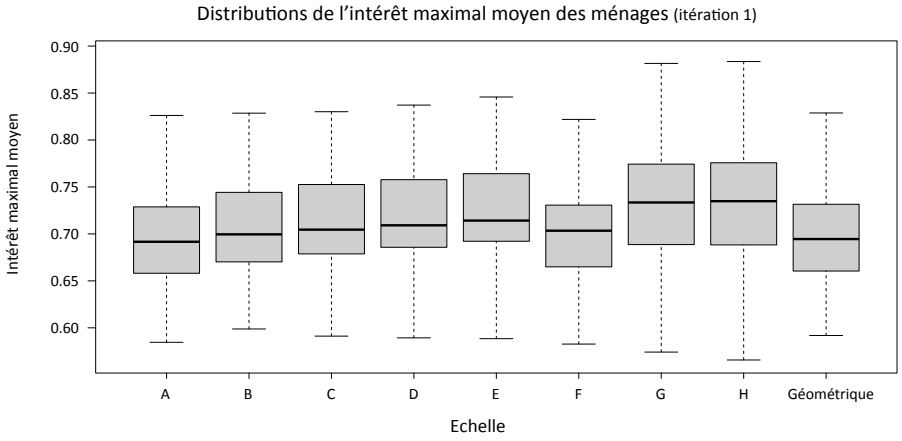


FIGURE 7.17 – Sensibilité de la distribution des valeurs d'intérêt maximal des ménages pour une autre localisation résidentielle aux échelles de valeurs testées pour la quantification des importances

a) Amplitude des variations de $U_H(J)$ à la modification du paramètre ω_H Les valeurs de l'intérêt maximal des ménages pour une autre localisation résidentielle ne présentent pas la même sensibilité aux modifications des valeurs de l'échelle des importances (Fig. 7.17). La valeur médiane de leur distribution est d'autant plus élevée que l'écart de valeurs de l'échelle augmente, et ce linéairement jusqu'à l'échelle de raison 10 (échelle F) qui marque une rupture dans la continuité. Puis, comme pour les valeurs de satisfaction résidentielle, les échelles G et H paraissent montrer un point de stabilisation dans l'évolution des résultats.

L'amplitude des variations des valeurs de $U_H(J)$ selon les modifications des valeurs de l'échelle des importance n'est pas très étendue. Toutes échelles confondues, les valeurs minimales des distributions sont comprises entre 0.58 et 0.60, et les valeurs maximales paraissent s'étaler entre 0.83 et 0.88, soit une amplitude de 0.05 dans les valeurs d'intérêt des ménages, ce qui est faible. Les résultats obtenus avec l'échelle géométrique sont similaires à ceux de l'échelle A.

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements des ménages simulés Globalement, plus l'écart entre les valeurs de l'échelle est élevé, plus la distribution paraît étendue. Si cela est assez discret pour les premières échelles testées, la diversification des valeurs d'intérêt des ménages pour une autre localisation résidentielle pour les échelles G et H, c'est-à-dire lorsque les ménages accentuent le plus leur jugement dans la comparaison des importances des différents attributs.

Bilan de l'analyse de sensibilité de ce résultat à la variation du paramètre

L'évolution des distributions des valeurs d'intérêt maximal des ménages pour une localisation potentielle rappelle celle que l'on pouvait observer pour les distributions des distances entre les vecteurs propres. L'intérêt qu'un ménage porte à une localisation résidentielle différente de la sienne est une moyenne arithmétique de deux moyennes arithmétiques (l'intérêt pour le logement et l'intérêt pour l'environnement résidentiel), où les ménages considèrent appréciations et importances à un même niveau (elles sont multipliées ensemble). Cela peut expliquer que l'impact des modifications des valeurs de l'échelle des importances ait la même forme sur ce résultat de simulation que celui des vecteurs propres.

En accentuant davantage les différences entre les importances accordées aux attributs des localisations résidentielles potentielles, non seulement les ménages se différencient les uns des autres en termes d'évaluations d'autres localisations résidentielles que la leur, mais augmentent également collectivement leur intérêt maximal, bien que les amplitudes de variations soient négligeables.

7.2.2.4 Impact sur la cohérence mathématique du jugement des ménages

Dès lors que l'échelle choisie n'est pas géométrique, la matrice de comparaison par paires n'est pas strictement cohérente mathématiquement parlant (cohérence cardinale du classement des valeurs ou même transitivité entre les critères évalués). Bien que cela soit l'effet recherché par Saaty pour modéliser le jugement humain, il est important de vérifier dans quelle mesure l'incohérence modélisée du jugement impacte la matrice. Pour cela, nous utiliserons la démarche proposée par Saaty (1977) et présentée dans Kordi et Brandt (2012).

La démarche consiste à calculer un indice de cohérence de la matrice CI [13] et de le confronter à un indice de cohérence RI [14] généré aléatoirement : le ratio entre les deux permet d'évaluer le niveau de cohérence de la matrice concernée (Kordi et Brandt, 2012).

Une matrice réciproque (ou de comparaisons par paires) est cohérente si et seulement si sa valeur propre la plus élevée λ_{max} est égale au nombre de critères évalués n, soit $\lambda_{max} = n$. Elle est incohérente si $\lambda_{max} > n$ (Saaty, 1977). À partir de ces théorèmes,

13. *"Consistency Index"*
14. *"Random Inconsistency Index"*

et de ces deux valeurs λ_{max} et n, le calcul de l'indice de cohérence de la matrice est défini tel que :

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)}$$

Cet indice permet ensuite de calculer le ratio de cohérence CR [15], qui atteste d'un niveau de cohérence raisonnable s'il est inférieur à 10% (Kordi et Brandt, 2012). Il est défini par le rapport entre CI et RI :

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

RI est « l'indice de cohérence d'une matrice de comparaison par paires générée aléatoirement » (Kordi et Brandt, 2012), et est à considérer comme une référence, sans unité de mesure, à laquelle est confrontée la cohérence de la matrice étudiée (Tabl. 7.5). Lorsque CR est supérieur à 10%, le jugement modélisé par la matrice est considéré comme incohérent.

Tableau 7.5 – Valeurs de l'indice aléatoire de cohérence RI selon le nombre de critères n

Nombre de critères n dans la matrice	**1**	**2**	**2**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Random Consistency Index - R.I.	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45

Source : Saaty (1980) dans Kordi et Brandt, 2012.

Nous avons effectué ce test sur chacune des matrices obtenues avec chacune des neuf échelles de valeurs d'importance. Au total, 288 matrices sont étudiées pour le logement et 1152 pour l'environnement résidentiel [16]. D'après le tableau 7.6, nous pouvons constater que le risque que le jugement soit trop incohérent augmente avec l'écart entre les valeurs de l'échelle. Pour les matrices des importances accordées aux attributs du logement, les incohérences dans les jugements des types de ménage commencent à apparaître pour un écart de 4 (échelle D), et 5 (échelle E) pour celles des attributs de l'environnement résidentiel. Il semblerait que le maximum d'incohérence soit atteint pour un écart entre les valeurs de l'échelle des importances compris autour de 10 (échelle F) - 1140 types de ménage sur 1152 présentent des jugements incohérents dans

15. *"Consistency Ratio"*

16. Pour cette analyse, nous avons calculé automtaiquement les matrices, c'est-à-dire en combinant toutes les modalités des quatre caractéristiques des ménages entre elles, sans tenir compte des combinaisons impossibles (ex. il ne peut y avoir de ménage « en couple sans enfant » avec « 3 enfants et plus » dans Mobisim, mais la matrice est tout de même calculée ici). Au total, cela représente $4 \times 3 \times 3 \times 3 = 144$ possibilités par évaluation (satisfaction et intérêt), soit 288 matrices pour le logement, et $4 \times 4 \times 3 \times 3 \times 4 = 576$ pour l'environnement résidentiel puisque vient s'ajouter la caractéristique des styles de vie, soit un total de 1152 matrices pour les importances accordées par les ménages aux appréciations du logement actuel et celles d'un logement potentiel.

Tableau 7.6 – Résultats du test de cohérence de Saaty

	Matrices d'importance considérées	Nombre de matrices dont CR > 10%		
		Total[1]	Actuel[2]	Potentiel[3]
Échelle A	Logement	0		
	Environnement résidentiel	0		
Échelle B	Logement	0		
	Environnement résidentiel	0		
Échelle C	Logement	0		
	Environnement résidentiel	0		
Échelle D	Logement	18	18	0
	Environnement résidentiel	0		
Échelle E	Logement	54	34	20
	Environnement résidentiel	24	24	0
Échelle F	Logement	262	122	140
	Environnement résidentiel	1140	564	576
Échelle G	Logement	128	80	48
	Environnement résidentiel	852	396	456
Échelle H	Logement	128	80	48
	Environnement résidentiel	852	396	456

[1] Sur un total de 288 matrices pour le logement (144 par évaluation) et 1152 pour l'environnement résidentiel (576 par évaluation).
[2] Matrice des importances accordées aux attributs de la localisation résidentielle actuelle.
[3] Matrice des importances accordées aux attributs d'une localisation résidentielle potentielle.

leurs comparaisons par paires sur les importances de l'environnement résidentiel - pour diminuer faiblement ensuite puis se stabiliser (échelles G et H). Lorsque l'écart entre les valeurs de l'échelle est maximal (33 pour l'échelle H), 128 matrices sont considérées comme trop incohérentes sur les 288 analysées pour les importances du logement, et 852 pour l'environnement résidentiel.

Les matrices des importances de l'environnement résidentiel sont plus facilement incohérentes du fait de leur grand nombre de critères : plus le nombre d'attributs considérés dans la comparaison par paires est élevé, moins il est évident d'exprimer un jugement cohérent entre ceux-ci.

L'autre constat que l'on peut faire quant à ces résultats porte sur la distinction entre les matrices des importances des attributs d'une localisation résidentielle actuelle versus ceux d'une autre localisation résidentielle que celle vécue par les ménages. Les matrices dépendent des tableaux des importances qualitatives, et visiblement elles sont plus facilement incohérentes lors des comparaisons des attributs de la localisation résidentielle actuelle que des attributs des localisations potentielles. Pour les importances

accordées aux attributs du logement, le nombre de matrices jugées trop incohérentes est systématiquement supérieur pour les importances intervenant dans le calcul de la satisfaction que dans celui de l'intérêt des ménages, sauf pour l'échelle F. Pour l'environnement résidentiel, il est systématiquement supérieur pour les matrices d'importances de l'intérêt aux environnements résidentiels potentiels ; le nombre d'attributs plus élevé est une explication possible à ce résultat.

7.2.2.5 Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation du paramètre

Plusieurs constats peuvent être faits quant à l'analyse de sensibilité des échelles de valeurs des importances que les ménages accordent aux attributs des localisations résidentielles :

- les amplitudes de variations des résultats de simulation les plus marquées sont souvent observées entre les trois premières échelles testées, c'est-à-dire celles pour lesquelles les écarts de valeurs sont faibles ;
- les résultats de simulation obtenus avec les échelles G et H se distinguent systématiquement des autres ;
- les résultats de simulation obtenus avec l'échelle géométrique sont systématiquement proches de ceux obtenus avec l'échelle A, les deux étant de raison mathématique deux.

D'après ces résultats, les échelles G et F, puis A et B, paraissent les plus aptes à modéliser une diversité des évaluations résidentielles des ménages. La forte similarité des résultats de l'échelle géométrique avec l'échelle A peut être un frein à l'utilisation de cette dernière, compte tenu de ce que cela implique au niveau de la cohérence du jugement humain. D'autre part, les échelles dont les écarts entre les valeurs sont les plus faibles (respectivement 1 pour A, 2 pour B et 3 pour C) permettent de générer des matrices dont le niveau d'incohérence mathématique est acceptable. Ces différents résultats nous confortent dans le choix de l'échelle B, c'est-à-dire celle que nous avons adaptée de Saaty, dont l'écart entre les valeurs est de 2. En effet, les résultats qu'elle permet de simuler correspondent à un compromis entre la simulation de comportements des ménages relativement hétérogènes à un niveau global et respecte une certaine cohérence mathématique dans la structure des matrices qu'elle génère à partir des tableaux d'importances.

7.3 Le coût du logement

Paramètres testés

Rappel de la section 3.2.1 du chapitre 3

Dans Mobisim-MR, le coût du logement est un *proxy*, qui dépend de la taille du logement - plus le logement est grand, plus son coût est élevé - et de son voisinage social - plus le revenu des ménages résidant dans le voisinage est élevé, plus le coût est élevé. Ces deux variables sont combinées dans une moyenne pondérée (Étape 1 sur la figure 7.18).

Une fois quantifié, le coût est affecté à une des trois classes qualitative de l'attribut « coût » du logement (Étape 2 sur la figure 7.18).

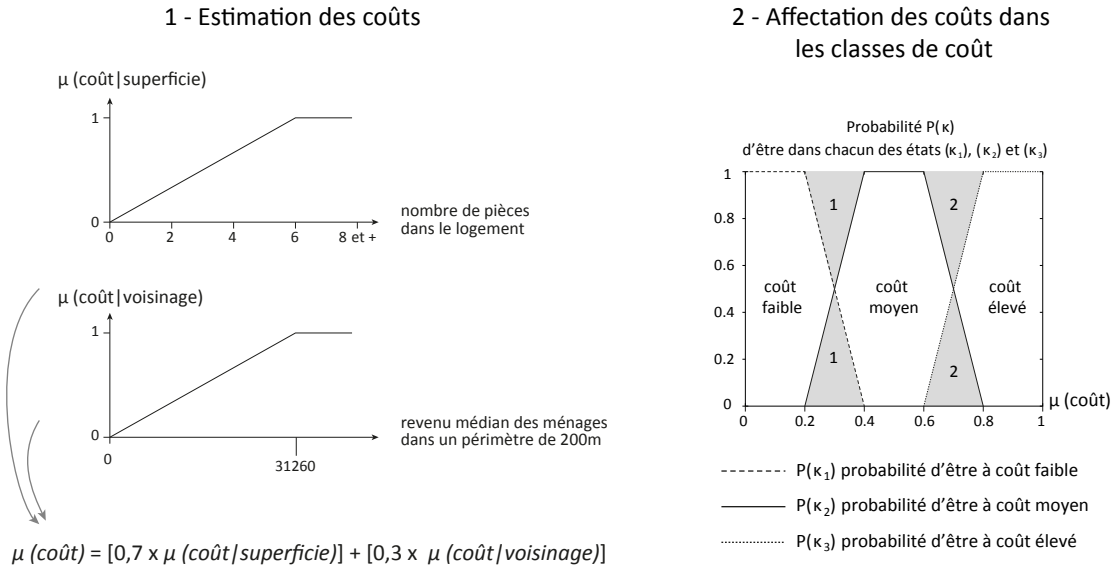


FIGURE 7.18 – Les paramètres de l'estimation du coût du logement et leur valeur par défaut

Tandis que les autres paramètres étudiés dans l'analyse de sensibilité participent aux étapes dans la décision résidentielle du ménage, le coût du logement intervient en amont, puisqu'il concerne la manière d'estimer un attribut du logement. L'objectif ici est de tester l'impact des modifications de chaque paramètre (quatre en tout) intervenant dans l'estimation du coût des logements réparti en trois classes, et d'observer l'impact de ces modifications sur les résultats de simulation du modèle.

Chacune des variables utilisées dans l'estimation du coût fait l'objet d'un test de sensibilité (cf. encadré et figure 7.18). La variable δ représentant le prix de l'immobilier sur le coût des logements en vente ne sera pas testée. Le nombre de valeurs testées n'est

pas le même pour chaque paramètre. Chaque valeur est testée toutes choses égales par ailleurs, les autres paramètres étant fixés à leur valeur par défaut.

Résultats étudiés

Le premier résultat de simulation directement concerné par l'estimation du coût est le nombre de logements dans chacune des trois classes :

- Les modifications des variables qui contribuent au calcul du coût ou leur poids dans le calcul final impactent-elles le passage d'une classe de coût à une autre pour les logements ?
- Est ce que le changement dans l'affectation du coût dans chacune des classes affecte le nombre de logements dans chaque classe ?

Nous analysons également les résultats généraux, le taux de migration moyen et la satisfaction moyenne sur l'agglomération : les modifications des différentes valeurs de paramètres, *via* les impacts observés précédemment, ont-elles des conséquences sur ces indicateurs généraux ?

La sensibilité des résultats de simulation aux modifications des valeurs de paramètres est systématiquement comparée aux résultats obtenus avec la configuration par défaut des valeurs de paramètres (Fig. 7.18). Enfin, comme ces paramètres ne concernent pas le comportement même des ménages, l'hétérogénéité des comportements n'est pas un critère d'évaluation pour l'analyse de cette sensibilité.

7.3.1 Sensibilité vis-à-vis de la modification du paramètre « taille du logement » correspondant à un coût du logement maximal $\mu(cout|superficie)$

Une seule valeur est testée pour le paramètre « taille du logement » correspondant à un coût du logement maximal (Fig. 7.19). En diminuant la taille du logement pour laquelle le coût est maximal de 6 pièces à 5 pièces, on augmente potentiellement le coût de tous les logements : à tailles équivalentes, le coût relatif à la superficie sera plus élevé.

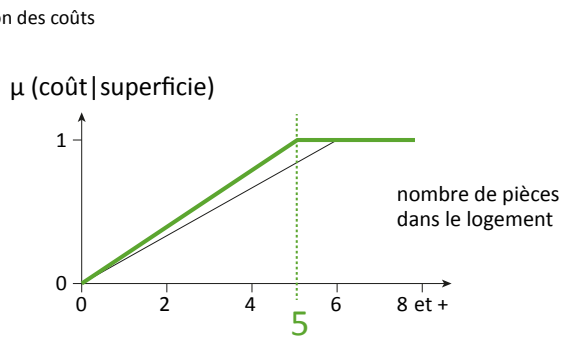


FIGURE 7.19 – Valeur testée pour étudier l'impact de la modification du paramètre « taille du logement » correspondant à un coût du logement maximal (égal à 1)

7.3.1.1 Impact de la modification du paramètre $\mu(cout|superficie)$ sur le nombre de logements dans chaque classe de coût

La diminution de cette valeur de paramètre revient à considérer une augmentation du prix au mètre carré sur l'agglomération. De fait, le nombre de logements à coût faible et moyen diminue fortement par rapport aux résultats de simulation obtenus avec la valeur par défaut (coût maximal des logements pour une taille du logement de 6 pièces), et le nombre de logements à coût élevé augmente (Fig. 7.20). Ce résultat est assez intuitif compte tenu du rôle du paramètre dans l'estimation du coût.

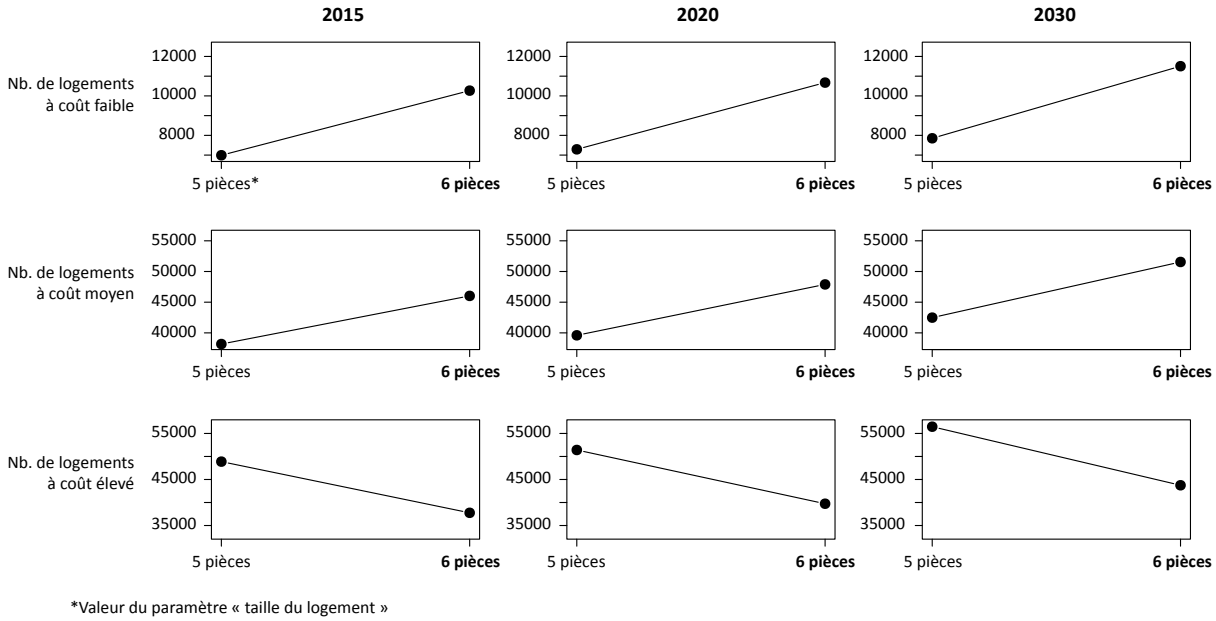


FIGURE 7.20 – Sensibilité du nombre de logements par classe de coût à une modification du paramètre « taille du logement » correspondant à un coût du logement maximal (égale à 1) $\mu(cout|superficie)$

L'amplitude des variations des valeurs est d'environ 3 000 logements à coût faible en moins en 2030 (sur un total de 12 000 logements à coût faible avec la configuration

initiale, soit une perte non négligeable de presque un quart du total de ces logements) et 15 000 logements pour les coûts moyens sur les 50 000 simulés auparavant, et 7 000 logements à coût élevé supplémentaires (42 000 logements à coût élevé avec la configuration par défaut et plus de 55 000 avec la modification du paramètre). Les variations sont assez importantes, et l'impact sur l'offre en logement n'est pas négligeable.

Si on se réfère à l'affectation des coûts du logement dans les classes de coûts (Fig. 7.18), cela signifie que les logements susceptibles d'appartenir à la classe de coût élevé sont plus nombreux. Leur valeur de coût est soit supérieure à 0,8, soit comprise entre 0,6 et 0,8 (zone de probabilité d'appartenir à la classe « coût moyen » ou « coût élevé »).

7.3.1.2 Impact de la modification du paramètre $\mu(cout|superficie)$ sur la satisfaction résidentielle moyenne sur l'agglomération

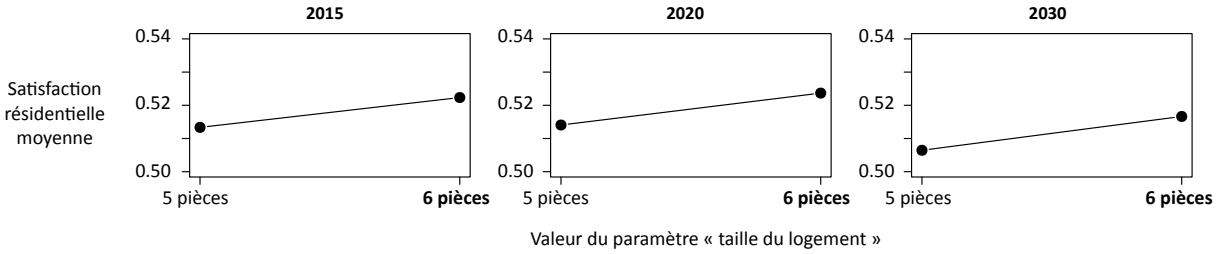


FIGURE 7.21 – Sensibilité de la satisfaction moyenne sur l'agglomération à une modification du paramètre « taille du logement » correspondant à un coût du logement maximal (égale à 1) $\mu(cout|superficie)$

À un niveau plus agrégé, ce plus grand nombre de logements à coûts élevés entraine un léger impact sur la satisfaction globale à l'échelle de l'agglomération : elle est légèrement plus faible (plutôt autour de 0.51) qu'avec la configuration par défaut (autour de 0.52) (Fig. 7.21).

7.3.1.3 Impact de la modification du paramètre $\mu(cout|superficie)$ sur le taux annuel de migration à la modification

Le taux de migration est sensiblement plus élevé lorsque le nombre de logements chers est plus important sur l'agglomération (Fig. 7.22), et ce de manière systématique dans le temps. On pourrait attribuer ce résultat à la baisse relative de l'insatisfaction : l'offre est potentiellement moins satisfaisante compte tenu des besoins des ménages, ce qui les encouragent à déménager plus.

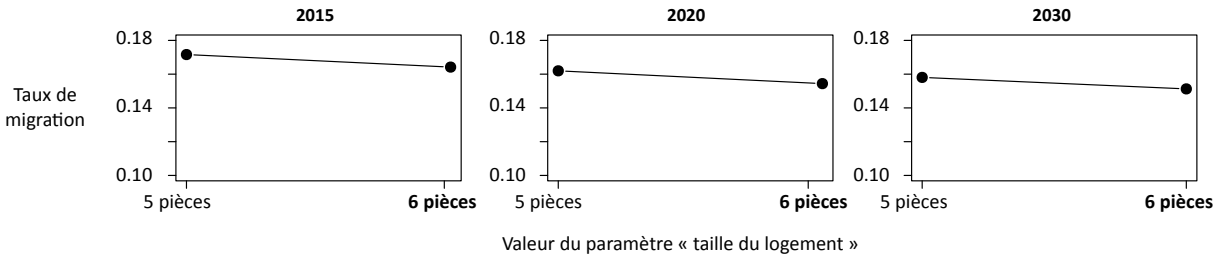


FIGURE 7.22 – Sensibilité du taux annuel de migration à une modification du paramètre « taille du logement » correspondant à un coût du logement maximal (égale à 1) $\mu(cout|superficie)$

Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation du paramètre

La modification de la taille du logement correspondant à un coût du logement maximal influence surtout le nombre de logements dans chaque classe de coût, et de manière moins significative les résultats généraux du modèle. L'augmentation du prix au mètre carré ainsi simulée impacte assez nettement la structure des ménages par classe de coût, au détriment des logements à coût faible et moyen, très sensible à la modification de ce paramètre. Les logements à coût faible, déjà peu nombreux sur l'agglomération étant donné le nombre total de logement (environ 106 800 en 2030), sont encore moins valorisés avec la configuration de paramètre testée ici.

7.3.2 Sensibilité vis-à-vis de la modification du paramètre « revenu médian dans le voisinage » correspondant à un coût du logement maximal $\mu(cout|voisinage)$

Le paramétrage du « revenu médian dans le voisinage » correspondant à un coût du logement maximal dépend de la distribution des valeurs du revenu médian des ménages dans un périmètre de 200m autour de leur logement. Par défaut, la valeur du paramètre est fixée au troisième quartile de cette distribution. Nous avons choisi de tester deux autres valeurs : la valeur médiane de la distribution (22 025) et une valeur équidistante des deux autres, 26 642. Ces deux valeurs sont inférieures à la valeur par défaut : à mesure que l'on diminue la valeur seuil de la variable, on augmente les chances qu'elle soit atteinte dans le voisinage, et donc on augmente aussi potentiellement le coût du logement.

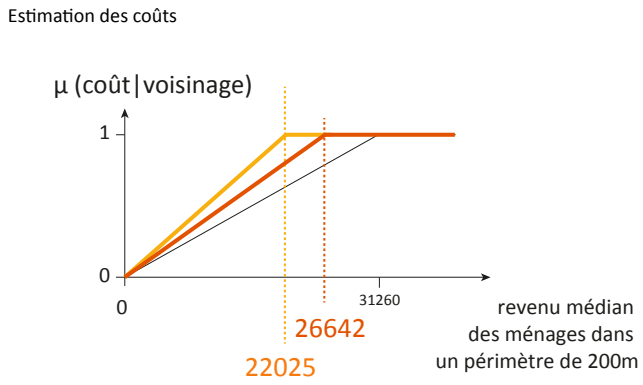


FIGURE 7.23 – Valeurs testées pour étudier l'impact de la modification du paramètre « revenu médian dans le voisinage » correspondant à un coût du logement maximal (égal à 1)

7.3.2.1 Impact de la modification du paramètre $\mu(cout|voisinage)$ sur le nombre de logements dans chaque classe de coût

À l'image des résultats de sensibilité précédents, la modification du revenu médian dans le voisinage du logement correspondant à un coût maximal du logement entraîne une nette diminution du nombre de logements à coût faible, linéairement, bien que le coût du voisinage ne pèse que 30% dans le calcul du coût final des logements (Fig. 7.24). Le nombre de logement à coût moyen diminue également mais dans des proportions moins marquées que dans le cas précédent ; la réciproque est vraie pour les logements à coût élevés, dont l'augmentation est certaine, mais moins forte que dans le cas précédent.

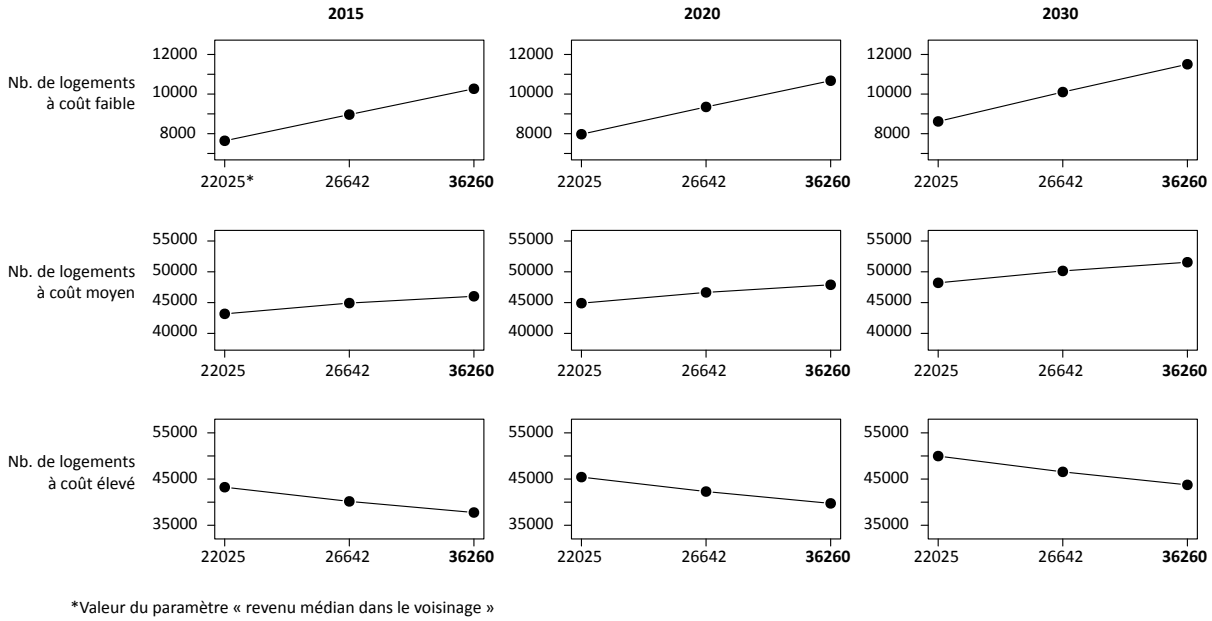


FIGURE 7.24 – Sensibilité du nombre de logements par classe de coût à une modification du paramètre « revenu médian dans le voisinage » correspondant à un coût du logement maximal (égale à 1) $\mu(cout|voisinage)$

7.3.2.2 Impact de la modification du paramètre $\mu(cout|voisinage)$ sur la satisfaction résidentielle moyenne

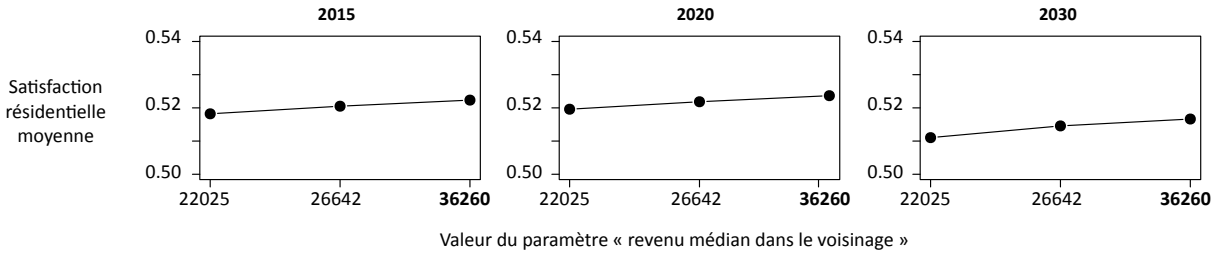


FIGURE 7.25 – Sensibilité de la satisfaction moyenne sur l'agglomération à une modification du paramètre « revenu médian dans le voisinage » correspondant à un coût du logement maximal (égale à 1) $\mu(cout|voisinage)$

Les conséquences sur les valeurs de satisfaction moyenne des ménages sont également similaires au cas précédent (Fig. 7.25 : une offre en logements tournée essentiellement vers des logements à coûts moyens et élevés se ressent de la satisfaction moyenne sur l'agglomération, qui diminue, faiblement, à mesure que le nombre de logements à coût faible diminue.

7.3.2.3 Impact de la modification du paramètre $\mu(cout|voisinage)$ sur le taux annuel de migration

La sensibilité de ces variations sur le taux de migration est plus anecdotique : il n'évolue presque pas avec la modification des valeurs du paramètre.

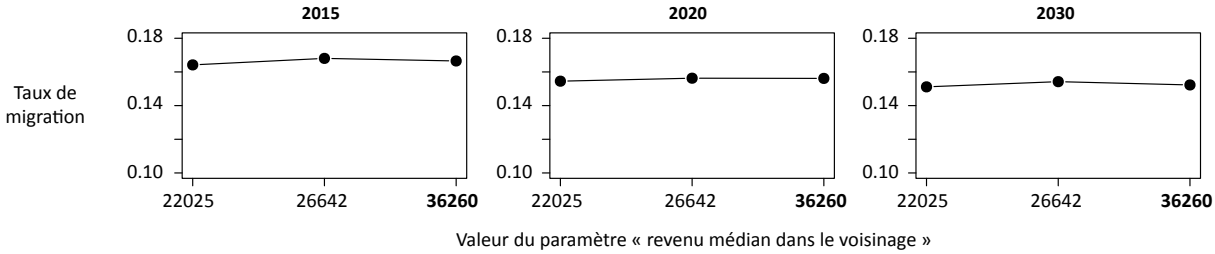


FIGURE 7.26 – Sensibilité du taux annuel de migration à une modification du paramètre « revenu médian dans le voisinage » correspondant à un coût du logement maximal (égale à 1) $\mu(cout|voisinage)$

Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation du paramètre

L'impact de la modification de ce paramètre sur les différents résultats de simulation suit les mêmes tendances que dans les tests précédents. La structure de l'offre des logements est sensible aux modifications, mais dans une moindre mesure : on déplore

une perte moins importante du nombre de logements à coût faible et moyen, et les logements chers sont plus nombreux, mais de manière plus relative.

L'influence sur les résultats généraux suit ces mêmes tendances : elle est plus discrète, à la mesure de l'influence sur le nombre de logements dans les classes de coût.

7.3.3 Sensibilité vis-à-vis de la modification de la part respective des paramètres « taille du logement » et « revenu médian dans le voisinage » dans le calcul du coût du logement μ

Le troisième paramètre testé est le poids relatif de chacune des deux variables précédentes dans l'estimation finale de la valeur du coût. Nous faisons varier la part du paramètre « taille du logement » $\mu_{cout|superficie}$ dans ce calcul en testant quatre valeurs (Fig. 7.27) :

- deux valeurs inférieures à la valeur par défaut : 0,6 et 0,65 : moindre poids de la taille du logement dans l'estimation du coût, importance plus marquée du voisinage social.
- deux valeurs supérieures à la valeur par défaut : 0,75 et 0,8 : tendance à la prédominance de la taille du logement dans l'estimation du coût, le voisinage social devient négligeable.

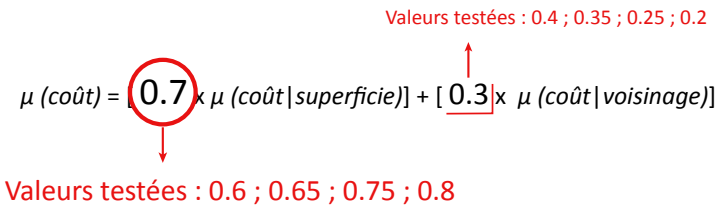


FIGURE 7.27 – Valeurs testées pour étudier l'impact de la modification de la part respective des paramètres « taille du logement » et « revenu médian dans le voisinage » dans le calcul du coût du logement

7.3.3.1 Impact de la modification de la part respective des deux variables dans le calcul de μ sur le nombre de logements dans chaque classe de coût

Compte tenu des valeurs testées, chaque modification de ce paramètre donne plus de poids à la taille du logement correspondant à un coût maximal du logement qu'au revenu médian dans le voisinage (participation de 60% à 80% dans le calcul du coût

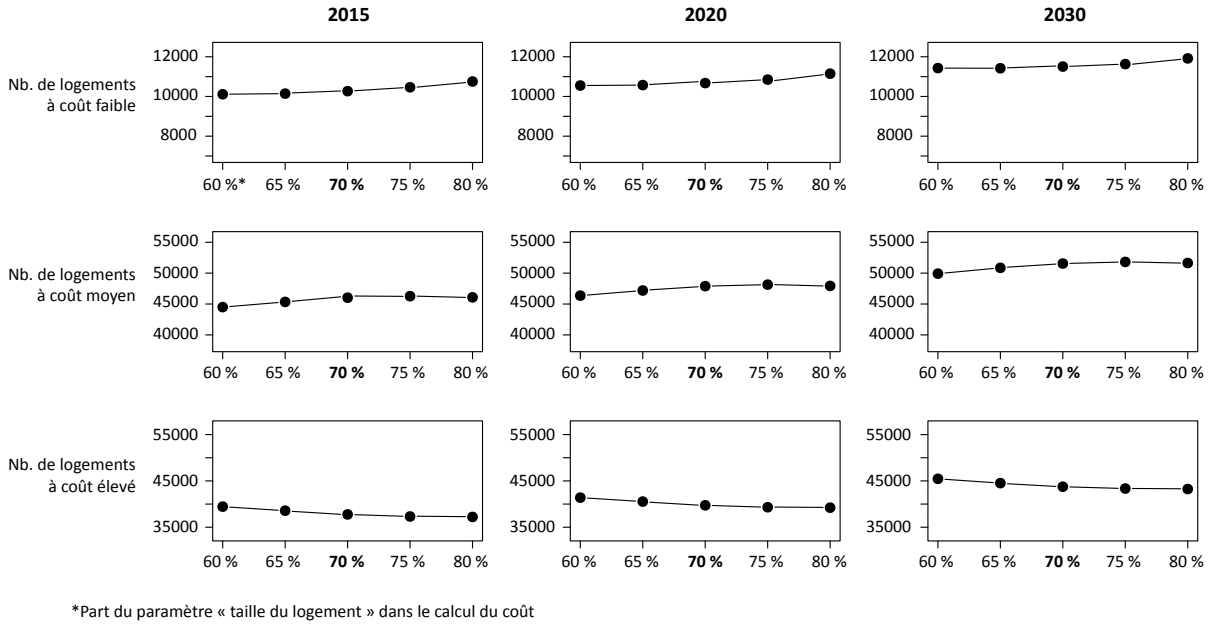


FIGURE 7.28 – Sensibilité du nombre de logements par classe de coût à une modification de la part respective des paramètres « taille du logement » et « revenu médian dans le voisinage » dans le calcul du coût du logement μ

final μ). Sur la figure 7.28, on peut observer une augmentation du nombre de logements à coût faible et moyen, et une légère diminution du nombre de logements à cout élevé à mesure que la valeur de la taille du logement correspondant à un coût maximal a de l'importance dans le calcul du coût. Pour synthétiser : plus la taille du logement a du poids dans le coût, plus les logements sont abordables financièrement.

Ces constats peuvent trouver deux explications :

– un faible nombre de grands logements dans l'agglomération ;
– des revenus médians globalement élevés.

Pour vérifier si une de ces hypothèses est vraie ou si le résultat est une combinaison des deux, il faudrait analyser les distributions respectives des valeurs de coût sur la taille du logement et celles du coût sur le voisinage social. N'ayant pas pu anticiper ce résultat, nous ne disposons pas de ces résultats avec les simulations effectuées pour l'analyse de sensibilité.

7.3.3.2 Impact de la modification de la part respective des deux variables dans le calcul de μ sur la satisfaction résidentielle moyenne

Le constat concernant la sensibilité de la satisfaction résidentielle moyenne à la modification de la part relative de chacune des variables est l'inverse que ceux qui ont pu être faits dans les deux cas précédents : avec la baisse moyenne du coût des

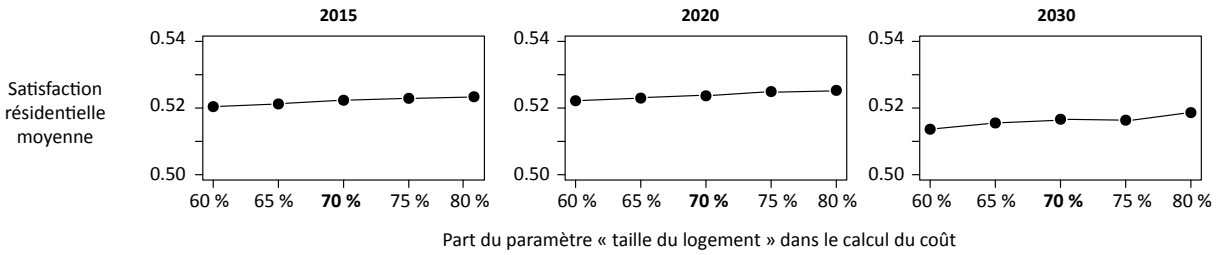


FIGURE 7.29 – Sensibilité de la satisfaction moyenne sur l'agglomération à une modification de la part respective des paramètres « taille du logement » et « revenu médian dans le voisinage » dans le calcul du coût du logement μ

logements, la satisfaction moyenne des ménages augmente sur l'agglomération. Cette croissance de la satisfaction est faible (+ 0,01) mais bien régulière à mesure que le coût moyen des logements diminue (i.e. à mesure que la part de la valeur de la taille du logement correspondant à un coût maximal dans le calcul du coût μ augmente).

7.3.3.3 Impact de la modification de la part respective des deux variables dans le calcul de μ sur le taux annuel de migration

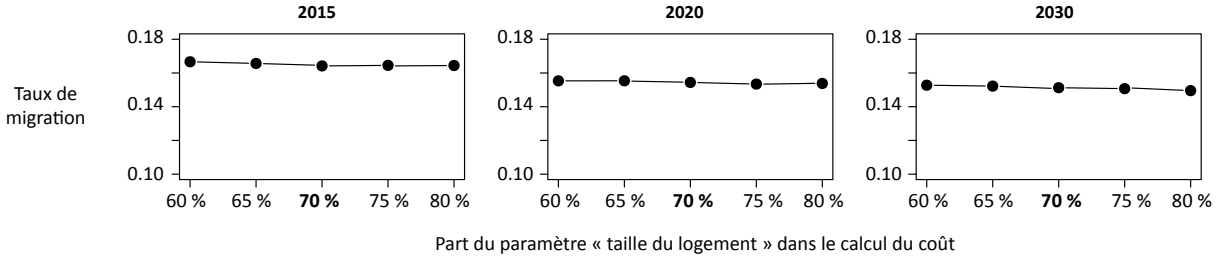


FIGURE 7.30 – Sensibilité du taux annuel de migration à une modification de la part respective des paramètres « taille du logement » et « revenu médian dans le voisinage » dans le calcul du coût du logement μ

Par ailleurs, bien qu'une fois encore les différences entre les valeurs testées soient minimes, on observe une tendance à la baisse du taux de migration à mesure que le nombre de logements à coût faible et moyen augmente. On peut supposer que l'offre en logements convient mieux aux ménages, qui ont, de fait, moins d'intérêt à déménager.

Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation du paramètre

La sensibilité de ces trois résultats de simulation (structure par coût des logements, satisfaction résidentielle moyenne et taux annuel de migration) aux modifications de ce paramètre est faible mais régulière avec les valeurs du paramètre.

Trois constats méritent d'être faits concernant l'impact des variations de ces trois paramètres :

- quel que soit le paramètre dont la valeur est modifiée, l'évolution des effectifs dans les classes de coût est quasiment inversée entre les logements à coût faible et les logements à coût élevé. L'évolution du nombre de logements à coût moyen est souvent plus nuancée, mais suit les tendances d'évolution des logements à coût faible ;
- la satisfaction moyenne et le taux de migration moyens sont inversement liés : plus la satisfaction est élevée (toutes proportions gardées), plus le taux de migration diminue ;
- la structure par coût des logements et la satisfaction résidentielle moyenne sont liées : la satisfaction résidentielle moyenne des ménages sur l'agglomération a tendance à augmenter lorsque l'offre en logement est financièrement plus abordable.

7.3.4 Sensibilité vis-à-vis de la modification de la probabilité d'affectation des valeurs de $P(\kappa_1)$, $P(\kappa_2)$ et $P(\kappa_3)$ à chacune des classes de coût

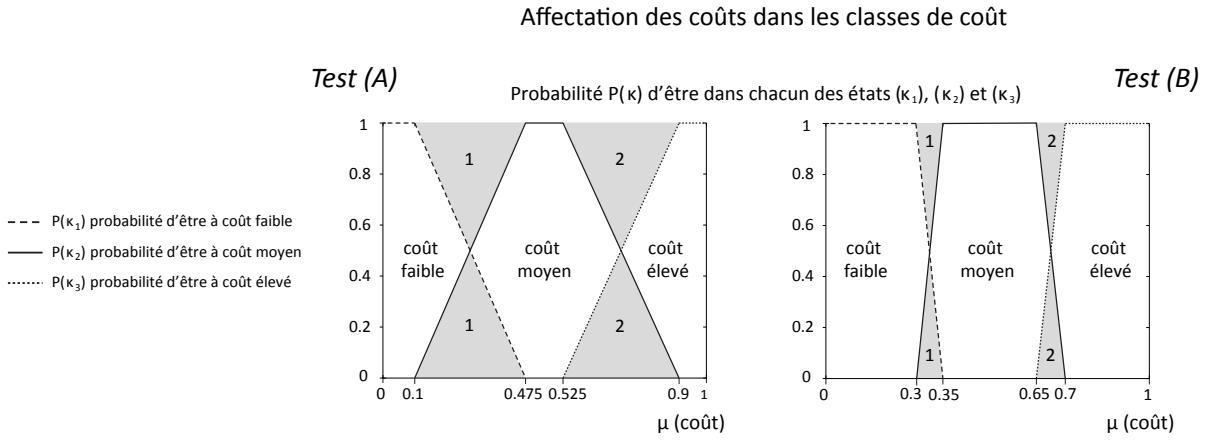


FIGURE 7.31 – Valeurs testées pour étudier l'impact de la modification de la probabilité d'affectation des valeurs de coût à chacune des classes de coût

Les valeurs de coûts (comprises entre 0 et 1) sont affectées à des classes de coût de manière probabiliste : certaines valeurs du coût sont affectées directement à une classe tandis que d'autres sont soumises à une probabilité d'être affectée à l'une ou l'autre classe (entre coût faible et coût moyen d'une part, et coût moyen et coût élevé d'autre part). Le test de sensibilité porte sur les deux intervalles délimitant ces zones de probabilité $P(\kappa_1)$, $P(\kappa_2)$ et $P(\kappa_3)$ (Fig. 7.31) :

– Le premier test (A) simule une forte augmentation de l'aléa dans l'affectation d'un cout à un logement : on augmente l'intervalle des valeurs de coût soumises à la probabilité d'appartenir à l'une ou l'autre classe.
– Le second test (B) simule au contraire une forte réduction de l'aléa : les intervalles de probabilité sont diminué, ce qui rend l'affectation beaucoup plus déterministe.

Les intervalles de valeurs sont modifiés de manière symétrique.

7.3.4.1 Impact de la modification des paramètres $P(\kappa_1)$, $P(\kappa_2)$ et $P(\kappa_3)$ sur le nombre de logements dans chaque classe de coût

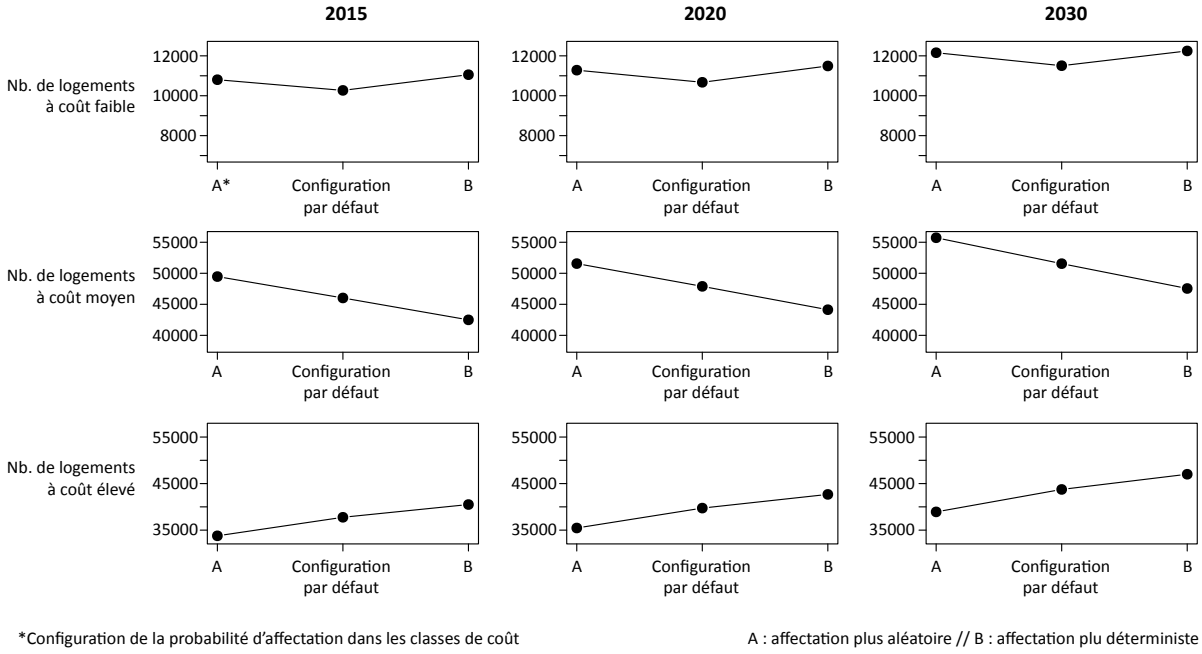


FIGURE 7.32 – Sensibilité du nombre de logements par classe de coût à une modification de la probabilité d'affectation des valeurs de $P(\kappa_1)$, $P(\kappa_2)$ et $P(\kappa_3)$ à chacune des classes de coût

Dans un cas comme dans l'autre, comparé à l'affectation par défaut, les comportements des résultats en réaction aux variations des probabilités d'affectation $P(\kappa_1)$, $P(\kappa_2)$ et $P(\kappa_3)$ sont assez nets (Fig. 7.32). La classe « coût faible » est 1) peu affectée par les modifications des intervalles de probabilité, et 2) affectée de la même manière par les deux tests : augmenter ou réduire l'aléa dans l'affectation des logements dans les classes a tendance à augmenter le nombre de logements à coûts faibles, mais de manière assez discrète (l'amplitude de variation est faible comparée aux variations observées dans les tests précédents, bien qu'elle soit d'environ 10% tout de même). Cela est sans doute dû au petit nombre de logements dans cette classe relativement aux deux autres. Mais ce résultat signifie également que de nombreux logements ont une valeur de coût comprise dans un intervalle qui n'est pas concerné ou moins concerné

par la probabilité $P(\kappa_1)$ avec la configuration par défaut (Fig. 7.18 et 7.31) :

- entre 0,2 et 0,3 : cet intervalle de valeur est directement affecté dans la classe coût faible avec la configuration B (plus déterministe) alors qu'il est soumis aux probabilités $P(\kappa_1)$ et $P(\kappa_2)$ dans la configuration par défaut ;
- entre 0,4 à 0,475 : cet intervalle de valeur est concerné par la probabilité $P(\kappa_1)$ avec la configuration A (plus aléatoire) alors qu'il est directement affecté à la classe de coût moyen dans la configration par défaut.

Les effectifs de logements dans les deux autres classes évoluent symétriquement l'un par rapport à l'autre, et l'impact des modifications du paramètre est assez conséquent. La version plus aléatoire (A sur la figure 7.32) des probabilités d'affectation entraîne une nette augmentation du nombre de logements à coût moyen au détriment des logements à coût élevé (comparé au calcul par défaut), tandis que l'inverse se produit avec la modélisation plus déterministe (B). L'amplitude de valeurs entre les deux configurations avoisine les 8 000 logements pour chacune des deux classes.

Le changement radical avec le test B est que les logements dont le coût est supérieur à 0,7 sont directement affectés dans la classe des coûts élevés alors qu'ils étaient soumis aux probabilités $P(\kappa_2)$ et $P(\kappa_3)$ auparavant (entre 0,7 et 0,8 pour les valeurs par défaut, et entre 0,7 et 0,9 pour le test A). L'augmentation du nombre de logements dans cette classe signifie qu'il y a beaucoup de logements dans Mobisim dont les valeurs de coût sont supérieures à 0,7.

Lorsque le nombre de logements à coût moyen augmente fortement, celui des logements à coût faible augmente également, ce qui signifie que les « nouveaux » logements à coût moyen se créent bien au détriment des logements à coût élevés. La distribution des valeurs de μ permettrait de mieux comprendre les valeurs de coût des logements et donc de mieux comprendre leur répartition dans les classes.

7.3.4.2 Impact de la modification des paramètres $P(\kappa_1)$, $P(\kappa_2)$ et $P(\kappa_3)$ sur la satisfaction résidentielle moyenne

À un niveau plus agrégé, la satisfaction résidentielle moyenne est légèrement sensible à la modification du paramètre. Elle est un peu plus élevée lorsque le nombre de logements à coût moyen est plus important.

Les variations dans la structure par coût des logements observés avec la modification de ce paramètre favorisent plutôt les logements à coût moyen, et visiblement,

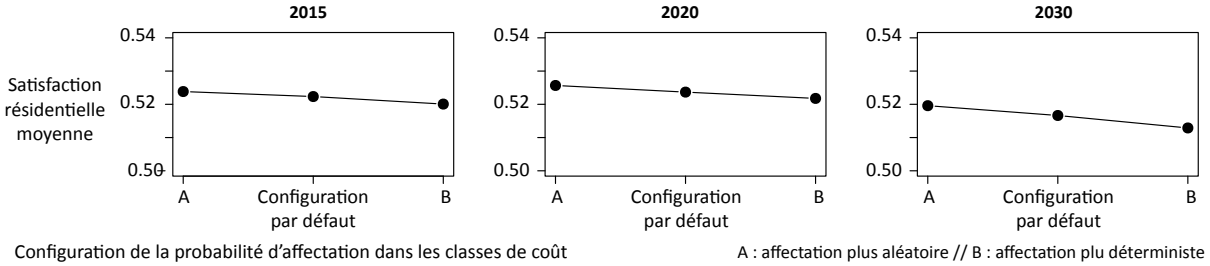


FIGURE 7.33 – Sensibilité de la satisfaction moyenne sur l'agglomération à une modification de la probabilité d'affectation des valeurs de $P(\kappa_1)$, $P(\kappa_2)$ et $P(\kappa_3)$ à chacune des classes de coût

la satisfaction résidentielle moyenne y est moins sensible que lorsque les variations concernaient les logements à coût faible.

7.3.4.3 Impact de la modification des paramètres $P(\kappa_1)$, $P(\kappa_2)$ et $P(\kappa_3)$ sur le taux annuel de migration

Le taux de migration moyen reste stable avec les modifications du paramètre.

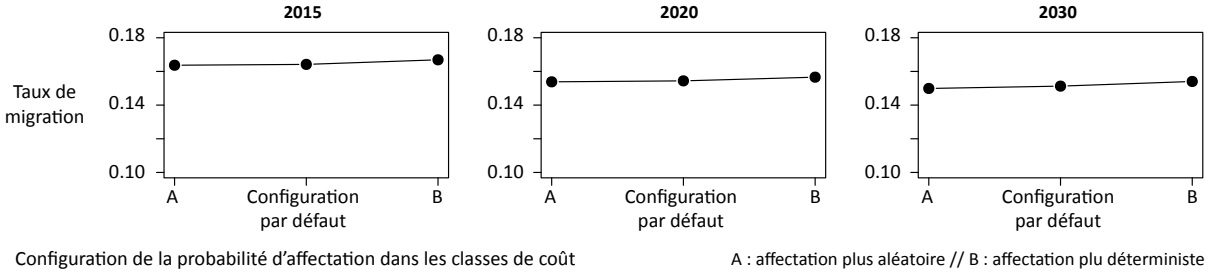


FIGURE 7.34 – Sensibilité du taux annuel de migration à une modification de la probabilité d'affectation des valeurs de $P(\kappa_1)$, $P(\kappa_2)$ et $P(\kappa_3)$ à chacune des classes de coût

Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation du paramètre

Alors que les logements à coût faible étaient plus nettement sensibles aux modifications des variables de l'estimation du coût, les probabilités d'affectation dans les classes de coût opèrent un transfert des logements entre les classes de coût moyen et de coût élevé. Ces résultats renvoient donc directement à la distribution des valeurs de coût.

Bilan des premières analyses de sensibilité

Les premiers tests de sensibilité ont porté sur des paramètres ne nécessitant pas de calibrage : les valeurs qui leurs ont été affectées par défaut ne nécessitent pas de vérification. Tester leur impact sur différents résultats permet de mieux comprendre leur rôle dans la valeur du résultat auquel ils participent plus ou moins directement, ainsi que dans le fonctionnement général du modèle.

Appréciations, importances et paramètres de l'estimation du coût du logement ont ce point commun qu'ils sont des paramètres transformés plusieurs fois pour le calcul du résultat auquel ils participent. Les appréciations sont combinées aux importances puis, pour trois cas sur les quatre, intégrées dans une moyenne, et les coûts estimés quantitativement sont ensuite agrégés en classes qualitatives.

On pourrait supposer que de telles transformations annihilent le rôle de chacun dans les résultats plus généraux, mais les différentes analyses conduites montrent que les résultats du modèle sont sensibles aux paramètres que nous avons testés ici. Les résultats de simulation réagissent aux variations des valeurs des paramètres, de manière nuancée mais néanmoins visible graphiquement.

Enfin, les réactions des résultats face aux variations des valeurs de paramètres sont pour l'instant assez attendues compte tenu de la signification des valeurs testées. À ce stade de l'exploration du fonctionnement du modèle, ce dernier ne paraît pas produire de résultats contre-intuitifs.

L'analyse de sensibilité des paramètres du coût μ souligne le rôle significatif du paramètre « taille des logements » correspondant à une valeur maximale du coût dans la structure par coût de ces derniers ; les résultats de simulation sont assez sensibles à la modification de ce paramètre. Mais cette analyse révèle surtout la relation positive entre le nombre de logements à coût faible sur l'agglomération et la satisfaction résidentielle moyenne de l'ensemble des ménages. Ces logements sont peu nombreux et l'augmentation de leur nombre est plus satisfaisant pour les ménages. Ceci se traduit d'ailleurs par une moindre mobilité résidentielle globale.

7.4 L'intérêt global à déménager : tester l'impact des valeurs n_J et $A_H(v_J)$

L'intérêt global à déménager M se rapporte à l'attractivité Y des localisations résidentielles pour les ménages d'une part et à leur connaissance de cette attractivité d'autre part. L'attractivité Y est un résultat émergeant de différentes interactions entre les ménages et les logements, et des différentes évolutions qui ont eu lieu dans les itérations de la simulation. C'est un résultat dont il n'est pas possible de connaître *a priori* la structure des valeurs.

La variable M dépend de deux paramètres - le nombre n_J de logements connus par le ménage et la référence collective sur le marché immobilier $A_H(v_J)$ - dont il convient de tester les valeurs pour mieux en comprendre le fonctionnement. Le paramètre n_J a une équivalence thématique puisqu'il peut être associé à la connaissance que le ménage a de certains logements (bouche-à-oreille) ou aux visites qu'il effectue préalablement à son choix. Il est donc possible d'en définir un ordre de grandeur, et une valeur par défaut. $A_H(v_J)$ par contre est une valeur synthétique qui nous permet de modéliser une idée plus abstraite qui est l'évaluation des logements qu'un ménage effectue par rapport à sa connaissance de l'offre globale sur l'agglomération. Sa valeur dépend des valeurs d'attractivités simulées, sur lesquelles nous n'avons, une fois encore, aucune information. Le paramètre ne renvoie donc à aucune donnée réelle et dépend de résultats de simulations, et sa valeur doit être calibrée spécifiquement pour les simulations.

L'analyse de sensibilité de ces paramètres, si elle ne servait qu'à explorer le lien entre les valeurs de paramètres et les valeurs de résultat de M, pourrait être conduite de la même manière que les autres, en testant simplement des valeurs de n_J autour de sa valeur par défaut (fixée à 30 logements) et des valeurs comprises dans l'intervalle possible de $A_H(v_J)$ (compris entre 0 et 1). Mais comme annoncé en début de chapitre, nous souhaitons mettre cette analyse de sensibilité à profit pour affiner l'intervalle de valeurs à cibler lors du calibrage du modèle. C'est pourquoi nous devons approfondir la connaissance de certains résultats du modèle notamment les valeurs d'attractivités résultantes des simulations.

Ces explorations doivent nous permettre de mieux comprendre ce qu'il se passe au cœur de la simulation des attractivités des ménages et d'évaluer la cohérence du modèle entre les choix de modélisation et les résultats qui en émergent.

7.4.1 Exploration de l'attractivité des ménages

Rappel des chapitres 3 (section 3.2.6) et 5 (section 5.3.2)

L'attractivité de chaque logement vacant pour un ménage est la différence entre la satisfaction résidentielle du ménage et l'intérêt qu'il manifeste pour une autre localisation résidentielle que la sienne. On dit qu'un logement est attractif lorsque l'intérêt qu'un ménage lui porte est supérieur à sa satisfaction résidentielle actuelle. L'ensemble de ces attractivités constitue l'attractivité effective des ménages $Y_{IJ}(H)$.

Les ménages de Mobisim ne sont pas omniscients : ils n'ont pas connaissance de l'ensemble des logements vacants qui leur sont attractifs, et n'ont donc aucune idée de leur attractivité effective. Ils ont une connaissance imparfaite des logements vacants qui leur sont attractifs à travers $n_J = 30$ logements qu'ils « connaissent ». Ces 30 logements ne sont qu'un échantillon, tiré au sort pour chaque ménage parmi l'ensemble des logements vacants qui lui sont attractifs.

Chacun de ces logements représente pour le ménage une certaine attractivité compte tenu de sa situation résidentielle actuelle et, en visitant 30 logements, le ménage prend connaissance de 30 attractivités possibles. Pour synthétiser ces valeurs en une seule, nous avons choisi la valeur médiane de ces 30 attractivités qui est l'attractivité connue $v_J(H)$ (Fig. 7.35).

C'est à partir de cette attractivité connue $v_J(H)$ que les ménages estiment, par rapport à une idée globale de l'offre en logements sur l'agglomération (une référence collective $A_H(v_J)$) leur intérêt global à déménager. La valeur de référence collective $A_H(v_J)$ est définie par défaut comme la valeur médiane de l'ensemble des attractivités pour tous les ménages de tous les logements de l'agglomération.

Par souci de simplification, et par cohérence avec l'indicateur d'attractivité connue $v_J(H)$, nous choisissons dans cette exploration de représenter les attractivités effectives des ménages (autant de valeurs d'attractivité que de logements vacants attractifs) par la médiane de leurs valeurs d'attractivité effective : $Y_{med}(H)$ (Fig. 7.35). $Y_{med}(H)$ n'est qu'un indicateur utilisé pour l'exploration des attractivités puisque l'attractivité effective n'a aucun rôle en tant que tel dans le processus de modélisation. Elle est évoquée ici en tant que résultat intermédiaire à étudier.

7.4.1.1 Attractivité effective Y_{IJ} et attractivité connue $v_J(H)$: les enjeux

Objectif : mieux comprendre sur quelle offre et sur quelle perception de l'offre les ménages prennent leur décision

L'attractivité des logements pour chaque ménage est un résultat simulé par le modèle : nous n'avons *a priori* aucune information sur le nombre de logements vacants attractifs, ni sur la distribution des valeurs d'attractivité $Y_{IJ}(H)$ de ces logements simulées pour chaque ménage. Sans exploration de ces résultats intermédiaires de simulation, il n'est pas non plus possible de savoir si ces valeurs changent au cours des

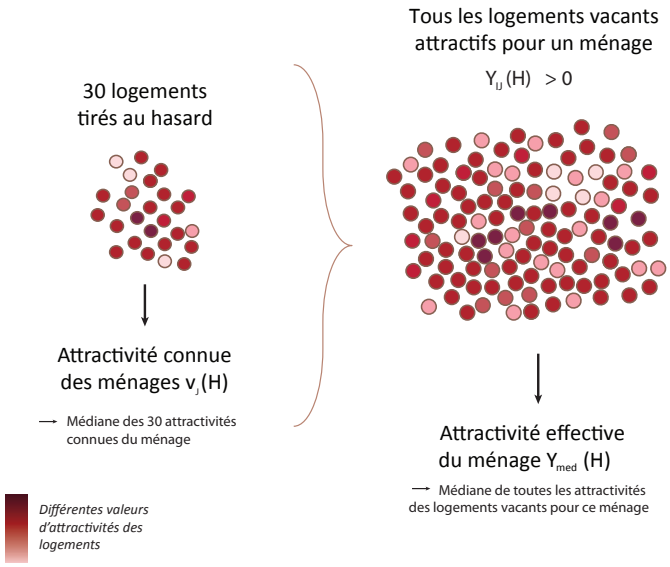


FIGURE 7.35 – Attractivité effective et attractivité connue

itérations. Or toutes ces informations sont nécessaires pour évaluer la structure des attractivités des ménages : les ménages ont-ils des attractivités plutôt basses, plutôt élevées, sont-elles diversifiées ?

Sans information plus précise sur la distribution des valeurs d'attractivité $Y_{IJ}(H)$, nous ne savons pas non plus dans quelle mesure le tirage aléatoire des 30 logements sur lesquels $v_J(H)$ est calculée permet de représenter réellement l'attractivité effective $Y_{IJ}(H)$ de chaque ménage. En d'autres termes, nous ne savons pas si ces 30 logements permettent aux ménages de Mobisim d'estimer correctement leur attractivité ou s'ils ont une image biaisée de leurs opportunités sur le marché immobilier (sous-estimation ou surestimation de ce qui est *réellement* attractif pour eux).

Enfin, la valeur d'attractivité collective $A_H(v_J)$ à laquelle les ménages confrontent leur attractivité connue $v_J(H)$ est fixée à 0,12, médiane de la distribution de toutes les attractivités possibles sur l'agglomération lors de la situation initiale. Le coût technique que représente le calcul d'une telle valeur de distribution contraint à ne pas pouvoir le reproduire sur chaque étape de simulation, aussi n'avons-nous aucune information sur la distribution de toutes les valeurs d'attractivités pour les autres étapes d'itération, ni sur l'évolution de la valeur de la médiane.

Étant donné que chaque ménage confronte sa valeur d'attractivité connue $v_J(H)$ à $A_H(v_J)$ pour définir son propre intérêt à migrer, il est important d'explorer la relation entre ces deux valeurs, pour évaluer dans quelle mesure la valeur médiane $A_H(v_J)$ modélise correctement l'intérêt global à déménager : quelle est la part des ménages pour

lesquels l'attractivité connue $v_J(H)$ est inférieure / supérieure à la référence collective ainsi fixée ?

Démarche suivie pour explorer les attractivités des ménages

Dans un premier temps, l'objectif est d'évaluer, en amont, la diversité des situations d'attractivités entre les ménages et son évolution au cours de la simulation. Pour cela, nous étudierons de manière univariée le nombre total de logements vacants attractifs par ménage (nommé ici *nby*), et sur les valeurs d'attractivité de ces logements (i.e. l'attractivité effective $Y_{IJ}(H)$).

Dans un second temps, nous nous focaliserons plus précisément sur l'intérêt global à déménager M, résultat d'une confrontation entre plusieurs valeurs d'attractivités : attractivité connue $v_J(H)$, issue d'un tirage au sort aléatoire (les $n_J = 30$ logements) et la valeur de référence $A_H(v_J)$, synthèse à un moment donné de toutes les valeurs d'attractivités.

Pour cela, nous chercherons à mieux comprendre pour chaque ménage :

- la relation entre $v_J(H)$ - médiane des attractivités des 30 logements vacants attractifs connus - et $Y_{med}(H)$ - médiane des attractivités de tous les *nby* logements vacants attractifs - d'une part : est-ce que $v_J(H)$ est représentative de $Y_{med}(H)$?
- La relation entre $v_J(H)$ et $A_H(v_J)$ - médiane de toutes les attractivités de l'agglomération, pour tous les ménages et tous les logements, valeur de référence collective pour l'agglomération (actuellement égale à 0,12) - d'autre part : est-ce que $v_J(H)$ est loin de la valeur de référence collective ?

L'ensemble de ces analyses porte sur la variabilité des situations résidentielles en fonction des types de ménages. Pour chacune des explorations, nous cherchons à répondre à deux questions élémentaires :

- Est-ce que le pourcentage des ménages concernés par une relation entre deux variables est constante à travers les itérations ?
- Sont-ce toujours les mêmes types de ménages qui sont concernés ?
  Cette deuxième question nous impose d'identifier les types de ménages concernés, et donc de mettre en lien chacun des résultats des analyses avec les caractéristiques des ménages.

Comme pour l'analyse de sensibilité, l'exploration des attractivités est menée sur dix simulations. Mais à la différence des analyses précédentes, chaque simulation est

analysée individuellement pour étudier précisément la variabilité des résultats intermédiaires et leur stabilité entre les réplications, notamment parce que certaines variables sont dépendantes de tirages aléatoires. Les étapes de simulation analysées sont les mêmes que pour l'analyse de sensibilité (2015, 2020 et 2030).

7.4.1.2 Structure des attractivités

État des lieux de l'attractivité effective $Y_{med}(H)$

L'exploration de l'attractivité constitue en quelque sorte un état des lieux qui commence par le nombre de total *nby* de logements vacants attractifs par ménage, ainsi que l'attractivité qui en découle, c'est-à-dire l'attractivité effective $Y_{med}(H)$, valeur médiane des $Y_{IJ}(H)$ pour chaque ménage.

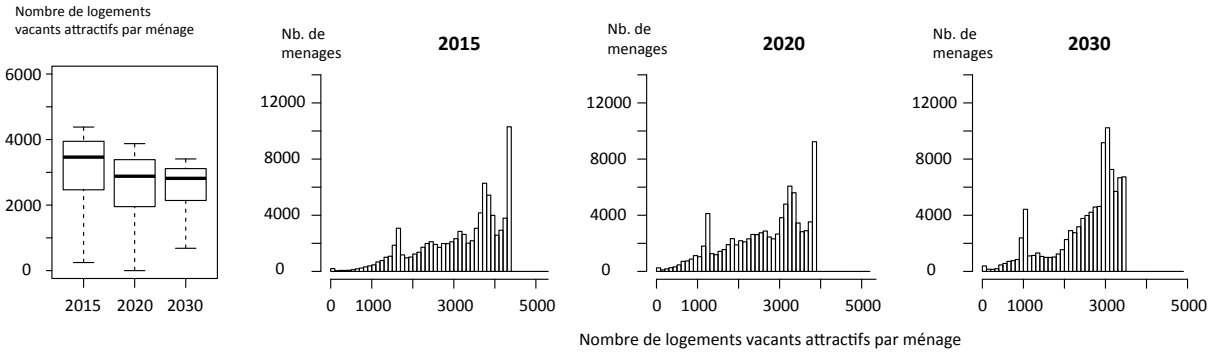


FIGURE 7.36 – Distribution du nombre *nby* de logements vacants attractifs par ménage dans une réplication

Deux constats très généraux peuvent être faits en regardant la figure 7.36 :
- le nombre de logements vacants attractifs diminue avec le temps ;
- la structure de la distribution des valeurs de *nby* par ménage est constante, aussi bien entre les trois étapes d'itération qu'entre les 10 réplications de simulation (à étape équivalente) [17].

Les deux types de graphiques témoignent d'une concentration des effectifs de ménages sur les valeurs fortes, ce qui veut dire qu'une grande partie des ménages a un nombre de logements vacants attractifs élevé (supérieur à 3 000). De manière quasi systématique, on observe que beaucoup de ménages disposent d'au moins 1 500 logements vacants attractifs, et ce pour les trois années de simulation.

Les distributions des valeurs de $Y_{med}(H)$ sont également très similaires entre les 10 réplications [18]. En 2015 et 2020, la distribution est plutôt bimodale, ce qui est moins net

17. Le résultat d'une seule des 10 réplications est présenté ici, les autres graphiques sont en annexe.
18. Le résultat d'une seule des 10 réplications est présenté ici, les autres graphiques sont en annexe.

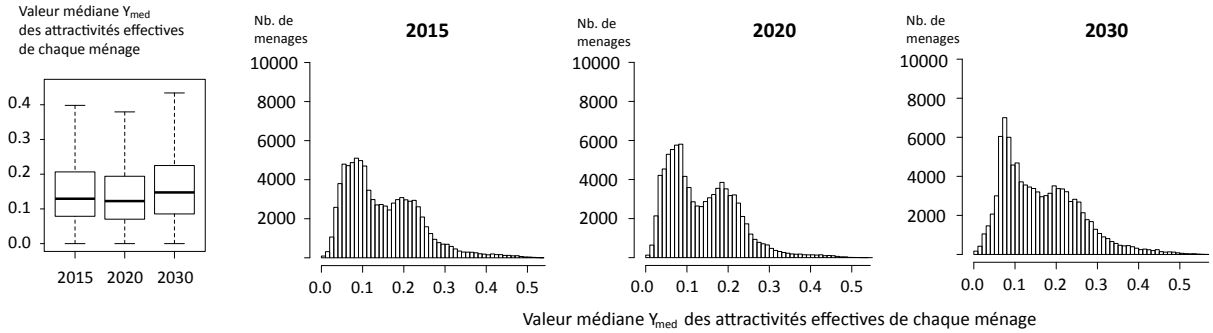


FIGURE 7.37 – Distribution des valeurs médianes $Y_{med}(H)$ des attractivités effectives de chaque ménage dans une réplication

en fin de simulation. Très peu de ménages ont des valeurs de $Y_{med}(H)$ proches de 0, et ils sont une grande majorité à bénéficier de valeurs d'attractivité effective médiane proche de 0,07 quelle que soit l'année de simulation. Les boîtes à moustaches mettent en valeur également cette dominance des valeurs d'attractivité effective médiane inférieures à 0,1 (concentration des effectifs sur la partie basse des boîtes à moustaches). Dans une moindre mesure, ils sont également nombreux à avoir une valeur d'attractivité $Y_{med}(H)$ proche de 0,2. Ils deviennent très peu nombreux pour des valeurs d'attractivité supérieure à 0,3.

Synthèse : Le nombre de logements vacants attractifs par ménage diminue avec le temps. En moyenne, les ménages disposent néanmoins en grande majorité d'au moins 1500 logements vacants attractifs tout au long de la simulation. Les valeurs d'attractivité effective $Y_{med}(H)$ sont globalement inférieures à 0,4, avec une grande partie des ménages pour lesquels cette valeur est même inférieure à 0,15. Les valeurs et les distributions sont stables dans les réplications.

Existe-il des profils d'attractivité effective $Y_{med}(H)$?

Sont-ce toujours les mêmes types de ménages qui bénéficient d'une attractivité élevée ou d'un nombre de logements vacants attractifs faibles ? L'idée est d'identifier s'il existe une relation entre les deux variables analysées dans le paragraphe précédent d'une part, et entre elles et les caractéristiques des ménages d'autre part.

Pour identifier ces relations potentielles, nous avons procédé à une analyse factorielle de données mixtes (AFDM - (Pagès, 2004)). L'analyse factorielle, en statistiques multivariées, permet de décrire un ensemble de variables et de les rapprocher selon une certaine proximité statistique. L'intérêt de l'AFDM dans notre cas est qu'elle permet de traiter dans une même analyse factorielle des données qualitatives et quantitative. Nous

cherchons à identifier, au moyen de cette analyse factorielle, les liens éventuels entre les modalités caractérisant les ménages (i.e. leurs caractéristiques socio-démographiques) et leurs attractivités : nous cherchons à savoir s'il existe une typologie des ménages en fonction de leur attractivité.

L'AFDM a été réalisée pour chaque année sur 10 échantillons aléatoires de 10 000 ménages [19]. Les résultats produits par R sont sur deux graphiques différents (le cercle des corrélations (variables quantitatives) et la représentation des variables qualitatives) : les axes factoriels étant les mêmes, nous avons choisi de les assembler ici pour une interprétation plus facile de ce résultat.

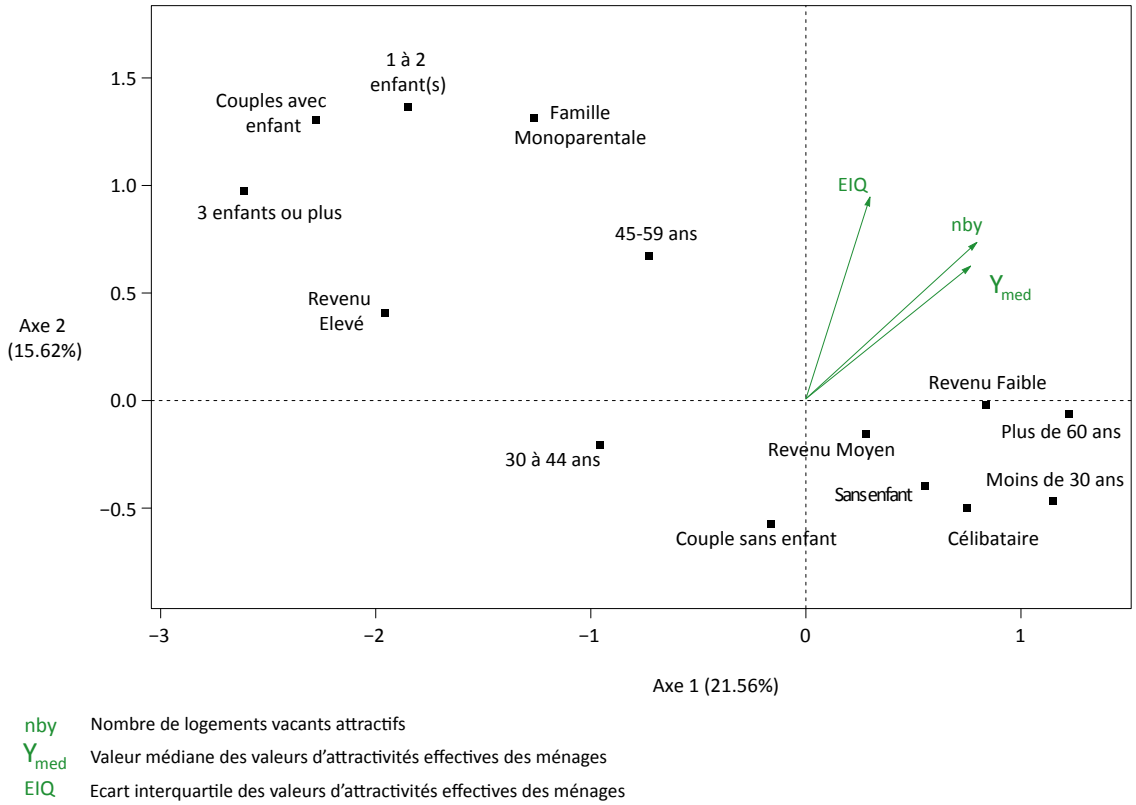


FIGURE 7.38 – Résultats de l'analyse factorielle de données mixtes, réalisée sur un échantillon de 10 000 ménages tirés aléatoirement (2015)

Les variables quantitatives concernent l'attractivité – le nombre *nby* de logements vacants attractifs d'une part et deux valeurs synthétiques de l'attractivité de ces logements pour chaque ménage : l'attractivité effective $Y_{med}(H)$ et l'écart interquartile EIQ correspondant pour chaque ménage. Nous pouvons constater que ces trois valeurs

19. L'analyse a été effectuée avec le logiciel R, qui n'a pas pu gérer avec la totalité des ménages en 2015 (i.e. 86 500). Pour pallier cette contrainte technique, nous avons choisi de procéder à 10 échantillonnages d'un grand nombre de ménages.

sont fortement corrélées (Fig. 7.38). Cela veut dire que plus le nombre de logements vacants attractifs pour un ménage est important, plus les valeurs d'attractivité qu'il en ressort seront dispersées et plus son attractivité effective (médiane) sera élevée.

Ce constat s'explique par la construction de la variable « attractivité » Y_{IJ}. Pour être attractif, un logement doit présenter pour le ménage un intérêt supérieur à sa satisfaction résidentielle actuelle. L'attractivité est un différentiel entre deux variables et ses valeurs sont donc globalement faibles. Néanmoins, elles seront d'autant plus élevées que l'écart entre la valeur d'intérêt et la valeur de satisfaction sera important. Selon le même raisonnement, plus la satisfaction est élevée, plus il sera difficile de trouver des logements présentant un intérêt supérieur. Dans ce cas ce figure, le nombre de logements vacants attractifs d'une part et les valeurs d'attractivité qui leurs seront associées seront faibles. A l'inverse, en cas de satisfaction résidentielle faible :

- il y a potentiellement plus de logements vacants dont l'intérêt peut apporter une attractivité positive au ménage, donc plus de logements vacants attractifs (augmentation de nby) ;
- le nombre de logements attractifs étant plus élevé, il y a plus de valeurs d'attractivité Y dans l'ensemble considéré et donc un potentiel de diversification des valeurs de Y plus important (augmentation de l'écart interquartile EIQ) ;
- le différentiel de la satisfaction avec l'intérêt manifesté pour d'autres logements peut être élevé, ce qui augmente gloalement l'attractivité effective médiane de l'ensemble des logements considérés (augmentation de $Y_{med}(H)$).

Par ailleurs, nous pouvons observer deux groupes principaux dans les variables qualitatives considérées dans l'analyse (Fig. 7.38). Le premier est constitué par des familles avec enfant(s), aux revenus plutôt élevés. Le second est composé des ménages de moins de 30 ans et de plus de 60 ans, de célibataires ou de couples sans enfant, aux revenus globalement faibles.

Les résultats de l'AFDM montrent clairement qu'il n'existe aucune corrélation entre les trois valeurs d'attractivité et les modalités caractérisant les ménages. Ce résultat signifie que l'attractivité des ménages ne dépend pas de leurs caractéristiques, mais bien d'autres facteurs (adéquation entre les types de ménages et l'offre en logements, distribution des valeurs de satisfaction résidentielle), qu'il serait intéressant d'identifier dans des études ultérieures.

L'analyse a été reproduite sur les années 2020 et elle présente des résultats si-

milaires [20]. En 2029, les variables quantitatives semblent être corrélées à l'axe 2 de l'analyse factorielle, mais sans pour autant être corrélées aux variables qualitatives ; les constats sur une possible typologie des ménages selon un profil d'attractivité sont donc les mêmes.

Synthèse : Il n'existe aucune structure directe entre les caractéristiques des ménages et leurs attractivités. Les variables caractérisant l'attractivité sont fortement liées entre elles : il existe une relation positive entre le nombre de logements vacants attractifs, l'amplitude des valeurs d'attractivités effectives et la valeur médiane des attractivités effectives d'un ménage.

Cette analyse n'a été conduite que sur une réplication : ne constatant aucune corrélation sur les trois étapes d'une simulation, nous pouvons en déduire qu'il n'existe pas de typologie systématique de l'attractivité effective.

7.4.1.3 Relation entre les attractivités $v_J(H)$, $Y_{med}(H)$ et $A_H(v_J)$

La représentativité de $Y_{med}(H)$ par $v_J(H)$

L'attractivité connue $v_J(H)$ permet de synthétiser en une seule mesure les 30 valeurs d'attractivité dont le ménage prend connaissance, en visitant les logements par exemple. Ces n_J logements sont sélectionnés au hasard parmi l'ensemble des nby logements vacants attractifs dont il bénéficie selon ses valeurs de satisfaction. Reprenant la figure 7.35, la question que l'on peut légitimement se poser est : dans quelle mesure les 30 logements sont-ils représentatifs de l'ensemble nby, c'est-à-dire dans quelle mesure l'attractivité connue $v_J(H)$ est-elle représentative de l'attractivité effective $Y_{med}(H)$ dont bénéficient sans le savoir les ménages ? Cette question nous permet de savoir si les ménages estiment correctement ou non leur attractivité.

Avant de considérer la relation entre $v_J(H)$ et $Y_{med}(H)$, nous nous sommes intéressé au tri à plat des valeurs de $v_J(H)$. Les distributions des valeurs de $v_J(H)$ sont stables à travers le temps et à travers les réplications. Les trois boîtes à moustaches (Fig. 7.39) attestent de cette régularité à travers les étapes de simulation : elles sont globalement identiques, l'amplitude et la distribution des valeurs le sont également. Les boîtes à moustaches comme les histogrammes montrent que la majorité des ménages estime leur attractivité à des valeurs inférieures à 0,2 et à plus forte raison inférieure à 0,1.

20. Résultats présentés en annexes.

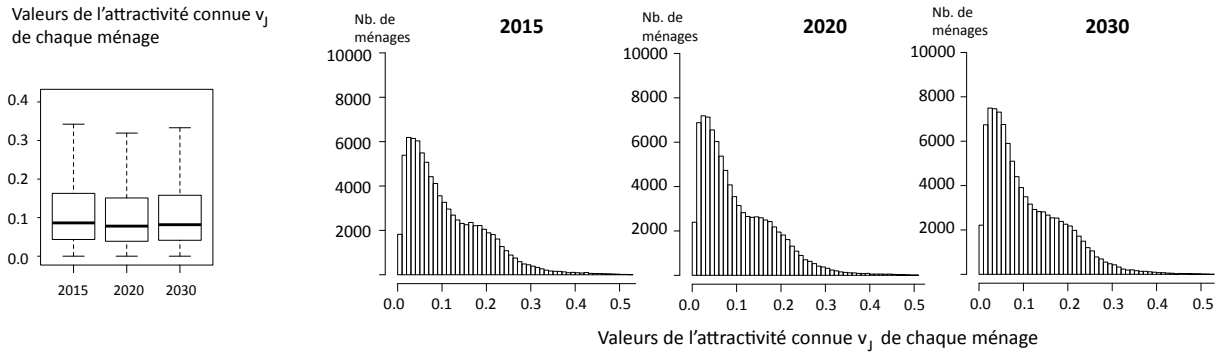


FIGURE 7.39 – Distributions des valeurs d'attractivité connue $v_J(H)$ de chaque ménage dans une réplication

En confrontant ces distributions avec celles de $Y_{med}(H)$ (Fig. 7.37), nous pouvons constater, à valeur d'attractivité équivalente, un décalage dans le nombre de ménages concernés par l'une ou l'autre des valeurs d'attractivité : une nette majorité des ménages estime leur attractivité connue $v_J(H)$ comme étant inférieure à 0,06, alors qu'ils sont une grande majorité à bénéficier d'une attractivité effective $Y_{med}(H)$ supérieure à 0,05. Ces constats sont très généraux puisque les ménages sont considérés ici comme un ensemble et non dans leur individualité.

Les questions associées à ce constat sont les suivantes : pour chaque ménage, quel est le lien entre son attractivité connue $v_J(H)$ et son attractivité effective $Y_{med}(H)$? Quelle est la part des ménages pour laquelle la valeur d'attractivité connue $v_J(H)$ n'est pas représentative de son attractivité effective $Y_{med}(H)$? Si $v_J(H)$ n'est pas effectivement représentatif, de combien est-il supérieur ou inférieur à $Y_{med}(H)$? Et enfin, cette relation de représentativité dépend-elle des caractéristiques des ménages ?

Pour y répondre, nous avons choisi de répartir en trois classes les ménages selon le lien entre leur attractivité connue $v_J(H)$ et leur attractivité effective $Y_{med}(H)$. C'est la représentativité de $v_J(H)$ par rapport à $Y_{med}(H)$ qui est au cœur de ces questions, aussi nous avons choisi de la caractériser par la relation $v_J(H) = Y_{med}(H)$, avec une marge de tolérance à +/- 0,05. On créé ainsi un espace dans lequel « le ménage fait une estimation correcte de son attractivité effective », en ciblant bien chaque ménage, individuellement. Cette relation constitue une classe. Le choix de cette marge est subjectif, un écart de +/-0,1 ne nous semblant pas assez restrictif. L'objectif ici n'est pas de savoir si +/- 0,05 est pertinent pour la représentativité mais de pouvoir définir des classes reproductibles sur les différentes étapes et à travers les différentes réplications. En effet, la constitution de ces classes permet surtout de quantifier le nombre de ménages dans chacun des cas de figure, et d'en étudier l'évolution et la stabilité.

Les autres ménages sont répartis en deux classes distinctes. La première comprend

les ménages pour lesquels $v_J(H)$ est supérieure à $Y_{med}(H)$, c'est-à-dire que leur attractivité connue est surestimée compte tenu du potentiel donné par l'attractivité effective ; la seconde concerne les ménages pour lesquels $v_J(H)$ est inférieure à $Y_{med}(H)$, c'est-à-dire que ces ménages sous-estiment leur attractivité effective.

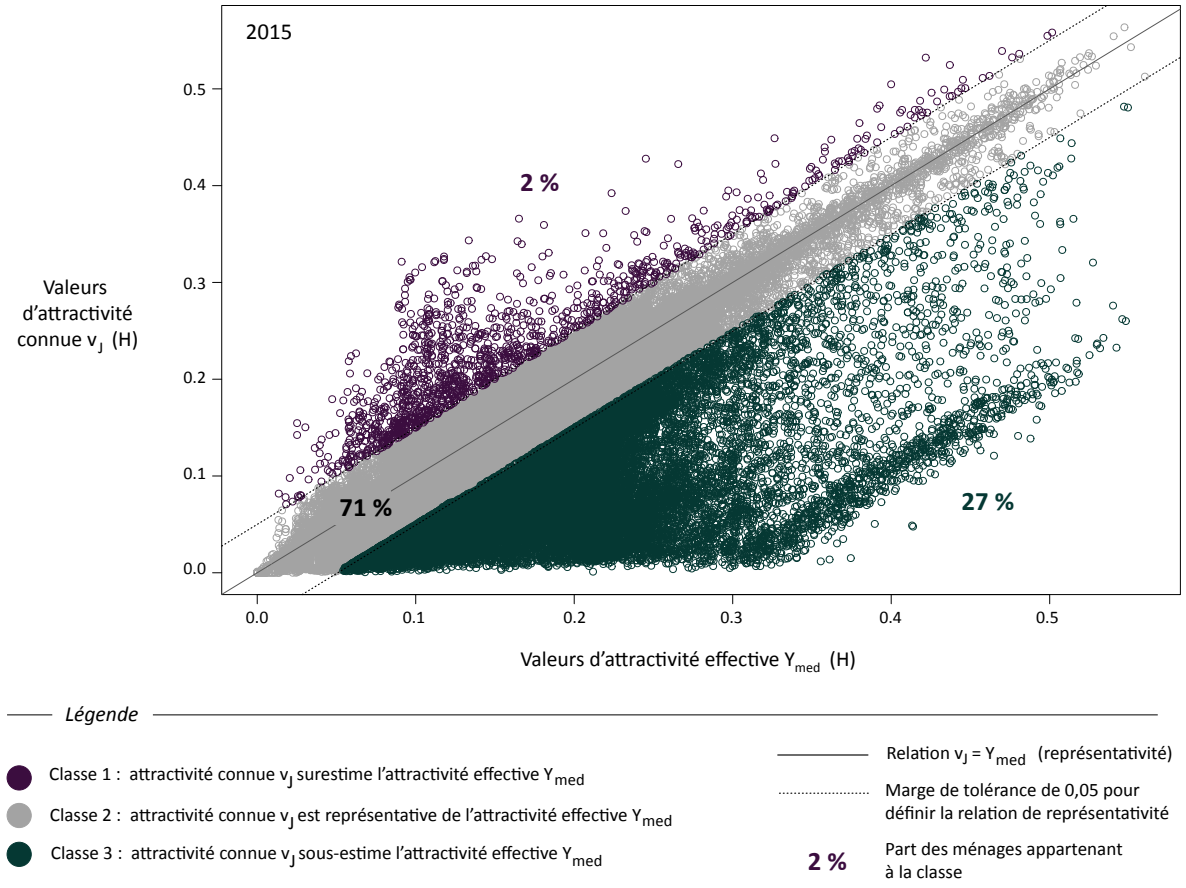


FIGURE 7.40 – Relation entre la valeur d'attractivité effective $Y_{med}(H)$ et la valeur d'attractivité connue $v_J(H)$ de chaque ménage - en 2015 pour une réplication

Le nuage de point (Fig. 7.40) nous permet de mieux visualiser ces résultats. La classe 1, en violet, correspond aux résidus supérieurs de la relation de représentativité : $v_J(H)$ est supérieure à $Y_{med}(H)$, signifiant ainsi que les 30 logements sélectionnés représentent la fourchette haute des attractivités des *nby*. Les ménages appartenant à cette classe (seulement 2% de l'ensemble des ménages) surestiment leur attractivité effective. La classe 2 comprend les ménages pour lesquels la valeur de $v_J(H)$ est représentative de celle de $Y_{med}(H)$, plus ou moins 0,05. La relation $v_J(H) = Y_{med}(H)$ est représentée par la diagonale, et la classe de représentativité (avec la marge de tolérance) par l'ensemble gris. Ces ménages, pour qui l'attractivité connue donne une assez bonne idée des opportunités sur le marché du logement, sont majoritaires à 71% [21]. La classe 3

21. Pour information, avec une marge de tolérance de 0,1, $v_J(H)$ est représentatif pour 88 % des ménages en 2015.

enfin correspond aux valeurs de $v_J(H)$ inférieures à $Y_{med}(H)$: les 30 logements ont été sélectionnés parmi les logements ayant une attractivité plus faible que leur attractivité effective. Les ménages concernés par cette classe ont une idée de leur attractivité qui sous-estime ce dont ils pourraient en fait bénéficier. Ils sont 27% dans ce cas en 2015, et on peut voir que la sous-estimation peut parfois être très forte (les points les plus éloignés de la zone grise) : certains ménages sont vraiment défavorisés par le tirage au sort des 30 logements puisqu'ils ont sélectionné des logements de très faible attractivité, comparé à leur attractivité effective globale. Inversement, pour les ménages de la classe 1 (tirage au sort avantagé), l'attractivité connue $v_J(H)$ est supérieure mais proche de la valeur de l'attractivité effective $Y_{med}(H)$. Cela signifie que l'idée que ces ménages ont de leur attractivité n'est que faiblement « biaisée ».

Ces chiffres évoluent dans le temps et nous observons globalement une diminution des ménages appartenant à la classe de la représentativité (62 % en fin de simulation - Tabl. 7.7) et une augmentation de la part des ménages dans la classe 3, c'est-à-dire que les ménages sont de plus en plus nombreux à sous-estimer leur attractivité effective (37 % en fin de simulation). La part des ménages surestimant leur attractivité connue reste en moyenne relativement constante sur les 20 années de simulation. Enfin, nous pouvons constater que les résultats sont les mêmes à travers les réplications (Tabl. 7.7), ce qui renforce l'idée de stabilité du modèle.

Ces classes à présent délimitées et quantifiées, il est possible de les qualifier, c'est-à-dire de connaître plus précisément leur composition. Pour chaque ménage, le tirage au sort des 30 logements parmi l'ensemble des logements vacants attractifs est aléatoire, mais pour mieux évaluer le fonctionnement du modèle, nous cherchons à savoir si malgré cet aléa, il existe une typologie de la représentativité de $Y_{med}(H)$ par $v_J(H)$. Autrement dit : existe-t-il un lien entre les modalités caractérisant les ménages et l'estimation de leur attractivité effective ?

Pour cela, nous avons choisi d'étudier graphiquement la répartition des différentes modalités des ménages selon les trois classes d'appartenance (Fig. 7.41). Les diagrammes en bâton permettent d'identifier facilement une modalité qui serait sur/sous-représentée dans une classe, par rapport à l'ensemble des ménages. Nous considérons comme référence pour chaque caractéristique la répartition des modalités au sein de l'ensemble des ménages (premier diagramme dans chaque cas).

En 2015, la répartition des modalités de caractéristiques des ménages dans les classes 2 ($v_J(H)$ est représentative) et 3 ($Y_{med}(H)$ est sous-estimée) est globalement la même

TABLEAU 7.7 – Répartition des ménages dans les trois classes de représentativité de l'attractivité effective $Y_{med}(H)$ par l'attractivité connue $v_J(H)$

Date	Simulation	Part des ménages dans la classe 1	Part des ménages dans la classe 2	Part des ménages dans la classe 3
2015	Réplication 1	0,015	0,713	0,271
	Réplication 2	0,016	0,713	0,270
	Réplication 3	0,016	0,722	0,262
	Réplication 4	0,016	0,714	0,270
	Réplication 5	0,017	0,720	0,264
	Réplication 6	0,018	0,709	0,272
	Réplication 7	0,018	0,720	0,262
	Réplication 8	0,019	0,710	0,271
	Réplication 9	0,016	0,704	0,281
	Réplication 10	0,017	0,714	0,270
	MOYENNE DES 10 REPLICATIONS	***0,02***	***0,71***	***0,27***
2020	Réplication 1	0,018	0,729	0,253
	Réplication 2	0,025	0,730	0,245
	Réplication 3	0,022	0,729	0,249
	Réplication 4	0,019	0,728	0,253
	Réplication 5	0,026	0,733	0,241
	Réplication 6	0,022	0,722	0,256
	Réplication 7	0,022	0,729	0,248
	Réplication 8	0,023	0,731	0,245
	Réplication 9	0,023	0,743	0,234
	Réplication 10	0,017	0,728	0,255
	MOYENNE DES 10 REPLICATIONS	***0,02***	***0,73***	***0,25***
2030	Réplication 1	0,016	0,576	0,408
	Réplication 2	0,018	0,613	0,369
	Réplication 3	0,014	0,584	0,402
	Réplication 4	0,015	0,601	0,384
	Réplication 5	0,016	0,603	0,381
	Réplication 6	0,015	0,607	0,377
	Réplication 7	0,025	0,684	0,291
	Réplication 8	0,016	0,580	0,404
	Réplication 9	0,025	0,690	0,286
	Réplication 10	0,016	0,618	0,367
	MOYENNE DES 10 REPLICATIONS	***0,02***	***0,62***	***0,37***

Classe 1 : attractivité connue v_J surestime l'attractivité effective Y_{med}
Classe 2 : attractivité connue v_J est représentative de l'attractivité effective Y_{med}
Classe 3 : attractivité connue v_J sous-estime l'attractivité effective Y_{med}

que pour l'ensemble de la population. Seule la classe 1 ($Y_{med}(H)$ est surestimée) se distingue très clairement des deux autres (Fig. 7.41). Globalement sur les 10 réplications [22], la classe 1 est nettement dominée par les familles, bi- ou monoparentales, dont le chef de famille est âgé de moins de 30 ans (au détriment de la classe 44-59 ans). La présence d'enfant(s) y est clairement signifiante, comparée à l'ensemble de la population. Les résultats révèlent également que ces ménages ont plutôt des revenus élevés par rapport à l'ensemble de la population. Le faible effectif de la classe 1 (1,5 % des ménages seulement) participe certainement à ce profil plus prononcé que dans les deux autres. Ces résultats sont les mêmes pour les 10 réplications.

En 2020, la classe 1 reste typée : ce sont des familles globalement plus jeunes que la

22. La figure 7.41 présente les résultats de simulation de la réplication 1 ; les autres résultats sont présentés en annexes.

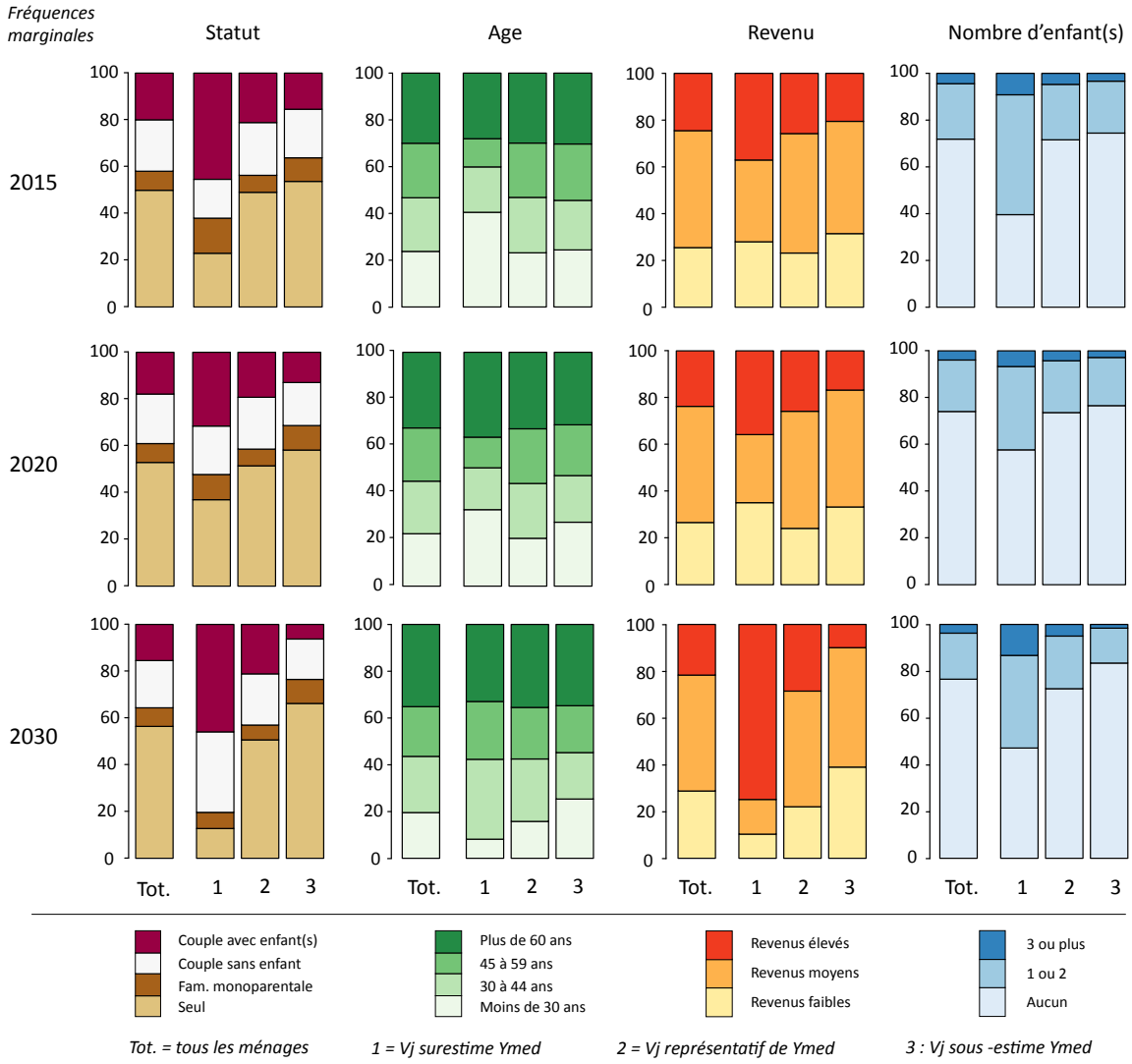


FIGURE 7.41 – Profil des ménages appartenant à chacune des classes de représentativité de l'attractivité effective $Y_{med}(H)$ par l'attractivité connue $v_J(H)$ - pour une réplication

moyenne et dont les revenus sont plus élevés. Les ménages célibataires sont quant à eux plus nombreux dans la classe 3. Les résultats sont les mêmes entre les 10 réplications.

La classe 1, déjà démarquée des autres classes en 2015 et 2020, se singularise encore en fin de simulation. Elle est quasiment exclusivement composée de couples, avec ou sans enfant, et aux revenus élevés. Les 30-45 ans y sont également plus présents. Contrairement aux constats précédents, les résultats des 10 réplications ne sont pas interchangeables pour la classe 1 en 2030. Deux réplications sur 10 en présentent une composition plus homogène. Dans les simulations 7 et 9, la classe 1 ne présente pas de typologie particulière (cf. annexes). Ces différences entre les réplications sont probablement dues à l'effectif restreint de cette classe, qui la rend plus sensible au tirage aléatoire des 30 logements sur lesquels est calculée $v_J(H)$. La composition de la classe 2, qui correspond à la majorité des ménages de l'agglomération, ne présente pas de par-

ticularité. La classe 3, enfin, est définie par les ménages célibataires, dont les revenus sont un peu plus faibles que la moyenne.

Synthèse : Nous avons répliqué l'analyse sur les 10 simulations. Les résultats sont toujours similaires (cf. annexes). Les singularités observées concernent majoritairement la classe 1 : des familles aux revenus élevés ont tendance à avoir une idée de leur attractivité qui est surestimée. Néanmoins, cette classe ne concerne que 1,5 % à 2 % des ménages. La classe 3, qui comprend jusqu'à 37 % des ménages en fin de simulation, présente dans une moindre mesure quelques particularités : les célibataires et les ménages aux revenus plus faibles à l'inverse ont de plus en plus tendance à avoir une mauvaise image de leur attractivité *via* ces 30 logements.

À première vue, ces particularités restent malgré tout insuffisantes pour conclure qu'elles ne sont pas liées l'aléa du tirage des 30 logements (la typologie n'est pas radicale, et lorsqu'elle l'est - pour la classe 1 - elle concerne moins de 2% des ménages). La composition de la classe 2, 60 à 70 % des ménages, est quant à elle similaire à celle de l'ensemble de la population. Les résultats présentent certaines spécificités dans la composition des classes de représentativité, mais celles-ci ne sont pas assez franches pour conclure qu'il existe une structure dans la représentativité de $Y_{med}(H)$ par $v_J(H)$.

Relation entre $v_J(H)$ et $A_H(v_J)$

Cette évaluation de l'attractivité connue des ménages est importante parce qu'elle constitue l'information unique sur l'offre en logements dont ils ont connaissance dans leur décision de déménager. C'est grâce à cette information unique qu'ils évaluent le succès potentiel de leur déménagement. En effet, chaque ménage confronte sa valeur d'attractivité connue $v_J(H)$ à une valeur de référence, identique pour tous les ménages, qui est l'attractivité médiane de tous les logements de l'agglomération pour tous les ménages $A_H(v_J)$. Pour rappel, lorsque les ménages ont une valeur de $v_J(H)$ supérieure à la valeur de $A_H(v_J)$, leur intérêt à déménager M est maximal (égal à 1) ; dans le cas contraire, leur intérêt global à déménager M est compris entre 0 et 1, et est d'autant plus faible que la valeur de $v_J(H)$ est proche de zéro.

$A_H(v_J)$ est fixé à 0,12 (cf. chapitre 5), et l'enjeu ici est de mieux connaître la répartition des valeurs d'attractivité connue $v_J(H)$ des ménages par rapport à cette valeur globale.

À partir de la distribution des valeurs de $v_J(H)$, nous avons à nouveau créé trois

classes. Nous avons divisé les valeurs inférieures à $A_H(v_J = 0,12)$ en 2, en créant une classe comprenant les ménages pour lesquels $v_J(H)$ est inférieur à 0,06 (attractivité clairement insuffisante pour considérer le déménagement comme une réelle opportunité) et une autre pour les valeurs comprises entre 0,06 et 0,12 (appréciation mitigée de leur attractivité). La troisième classe concerne les ménages pour lesquels $v_J(H)$ est supérieure à 0,12. Ces ménages disposent d'un intérêt global à déménager M maximal, en considérant que leur attractivité justifie un déménagement. Selon le même raisonnement que pour la représentativité de $Y_{med}(H)$ par $v_J(H)$, nous avons quantifié la répartition des ménages dans ces classes, et évalué sa stabilité à travers le temps et les réplications.

TABLEAU 7.8 – Répartition des ménages dans les trois classes de proximité des valeurs de $v_J(H)$ à la référence collective $A_H(v_J) = 0,12$

Date	Simulation	Part des ménages dans la classe A	Part des ménages dans la classe B	Part des ménages dans la classe C
2015	Réplication 1	0,36	0,27	0,37
	Réplication 2	0,37	0,26	0,36
	Réplication 3	0,37	0,27	0,37
	Réplication 4	0,37	0,27	0,36
	Réplication 5	0,37	0,26	0,37
	Réplication 6	0,37	0,26	0,37
	Réplication 7	0,38	0,26	0,36
	Réplication 8	0,37	0,26	0,37
	Réplication 9	0,35	0,27	0,38
	Réplication 10	0,37	0,26	0,37
	MOYENNE DES 10 REPLICATIONS	***0,37***	***0,26***	***0,37***
2020	Réplication 1	0,40	0,26	0,34
	Réplication 2	0,41	0,27	0,33
	Réplication 3	0,41	0,26	0,34
	Réplication 4	0,40	0,26	0,34
	Réplication 5	0,41	0,25	0,34
	Réplication 6	0,41	0,26	0,33
	Réplication 7	0,41	0,26	0,34
	Réplication 8	0,40	0,26	0,34
	Réplication 9	0,40	0,26	0,34
	Réplication 10	0,40	0,26	0,34
	MOYENNE DES 10 REPLICATIONS	***0,40***	***0,26***	***0,34***
2030	Réplication 1	0,38	0,26	0,36
	Réplication 2	0,40	0,26	0,34
	Réplication 3	0,39	0,26	0,35
	Réplication 4	0,39	0,26	0,35
	Réplication 5	0,39	0,26	0,35
	Réplication 6	0,40	0,25	0,35
	Réplication 7	0,40	0,26	0,34
	Réplication 8	0,38	0,26	0,36
	Réplication 9	0,40	0,26	0,34
	Réplication 10	0,38	0,26	0,36
	MOYENNE DES 10 REPLICATIONS	***0,39***	***0,26***	***0,35***

Classe A : attractivité connue v_J inférieure à 0,06 = intérêt global à déménager M inférieur à 0,5
Classe B : attractivité connue v_J comprise entre 0,06 et 0,12 = intérêt global à déménager M compris entre 0,05 et 1
Classe C : attractivité connue v_J supérieure à 0,12 = intérêt global à déménager M supérieur à 1

35 % des ménages estiment que leur intérêt global à déménager M est maximal (égal à 1) (Tabl. 7.8). Cette part a tendance à légèrement diminuer dans les 10 premières années de simulation, pour se stabiliser sur les 10 dernières (ils sont 35% en

moyenne en 2030). Plus de 60 % des ménages considèrent que leur attractivité (*via* $v_J(H)$) n'est pas suffisante pour justifier un déménagement : leur valeur de $v_J(H)$ se situe en dessous du seuil $A_H(v_J) = 0,12$. Leur intérêt à déménager M est d'autant plus faible que leur valeur d'attractivité s'éloigne de 0,12 pour tendre vers 0. Parmi eux, ils sont majoritaires à estimer que leur attractivité est clairement trop faible pour que le déménagement soit intéressant d'un point de vue résidentiel ; cela signifie que l'intérêt à déménager de 40 % des ménages est inférieur à 0,5.

Nous avons ensuite cherché à savoir si ces répartitions concernaient systématiquement les mêmes types de ménages ou non. Pour cela, nous avons reproduit la même étude, basée sur les diagrammes en bâton de la répartition des modalités caractérisant les ménages au sein de chacune des trois classes, en comparaison avec l'ensemble des ménages (Fig. 7.42).

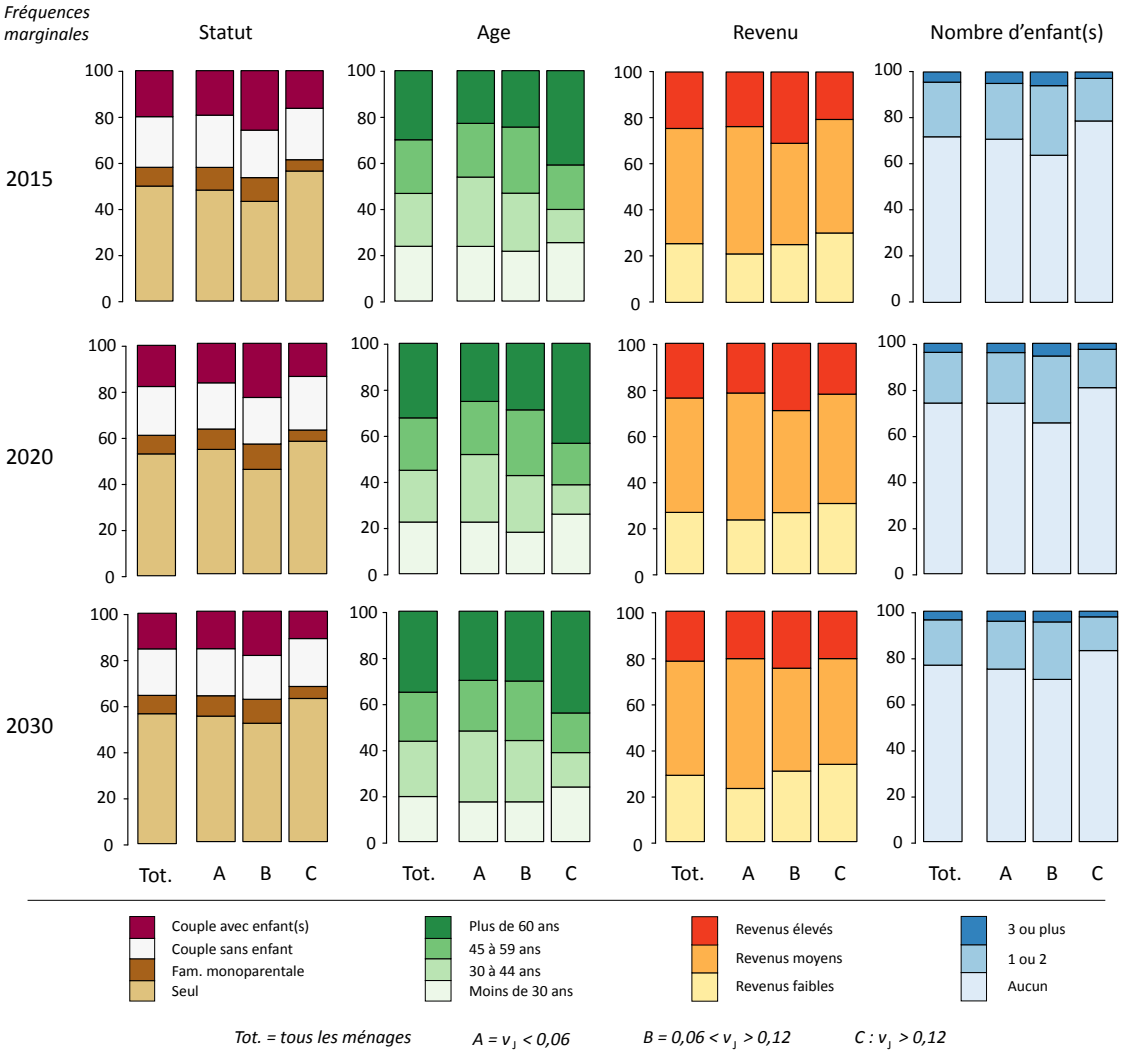


FIGURE 7.42 – Profil des ménages appartenant à chacune des classes de proximité de la valeur d'attractivité connue $v_J(H)$ à la référence collective $A_H(v_J) = 0,12$ - pour une réplication

En 2015, la classe A ne se distingue pas particulièrement de l'ensemble des ménages. Les classes B et C sont légèrement plus différenciées. Les familles (couples avec enfant(s) ou familles monoparentales) et les ménages aux revenus plus élevés paraissent dominer un peu les ménages dont l'évaluation de l'attractivité est mitigée (classe B). Enfin, on remarque que les ménages de plus de 60 ans et les ménages célibataires considèrent davantage que d'autres le déménagement comme une opportunité compte tenu de leur attractivité (classe C : $v_J(H) > 0,12$ donc $M = 1$).

Ainsi, ces deux classes se différencient l'une de l'autre selon deux caractéristiques : l'âge (les ménages de plus de 60 ans paraissent estimer le déménagement comme une option intéressante compte tenu de leur attractivité, et la tranche des 30-59 ans est plus mitigée dans son appréciation) et la présence d'enfant dans le ménage (les ménages avec enfant(s) sont plus mitigés à l'idée d'un déménagement que les autres). Les revenus sont également inégalement répartis avec davantage de revenus élevés dans la classe B contre davantage de revenus faibles dans la classe 3. Par ailleurs, on peut noter une légère tendance des ménages aux revenus faibles à considérer que leur attractivité justifie un déménagement (classe C). En milieu et fin de simulation, les constats sont exactement les mêmes.

Globalement, il n'existe pas de typologie des ménages selon l'appréciation qu'ils font de leur attractivité. Ce résultat est à la fois constant dans le temps et à travers les réplications.

Synthèse : Nous avons vu en début d'analyse que les attractivités effectives ($Y_{med}(H)$) n'étaient pas particulièrement corrélées aux caractéristiques des ménages. Nous voyons ici que les attractivités connues ($v_J(H)$) le sont un peu plus, sans pour autant que le lien soit décisif : certains types de ménages (« plus de 60 ans », « célibataires », « sans enfant ») vont avoir une propension plus importante que d'autres à avoir une valeur de $v_J(H)$ élevée, tandis que d'autres seront plus enclins à avoir des valeurs de $v_J(H)$ inférieures à 0,12 (« avec enfant », « revenus élevés »).

Lien entre la représentativité à $Y_{med}(H)$ et l'intérêt global à migrer M

Cette dernière partie de l'exploration nous permet d'identifier si les ménages qui considèrent que leur attractivité n'est pas suffisante pour justifier un déménagement (valeur de $v_J(H)$ inférieure à $A_H(v_J) = 0,12$) sont les mêmes que ceux pour lesquels $v_J(H)$ sous-estime l'attractivité effective $Y_{med}(H)$. L'hypothèse sous-jacente est que si

ces ménages sont les mêmes, leur frein au déménagement provient d'une idée biaisée de leur attractivité, alors qu'avec une autre perception de $Y_{med}(H)$ (*via* une autre valeur de $v_J(H)$), ils considéreraient différemment leur intérêt à déménager M.

Le premier constat que l'on peut faire concernant le lien entre la représentativité de $Y_{med}(H)$ par $v_J(H)$ et la proximité de $v_J(H)$ à $A_H(v_J)$ est qualitatif et se rapporte aux deux analyses menées sur les typologies des ménages. Aucune typologie précise ne se dessine pour les classes de représentativité de $Y_{med}(H)$ par $v_J(H)$ (Fig. 7.41), alors que certaines modalités ressortent plus que d'autres dans les classes de proximité de $v_J(H)$ à $A_H(v_J)$ (Fig. 7.42).

Pour approfondir cette question, nous avons croisé les informations concernant chacune des classes dans un tableau à double entrée. Les résultats de ce croisement sont présentés dans les tableaux 7.9 avec deux points de vue : les tableaux (a) présentent, pour une simulation [23], la répartition des classes de représentativité selon les classes de proximité à $A_H(v_J)$ (pour les ménages dont l'attractivité est surestimée (classe 1) quelle est leur intérêt à migrer ?) [24], et les tableaux (b) présentent plus généralement la répartition des ménages selon les 9 cas de figures possibles.

D'après les résultats des tableaux 7.9 - a, on peut observer qu'en 2015 :

- les ménages pour qui le tirage au sort des 30 logements leur donne une idée surestimée de leur attractivité $Y_{med}(H)$ par $v_J(H)$ (classe 1 de la représentativité) ont systématiquement une valeur de $v_J(H)$ supérieure à 0,12 (classe C). Ils ne sont que 3% à être mitigés quant à l'opportunité représentée par un déménagement ;
- les ménages bénéficiant de la représentativité de $Y_{med}(H)$ par $v_J(H)$ (classe 2 - les plus nombreux) sont répartis de manière relativement homogène dans chacune des classes, et sont plus de 40% à envisager un déménagement compte tenu de leur attractivité ;
- les ménages dont l'attractivité effective est sous-estimée (classe 3) se retrouvent dans toutes les classes, et leur répartition paraît suivre la tendance générale des valeurs de $v_J(H)$ (Fig. 7.39) : ils ont 46% à considérer que le déménagement n'a pas grand intérêt dans ces conditions d'attractivité (valeur de v_J inférieures à 0,06), 31% à être plutôt mitigés quant au bénéfice d'un déménagement ($v_J(H)$ inférieure à 0,12) et enfin ils sont plus de 20% à considérer que leur attractivité est une opportunité à saisir (valeur de $v_J(H)$ supérieure à 0,12).

23. Les résultats des neuf réplications sont présentés en annexes.
24. Fréquences marginales

TABLEAU 7.9 – Correspondance entre les classes de représentativité de $Y_{med}(H)$ par $v_J(H)$ et de proximité de $v_J(H)$ à $A_H(v_J)$ en 2015 - pour la réplication 1

Répartition des classes de représentativité selon la proximité à $A_H(v_J)$

a

2015	Classe A	Classe B	Classe C	*Total*
Classe 1	0	0,03	0,97	*1*
Classe 2	0,33	0,26	0,41	*1*
Classe 3	0,46	0,31	0,23	*1*

2020	Classe A	Classe B	Classe C	*Total*
Classe 1	0	0,02	0,98	*1*
Classe 2	0,38	0,25	0,37	*1*
Classe 3	0,49	0,30	0,21	*1*

2030	Classe A	Classe B	Classe C	*Total*
Classe 1	0	0,08	0,92	*1*
Classe 2	0,31	0,27	0,43	*1*
Classe 3	0,50	0,26	0,24	*1*

Répartition des ménages selon les 9 cas de figure possibles

b

2015	Classe A	Classe B	Classe C	*Total*
Classe 1	0	0,0004	0,015	*0,02*
Classe 2	0,233	0,186	0,294	*0,71*
Classe 3	0,126	0,084	0,062	*0,27*
Total	*0,36*	*0,27*	*0,37*	*1*

2020	Classe A	Classe B	Classe C	*Total*
Classe 1	0	0,0003	0,018	*0,02*
Classe 2	0,275	0,184	0,270	*0,73*
Classe 3	0,124	0,077	0,053	*0,25*
Total	*0,40*	*0,26*	*0,34*	*1*

2030	Classe A	Classe B	Classe C	*Total*
Classe 1	0	0,0012	0,015	*0,02*
Classe 2	0,176	0,153	0,246	*0,58*
Classe 3	0,205	0,106	0,096	*0,41*
Total	*0,39*	*0,26*	*0,35*	*1*

Légende

Représentativité de Y_{med} par v_J
- Classe 1 : attractivité connue v_J surestime l'attractivité effective Y_{med}
- Classe 2 : attractivité connue v_J est représentative de l'attractivité effective Y_{med}
- Classe 3 : attractivité connue v_J sous-estime l'attractivité effective Y_{med}

Proximité de v_J à $A_H(v_J)$
- Classe A : attractivité connue v_j inférieure à 0,06
- Classe B : attractivité connue v_j comprise entre 0,06 et 0,12
- Classe C : attractivité connue v_j supérieure à 0,12

Cela signifie que, sur les 27 % des ménages ayant une mauvaise perception de leur attractivité (classe 3), ils sont 77% à être plus ou moins mitigés à l'idée que le déménagement présente un réel intérêt – soit un total de 21 % (Tabl. 7.9 - b) des ménages de l'agglomération pour qui le fait de sous-estimer l'attractivité $Y_{med}(H)$ est pénalisant.

Enfin, en comparant la répartition des ménages de la classe 3 avec celle de la classe 2 (ménages pour lesquels $v_J(H)$ représente convenablement $Y_{med}(H)$), on réalise qu'elles suivent les mêmes tendances, ce qui signifie que le fait d'avoir une connaissance qui sous-estime l'attractivité ne pénalise que faiblement le ménage dans sa manière d'envisager l'intérêt du déménagement.

Ces constats sont valables pour les deux autres dates, et ils sont les mêmes pour les autres réplications.

Bilan de l'exploration des attractivités

Résultats de l'exploration des attractivités Ces analyses ont permis d'explorer les relations entre les différentes variables participant à l'évaluation par chaque ménage de son intérêt à déménager, compte tenu de l'offre en logements dont il a connaissance et de leur attractivité pour lui. Les résultats de cette exploration des résultats intermédiaires de simulation de Mobisim sont les suivants :

- les ménages disposent d'une offre en logements vacants attractifs relativement importante ;
- cette offre n'est pas liée à leurs caractéristiques, elle dépend donc d'autres variables telle que leur satisfaction résidentielle actuelle par exemple ;
- plus cette offre est importante, plus elle est potentiellement variée et attractive ;
- l'attractivité dont les ménages ont connaissance avec les 30 logements connus est globalement représentative de leur attractivité effective (sur tout les logements vacants attractifs). Elle est sous-estimée pour un tiers des ménages de l'agglomération, parmi lesquels on trouve un peu plus de célibataires et de revenus faibles que pour l'ensemble de la population ;
- en général, 35% des ménages considèrent leur attractivité suffisamment intéressante pour envisager un déménagement, contre 39% qui considèrent ne pas avoir de suffisamment bonnes opportunités pour cela ;
- il n'existe pas de typologie évidente des ménages selon leur attractivité ni selon leur évaluation de celle-ci pour envisager un déménagement : tous les ménages sont potentiellement confrontés aux mêmes situations ;
- 21% des ménages de l'agglomération sont pénalisés par une mauvaise connaissance de leur attractivité.

L'ensemble de ces résultats nous permet d'attester que le modèle produit des résultats cohérents : le tirage aléatoire des 30 logements dont chaque ménage a connaissance n'entraîne pas de différenciation particulière dans le comportement des ménages face à l'évaluation de leur intérêt à déménager.

Le modèle permet également de représenter l'hétérogénéité des comportements des ménages vis-à-vis de leur décision résidentielle : à caractéristiques équivalentes, les ménages de Mobisim n'ont pas tous la même qualité d'information concernant leur attractivité et ne réagissent pas de la même manière à cette information. Certains ménages ont une connaissance relativement juste de ce qui leur est attractif et pourront envisager de changer de localisation résidentielle en connaissance de cause, tandis que

d'autres ne sauront pas trouver les bonnes informations, ce qui peut les freiner dans leur décision de déménager en attendant de trouver de meilleures opportunités.

Cette exploration des attractivités permet également de souligner le rôle sous-jacent mais indéniable de la satisfaction résidentielle des ménages d'une part, et de la localisation des logements dont ils ont connaissance d'autre part. Le rôle de ces deux variables devrait être approfondi dans des analyses complémentaires.

Concernant l'analyse de sensibilité

A l'heure actuelle, le taux annuel de migration est trop élevé par rapport aux données locales dont nous disposons : en 2012, il est de 18 % avec Mobisim contre 13 % en réalité (cf. chapitre 5). Dans les simulations, il diminue nettement en fin de simulation, ce qui est cohérent avec le fait qu'un plus grand nombre de ménages sous-estiment leur intérêt global à migrer.

Par ailleurs on sait à présent que la probabilité de déménager Ω de 21% des ménages est réduite parce que ces derniers ont une idée biaisée à la baisse de leur attractivité. Étant donné que la probabilité de déménager est effectivement le levier final pour ajuster les taux de migration, deux solutions s'offrent à nous :

1. il faut encore diminuer l'intérêt global à déménager M des ménages[25], c'est-à-dire augmenter la valeur de $A_H(v_J)$ pour que les ménages soient plus exigeants vis-à-vis de leur attractivité connue $v_J(H)$;
2. la mobilité individuelle des ménages est trop élevée, et il faut revoir à la baisse les valeurs d'α.

Ces deux constats nous permettent d'orienter le choix des valeurs à tester pour ces deux paramètres ($A_H(v_J)$ et α) dans leur analyse de sensibilité.

7.4.2 Analyse de sensibilité des paramètres d'attractivité des ménages

Pour simplifier l'analyse de sensibilité vis-à-vis de ces paramètres, ne seront testées dans l'analyse de sensibilité que les valeurs du nombre de logements connus n_J et de la référence collective $A_H(v_J)$. La valeur utilisée pour synthétiser l'attractivité connue $v_J(H)$ des ménages est fixée à la médiane des valeurs d'attractivités des n_J logements connus par le ménage, et nous n'en testerons pas les modifications ici.

La sensibilité vis-à-vis de n_J et de $A_H(v_J)$ est analysée sur les valeurs de l'intérêt global à déménager M et de la probabilité de déménager Ω pour les résultats dits « directs » et sur les résultats généraux du taux annuel de migration et de la satisfaction moyenne sur l'agglomération. Nous testerons également les effets de la modification du paramètre n_J sur les valeurs d'attractivité connue v_J des ménages. Enfin, nous observerons l'influence des valeurs de ces deux paramètres sur le nombre de migrants dans une dichotomie ville-centre - communes périurbaines, pour vérifier en quoi les paramètres liés à l'attractivité peuvent impacter les flux migratoires au sein de l'agglomération.

7.4.2.1 Sensibilité vis-à-vis de la modification du nombre de logements vacants attractifs connus n_J

La valeur par défaut de n_J est fixée à 30. Cette valeur est un ordre de grandeur reconnu dans la littérature, mais elle est aussi le minimum acceptable pour attester qu'un échantillon est représentatif de l'ensemble dont il est issu. Notre choix est donc de ne pas tester de valeur inférieure à 30. Les valeurs testées ont été choisies subjectivement, selon deux critères :

1. tester des valeurs proches de 30, pour maintenir le paramètre dans une certaine réalité thématique, à savoir le nombre de logements qu'un ménage peut effectivement connaître ;
2. tester des valeurs les plus grandes possibles pour analyser l'effet d'autres ordres de grandeur sur les résultats ; l'exploration des attractivités nous a montré que les ménages bénéficient d'un nombre important de logements vacants attractifs, et nous souhaitons éprouver ces valeurs sur les résultats de simulation du modèle.

Les valeurs choisies pour tester la sensibilité vis-à-vis de n_J sont les suivantes : 30, 35, 40, 50, 100, 500 et 1500.

Impact sur l'attractivité connue $v_J(H)$

a) Amplitude des variations de $v_J(H)$ à la modification du paramètre n_J Le nombre de logements n_J permet au ménage de prendre connaissance de son attractivité à travers l'attractivité connue $v_J(H)$ sur laquelle il va ensuite pour évaluer son intérêt global à déménager M. D'après les résultats de la figure 7.43 - a, nous pouvons constater que l'augmentation du nombre de logements connus par le ménage a finalement peu d'impact sur la distribution des valeurs d'attractivités connue $v_J(H)$ puisque quelle que soit la valeur donnée au paramètre, le nombre de ménages pour chaque valeur d'attractivité connue est globalement le même. Seules exceptions, les

valeurs d'attractivité connue des ménages estimées à partir de 500 logements ne sont pas les exactement les mêmes que pour les autres valeurs du paramètre : les ménages ayant une attractivité faible sont moins nombreux en début de simulation (2015 et 2020) et plus nombreux en 2030.

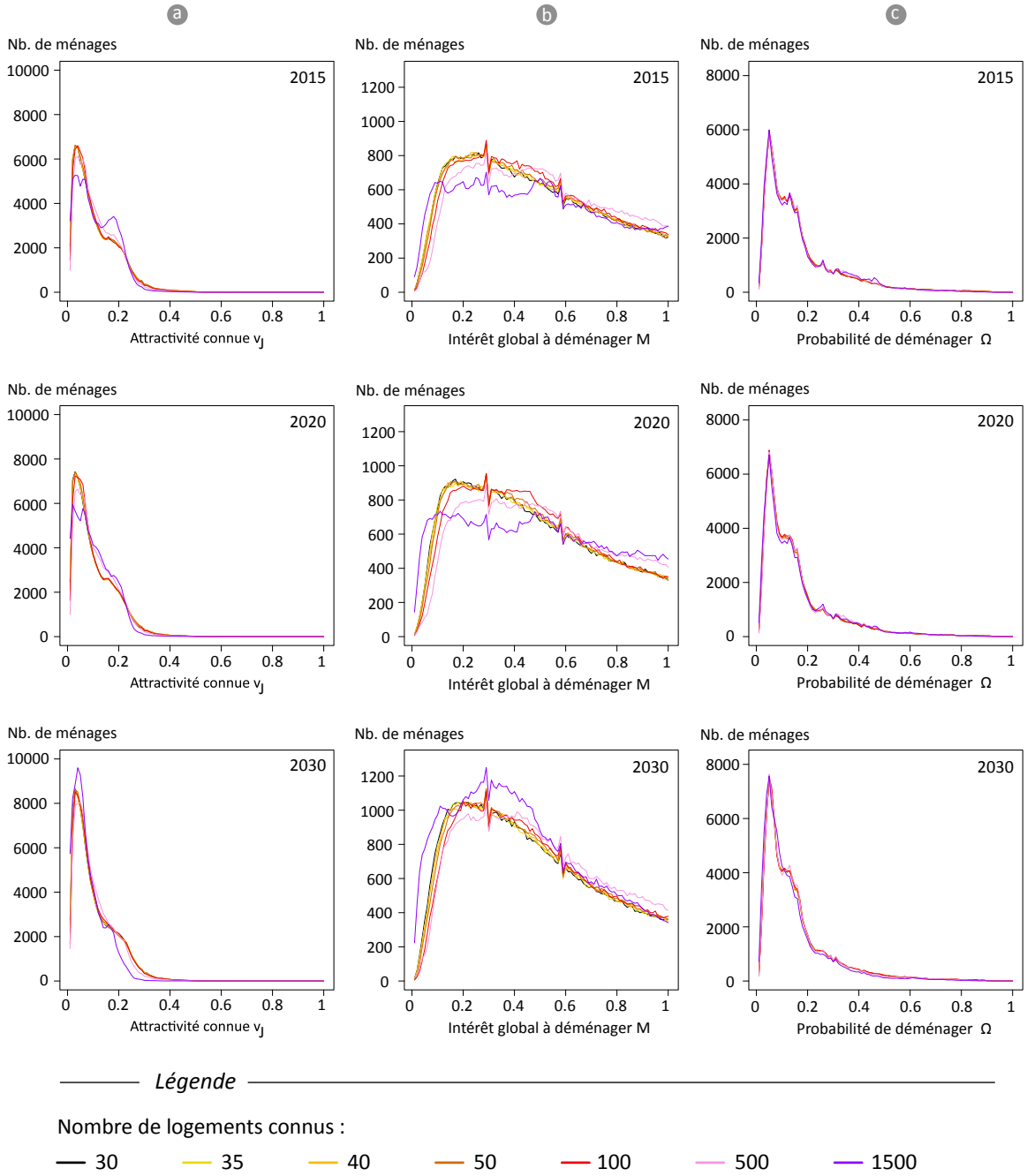


FIGURE 7.43 – Sensibilité des valeurs d'attractivité connue v_J, d'intérêt global à déménager M et de la probabilité de déménager ω à une modification du nombre de logements connus n_J

Nous pouvons imputer ce dernier résultat à la diminution du nombre de logements vacants attractifs en fin de simulation (Fig. 7.36) : moins il y a de logements vacants,

moins ils sont potentiellement attractifs, ce qui peut expliquer cette baisse globale de l'attractivité connue $v_J(H)$ des ménages.

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements simulés des ménages Connaître plus ou moins de logements vacants attractifs ne permet pas aux ménages de se différencier entre eux dans leur attractivité connue respective : le nombre de ménages pour chaque valeur de v_J est le même pour toutes les valeurs testées de n_J.

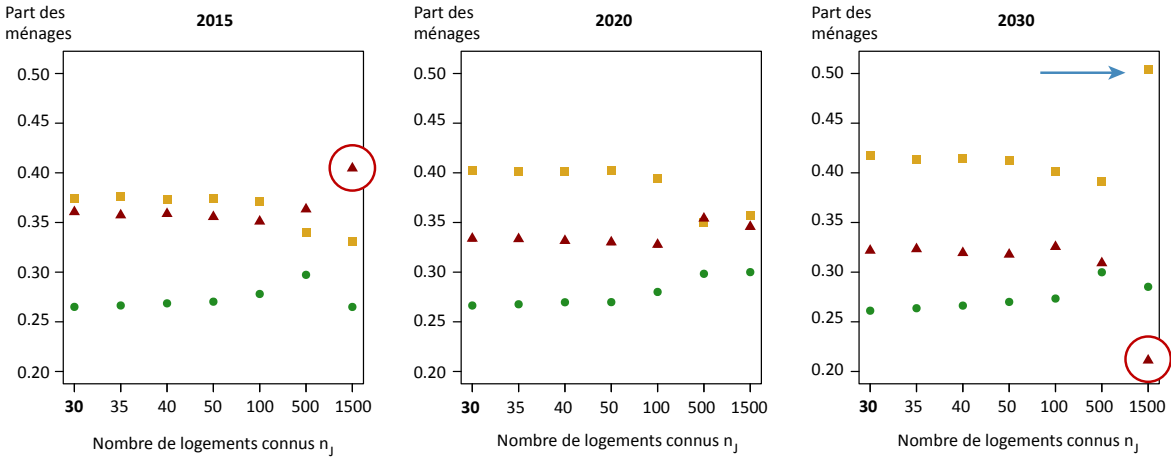
Néanmoins, une nette majorité des ménages présente des valeurs de v_J comprises entre 0 et 0,2, et à plus forte raison entre 0 et 0,1, et il serait pertinent de focaliser sur les variations dans cet intervalle de valeurs plus précisément pour observer dans quelle mesure les comportements des ménages ne sont pas influencés par la modification du paramètre.

Impact sur l'intérêt global à migrer M

a) Amplitude des variations de M à la modification du paramètre n_J L'intérêt global à déménager étant une traduction directe des valeurs d'attractivités, le graphique 7.43 - b peut être vu comme un zoom sur l'intervalle 0 - 0,12 des valeurs de v_J, 0,12 étant par défaut dans Mobisim la valeur d'attractivité à partir de laquelle le ménage considère que son intérêt global à déménager est maximal. De fait, les résultats des valeurs de M suivent la même tendance que pour les valeurs de $v_J(H)$ (Fig. 7.43 - b) : lorsque le ménage visite plus de logements, son attractivité connue $v_J(H)$ augmente sensiblement, ce qui peut lui permettre d'améliorer l'évaluation de son intérêt global à déménager M. A l'exception de $n_J = 1\ 500$ en 2030, l'ensemble des résultats suit cette tendance. Les variations sont minimes mais bien présentes : globalement, les ménages dont l'intérêt global à déménager est plus élevé sont plus nombreux.

L'amplitude des variations de M à la modification des valeurs de n_J de 100 à 1 500 concerne une centaine de ménages pour chaque valeur de M comprise entre 0,2 et 0,5, soit environ 3 000 ménages en tout pour cet intervalle de valeurs, ce qui n'est pas très élevé.

Quelle que soit la valeur du paramètre testée, on remarque deux discontinuités dans le nombre de ménages dont l'intérêt à déménager est égal à 0,3 et 0,6 (respectivement $v_J = 0{,}036$ et $v_J = 0{,}072$). Dans l'état actuel de l'exploration des résultats de simulation, nous ne pouvons pas les expliquer.



Date	Valeurs testées pour le nombre de logements connus	Part des ménages dans la classe A	Part des ménages dans la classe B	Part des ménages dans la classe C
2015	30	0,37	0,26	0,36
	35	0,38	0,27	0,36
	40	0,37	0,27	0,36
	50	0,37	0,27	0,36
	100	0,37	0,28	0,35
	500	0,34	0,30	0,36
	1500	0,33	0,26	0,40
2020	30	0,40	0,27	0,33
	35	0,40	0,27	0,33
	40	0,40	0,27	0,33
	50	0,40	0,27	0,33
	100	0,39	0,28	0,33
	500	0,35	0,30	0,35
	1500	0,36	0,30	0,34
2030	30	0,42	0,26	0,32
	35	0,41	0,26	0,32
	40	0,41	0,27	0,32
	50	0,41	0,27	0,32
	100	0,40	0,27	0,33
	500	0,39	0,30	0,31
	1500	0,50	0,29	0,21

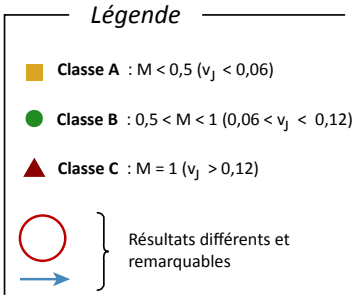


FIGURE 7.44 – Sensibilité de la répartition des ménages selon leur valeur d'intérêt global à migrer M à la modification du nombre de logements connus n_J

En complément de résultats de la figure 7.43 - b [26], nous avons répété les tests effectués dans l'exploration des attractivités, à savoir répartir les ménages en trois classes selon leur valeur d'intérêt global à déménager : M inférieur à 0,5 (classe A), M compris entre 0,5 et 1 (classe B) et M égal à 1 (classe C). Nous avons cherché à savoir dans quelle mesure la modification du paramètre n_J influençait la répartition des ménages dans chacune de ces classes. La figure 7.44 présente les résultats ainsi obtenus.

La similarité des résultats de simulation pour les valeurs du paramètre allant de 30 à 100 est très marquée sur les trois graphiques, tout comme l'est le comportement différent des ménages lorsque n_J est supérieur à 500. Les classes A et B présentent les mêmes résultats que la figure 7.43 - b, c'est-à-dire une part importante des ménages

26. Elle ne présente pas le nombre de ménages dont l'intérêt global à déménager est strictement égal à 1, c'est-à-dire le nombre de ménages dont l'attractivité connue v_J est supérieure à 0,12

pour lesquels l'intérêt global à déménager M est inférieur à 0,5, et ce invariablement selon les valeurs testées de n_J. Mais cette figure permet surtout de constater deux résultats obtenus avec un nombre de logements connus à 1500 :

- en 2030, 50% des ménages ont un intérêt global à déménager très faible (inférieur à 0,5 - classe A) (en bleu sur la figure 7.44) ;
- la part de ménages dont l'intérêt global à déménager M est maximal est plus importante en début de simulation (40% des ménages contre 36% avec les autres valeurs du paramètre), et bien moins importante en fin de simulation (21% seulement, contre 30% avec les autres valeurs de paramètres). Ces deux résultats, entourés en rouge sur la figure 7.44 et dans le tableau, traduisent le nombre de ménages concernés par des valeurs d'attractivité avoisinant 0,2 observé en 2015 et en 2030 sur les graphiques 7.43 - a.

Une fois encore, on peut supposer que la saturation du marché du logement (diminution générale du nombre de logements vacants attractifs) est à l'origine de tels comportements de la part des ménages.

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements simulés des ménages Quelle que soit la valeur du nombre de logements connus par le ménage, l'intérêt global à déménager varie toujours entre 0 et 1. La différence que l'on peut noter avec la modification de la valeur du paramètre se trouve plutôt dans le nombre de ménages concernés par chaque valeur de M pour un nombre de logements connus supérieur à 500. En 2015 et en 2020, dans ces deux cas de figure ($n_J = 500$ et $n_J = 1500$), la courbe de distribution est plus basse lorsque M est compris entre 0,2 et 0,5, ce qui signifie que moins de ménages sont concernés par ces valeurs dans la première moitié de la simulation. Par ailleurs, elle est plus élevée que les autres pour des valeurs de M supérieures à 0,7, ce qui veut dire que plus de ménages ont un intérêt à déménager élevé. Ces différences traduisent une hétérogénéité simulée plus importante avec ces valeurs du paramètre : les ménages sont moins nombreux à avoir la même valeur de M.

En fin de simulation, l'hétérogénéité paraît de nouveau similaire pour toutes les valeurs testées de n_J.

Bilan de l'analyse de sensibilité du résultat de simulation à la variation du paramètre Les valeurs de M comprises entre 0 et 1 dépendent principalement de l'attractivité des ménages v_J, dont nous savons maintenant que les valeurs sont principalement comprises entre 0 et 0,12. L'ordre de grandeur des valeurs n'est donc pas le même, et les variations de M ne peuvent être expliquées sans approfondir la

sensibilité locale (dans un intervalle de valeur plus précis) des valeurs de v_J à la valeur du paramètre n_J.

Impact sur la probabilité de déménager Ω

a) Amplitude des variations de Ω à la modification du paramètre n_J L'influence du nombre de logements connus par le ménage sur la distribution des probabilité de déménager Ω est pour ainsi dire nul. Les distributions des valeurs de Ω selon les valeurs testées de n_J sont toutes identiques, et ce pour les trois itérations considérées : le même nombre de ménages est concerné par les mêmes valeurs de Ω, y compris pour un nombre de logements connus égal à 1 500.

La faible sensibilité des résultats précédents a été encore été atténuée au moment de l'agrégation avec la mobilité individuelle φ pour le calcul de la probabilité de déménager Ω.

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements simulés des ménages L'hétérogénéité des comportements des ménages reste la même selon les valeurs du paramètre testées. Les ménages sont nombreux à avoir des valeurs de probabilité à déménager comprises entre 0 et 0,2, ce qui est relativement faible. Ce comportement se radicalise au cours de la simulation.

Une faible part des ménages ont une probabilité de déménager supérieure à 0,2. Bien que les courbes paraissent présenter des résultats très similaires, il serait pertinent d'étudier plus précisément le comportement de la variable dans un intervalle de valeurs plus adapté à sa distribution. L'hétérogénéité observée à cette échelle (intervalle de valeurs possibles de Ω : 0 et 1) est quasiment nulle, mais elle est potentiellement différente entre 0 et 0,2.

Impact de la modification du paramètre n_J sur la satisfaction résidentielle moyenne

L'impact des différentes valeurs de n_J sur la satisfaction résidentielle moyenne de tous les ménages est quasiment nul pour les valeurs de n_J de 30 à 50, puis elle augmente nettement à mesure que les ménages connaissent davantage de logements pour atteindre 0,53 pour $n_J = 1500$ logements vacants attractifs (Fig. 7.45), et ce pour les différentes dates considérées.

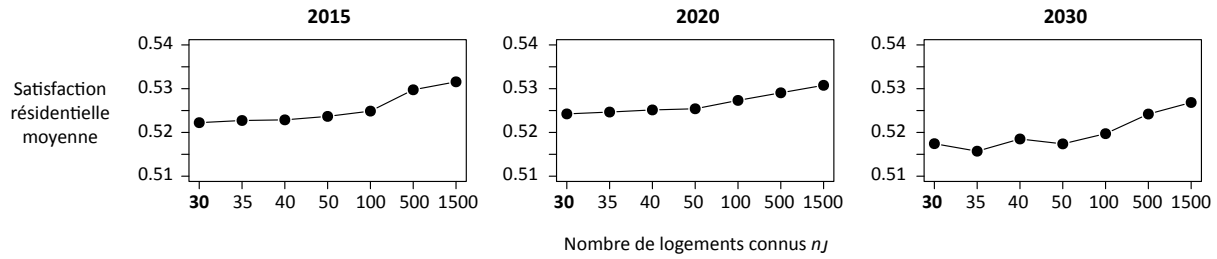


FIGURE 7.45 – Sensibilité de la satisfaction moyenne sur l'agglomération à une modification du nombre n_J de logements connus par le ménage

Impact de la modification du paramètre n_J sur le taux annuel de migration

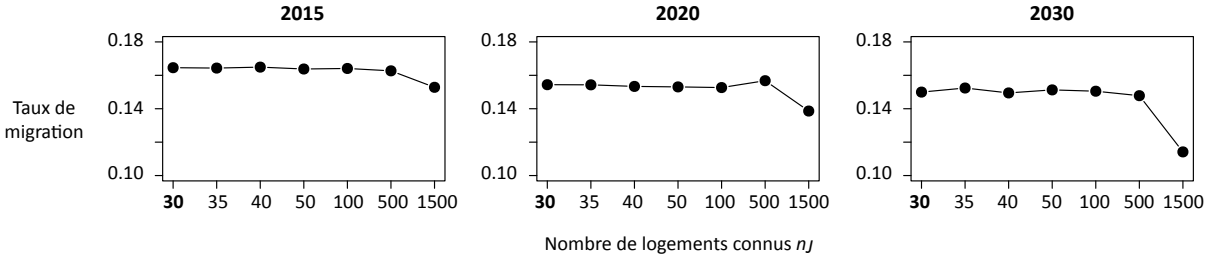


FIGURE 7.46 – Sensibilité du taux annuel de migration à une modification du nombre n_J de logements connus par le ménage

Comme nous avons pu le constater lors des analyses sur le coût des logements, l'évolution des valeurs de taux de migration global sur l'agglomération est inversement liée à celle de la satisfaction : lorsque les ménages évaluent jusqu'à 100 logements, l'influence sur le taux de migration moyen est quasiment nul (Fig. 7.46). Au-delà de 100 logements connus, plus les ménages enrichissent leur connaissance du marché pour estimer leur attractivité connue, plus les valeurs du taux de migration diminuent. Cette diminution s'accentue en 2030. Difficile de ne pas voir de ressemblance entre ce résultat et celui des valeurs de l'intérêt global à déménager M : les tendances observées ici dont les mêmes que celles de la figure 7.44, notamment pour l'année simulée 2030. Par ailleurs, cette ressemblance peut être surprenante étant donné que la sensibilité des valeurs de la probabilité de déménager Ω paraissait inexistante.

Compte tenu des résultats précédents, nous pouvons aussi émettre l'hypothèse qu'en évaluant davantage de logements, les ménages déménagent dans des logements qui leur correspondent plus (augmentation de la satisfaction résidentielle), diminuant ainsi la propension à déménager à nouveau.

Les résultats visibles sur le figure 7.46 ne paraissent pas montrer de stabilisation, et nous pouvons légitimement nous demander si une plus forte augmentation encore du nombre de logements connus ne prolongerait pas les tendances des résultats.

Impact de la modification du paramètre n_J sur le nombre de migrants selon le sens de migration

L'impact des valeurs de n_J sur les différentes migrations analysées suit la même tendance que pour les deux résultats précédents : jusqu'à $n_J = 100$, l'impact est pour ainsi dire nul, et bien que négligeable, il devient plus visible pour les valeurs de n_J supérieures à 100. Seules les migrations au sein de Besançon paraissent favorisées par une augmentation de la valeur de n_J, au détriment des départs de Besançon pour les communes périphériques.

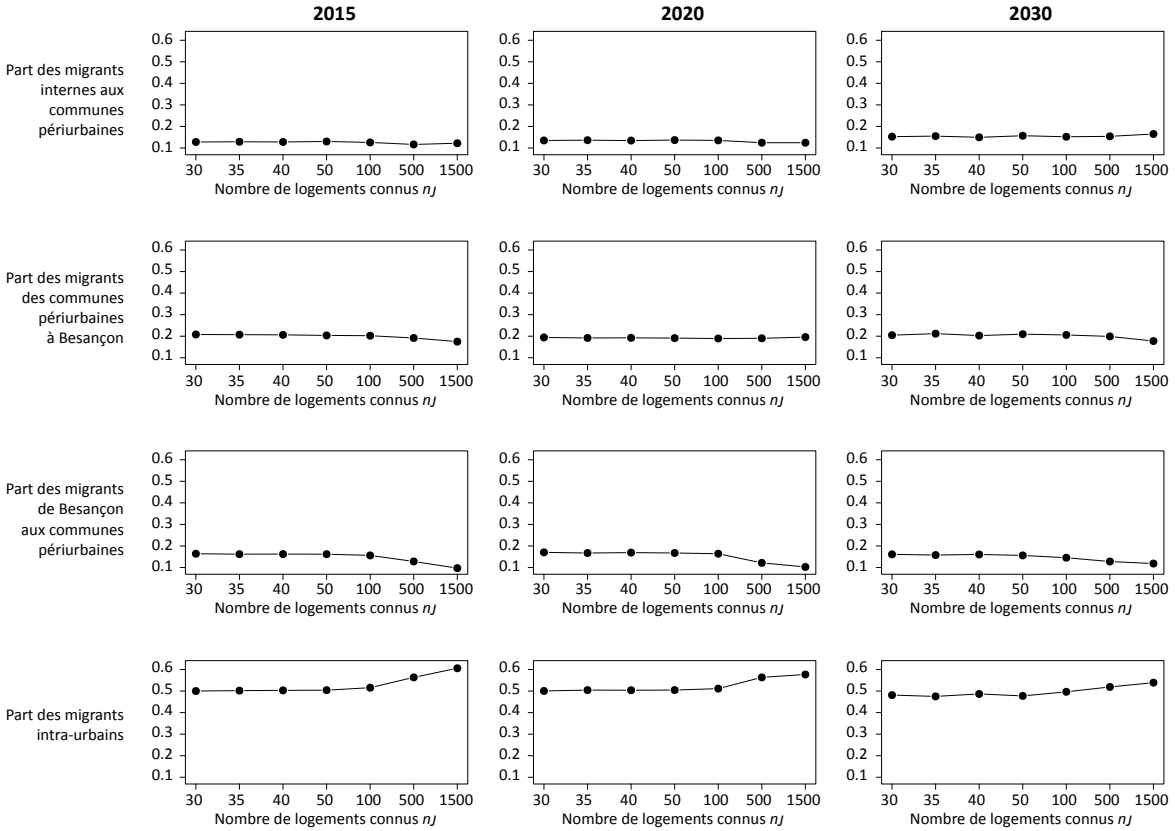


FIGURE 7.47 – Sensibilité du nombre de migrants selon le sens de migration à une modification du nombre n_J de logements connus par le ménage

Le nombre de migrants selon leur origine et destination résultent du choix final d'un ménage lorsqu'il décide effectivement de déménager (lorsqu'il est tiré au sort par sa probabilité Ω). Ce choix final est directement lié aux logements connus puisqu'il consiste à choisir le logement le plus attractif parmi les n_J connus.

Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation du paramètre

Le nombre de logements connus du ménage est une variable clé dans la décision résidentielle des ménages puisque c'est à partir de ces logements que le ménage es-

time son attractivité sur la zone d'étude d'une part, et qu'il évalue ou non s'il a une opportunité de déménager d'autre part. Nous avons pu constater que l'influence en apparence faible sur les valeurs d'attractivité connue v_J est bien réelle, notamment à travers les valeurs de l'intérêt à déménager M. Ces deux variables sont dépendantes dans le modèle et leur sensibilité respective aux modifications de la valeur du paramètre l'est également. Néanmoins, de faibles modifications du nombre de logements connus n'a pas beaucoup d'effet sur l'attractivité des logements pour les ménages en ressortent. Il faut qu'ils augmentent radicalement leur connaissance de l'offre en logements pour voir leur comportement évoluer.

Lorsque les ménages améliorent leur connaissance du marché du logement sur l'agglomération bisontine, ils sont globalement plus satisfaits. Cela est vrai jusqu'en 2020 en tout cas (Fig. 7.44) [27].

L'influence avérée des valeurs du paramètre n_J sur le nombre de migrants selon le sens de migration renvoie directement à la localisation des logements vacants attractifs de l'agglomération ; en augmentant leur connaissance des logements qui leur sont respectivement attractifs, les ménages diversifient potentiellement la localisation de leur futur logement. Ce paramètre est le seul à être lié explicitement à la localisation de chaque logement connu dans l'agglomération (situation par rapport aux commerces et services et autres aménités), et de ce fait, il est un paramètre géographique. Pour expliquer plus précisément ce dernier résultat, nous devrions approfondir l'exploration des localisations résidentielles, et de leur attractivité respective.

7.4.2.2 Sensibilité vis-à-vis de la modification de la valeur de référence collective $A_H(v_J)$

Suite à l'exploration des valeurs d'attractivités menée en section 7.4.1, on sait que beaucoup de ménages ont un intérêt global à migrer M inférieur à 1. Malgré cela, le taux de migration moyen reste trop élevé sur l'agglomération, ce qui peut signifier que les valeurs d'intérêt global à déménager M des ménages sont encore trop élevées. Cela pourrait être atténué en rendant ces derniers plus exigeants lorsqu'ils évaluent les opportunités de déménager qui s'offrent à eux, et cela se traduit dans les paramètres par une augmentation de la valeur de référence collective $A_H(v_J)$.

Tester la sensibilité de ce paramètre nous permet ici d'anticiper un futur calibrage, c'est pourquoi nous avons choisi de tester un grand nombre de valeurs supérieures à

27. L'augmentation de la valeur d'intérêt global à déménager correspond directement à une augmentation de la valeur d'attractivité connue v_J.

0,12. 0,12 est la médiane de l'ensemble des valeurs d'attractivité sur l'agglomération, et nous avons choisi de tester des valeurs atteignant jusqu'au troisième quartile de cette distribution, 0,19 (cf. chapitre 5, section 5.3.2). Thématiquement, cela traduit bien l'exigence des ménages vis-à-vis de leur valeur d'attractivité v_J : elle doit être de plus en plus élevée pour qu'ils estiment avoir un intérêt à déménager compte tenu de leur situation actuelle, c'est-à-dire pour que leur intérêt global à déménager soit maximal (Fig. 7.48).

Nous avons également choisi de tester deux valeurs inférieures mais proches de la médiane 0,12 par curiosité méthodologique : d'après les résultats de l'exploration précédente, on sait qu'une grande partie des ménages connaissent une attractivité $v_J(H)$ inférieure à cette valeur (cf. 7.4.1 - l'exploration des attractivités), et nous souhaitons tester la réaction des résultats de simulation sur des intervalles de valeurs concernant beaucoup de ménages. Deux valeurs suffisent (Fig. 7.48) puisque nous savons déjà que le calibrage ne portera pas sur des valeurs inférieures à 0,12.

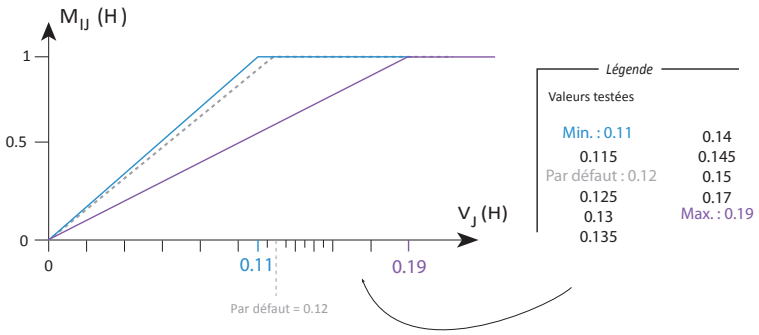


FIGURE 7.48 – Valeurs testées pour la modification du paramètre d'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale

Impact sur l'intérêt global à migrer M

a) Amplitude des variations de M à la modification du paramètre $A_H(v_J)$
L'impact des modifications de la valeur de $A_H(v_J)$ sur les valeurs de M est assez net et régulier : plus le ménage est exigeant lorsqu'il compare son attractivité connue au reste de l'agglomération (i.e. plus on augmente la valeur de $A_H(v_J)$), moins l'intérêt global à déménager M est élevé (Fig. 7.49). Cette sensibilité est complètement inhérente à la construction de la variable M, qui dépend directement, toutes choses égales par ailleurs, de la confrontation de l'attractivité connue v_J à $A_H(v_J)$.

On retrouve par ailleurs les deux discontinuités dans le nombre de ménages concernés par les valeurs d'intérêt à déménager M égal à 0,3 et 0,6.

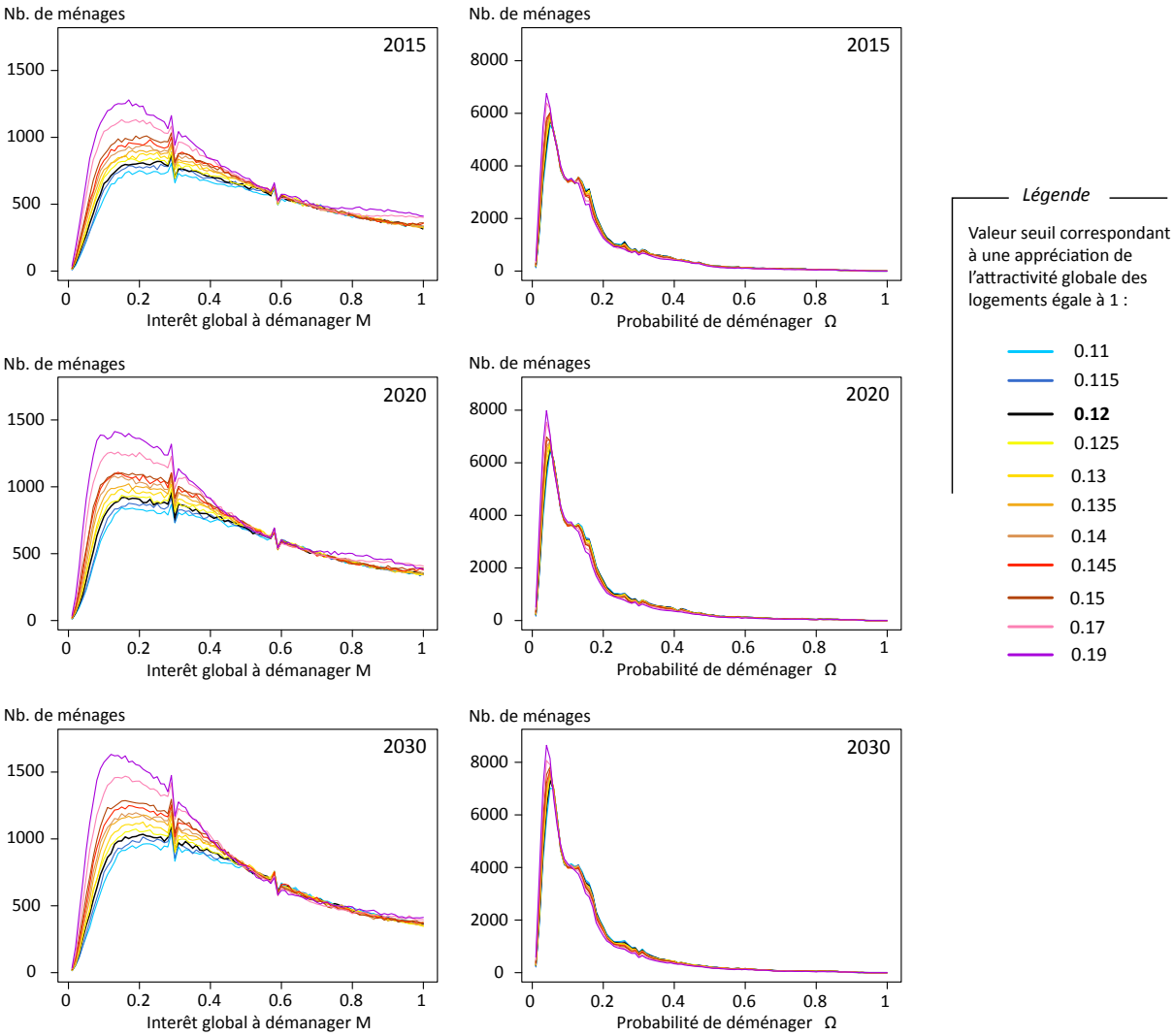
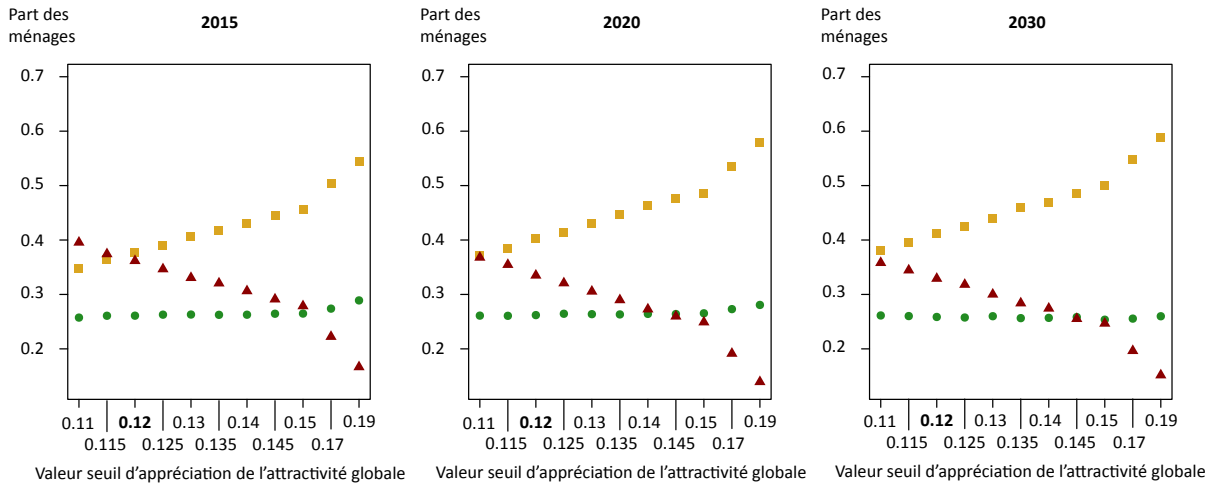


FIGURE 7.49 – Sensibilité des valeurs d'intérêt global à déménager M et de la probabilité de déménager Ω à une modification du paramètre d'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale des logements

L'amplitude des variations de M dans l'intervalle de valeurs testées pour $A_H(v_J)$ est maximal lorsque M varie autour de 0,2 : chacune des valeurs de M autour de 0,2 concerne environ 750 ménages lorsque les ménages ne sont pas exigeants ($A_H(v_J) = 0,11$) et plus de 1 100 lorsqu'ils sont très exigeants ($A_H(v_J) = 0,19$).

Nous avons complété ce résultat en analysant la répartition des ménages dans les trois classes de valeurs de l'intérêt global à déménager M définies lors de l'exploration des attractivités (Fig. 7.50). [28]

28. Le résultat observé sur la figure pour la valeur du paramètre égal à 0,12 est le même que celui observé sur le graphique 7.44 pour $n_J = 30$, puisqu'il s'agit de la configuration par défaut du paramètre.



Date	Valeurs testées pour l'appréciation de l'attractivité globale	Part des ménages dans la classe A	Part des ménages dans la classe B	Part des ménages dans la classe C
2015	0,11	0,35	0,26	0,40
	0,115	0,36	0,26	0,37
	0,12	0,38	0,26	0,36
	0,125	0,39	0,26	0,35
	0,13	0,41	0,26	0,33
	0,135	0,42	0,26	0,32
	0,14	0,43	0,26	0,31
	0,145	0,44	0,26	0,29
	0,15	0,46	0,26	0,28
	0,17	0,50	0,27	0,22
	0,19	0,54	0,29	0,17
2020	0,11	0,37	0,26	0,37
	0,115	0,38	0,26	0,35
	0,12	0,40	0,26	0,34
	0,125	0,41	0,26	0,32
	0,13	0,43	0,26	0,31
	0,135	0,45	0,26	0,29
	0,14	0,46	0,26	0,27
	0,145	0,48	0,26	0,26
	0,15	0,49	0,27	0,25
	0,17	0,54	0,27	0,19
	0,19	0,58	0,28	0,14
2030	0,11	0,38	0,26	0,36
	0,115	0,40	0,26	0,34
	0,12	0,41	0,26	0,33
	0,125	0,42	0,26	0,32
	0,13	0,44	0,26	0,30
	0,135	0,46	0,26	0,28
	0,14	0,47	0,26	0,27
	0,145	0,49	0,26	0,26
	0,15	0,50	0,25	0,25
	0,17	0,55	0,26	0,20
	0,19	0,59	0,26	0,15

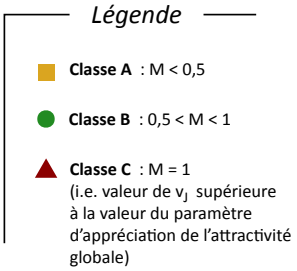


FIGURE 7.50 – Sensibilité de la répartition des ménages selon leur valeur d'intérêt global à migrer M à la modification du paramètre d'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale des logements

La répartition des ménages selon les valeurs de M en trois classes reflète là encore les conséquences d'une exigence plus prononcée des ménages à l'égard de leur attractivité connue v_J : plus les ménages sont exigeants, plus ils sont nombreux à estimer que leur intérêt global à migrer est très faible (classe A). La part des ménages considérant que

leur intérêt global à déménager est correct (classe B) reste globalement stable, tandis que celle des ménages estimant qu'un déménagement dans ces conditions d'attractivité est intéressant (classe C) est de plus en plus faible, à tel point qu'ils ne sont que 15% à estimer que leur intérêt global à déménager est maximal en 2030 lorsque leur attractivité connue v_J doit être supérieure à 0,19. Le tableau 7.50 nous permet également de constater qu'en 2030, 36% des ménages ont une attractivité connue supérieure à 0,11 et seulement 15% supérieure à 0,19.

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements simulés des ménages Quelle que soit la valeur donnée au paramètre d'appréciation de l'attractivité de l'ensemble des logements, la distribution de M concerne toutes les valeurs entre 0 et 1. Ceci dit, étant donné leur exigence de plus en plus importante, le comportement des ménages tend à s'homogénéiser avec l'augmentation de la valeur du paramètre : ils sont de plus en plus nombreux à considérer que leur intérêt global à déménager est faible, voire très faible. Les comportements résidentiels des ménages sont plus diversifiés lorsque la valeur d'appréciation de l'attractivité résidentielle globale est faible que quand elle est élevée.

Impact sur la probabilité de déménager Ω

a) Amplitude des variations de Ω à la modification du paramètre $A_H(v_J)$ La sensibilité des valeurs de Ω aux valeurs de $A_H(v_J)$ suit les variations des valeurs de M : plus le ménage est exigeant lors de l'évaluation de son attractivité connue (plus son attractivité connue doit être élevée pour être considérée comme une réelle opportunité de déménager), plus les ménages sont nombreux à avoir des valeurs de probabilités de déménager Ω faibles (Fig. 7.49).

Les valeurs de probabilité à déménager des ménages sont majoritairement comprises entre 0 et 0,2. L'amplitude de variation du nombre de ménages concernés par chaque valeur de Ω selon la modification de la valeur du paramètre est modérée : au maximum, elle est de 1500 ménages entre les deux valeurs extrêmes testées pour le paramètre (0,11 et 0,19 - courbe bleu et courbe violette) pour des valeurs de Ω avoisinant 0,1.

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements simulés des ménages À cette échelle de visualisation, la modification du paramètre d'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale ne paraît pas beaucoup diversifier le comportement des ménages selon leur valeur de probabilité à déménager. Ils semblent néanmoins un peu

plus nombreux à avoir des valeurs de Ω faibles, ce qui signifie que leur comportement tend à légèrement s'homogénéiser sensiblement.

Impact de la modification du paramètre d'appréciation de l'attractivité globale $A_H(v_J)$ sur la satisfaction résidentielle moyenne

L'exigence plus prononcée des ménages ne paraît pas avoir d'effet sur leur satisfaction résidentielle moyenne, à l'échelle de l'agglomération : les valeurs de satisfaction présentées sur la figure 7.51 sont relativement stables avec la modification du paramètre.

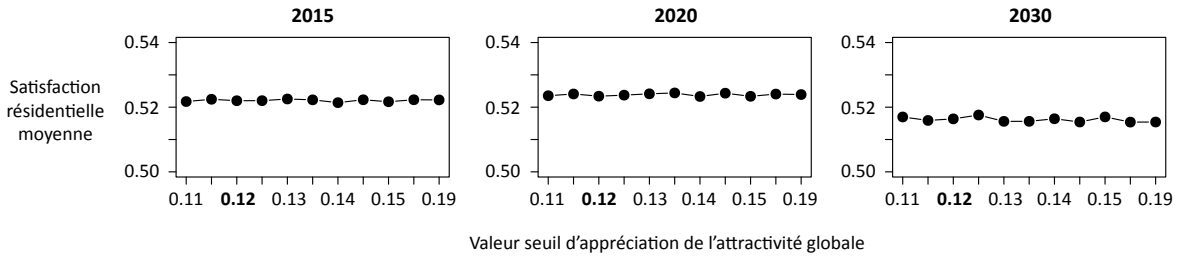


FIGURE 7.51 – Sensibilité de la satisfaction résidentielle moyenne à une modification du paramètre d'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale

Impact de la modification du paramètre d'appréciation de l'attractivité globale $A_H(v_J)$ sur le taux annuel de migration

Le taux de migration moyen, lui, est un peu plus sensible à la modification du paramètre, puisqu'il diminue régulièrement à mesure que les ménages sont plus exigeants quand ils comparent leur attractivité connue à la valeur $A_H(v_J)$. Pour faire référence au taux moyen observé dans la CAGB, le taux minimal observé pour l'ensemble des résultats de la figure 7.52 est de 0,13 en 2030 lorsque l'attractivité connue des ménages doit être égale à 0,19 pour que l'intérêt global à déménager soit maximal. La diminution des valeurs de taux de migration est régulière ; on peut donc supposer qu'elle continuerait à diminuer en augmentant encore l'exigence des ménages *via* la valeur de $A_H(v_J)$.

Impact de la modification du paramètre d'appréciation de l'attractivité globale $A_H(v_J)$ sur le nombre de migrants selon le sens de migration

Si l'impact du nombre n_J de logements connus sur les différents effectifs de migrants était notable, il est beaucoup plus discret pour ce qui est des modifications du paramètre

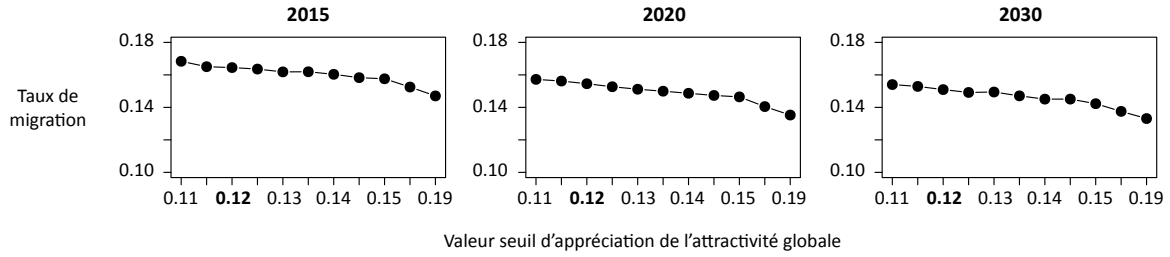


FIGURE 7.52 – Sensibilité du taux annuel de migration à une modification du paramètre d'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale

d'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale. En regardant les résultats présentés sur la figure 7.53, il n'est pas évident de déceler des liens entre les différentes valeurs testées pour le paramètre et le nombre de migrants selon le sens de migration. Cela est dû à la nature du paramètre : en testant le nombre de logements que les ménages visitent, on ciblait précisément des logements, et donc leur localisation, ce qui n'est pas le cas pour $A_H(v_J)$ puisque la modification émane de l'exigence des ménages vis-à-vis de leur attractivité connue v_J. L'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale est plus un paramètre « psychologique », intrinsèque au ménage qui n'a visiblement pas d'influence sur la localisation du logement dans lequel il va déménager.

Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation du paramètre

L'appréciation de l'attractivité globale des ménages nous permet de moduler leur exigence vis-à-vis de la connaissance qu'ils ont de leur propre attractivité : est-elle suffisante, au regard de l'agglomération dans laquelle je réside, pour considérer que ce déménagement est vraiment une opportunité ? Elle symbolise une intransigeance générale - tous les ménages ont le même comportement d'appréciation vis-à-vis de leur attractivité respective - par rapport à l'offre en logements de la zone d'étude. En augmentant cette intransigeance, on remarque que les ménages considèrent globalement avoir moins d'intérêt à déménager, ce qui leur confère des probabilités de déménager moindre, dont la conséquence est une diminution du taux annuel de migration.

Cette intransigeance a très peu, pour ne pas dire aucune influence sur la satisfaction résidentielle moyenne de l'ensemble des ménages, et son impact est inexistant sur les effectifs de migrants selon le sens de migration, à l'échelle globale toujours. Ce paramètre se révèle donc être vraiment la traduction d'une attitude collective à l'égard de l'offre d'un territoire, qui n'a d'autre incidence que de freiner le nombre de déménagements.

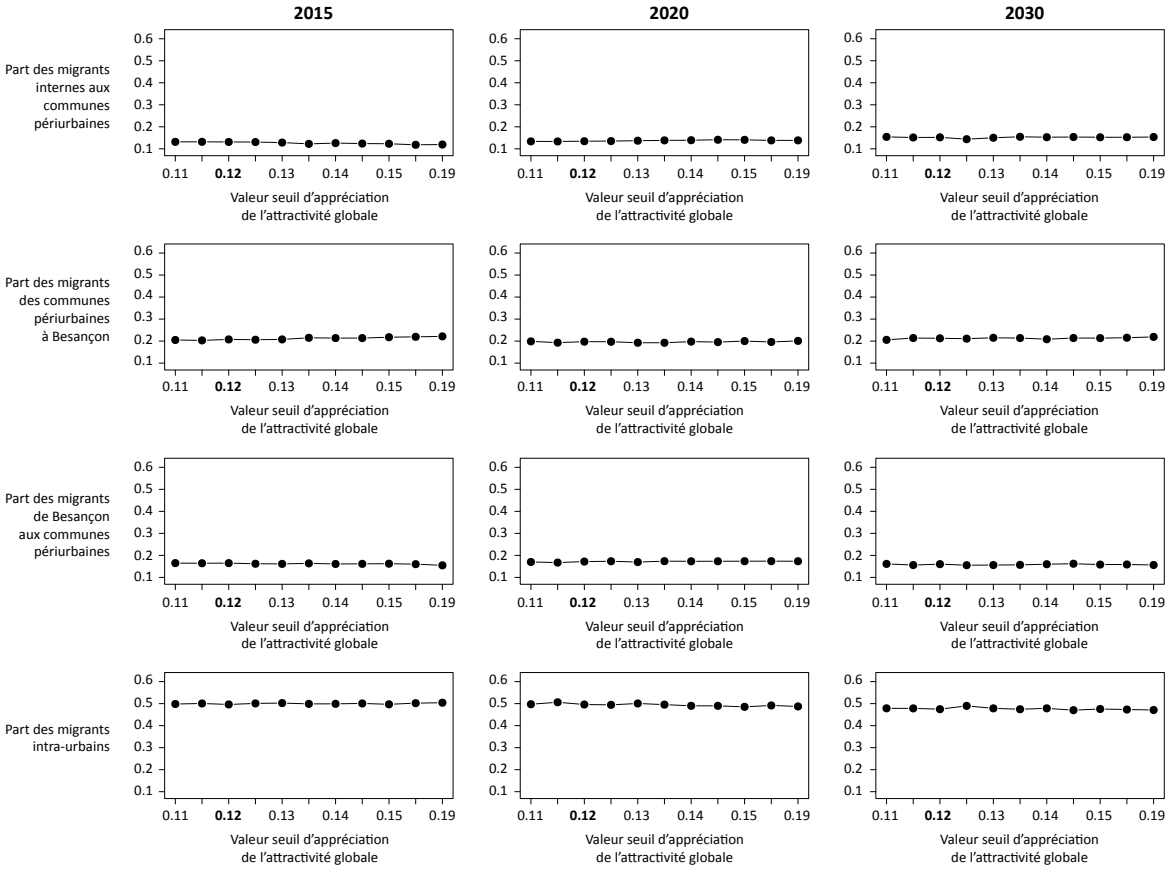


FIGURE 7.53 – Sensibilité du nombre de migrants selon le sens de migration à une modification du paramètre d'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale

7.5 Sensibilité vis-à-vis de la modification des valeurs d'α dans chacune des classes de mobilité individuelle φ

La mobilité individuelle φ permet de modéliser la mobilité intrinsèque des ménages, c'est-à-dire leur propension intrinsèque à être plus ou moins mobile selon leur situation résidentielle : en vieillissant, les ménages sont d'autant moins enclins à envisager un déménagement que leur satisfaction résidentielle est élevée. Les raisons en sont multiples et on peut notamment citer la volonté d'être installé durablement dans un logement ou la réticence à organiser un déménagement donc la logistique est parfois importante (énergie, coût, organisation).

Les paramètres de φ doivent être calibrés puisque cette variable n'a pas de correspondance empirique directe. Elle est composée de deux paramètres, α et β, dont les valeurs ont été fixées par défaut dans le chapitre 5. Nous avons fait le choix de fixer β

à une valeur par défaut (-10), identique pour tous les ménages, et de différencier leur mobilité individuelle *via* le paramètre α uniquement. C'est donc sur ce paramètre que nous focaliserons l'analyse de sensibilité pour la mobilité individuelle φ.

La mobilité individuelle ne dépend que de ses paramètres, et des valeurs de satisfaction résidentielle des ménages. Ainsi, une exploration de la structure des satisfactions des cinq classes de ménages vis-à-vis des valeurs de φ serait utile. Nous avons cependant choisi d'en faire l'impasse dans ce travail.

Concernant le choix des valeurs à tester, nous avons dû tenir compte de deux éléments :

- le paramètre α est multiple, puisqu'il est défini par une valeur différente par classe de mobilité individuelle, soit cinq valeurs en tout, et l'objectif premier est de maintenir le classement de migration entre les classes : le choix de chaque valeur doit être cohérent avec cette démarche ;
- la marge de manœuvre dans le choix des valeurs à tester est limitée puisque les valeurs par défaut sont toutes comprises dans un intervalle entre 0 et 0,4.

Nous avons choisi de tester plusieurs valeurs par classe de mobilité individuelle des ménages, en faisant varier l'écart entre les valeurs. Pour chaque classe, nous définissons la valeur de la classe de mobilité de rang $n + 1$ comme borne inférieure des valeurs testées. Cela nous permet d'analyser les résultats lorsque deux classes de mobilité individuelle des ménages ont les mêmes valeurs d'α.

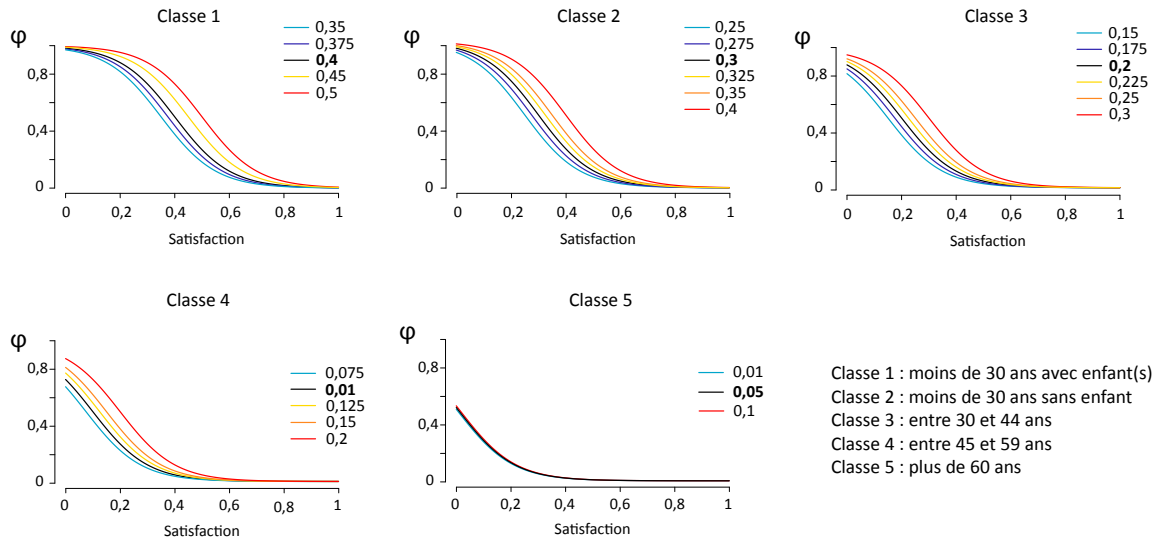


FIGURE 7.54 – Valeurs testées pour la modification du paramètre α de chaque classe de mobilité individuelle φ des ménages

La figure 7.54 présente les différentes valeurs testées pour chacune des classes, et la fonction φ correspondante. Pour chaque classe, les valeurs testées sont supérieures et inférieures à la valeur par défaut (représentée en noir sur la figure). Pour rappel, la valeur d'α détermine la valeur de satisfaction pour une mobilité à 0,5. En diminuant la valeur d'α, on diminue le seuil d'insatisfaction résidentielle nécessaire au ménage pour avoir une mobilité intrinsèque maximale : le ménage doit alors être de plus en plus insatisfait pour être enclin à envisager de déménager, ce qui réduit sa mobilité individuelle φ. Quand la valeur de α est élevée, le ménage est plus exigeant vis-à-vis de sa satisfaction résidentielle, et peut envisager un déménagement dès lors qu'il est faible.

Le point fondamental concernant les valeurs de α testées est que seuls les ménages des classes 1 et 2 (respectivement les ménages de moins de 30 ans avec et sans enfant(s)) peuvent avoir une mobilité individuelle φ maximale égale à 1 ; la mobilité individuelle maximale des autres classes est forcément inférieure à 1, et elle tombe assez rapidement à 0, même pour des valeurs de satisfaction résidentielle faibles.

L'analyse de sensibilité vis-à-vis du paramètre α de chaque classe de mobilité individuelle est effectuée toutes choses égales par ailleurs : les valeurs d'α sont modifiées les unes après les autres, c'est-à-dire qu'une seule classe à la fois est affectée par une modification du paramètre.

La sensibilité induite par α est testée sur trois résultats : les valeurs de mobilité individuelle φ, les valeurs de probabilité de déménager Ω et le taux annuel de migration. Nous étudierons systématiquement la distribution de valeurs du résultat de simulation pour l'ensemble de la population ainsi que la distribution des valeurs du résultat spécifiquement à chacune des cinq classes. Sont nommés « impacts locaux » les résultats de simulation spécifiques à chaque classe et « impacts généraux » les résultats de simulation pour l'ensemble des ménages ; seul le niveau d'agrégation de l'observation change.

Enfin, pour chaque valeur testée, nous regarderons si le classement initial entre les cinq classes se maintient, c'est-à-dire si les classes les plus mobiles par défaut demeurent les plus mobiles avec la modification du paramètre.

7.5.1 Impact local sur la mobilité individuelle φ intra-classe

a) Amplitude des variations de φ intra-classe à la modification du paramètre α de chacune des classes de mobilité individuelle

Ces résultats présentent la distribution des valeurs de mobilité individuelle φ pour les ménages appartenant à chacune des classes en fonction de la modification apportée à la valeur du paramètre α de la classe concernée. Les figures 7.55 à 7.59 présentent la distribution des effectifs des ménages au sein de chaque classe. Ces effectifs étant très différents selon les classes (la classe 1 - les ménages de moins de 30 ans avec enfant(s) - notamment est composée de peu de ménages comparée aux autres classes), nous avons également représenté ce résultat sous la forme d'histogrammes de distribution de la part des ménages selon leur valeur de mobilité individuelle φ (discrétisée en 10 classes) (Fig. 7.60 à 7.62), ce qui permet de comparer l'impact sur chacune des classes. Sur les histogrammes, les couleurs foncées représentent les résultats de simulation obtenus avec les valeurs de α les plus faibles.

L'impact des variations des valeurs du paramètre α sur les valeurs de la mobilité individuelle φ au sein de chaque classe est globalement identique (Fig. 7.55 à 7.59) : plus la valeur de α augmente, plus les valeurs de φ des ménages de la classe concernée sont élevées. Ce lien est directement imputable à la construction de la variable φ qui dépend intrinsèquement de la valeur d'α.

L'impact sur les valeurs de mobilité individuelle des ménages d'une classe est d'autant plus visible que cette classe est mobile : les classes 4 et 5 (respectivement, les ménages dont la personne de référence est âgée 45 et 59 et de 60 ans et plus - fig. 7.58, 7.59 et 7.60 à 7.62) sont les moins mobiles, et la quasi totalité des ménages a une mobilité individuelle faible (inférieure à 0,2), quelle que soit la valeur du paramètre testée. L'amplitude de variation de leur mobilité intrinsèque en fonction de la modification du paramètre est très faible.

Les ménages des classes 1 et 2 (respectivement les ménages de moins de 30 ans avec et sans enfant(s)) en revanche sont beaucoup plus influencés par la valeur de α (Fig. 7.55, 7.56 et 7.60 à 7.62) : pour la classe 1 (Fig. 7.55 et 7.60 à 7.62), quelle que soit la valeur donnée au paramètre, la mobilité individuelle φ des ménages de moins de 30 ans avec enfant(s) concerne toutes les valeurs entre 0 et 1, mais le nombre de ménages pour chaque valeur de φ est différent. Les ménages ont majoritairement des valeurs de φ inférieures à 0,3 avec les faibles valeurs de α alors qu'ils ont une mobilité individuelle

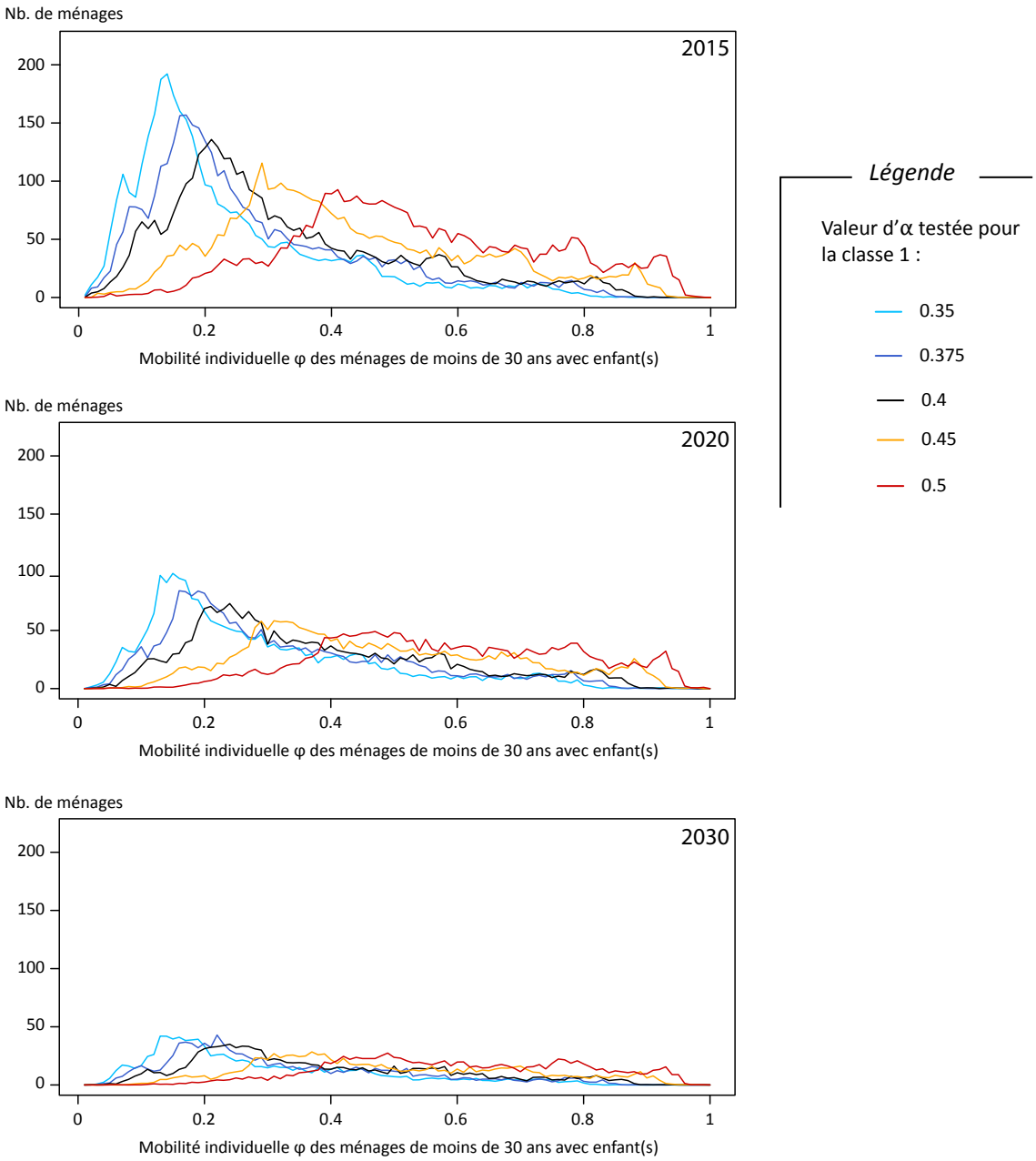


FIGURE 7.55 – Sensibilité des valeurs de φ au sein de la classe 1 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 1

globalement supérieure à 0,4 lorsque α est plus élevé. Pour les ménages de moins de 30 ans sans enfant, l'amplitude de variation entre les résultats de simulation pour les différentes valeurs données au paramètre est plus forte, notamment concernant le nombre de ménages ayant une faible mobilité individuelle (φ comprise entre 0 et 0,1) : la différence entre les valeurs minimum et maximum testées est de plus de 40% de l'effectif des ménages. C'est également le cas pour les ménages de la classe 3 (entre 30 et 44 ans - figures 7.57 et 7.60 à 7.62). Ces constats sont invariants selon la date de simulation étudiée.

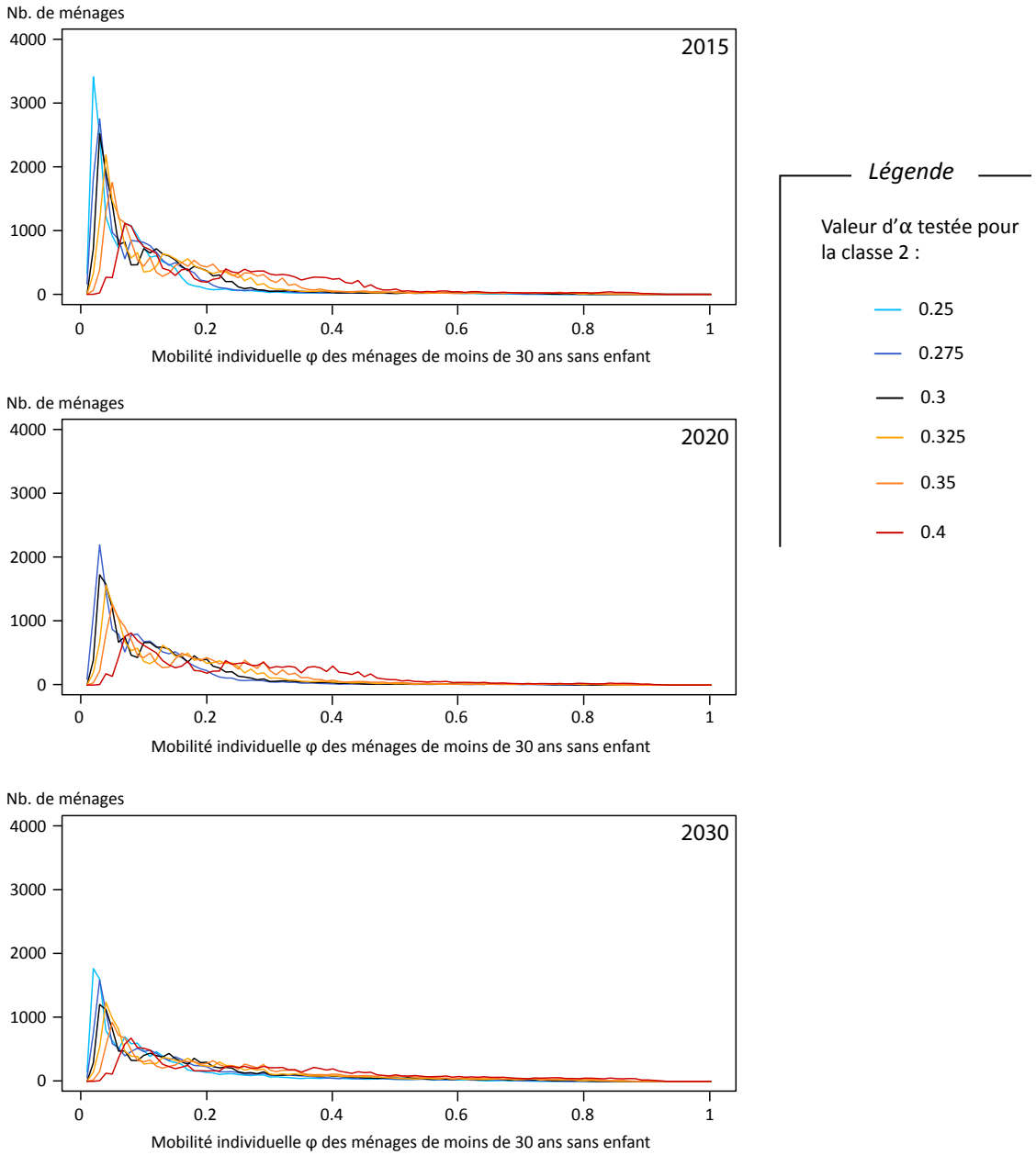


FIGURE 7.56 – Sensibilité des valeurs de φ au sein de la classe 2 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 2

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements simulés des ménages

L'hétérogénéité des comportements entre les ménages est d'autant plus forte au sein d'une classe que la mobilité individuelle des ménages de cette classe est élevée. Pour la classe 1 notamment, chaque valeur de mobilité individuelle concerne entre 30 et 10 % des ménages de cette classe.

Lorsque les ménages de moins de 30 ans sans enfant (classe 2) deviennent assez exigeants vis-à-vis de leur satisfaction résidentielle (valeur de α plus élevée), ils se

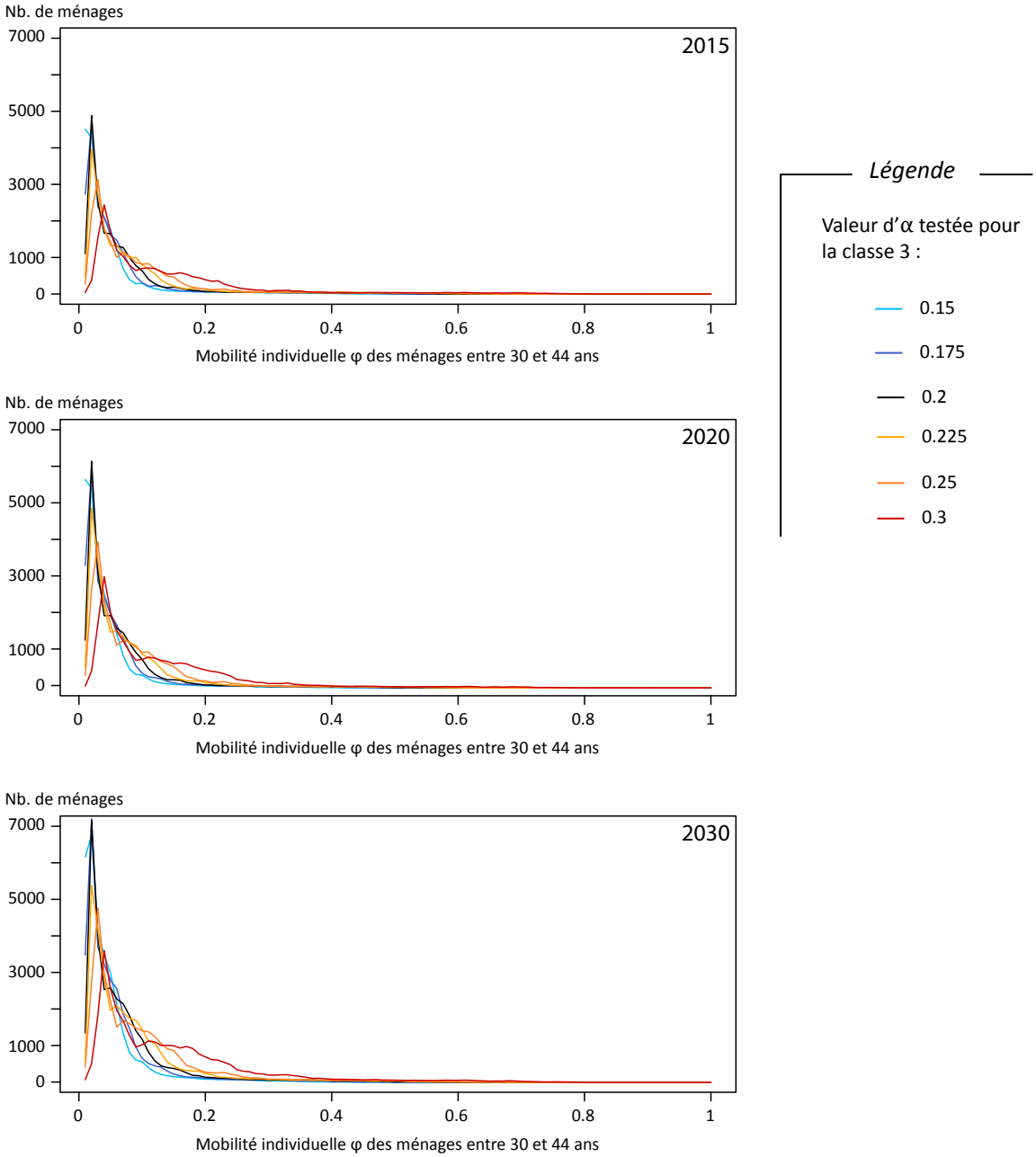


FIGURE 7.57 – Sensibilité des valeurs de φ au sein de la classe 3 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 3

différencient également dans leur comportement de mobilité individuelle φ les uns des autres.

Les ménages de plus de 45 ans (classes 4 et 5) réagissent quant à eux tous de la même manière à leur satisfaction résidentielle : elle doit être extrêmement faible pour qu'ils envisagent éventuellement de déménager (mobilité individuelle égale à 0,2).

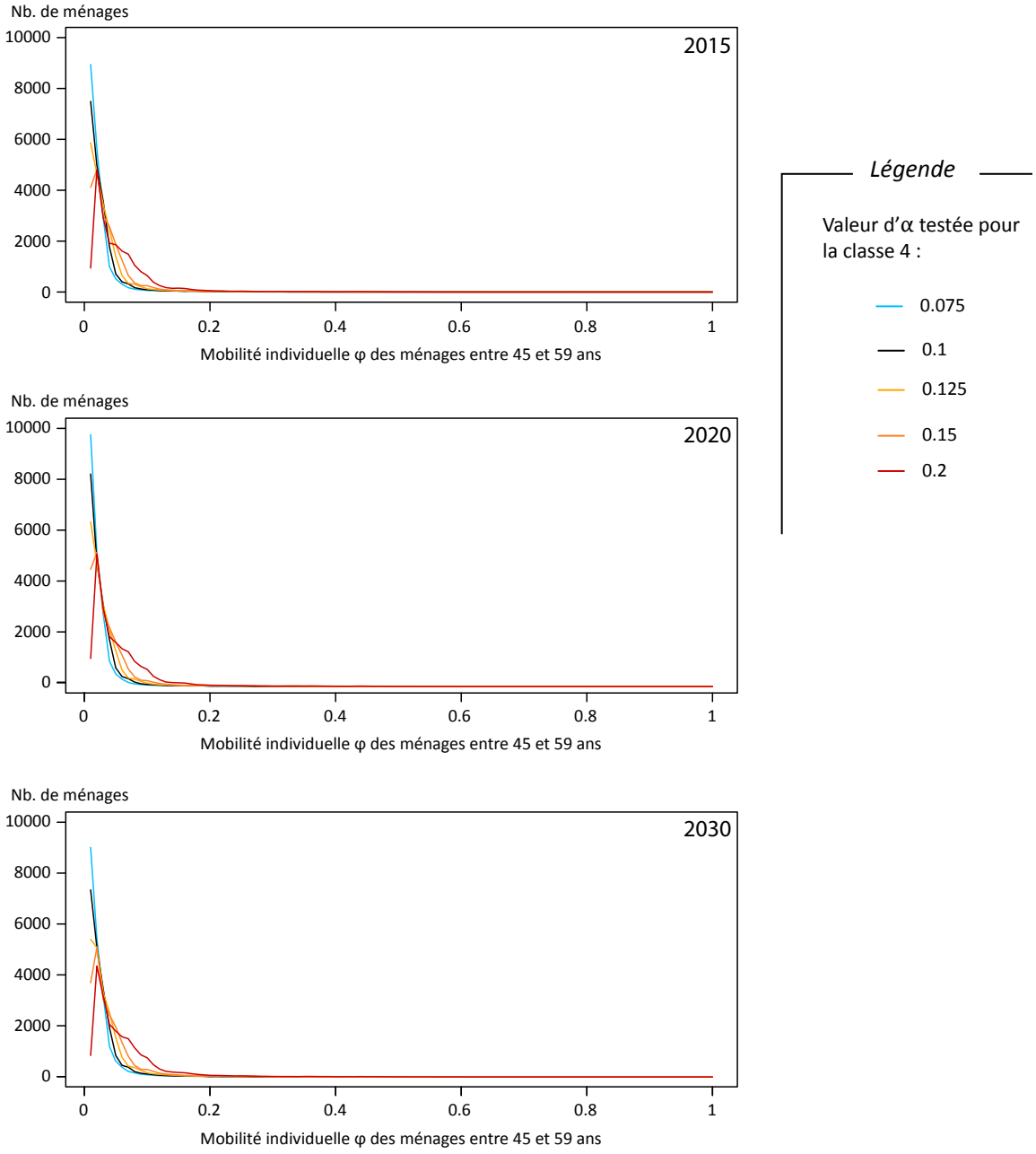


FIGURE 7.58 – Sensibilité des valeurs de φ au sein de la classe 4 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 4

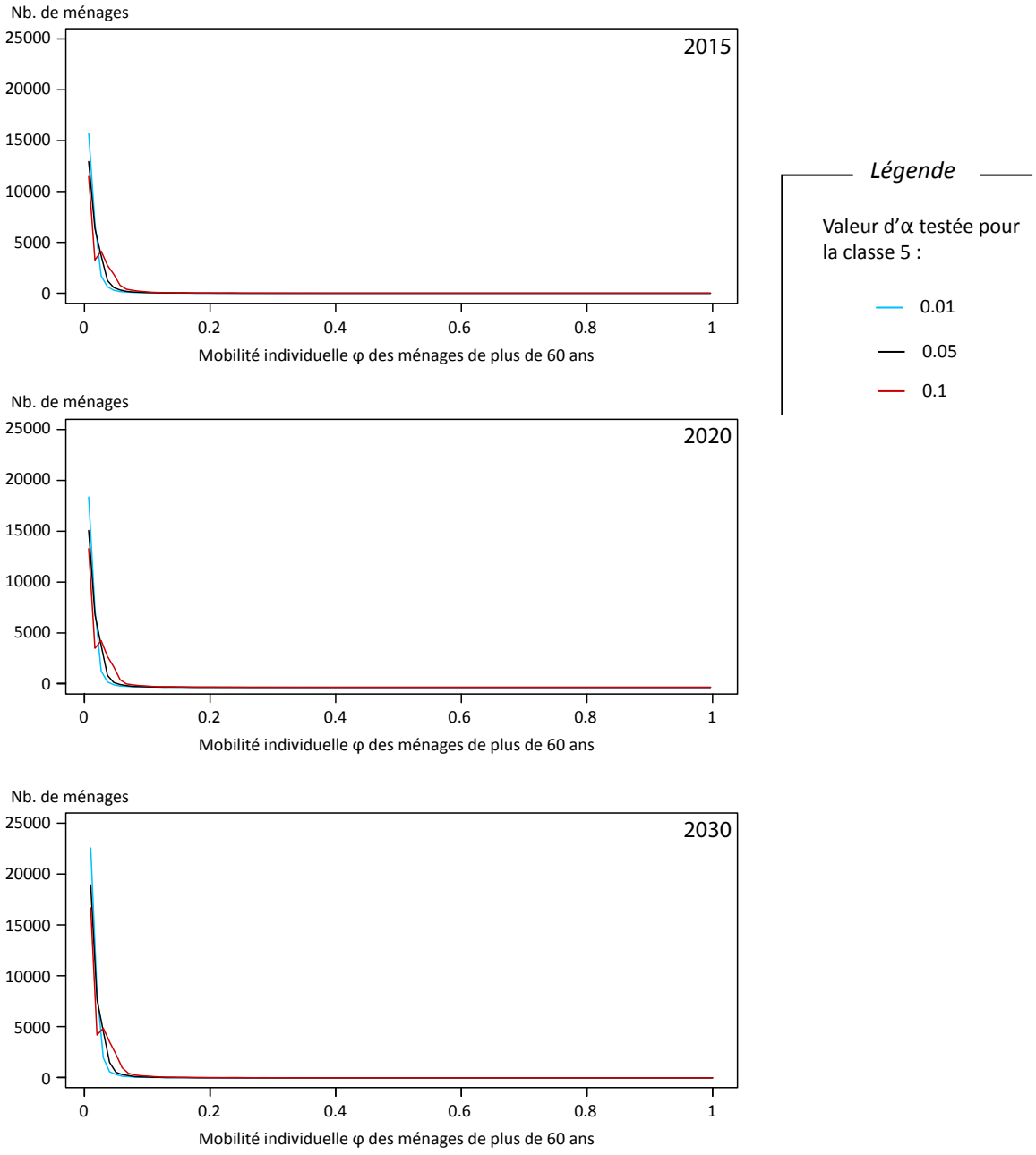


FIGURE 7.59 – Sensibilité des valeurs de φ au sein de la classe 5 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 5

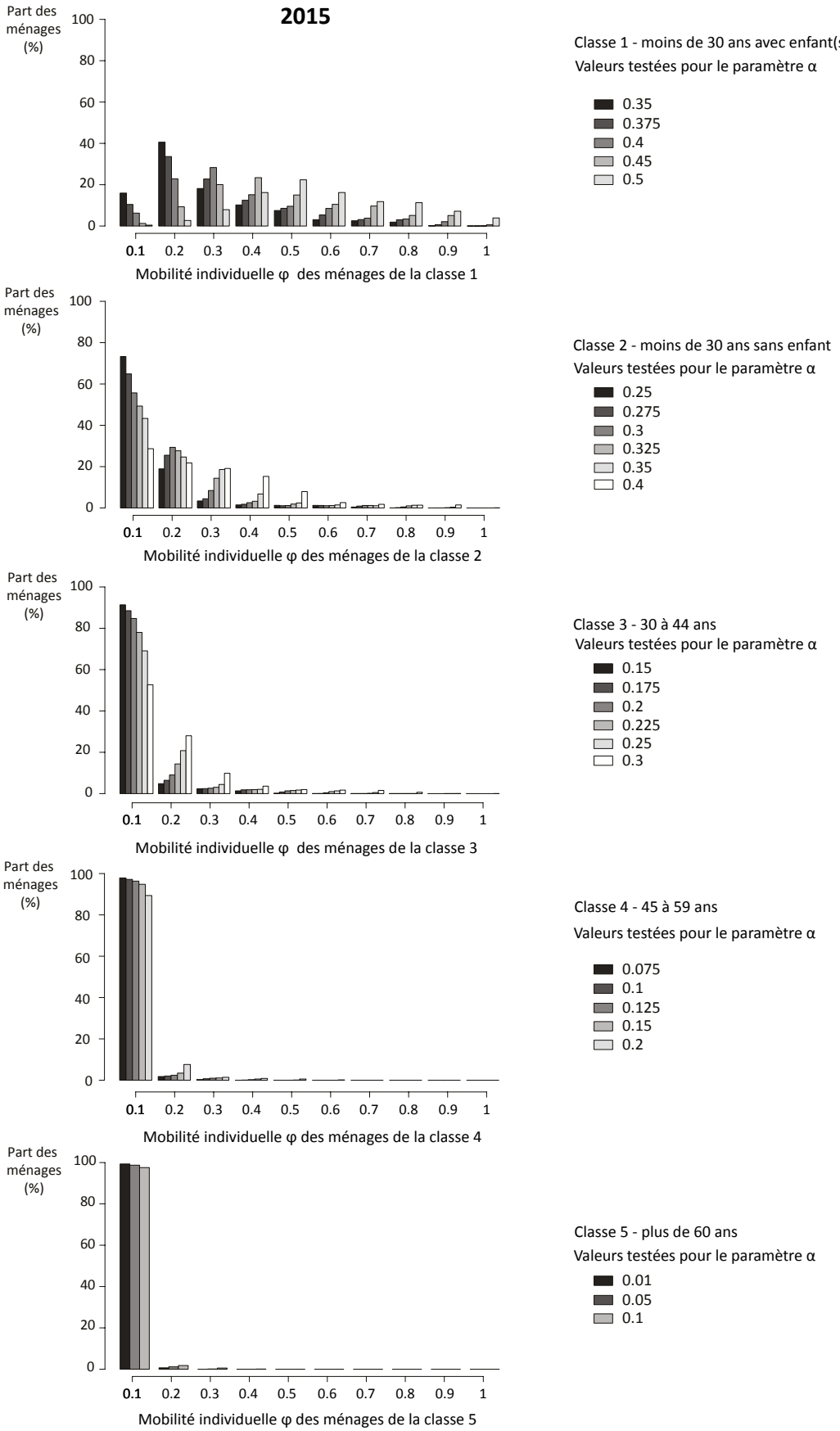


FIGURE 7.60 – Histogrammes de distribution de la part des ménages selon les valeurs de φ au sein de chaque classe de mobilité individuelle en 2015 : sensibilité à la modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de chaque classe

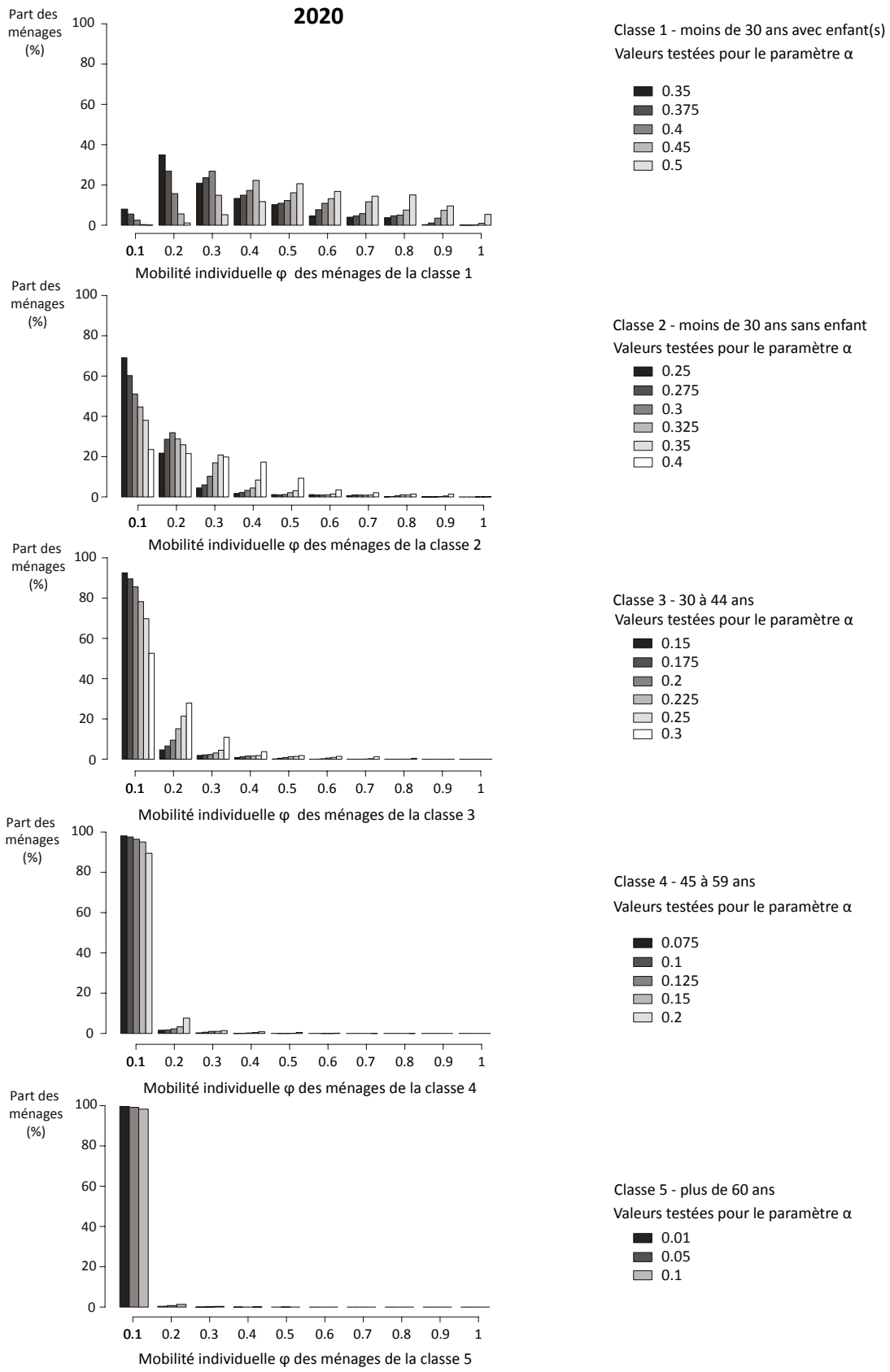


FIGURE 7.61 – Histogrammes de distribution de la part des ménages selon les valeurs de φ au sein de chaque classe de mobilité individuelle en 2020 : sensibilité à la modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de chaque classe

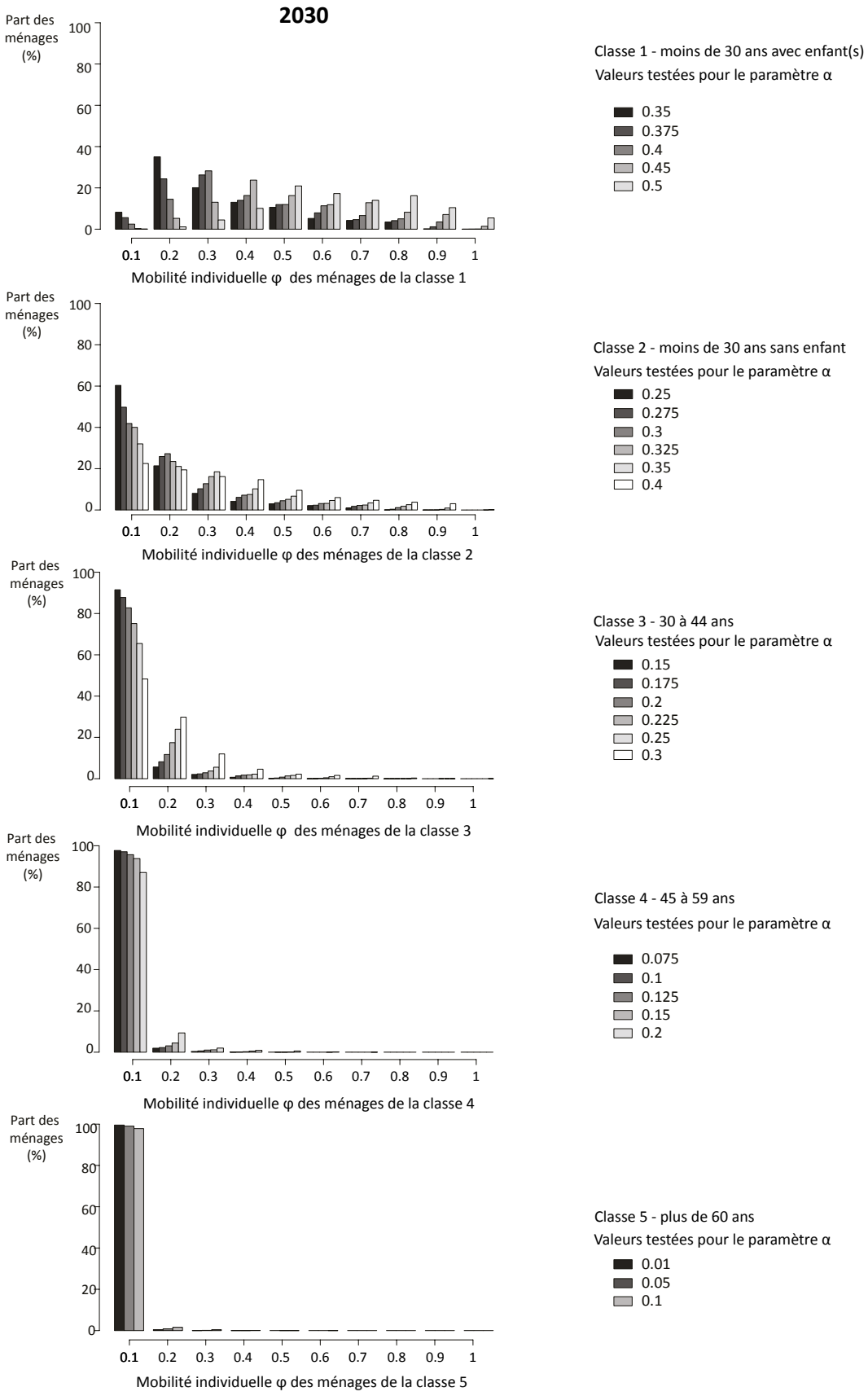


FIGURE 7.62 – Histogrammes de distribution de la part des ménages selon les valeurs de φ au sein de chaque classe de mobilité individuelle en 2030 : sensibilité à la modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de chaque classe

7.5.2 Impact local sur la probabilité de déménager Ω intra-classe

a) Amplitude des variations de Ω intra-classe à la modification du paramètre α de chacune des classes de mobilité individuelle

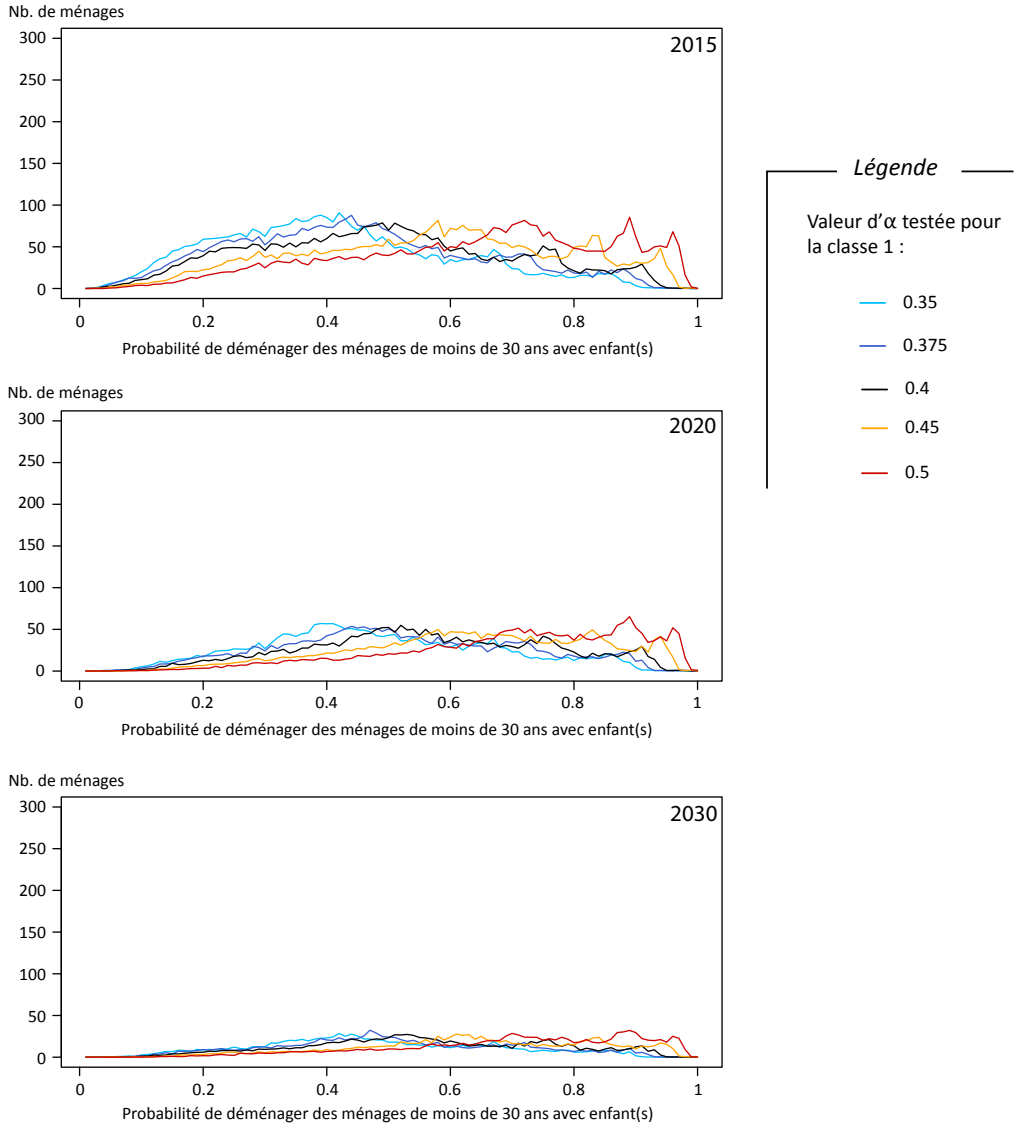


FIGURE 7.63 – Sensibilité des valeurs de Ω au sein de la classe 1 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 1

Les résultats des figures 7.63 à 7.67 présentent la distribution des valeurs de probabilité de déménager Ω pour les ménages appartenant à chacune des classes de mobilité individuelle en fonction de la modification apportée à la valeur du paramètre α de la classe concernée. On peut constater que les distributions des valeurs d'Ω de chacune des classes suit grossièrement les tendances observées auparavant pour les distributions

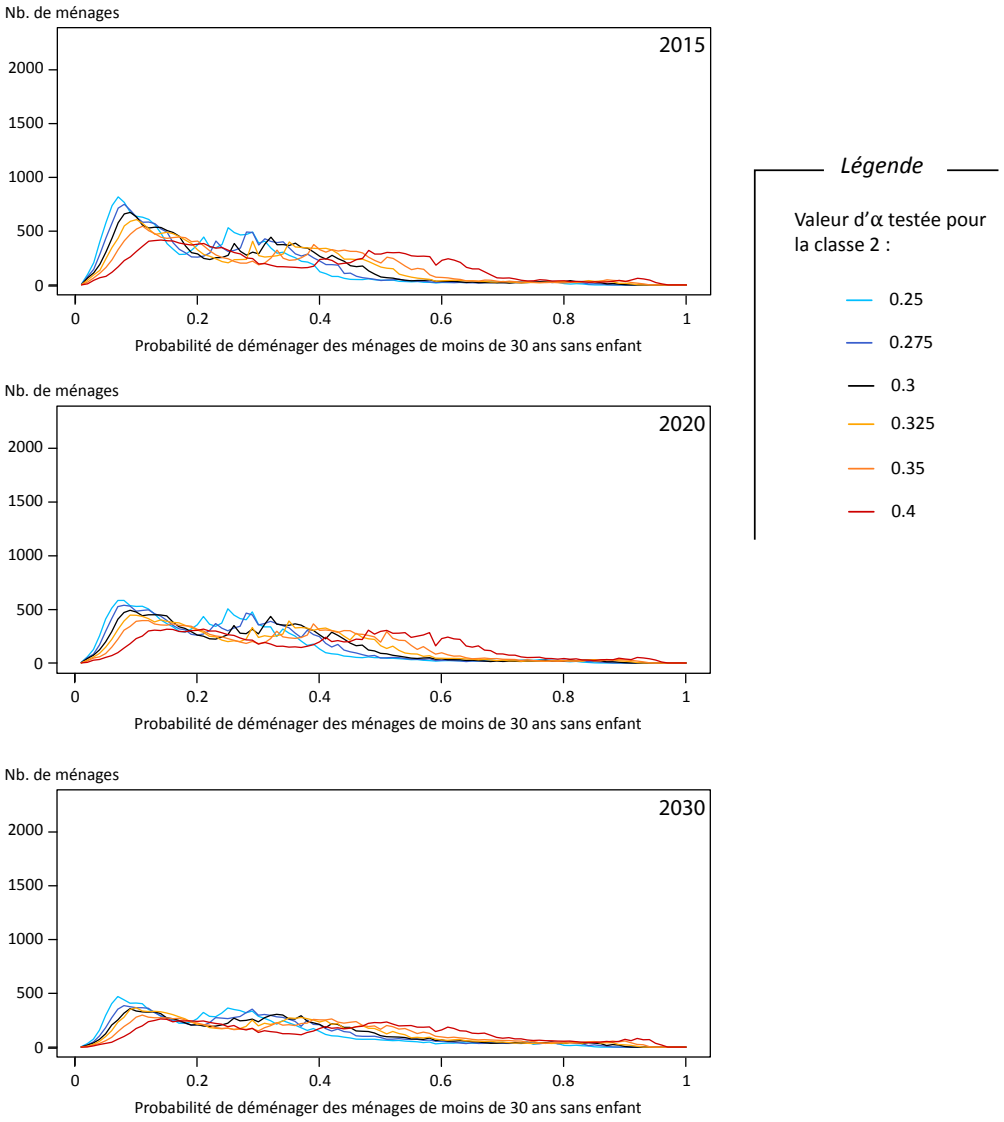


FIGURE 7.64 – Sensibilité des valeurs de Ω au sein de la classe 2 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 2

des valeurs de φ. D'une manière générale une fois encore, les valeurs d'Ω des ménages augmentent avec la valeur d'α : lorsqu'ils sont moins exigeants vis-à-vis de leur satisfaction résidentielle, la mobilité individuelle des ménages de chaque classe augmente tout comme leur probabilité de déménager.

Pour les ménages de moins de 30 ans avec enfant(s) (Classe 1 - figure 7.63), quelle que soit la valeur donnée au paramètre α, la distribution des valeurs de probabilité de déménager concerne toutes les valeurs entre 0 et 1 de manière plutôt équivalente. Cela signifie que globalement, le nombre de ménages concerné par chaque valeur de Ω est le même bien que davantage de ménages bénéficient d'une probabilité de déménager maximale lorsque la valeur d'α vaut 0,5.

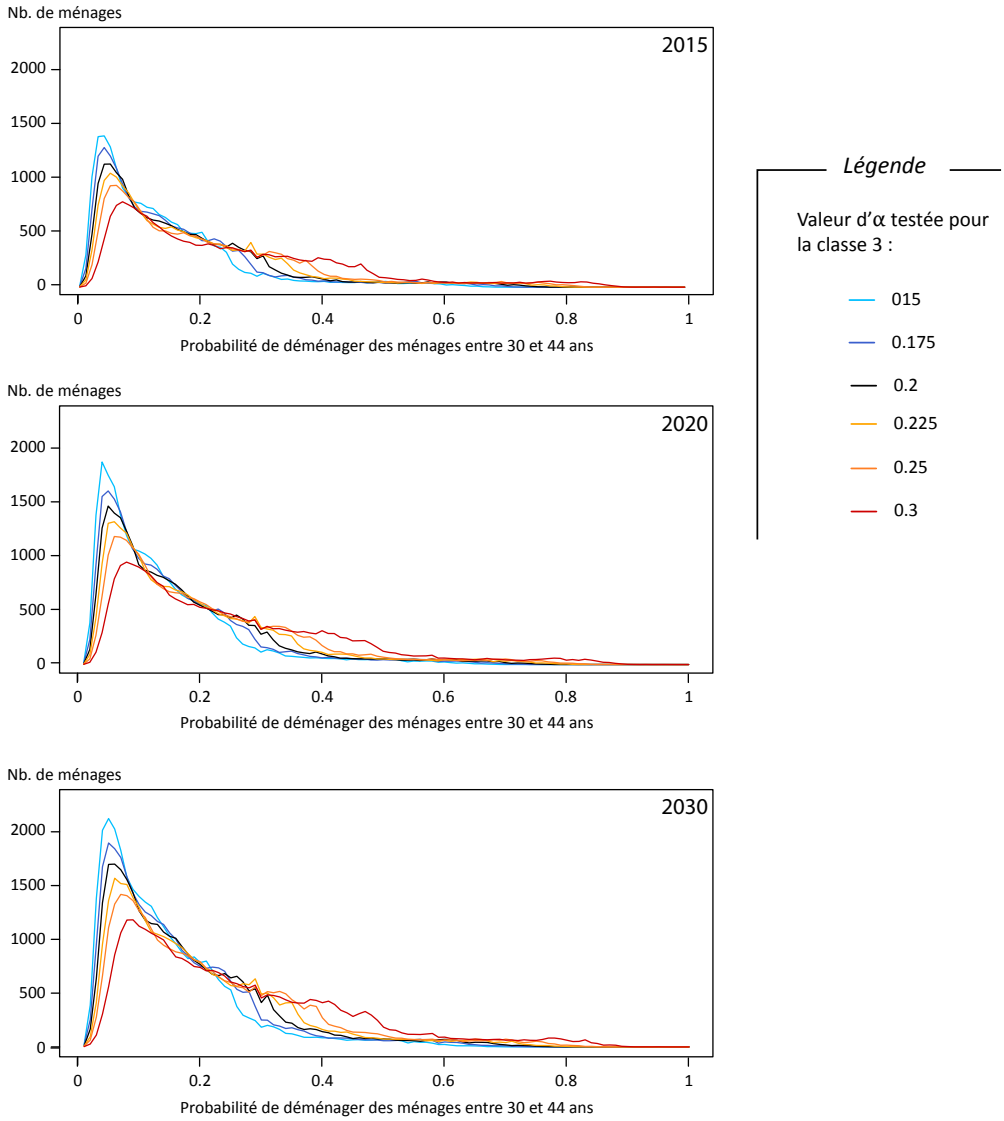


FIGURE 7.65 – Sensibilité des valeurs de Ω au sein de la classe 3 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 3

Sur l'ensemble des valeurs testées pour la classe 2 (ménages de moins de 30 sans enfant - figure 7.64), peu de ménages bénéficient d'une probabilité de déménager supérieure à 0,6, et ils sont une majorité pour lesquels Ω est inférieure à 0,3. Lorsqu'ils sont plus tolérants vis-à-vis des désagréments résidentiels qui peuvent diminuer leur satisfaction ($\alpha = 0,25$), ils sont environ 700 de plus à avoir une probabilité de déménager égale à 0,1 en 2015 que dans le cas contraire ($\alpha = 0,4$).

Les tendances sont d'autant plus prononcées que les valeurs de α diminuent : les ménages entre 30 et 44 ans (classe 3 - figure 7.65) ont globalement une probabilité de déménager comprise entre 0,05 et 0,3, et presqu'aucun des ménages de cette classe n'a une probabilité de déménager supérieure à 0,6. Ils deviennent de plus en plus nombreux

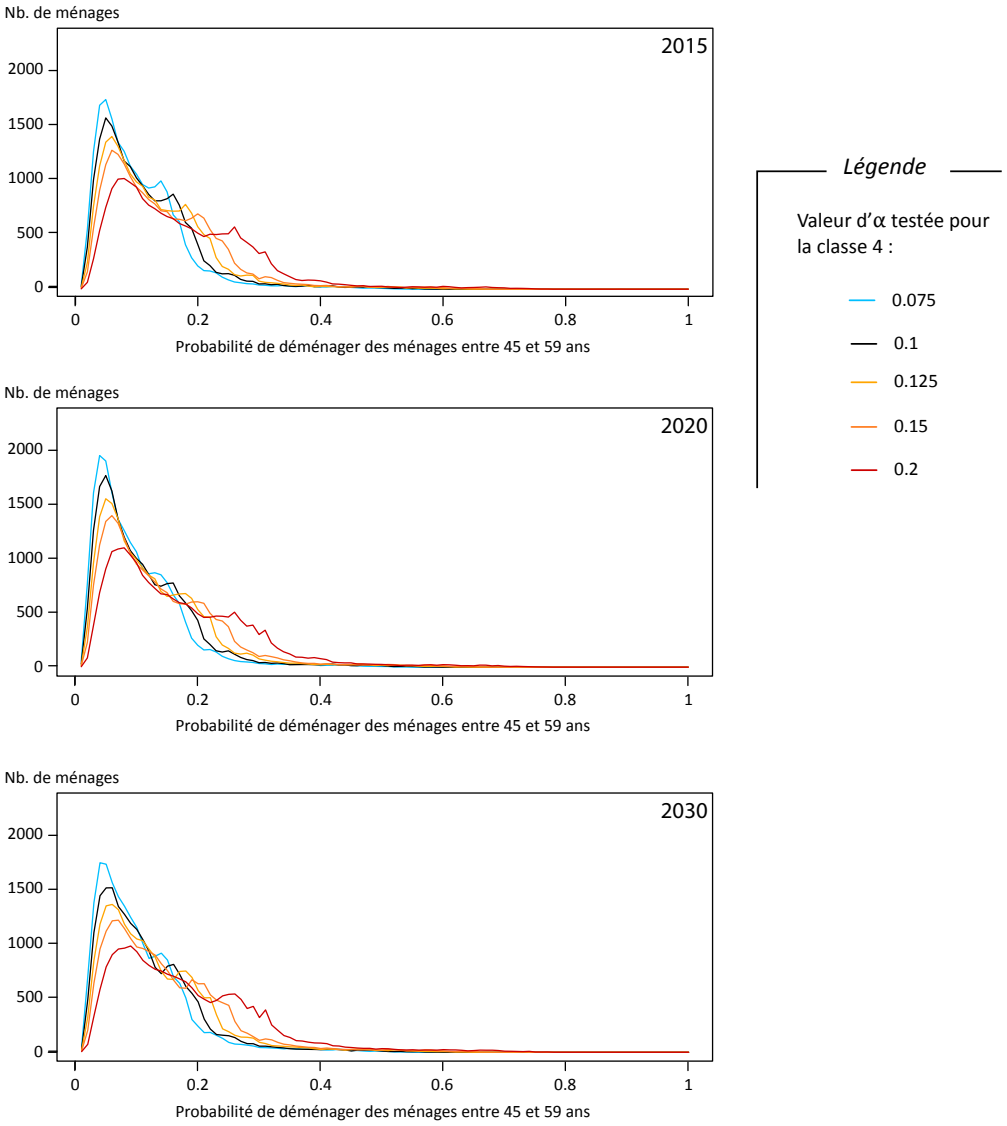


FIGURE 7.66 – Sensibilité des valeurs de Ω au sein de la classe 4 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 4

à bénéficier d'une valeur de Ω proche de 0,1 à mesure que l'intolérance à l'insatisfaction résidentielle augmente (courbes bleues sur la figure).

Les ménages entre 45 et 59 ans (classe 4 - figure 7.66) ont une probabilité de déménager maximale de 0,4, et ils sont une grande majorité pour lesquels cette valeur est inférieure à 0,1 ; cette tendance est d'autant plus accentuée que la valeur d'α diminue.

Les ménages de plus de 60 ans sont les moins mobiles et leur probabilité de déménager est comprise entre 0,05 et 0,2 (Fig. 7.66) pour la majorité d'entre eux. Malgré le très petit intervalle de valeurs de probabilité de déménager de ces ménages, la différence entre les trois valeurs données à α est visible : 1000 ménages de plus sont concernés

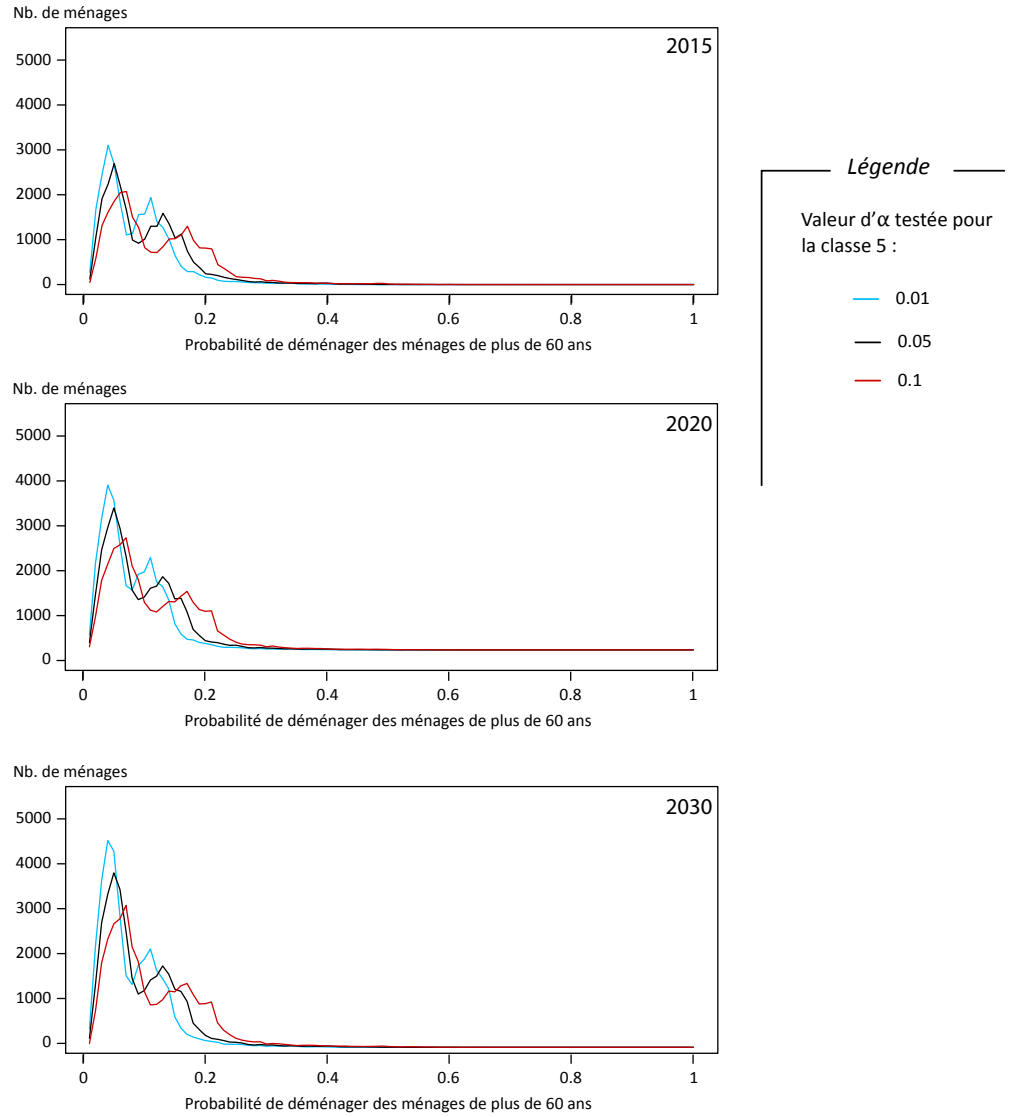


FIGURE 7.67 – Sensibilité des valeurs de Ω au sein de la classe 5 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 5

par une probabilité de déménager de 0,1 lorsque la satisfaction résidentielle nécessaire pour avoir une mobilité individuelle de 0,5 diminue seulement de 0,1 (différentiel entre la courbe bleue et la courbe rouge sur la figure 7.67).

Globalement, la probabilité de déménager Ω au sein de chaque classe est assez sensible à la modification du paramètre. De plus, l'impact de la modification de la valeur des différents α est plutôt linéaire sur les valeurs de probabilité de Ω : les courbes de distributions sont transposées vers les valeurs plus fortes de Ω, mais présentent la même structure.

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements simulés des ménages

Modifier la valeur d'α permet de faire varier le comportement des ménages entre eux au sein de chaque classe de ménage. Au même titre que les résultats précédents, c'est en rendant les ménages plus exigeants vis-à-vis de leur satisfaction résidentielle (i.e. en augmentant les valeurs du paramètre α pour chaque classe de mobilité individuelle) qu'ils se diversifient le plus les uns des autres dans leur probabilité de déménager.

7.5.3 Impact de la modification du paramètre α de chaque classe de mobilité individuelle sur le taux annuel de migration intra-classe

La linéarité du lien entre les valeurs du paramètre α, de la mobilité individuelle φ et de la probabilité de déménager Ω se poursuit sur les valeurs du taux annuel de migration. Dans le modèle, la probabilité de déménager d'un type de ménage conditionne directement son taux de migration, et les résultats de la figure 7.68 abondent dans ce sens. Plus la valeur d'α augmente pour une classe, plus les ménages de cette classe déménagent, et ce, de manière assez sensible : les valeurs de taux de migration enregistrées au sein de chaque classe augmente assez rapidement avec les valeurs de α (Fig. 7.68 et tabl. 7.10).

D'après le tableau 7.10, on peut constater que le classement des cinq classes selon le taux de migration intra-classe en 2015 se maintient avec la modification des valeurs du paramètre α de chaque classe, toutes choses égales par ailleurs : quelles que soient les modifications apportées aux valeurs d'α pour la classe 1, les ménages de moins de 30 ans avec enfant(s) sont les plus mobiles dans les simulations ; quelles que soient les valeurs d'α pour la classe 2, les ménages de moins de 30 ans sans enfant sont les deuxièmes plus mobiles et ainsi de suite. Les écarts entre les valeurs de taux de migrations intra-classes sont suffisamment importants pour que les modifications des valeurs de α n'impactent pas le classement général.

Deux valeurs d'α font cependant figure d'exception pour les classes 3 (ménages de 30 à 44 ans) et 5 (ménages de plus de 60 ans). Pour ces deux classes, lorsque la valeur d'α testée est équivalente à la valeur par défaut de la classe supérieure (0,3 dans le cas de la classe 2 et 0,1 pour la classe 4), le taux de migration intra-classe devient supérieur à celui de cette dernière, ce qui modifie le classement général.

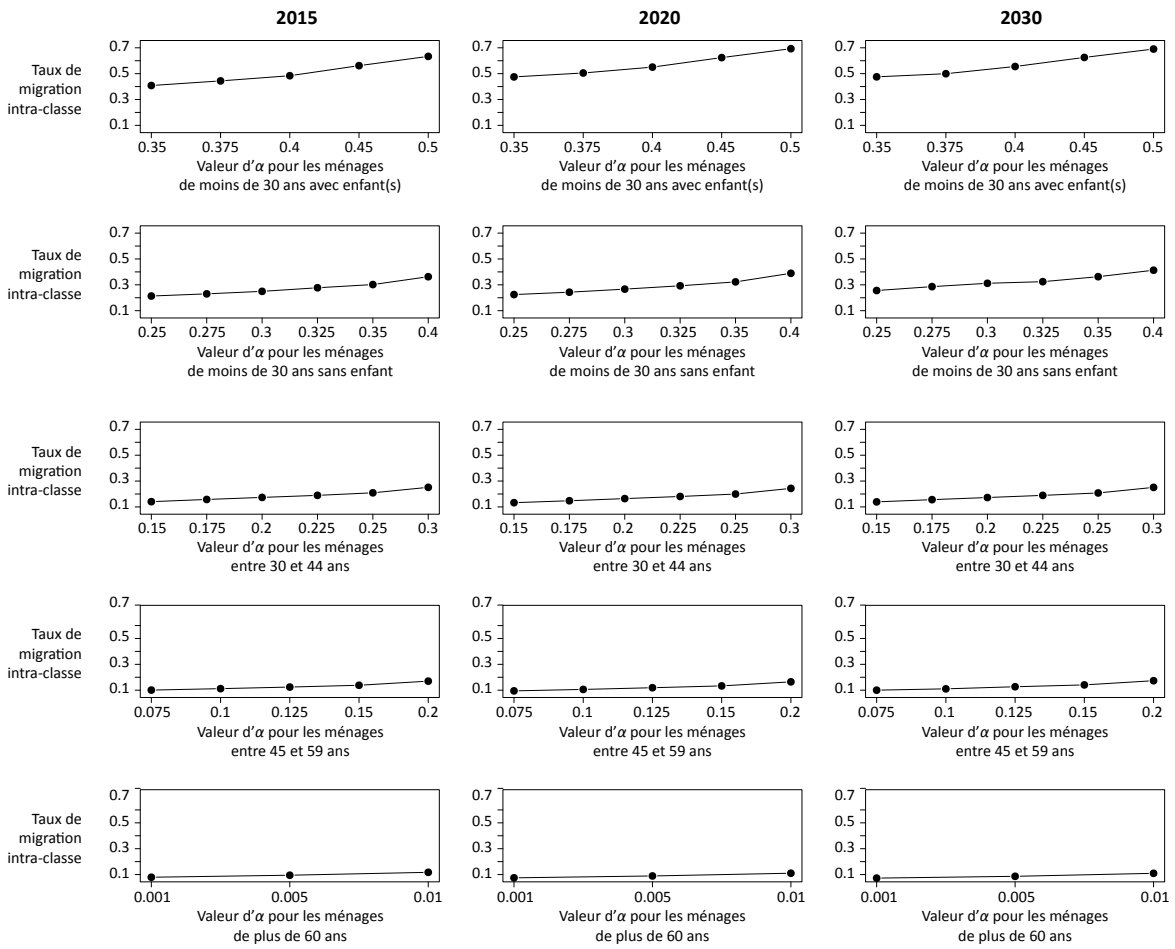


FIGURE 7.68 – Sensibilité des taux de migration intra-classes à la modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de chacune des classes

Attribuer une même valeur d'α à deux classes implique que la différence de mobilité individuelle entre les ménages de ces deux classes dépend uniquement de leur valeur de satisfaction résidentielle. De plus, en augmentant α, à satisfactions résidentielles égales, les ménages envisageront plus facilement de déménager. Ainsi, le résultat précédemment énoncé signifie que la satisfaction résidentielle moyenne des ménages de 30 à 44 ans (classe 3) est globalement plus élevée que celle des ménages de moins de 30 ans sans enfant (classe 2) d'une part, et qu'elle est également plus élevée pour les ménages de plus de 60 ans (classe 5) que pour les ménages entre 45 et 59 ans (classe 4) d'autre part.

TABLEAU 7.10 – Sensibilité du classement des cinq classes de ménages selon leur taux de migration pour chaque valeur de α testée

2015	Valeur testée pour le paramètre α	Taux de migration intra-classe	Taux de migration intra-classe obtenu avec les valeurs par défaut du paramètre alpha					Classement des types de ménage par taux de migration
			Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	
Classe 1 moins de 30 ans avec enfant(s)	0.35	40,8%	*48,4%*	*25,0%*	*17,4%*	*11,2%*	*9,5%*	1
	0.375	44,4%						1
	0.4	**48,4%**						1
	0.45	56,2%						1
	0.5	63,4%						1
Classe 2 moins de 30 ans sans enfant	0.25	21,3%						2
	0.275	23,0%						2
	0.3	**25,0%**						2
	0.325	27,7%						2
	0.35	30,2%						2
	0.4	36,3%						2
Classe 3 entre 30 et 44 ans	0.15	14,1%						3
	0.175	15,8%						3
	0.2	**17,4%**						3
	0.225	18,9%						3
	0.25	20,9%						3
	0.3	25,1%						**2**
Classe 4 entre 45 et 59 ans	0.075	10,1%						4
	0.1	**11,2%**						4
	0.125	12,4%						4
	0.15	13,8%						4
	0.2	17,0%						4
Classe 5 plus de 60 ans	0.01	7,9%						5
	0.05	**9,5%**						5
	0.1	11,7%						**4**

7.5.4 Impact global sur la mobilité individuelle φ

a) Amplitude des variations de φ à la modification du paramètre α

L'impact observé sur les valeurs de mobilité individuelle φ de chacune des classes ne paraît pas être répercuté sur la distribution des valeurs de φ de tous les ménages confondus.

Globalement, comme on peut le voir sur les figures 7.69 à 7.71, la modification des valeurs du paramètre α de chacune des classes de mobilité individuelle, indépendamment les unes des autres, n'a que peu d'impact sur la distribution des valeurs de φ de l'ensemble des ménages. Les valeurs de φ sont globalement très faibles (majoritairement inférieures à 0,1), et le nombre de ménages concernés par chaque valeur de mobilité individuelle est globalement le même selon les modifications des valeurs du paramètre.

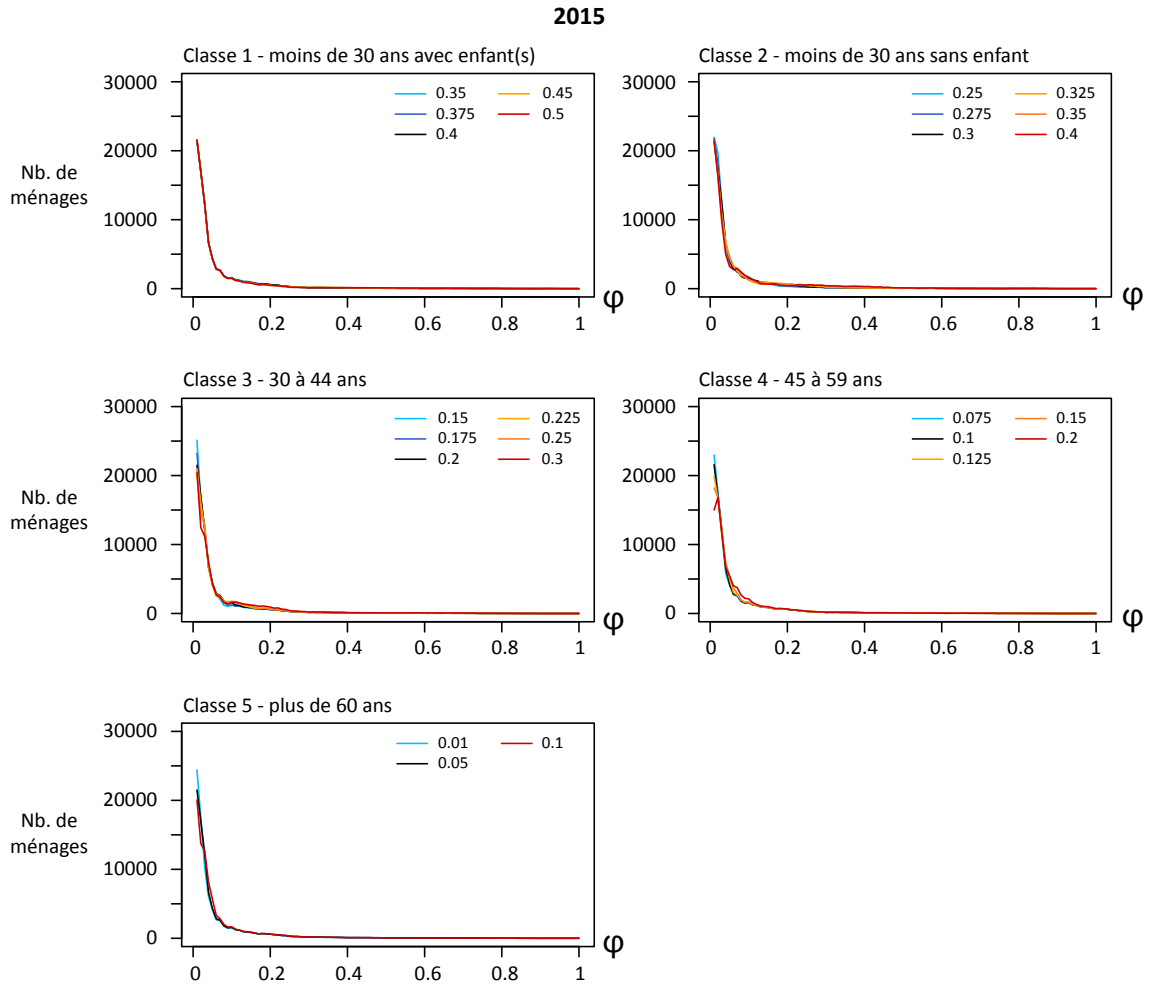


FIGURE 7.69 – Sensibilité des valeurs de mobilité individuelle φ pour tous les ménages en 2015 : modifications de la valeur de α

Pour avoir un certain impact sur l'ensemble des valeurs de mobilité individuelle φ, la modification de α doit concerner une classe dont le nombre de ménages est suffisamment important pour que le changement de comportement de ces ménages se ressente à une échelle plus globale. Sans surprise, étant donné leurs très faibles effectifs, le changement d'exigence vis-à-vis de leur satisfaction résidentielle des ménages de moins de 30 ans, tous confondus, n'a pas d'effet sur la mobilité individuelle globale. Par contre, lorsque les ménages entre 30 et 59 ans (classes 3 et 4) modifient leur manière de considérer le déménagement compte tenu de leur satisfaction résidentielle, on observe de légères variations dans le nombre de ménages concernés par les valeurs de φ proches de zéro. Une analyse plus précise sur l'impact des modifications du paramètre sur les valeurs de mobilité individuelle comprises entre 0 et 0,1 permettrait d'enrichir ces conclusions.

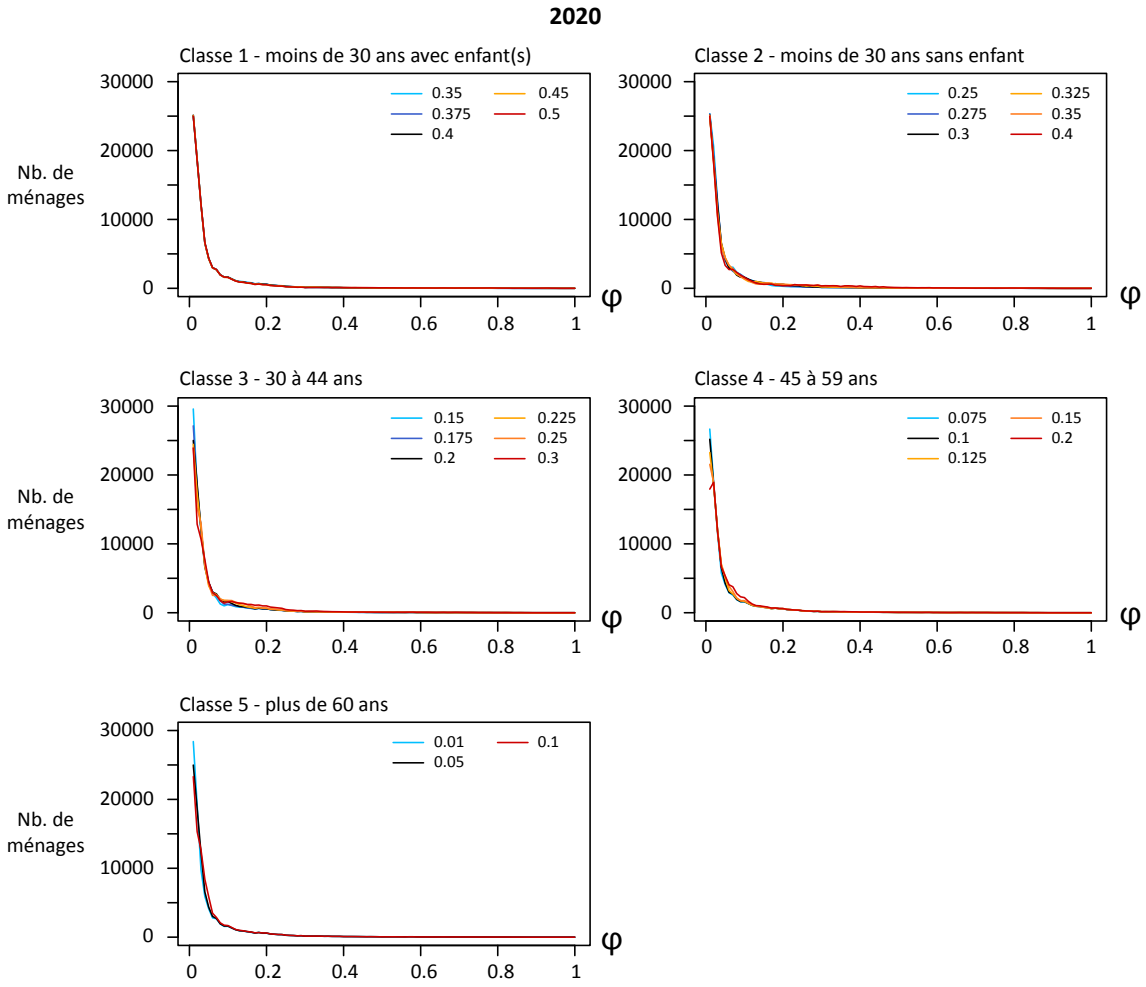


FIGURE 7.70 – Sensibilité des valeurs de mobilité individuelle φ pour tous les ménages en 2020 : modifications de la valeur de α

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements simulés des ménages

À partir des résultats présentés sur les figures 7.69 à 7.71, il n'est pas possible de juger dans quelle mesure la modification du paramètre α amène de l'hétérogénéité dans les comportements des ménages simulés. Nous devons recentrer l'analyse des résultats de simulation de cette variable pour pouvoir mieux comprendre la sensibilité dont elle peut faire preuve.

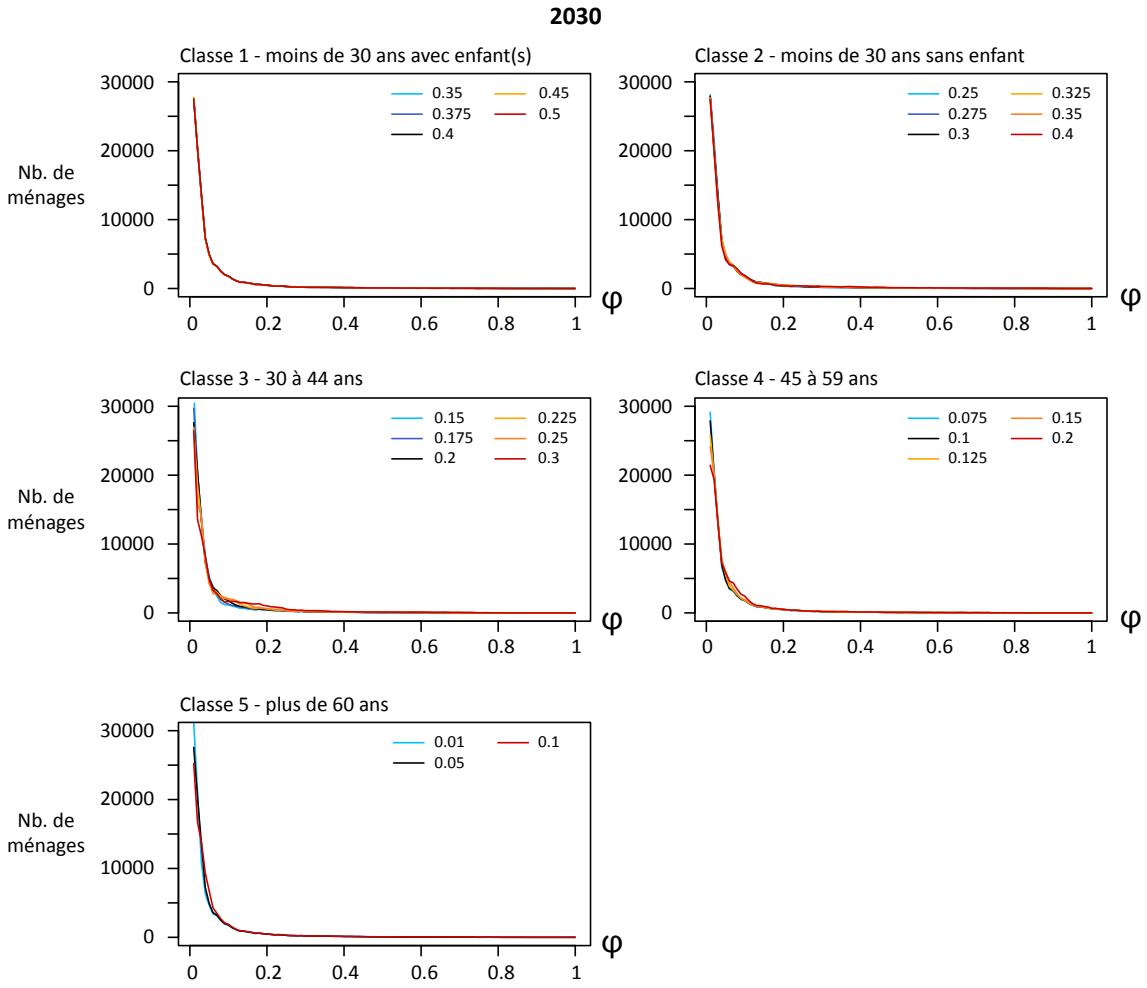


FIGURE 7.71 – Sensibilité des valeurs de mobilité individuelle φ de tous les ménages en 2030 : modifications de la valeur de α

7.5.5 Impact global sur la probabilité de déménager Ω

a) Amplitude des variations de Ω à la modification du paramètre α

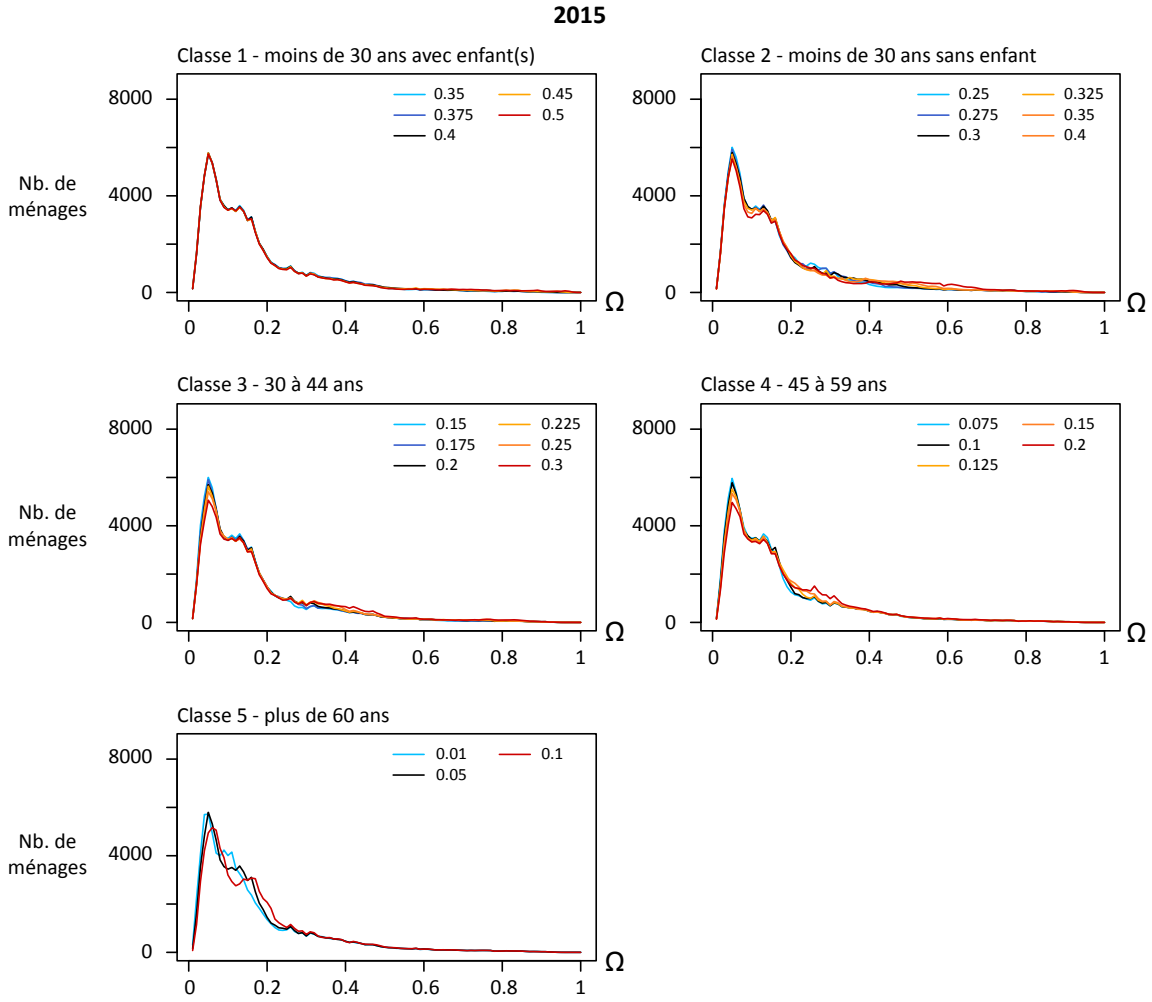


FIGURE 7.72 – Sensibilité des valeurs de probabilité de déménager Ω de tous les ménages en 2015 : modifications de la valeur de α

Sur les figures 7.72 à 7.74, on distingue systématiquement une légère augmentation des valeurs d'Ω avec l'augmentation des valeurs d'α, et ce pour chaque classe analysée. Hormis les ménages de la classe 1 (dont les effectifs sont sans doute trop faibles pour qu'un changement de comportement n'ait d'effet sur l'ensemble de la population), en modifiant les uns après les autres leur attitude vis-à-vis leur satisfaction résidentielle, les ménages de chaque classe influencent les valeurs de probabilité de déménager à l'échelle de l'agglomération. Une fois encore, ceci est particulièrement visible pour les classes 3, 4 et 5, c'est à dire pour les ménages de plus de 30 ans (soit une grande majorité de la population).

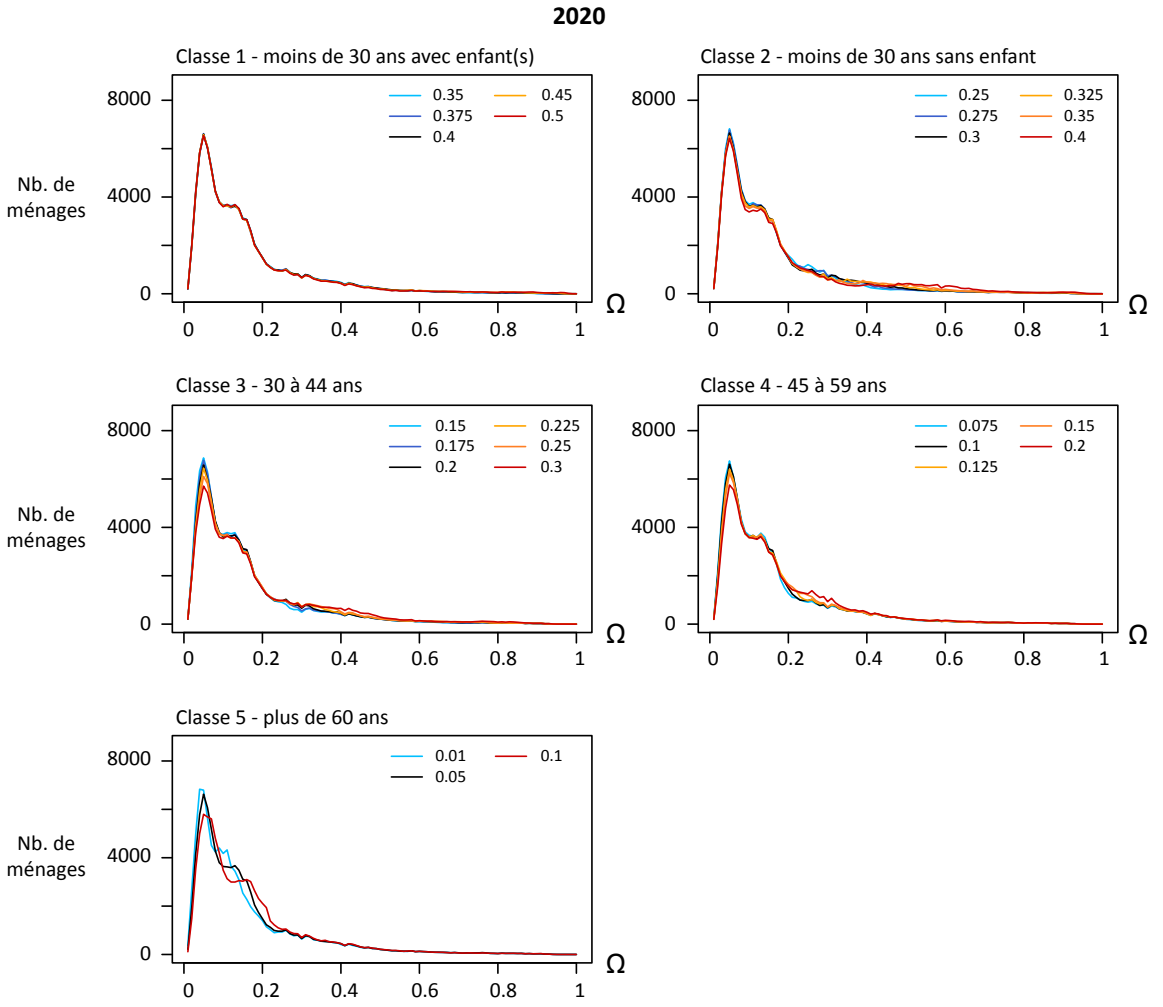


FIGURE 7.73 – Sensibilité des valeurs de probabilité de déménager Ω de tous les ménages en 2020 : modifications de la valeur de α

Ces résultats nous permettent de revenir sur les résultats observés précédemment pour les valeurs de φ (Fig. 7.69 à 7.71) et de supposer que la non-sensibilité observée alors existe bien, mais sur un intervalle de valeurs plus fin, dont on ne peut pas étudier les variations à cette échelle d'observation.

La sensibilité de ces résultats de simulation pour cette variable Ω, très générale, n'est pas affirmée mais elle est suffisamment visible pour considérer que la probabilité de déménager Ω est sensible aux changements de comportements des certain ménages seulement (i.e. un seul type de ménages à la fois).

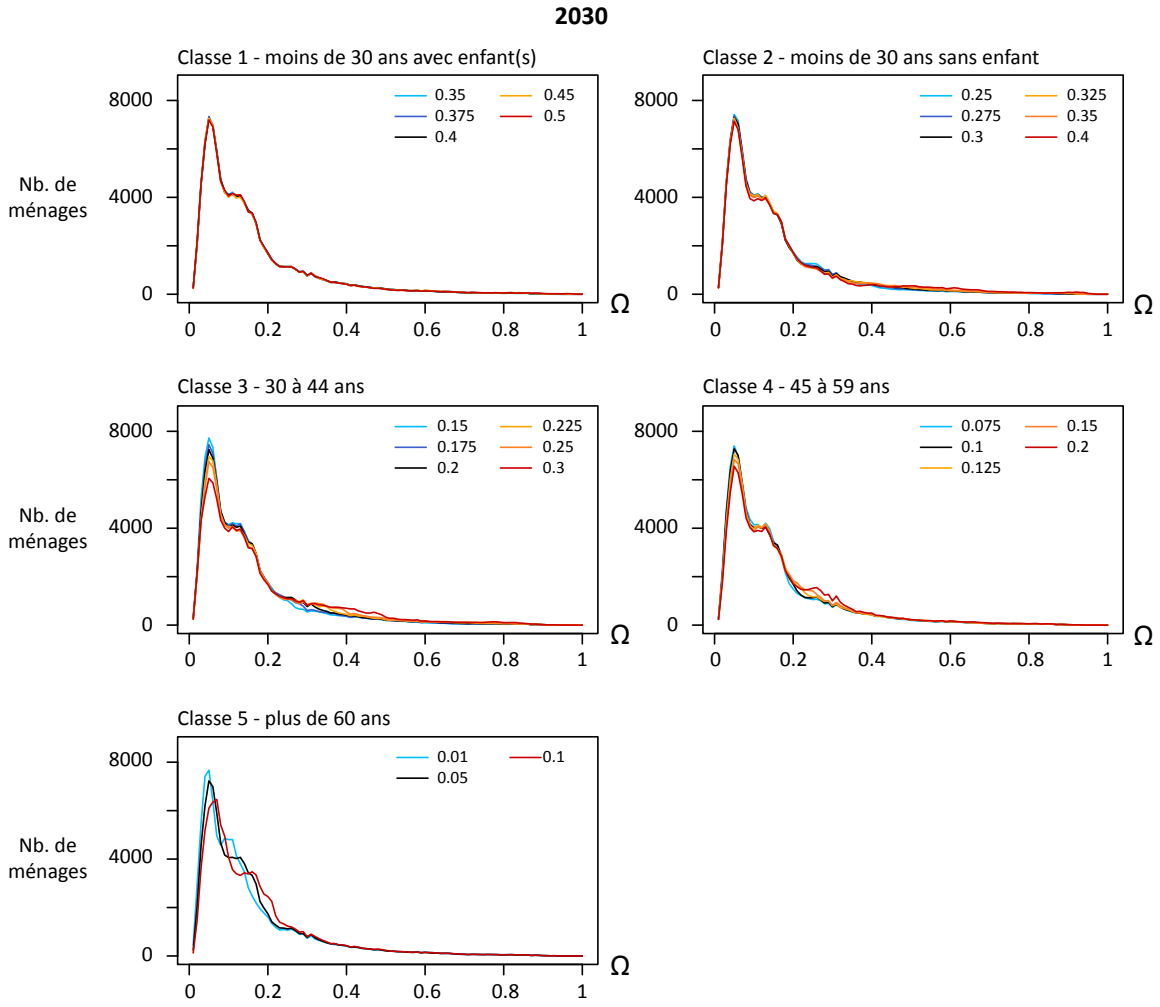


FIGURE 7.74 – Sensibilité des valeurs de probabilité de déménager Ω de tous les ménages en 2030 : modifications de la valeur de α

b) Variations dans l'hétérogénéité des comportements simulés des ménages

Quelle que soit la valeur donnée au paramètre α, toutes classes confondus, les valeurs de probabilité de déménager sont majoritairement comprises entre 0 et 0,3, sans grande variation au sein de cet intervalle : hormis le nombre de ménages concernés par une valeur de Ω avoisinant 0,1, on n'observe sur les figures 7.72 à 7.74 aucune grande diversification du comportement des ménages simulés. Une fois encore, focaliser sur cet intervalle de valeurs permettrait de capter cette hétérogénéité potentielle, si elle existe.

7.5.6 Impact de la modification du paramètre α de chaque classe de mobilité individuelle sur le taux annuel de migration

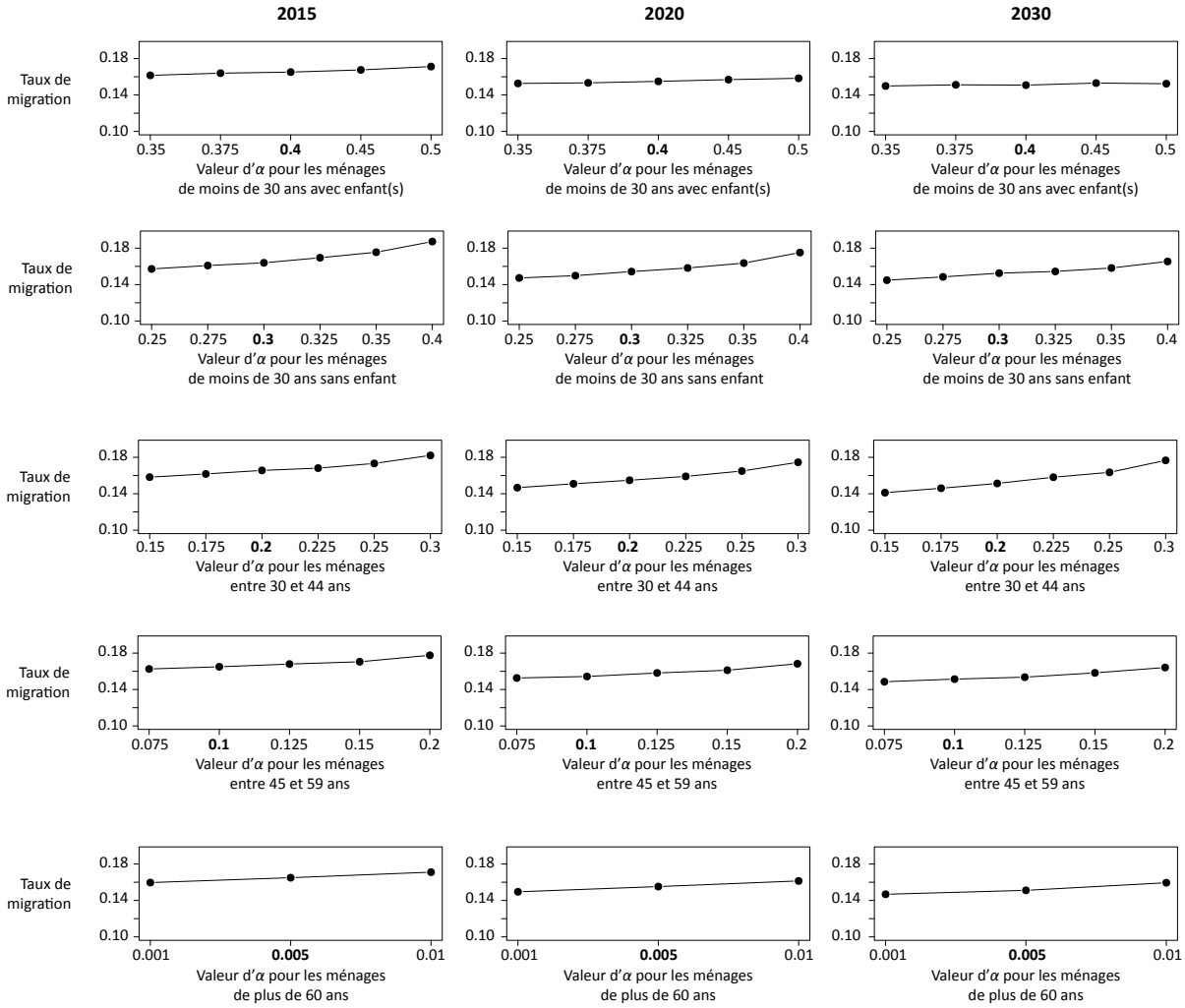


FIGURE 7.75 – Sensibilité du taux de migration moyen selon α

L'analyse des variations du taux annuel de migration sur l'ensemble de l'agglomération renforce les constats effectués précédemment : les valeurs du taux de migration varient selon la classe concernée par la modification du paramètre α, et ce en fonction de l'effectif de ménages au sein de chaque classe (Fig. 7.75). En effet, les valeurs d'α permettent de maîtriser la mobilité individuelle de chaque type de ménages, et nous l'avons vu, l'impact sur les probabilités de déménager à l'échelle globale est avéré. Si une classe de ménages est moins mobile, l'impact de sa moindre mobilité sur le taux de migration général sera proportionnel au nombre de ménages qu'elle représente. Ainsi, nous pouvons constater que l'impact du fort taux de migration observé pour les ménages jeunes avec enfant(s) (classe 1) diminue avec le temps, du fait de la nette baisse

d'effectif de ce type de ménages au cours des simulations (cf. section 6.2.2, figure 6.9).

Globalement, le taux de migration moyen sur l'agglomération augmente lorsque les ménages de chaque classe modifient leur attitude dans la manière d'envisager un déménager compte tenu de leur satisfaction résidentielle. Cette sensibilité est la même pour les trois dates considérées.

7.5.7 Bilan de l'analyse de sensibilité du modèle à la variation du paramètre

La relation entre le paramètre α, qui traduit une attitude de cinq types de ménages face à leur satisfaction résidentielle, et les valeurs de mobilité individuelle φ, de probabilité de déménager Ω et du taux de migration est linéaire : les modifications de la valeur du paramètre impactent chacun de ces résultats de la même manière, et l'influence est d'autant plus grande que la valeur du paramètre est élevée.

Ces résultats de simulation paraissent très sensibles aux valeurs que peut prendre α, comme nous avons pu le voir pour les taux de migrations intra-classes des cinq classes de mobilité individuelle.

L'exploration des valeurs que peuvent prendre ces différents résultats de simulation nous permet également de constater que les comportements des ménages sont parfois cantonnés à de petits intervalles de valeurs, sur lesquels les analyses devraient être affinées. Nous savons désormais que la mobilité individuelle est une variable dont les valeurs sont globalement comprises entre 0 et 0,2, et confirmons que la probabilité de déménager Ω des ménages varie globalement entre 0 et 0,4, compte tenu des valeurs testées pour le paramètre.

7.6 Conclusion

7.6.1 Synthèse des résultats de sensibilité de Mobisim-MR

L'influence de différents paramètres sur des variables simulées par le modèle a été étudiée tout au long de ce chapitre. Nous savons à présent comment chacun des paramètres choisis impacte les différents résultats de simulation, compte tenu des valeurs testées et toutes choses égales par ailleurs, puisque les modifications n'ont concerné qu'un paramètre à la fois.

Afin d'apporter un regard différent sur ces résultats, nous choisissons maintenant de faire une synthèse de ces résultats de sensibilité du modèle, du point de vue des

variables simulées et non plus des paramètres testés. La question n'est donc plus « quel est l'impact de ce paramètre sur ces variables ? » mais « quel paramètre influence le plus cette variable, compte tenu du protocole mis en place pour cette analyse de sensibilité de Mobisim-MR ? ».

7.6.1.1 Sensibilité des évaluations résidentielles

Satisfaction et intérêt d'un ménage dépendent de nombreuses variables, et nous sommes conscients que la sensibilité mise en avant dans ce travail dépend principalement des attributs choisis pour modifier les paramètres. Compte tenu du grand nombre d'appréciations possibles par les différents ménages dans Mobisim, les résultats de sensibilité ainsi obtenus pourraient être différents avec d'autres choix.

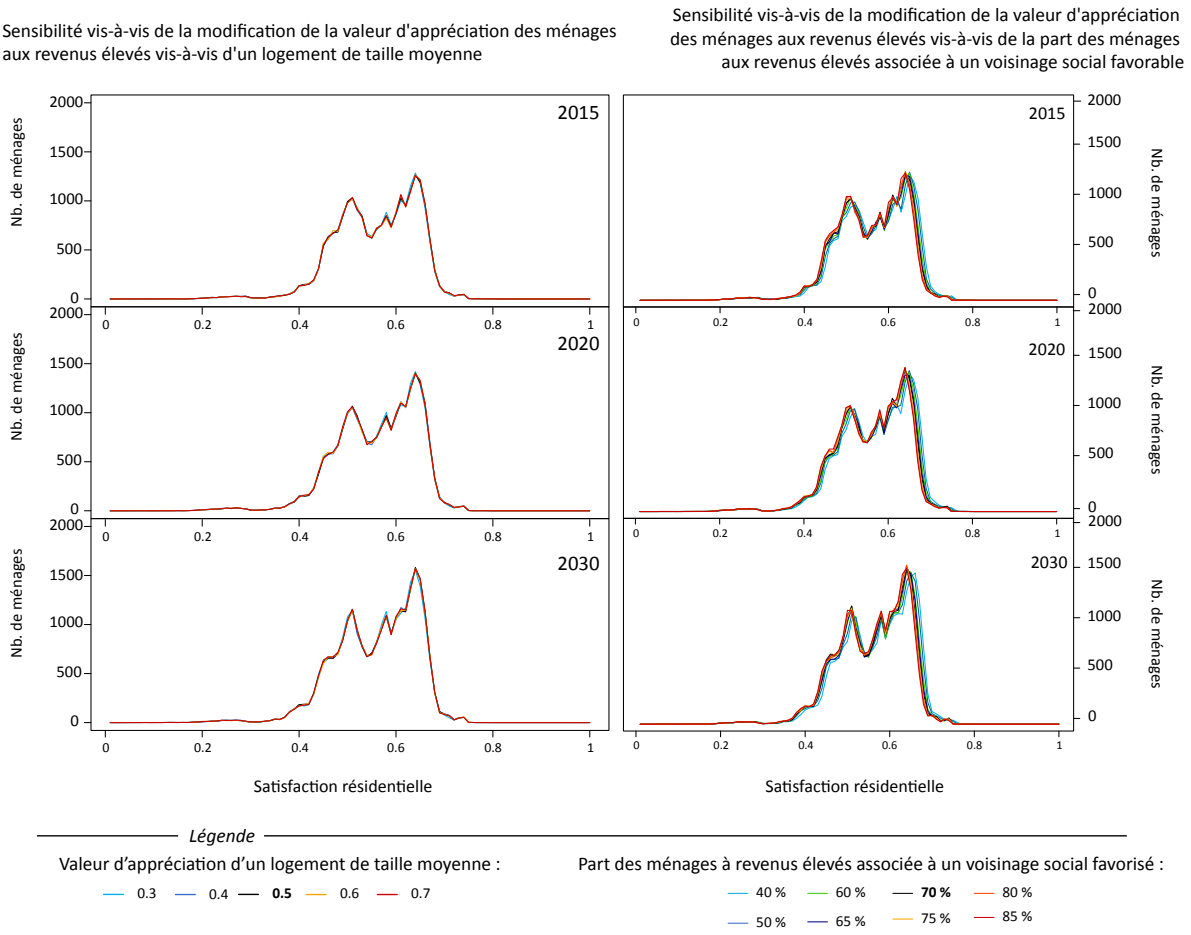


FIGURE 7.76 – Synthèse de la sensibilité de la satisfaction résidentielle des ménages aux revenus élevés selon les appréciations des attributs du logement et de l'environnement résidentiel actuels (Fig. 7.7 et 7.12)

Le premier constat que l'on peut faire est que, quelles que soient les valeurs des paramètres testées, le nombre de ménages pour chaque valeur de satisfaction résidentielle est quasiment le même (Fig. 7.76). Il est le même pour la modification de l'appréciation

à un attribut du logement, et il est presque le même pour la modification de l'appréciation de l'environnement résidentiel. Nous pouvons en effet remarquer que, sur les deux attributs choisis pour tester la sensibilité sur les évaluations résidentielles, le paramètre d'appréciation de l'environnement résidentiel paraît affecter le plus les valeurs de satisfaction résidentielle. Cela peut paraître surprenant sachant que 1) l'environnement résidentiel compte moins que le logement dans le calcul de la satisfaction (40% contre 60%), et que 2) les appréciations de l'environnement résidentiel sont potentiellement plus nombreuses dans le calcul de la satisfaction à l'environnement résidentiel, ce qui signifie que leurs valeurs peuvent être plus lissées à un niveau plus agrégé. Ce résultat peut être expliqué par le choix de l'attribut du logement, comme cela a été évoqué dans la section 7.2.1 de ce chapitre.

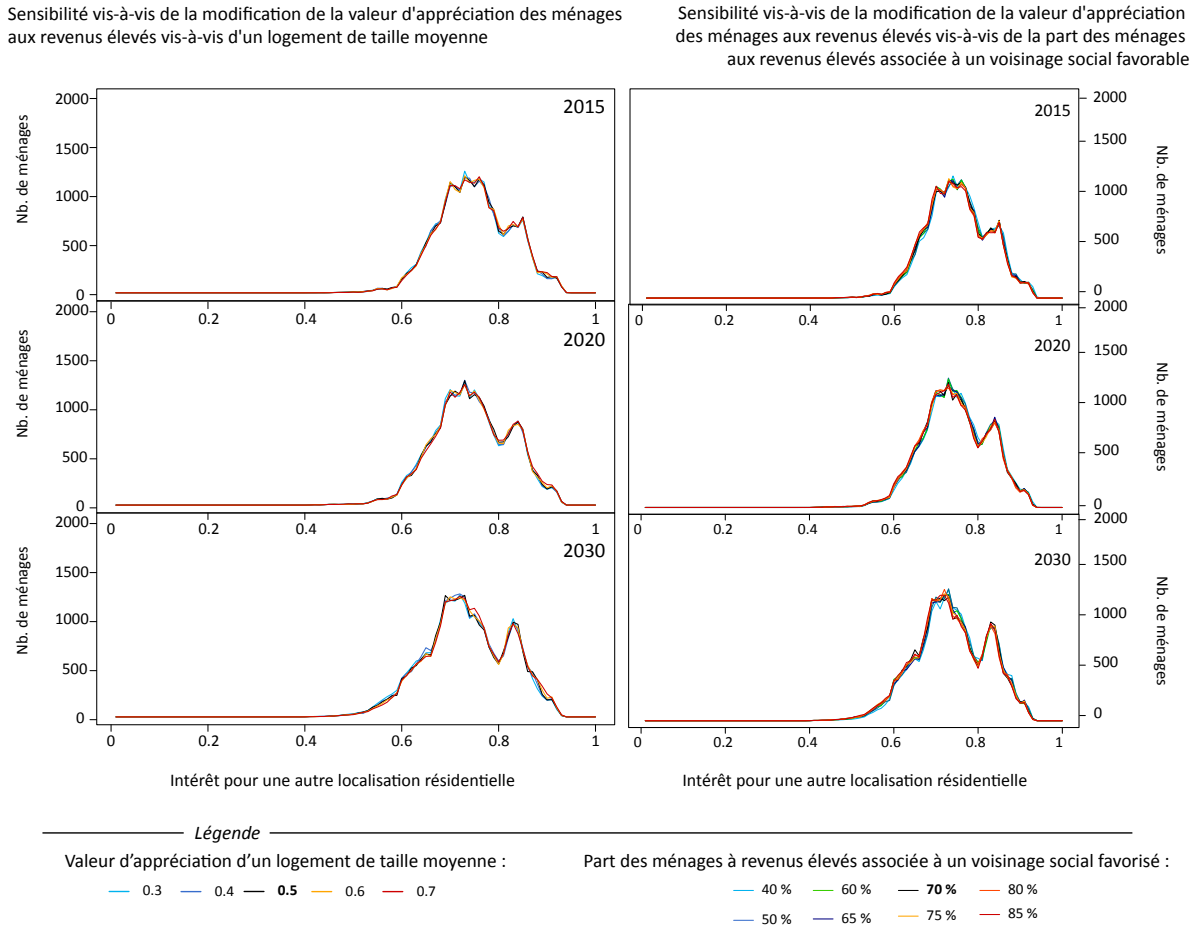


FIGURE 7.77 – Synthèse de la sensibilité de l'intérêt des ménages aux revenus élevés selon les appréciations des attributs d'autres logements et environnements résidentiels que le leur (Fig. 7.9 et 7.14)

Quoiqu'il en soit, dans cet exemple, l'influence des modifications de la valeur de l'appréciation d'un attribut de l'environnement résidentiel est plus important que celles d'un attribut du logement dans le calcul de la satisfaction résidentielle. Néanmoins, il

n'y a pas d'impact global sur les valeurs d'intérêt que les ménages aux revenus élevés portent à une autre localisation résidentielle que la leur.

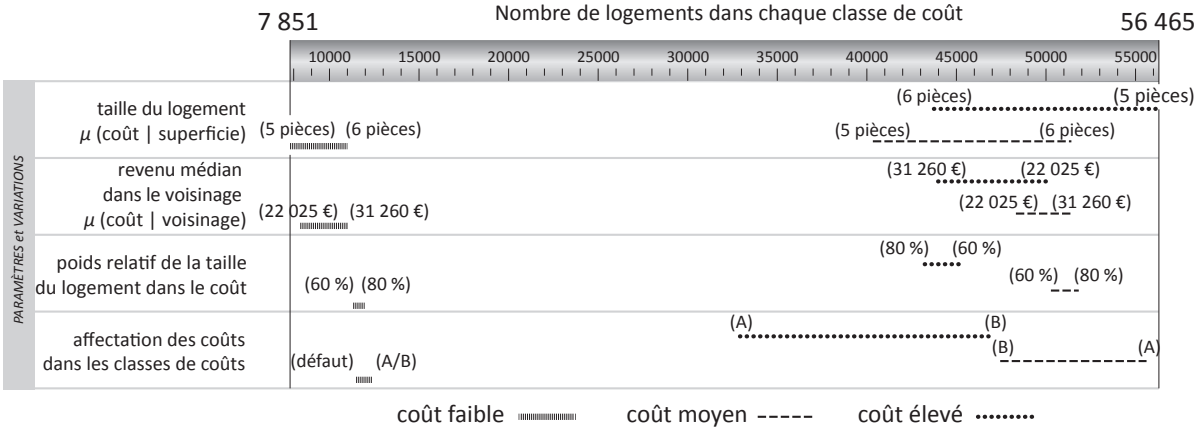
Synthèse : Compte tenu des paramètres choisis et des valeurs qui ont été testées, la sensibilité de chacune des évaluations résidentielles aux modifications d'une seule valeur d'appréciation, toutes choses égales par ailleurs, est très faible.

7.6.1.2 Sensibilité du nombre de logements par classe de coût

Nombre de logements dans chaque classe de coût

2030	coût faible		coût moyen		coût élevé	
PARAMÈTRES et VARIATIONS	*min*	*max*	*min*	*max*	*min*	*max*
taille du logement μ (coût | superficie)	5 pièces 7 851	6 pièces 11 505	5 pièces 42 424	6 pièces 51 552	6 pièces 43 743	5 pièces 56 465
revenu médian dans le voisinage μ (coût | voisinage)	22 025 € 8 616	31 260 € 11 505	22 025 € 48 209	31 260 € 51 552	31 260 € 43 743	22 025 € 49 974
poids relatif de la taille du logement dans le coût	60 % 11 429	80 % 11 817	60 % 49 917	80 % 51 639	80 % 43 245	60 % 45 454
affectation des coûts dans les classes de coûts	défaut 11 505	A / B 12 246	B 47 549	A 55 725	A 38 919	B 47 006

En gris : valeur du paramètre // En noir : valeur du résultat de simulation



(XX) : valeur du paramètre permettant de simuler cette valeur de résultat

FIGURE 7.78 – Synthèse de la sensibilité du nombre de logements par classe de coût aux modifications des différents paramètres permettant d'estimer le coût d'un logement dans Mobisim : le point en 2030

Comme nous l'avons vu dans la section 7.3, le nombre de logements dans chaque classe de coût n'est pas influencé de la même manière par les paramètres permettant d'estimer le coût des logements dans Mobisim. La figure 7.78 nous permet de synthétiser les différents résultats en mettant en avant la capacité des paramètres à simuler

certaines configurations du marché immobilier. La figure synthétise, pour chaque paramètre testé, la valeur minimale et maximale du résultat de simulation (ici, le nombre de logements dans chaque classe de coût) obtenu avec les différentes modifications des paramètres lors de l'analyse de sensibilité : à chaque valeur de résultat (en noir) est associé la valeur du paramètre permettant ce résultat (en gris). Le graphique en dessous permet de visualiser, pour chaque paramètre, l'étendue de la sensibilité de ces paramètres sur le nombre de logements dans chaque classe de coût. Les trois classes sont représentées, chacune dans un figuré différent.

Les informations du tableau permettent d'identifier deux paramètres ayant un rôle majeur dans l'estimation des coûts du logement en trois classes : le paramètre « taille du logement » correspondant à un coût maximal, et la probabilité d'affectation des valeurs de coût μ dans les classes. Ces paramètres s'opposent systématiquement : une taille du logement égale à 5 permet de simuler un nombre de logements à coût élevé très important (56 565, soit plus de la moitié des logements de l'agglomération en 2030), au détriment des logements à coût moyen et faible, tandis que la modification de la probabilité d'affectation des valeurs de coût dans les classes de coût permet d'augmenter considérablement le nombre de logements à coût faible et à coût moyen. Ces résultats sont intéressants notamment d'un point de vue des scénarios d'aménagement possibles pour des simulations avec Mobisim.

Inversement, on visualise assez bien le faible impact sur les résultats de simulation de la variation du poids relatif de chacun des deux paramètres (taille du logement et revenu médian dans le voisinage).

Enfin, la figure 7.78 nous permet de souligner que, dans ces conditions de simulation, quels que soient les paramètres modifiés :

- la simulation d'un très grand nombre de logements à coût faible est difficile ;
- il est possible d'inverser la tendance entre le nombre de logements à coût moyen et le nombre de logements à coût élevé, pour simuler une augmentation globale du prix de l'immobilier.

7.6.1.3 Sensibilité de l'intérêt à déménager M

Compte tenu des valeurs testées pour les paramètres, la variable M n'est pas influences de la même manière : en augmentant le nombre de logements connus, les ménages enrichissent leur connaissance du marché immobilier et accroissent potentiellement leur intérêt à migrer, tandis que l'augmentation des valeurs de $A_H(v_J)$ les rend

plus exigeants, contribuant ainsi à diminuer globalement les valeurs de M.

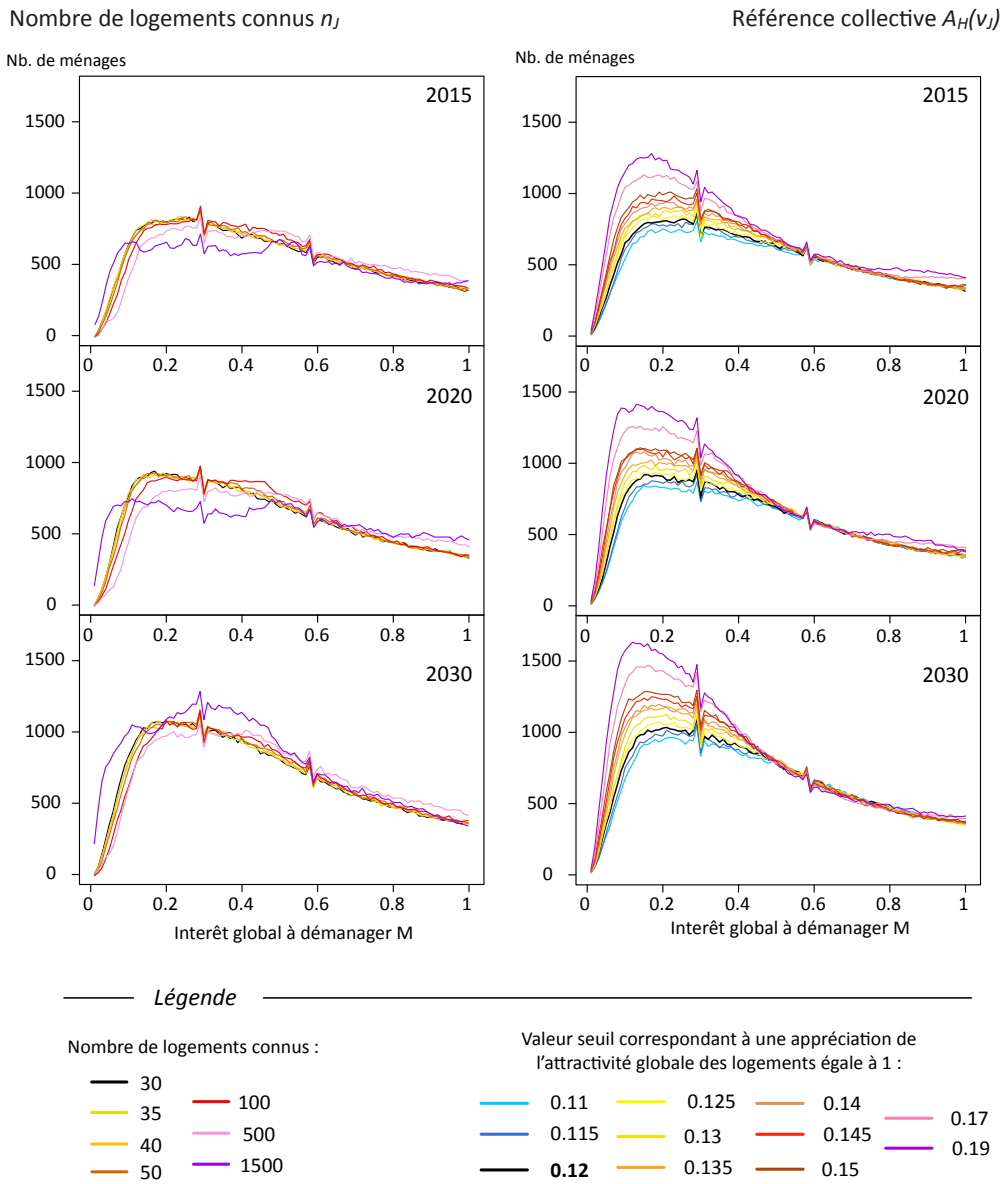


FIGURE 7.79 – Synthèse de la sensibilité de l'intérêt global à déménager M selon les paramètres n_J et $A_H(v_J)$ (figures 7.43 et 7.49)

Les tendances indiquées par la figure 7.79 montrent que, pris indépendamment l'un de l'autre, l'amélioration d'une connaissance du marché du logement (augmentation de la valeur de n_J) a le même impact sur l'intérêt à déménager des ménages de Mobisim qu'une plus grande tolérance de leur part à l'égard de leur attractivité (diminution de la valeur de $A_H(v_J)$). L'inverse n'a pas été vérifié : il faudrait restreindre encore la connaissance du marché des ménages (sous condition de descendre en deçà du seuil de fiabilité de l'échantillon n_J) pour vérifier qu'elle correspond, réciproquement aux résultats de l'analyse de sensibilité, à une plus grande exigence des ménages vis-à-vis

de leur attractivité au moment d'envisager un déménagement.

Comme nous l'avons souligné à plusieurs reprises dans ce chapitre, ces résultats de sensibilité doivent être rapprochés des valeurs d'attractivité connue v_J des ménages, qui apparaissent clairement comme une des clés des comportements des ménages, conjointement avec le nombre de logements connus n_J (cf. section 7.4.2.1).

7.6.1.4 Sensibilité de la probabilité de déménager Ω

La probabilité de déménager Ω d'un ménage est le résultat d'une moyenne géométrique entre son intérêt global à déménager M et sa mobilité individuelle φ. La sensibilité de la variable aux modifications des paramètres a été analysée sept fois dans ce travail. La figure 7.80 présente l'ensemble des variations de la variable selon chaque paramètre qui participe, indirectement, à son calcul.

D'un point de vue très global, c'est-à-dire juste en observant l'allure des distributions de Ω sur la figure 7.80, et bien que les impacts soient difficiles à préciser à cette échelle d'observation, nous pouvons constater que, quel que soit le paramètre modifié, une majorité des ménages a une probabilité de déménager inférieure à 0,3. Le nombre de ménages pour chaque valeur de Ω paraît globalement le même au gré des modifications des valeurs des différents paramètres, même s'il varie plus fortement dans l'intervalle de valeurs 0,05 et 0,1, et autour de 0,3 pour l'impact de certains paramètres.

Comparé aux autres paramètres, le nombre n_J de logements connus ne paraît pas avoir beaucoup d'influence sur Ω, tandis que celui de $A_H(v_J)$ est plus net. L'exigence des ménages augmente assez nettement le nombre de ménages dont les valeurs de Ω sont très faibles. Son rôle dans le calcul de M est probablement à l'origine d'une telle influence : l'effet des modifications de la valeur d'appréciation de l'attractivité global des ménage est important sur M, et par conséquent, se ressent dans le calcul de Ω.

Les différentes valeurs d'α jouent des rôles très similaires dans les variations des valeurs d'Ω, et leur influence augmente avec le nombre de ménages dans chacune des classes. De manière assez intuitive, plus les ménages sont nombreux à modifier leur attitude vis-à-vis de leur satisfaction résidentielle pour envisager un déménagement, plus cela impacte la probabilité de déménager globalement.

Ces conclusions ne peuvent être que partielles compte tenu de l'échelle d'observation que nous avons utilisée pour étudier l'impact des différents paramètres sur ce résultat de simulation. Elles nous permettent néanmoins d'affirmer que, quelles que soient les

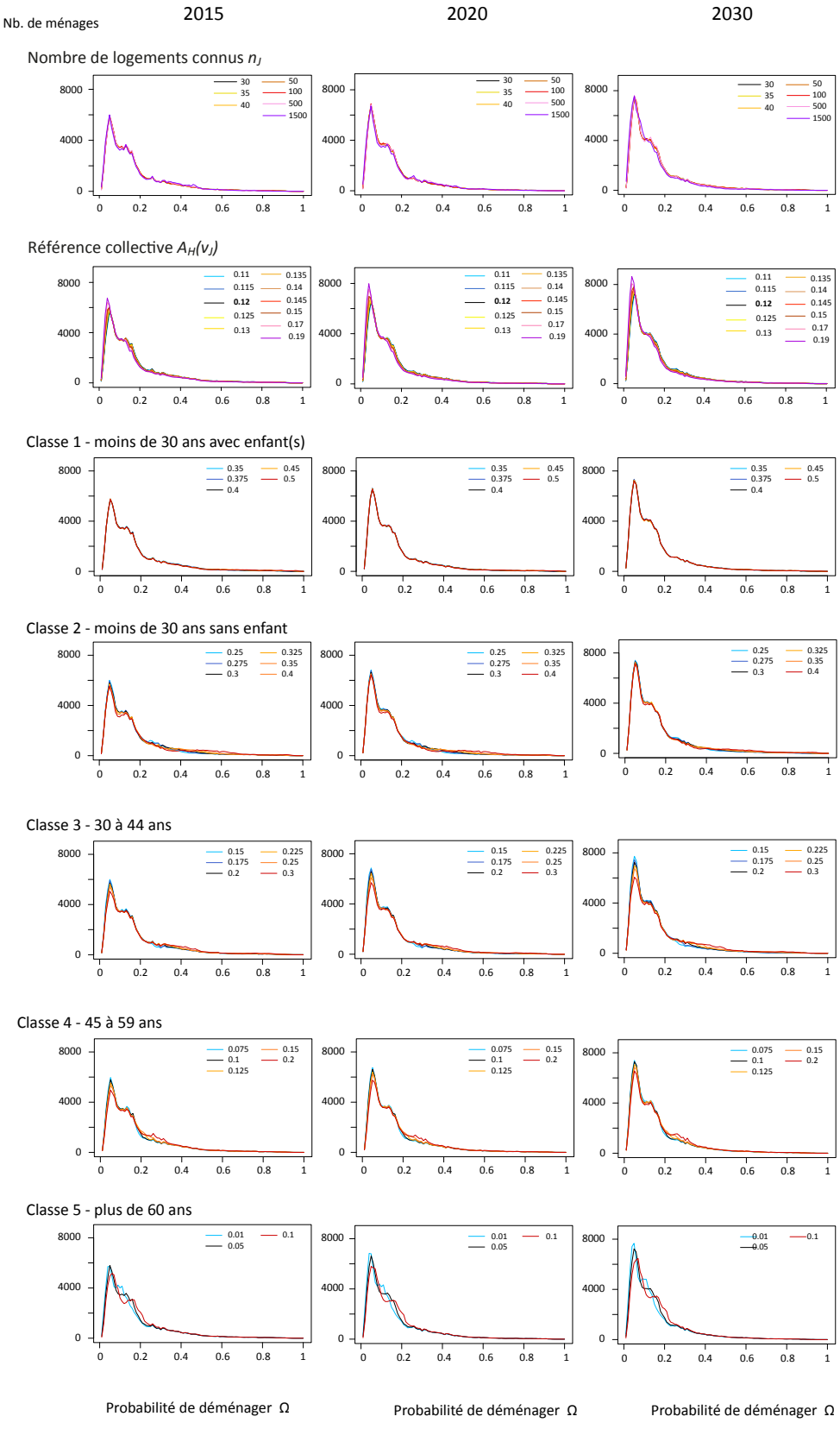


FIGURE 7.80 – Synthèse de la sensibilité de Ω selon les paramètres n_J, $A_H(v_J)$ et les cinq α (Fig. 7.43, 7.49, et 7.72 à 7.74)

modifications apportées aux paramètres (indépendamment les uns des autres), les ménages de Mobisim ont une probabilité de déménager comprise majoritairement entre 0 et 0,5 et à plus forte raison, inférieure à 0,1.

7.6.1.5 Sensibilité des résultats généraux du modèle : satisfaction résidentielle et taux de migration

L'analyse de sensibilité de locale que nous avons menée sur Mobisim-MR permet de définir, compte tenu des valeurs de paramètres testées, que la satisfaction moyenne des ménages peut varier entre 0,506 et 0,527 (Fig. 7.82).

À l'échelle de l'agglomération, cette variable constitue un résultat très agrégé de l'ensemble des interactions qui interviennent durant les simulations. Pourtant, comme nous avons pu le voir (Fig. 7.81), certaines modifications de valeurs des paramètres ont un effet sur les valeurs de la satisfaction résidentielle moyenne. Les coûts des logements, en simulant notamment la présence de davantage de logements à coût faible, et le nombre de logements connus influencent tous deux positivement la satisfaction moyenne des ménages (Fig. 7.82). Les ménages de Mobisim sont donc sensibles à une baisse des coûts du logement, ainsi qu'à un panel de logements plus grand (n_J = 1500 - Fig. 7.82) sur lequel estimer leur attractivité connue v_J. La référence collective $A_H(v_J)$ est la seule à ne pas susciter de changement dans les valeurs de satisfaction moyenne.

Le taux de migration moyen est le second résultat le plus général dont la sensibilité a été étudiée dans cette analyse. Les figures 7.84 et 7.75 d'une part et 7.83 d'autre part résument le rôle de chacun des paramètres dans le calcul de ce résultat final d'une simulation avec Mobisim-MR.

Les modifications apportées aux paramètres du coût n'ont pour ainsi dire aucun impact sur les valeurs de taux de migration, compte tenu des valeurs testées dans l'analyse, et ce d'autant moins au cours de la simulation (Fig. 7.83). Par contre, ce qui ressort de cette analyse de sensibilité est l'influence des variables intervenant dans la probabilité de déménager : les différentes valeurs données aux paramètres participant au calcul de l'intérêt à migrer M permettent de montrer qu'il est possible de diminuer le taux de migration moyen en 1) augmentant la taille de l'échantillon sur lequel les ménages basent leur connaissance du marché, et 2) les rendant plus intransigeants dans la manière d'envisager leur propre attractivité comme une opportunité aux déménagements.

L'effet des modifications des valeurs du paramètre α est plutôt intuitif (fig. 7.75) : lorsque certaines classes de ménages augmentent leur mobilité intrinsèque, le taux de

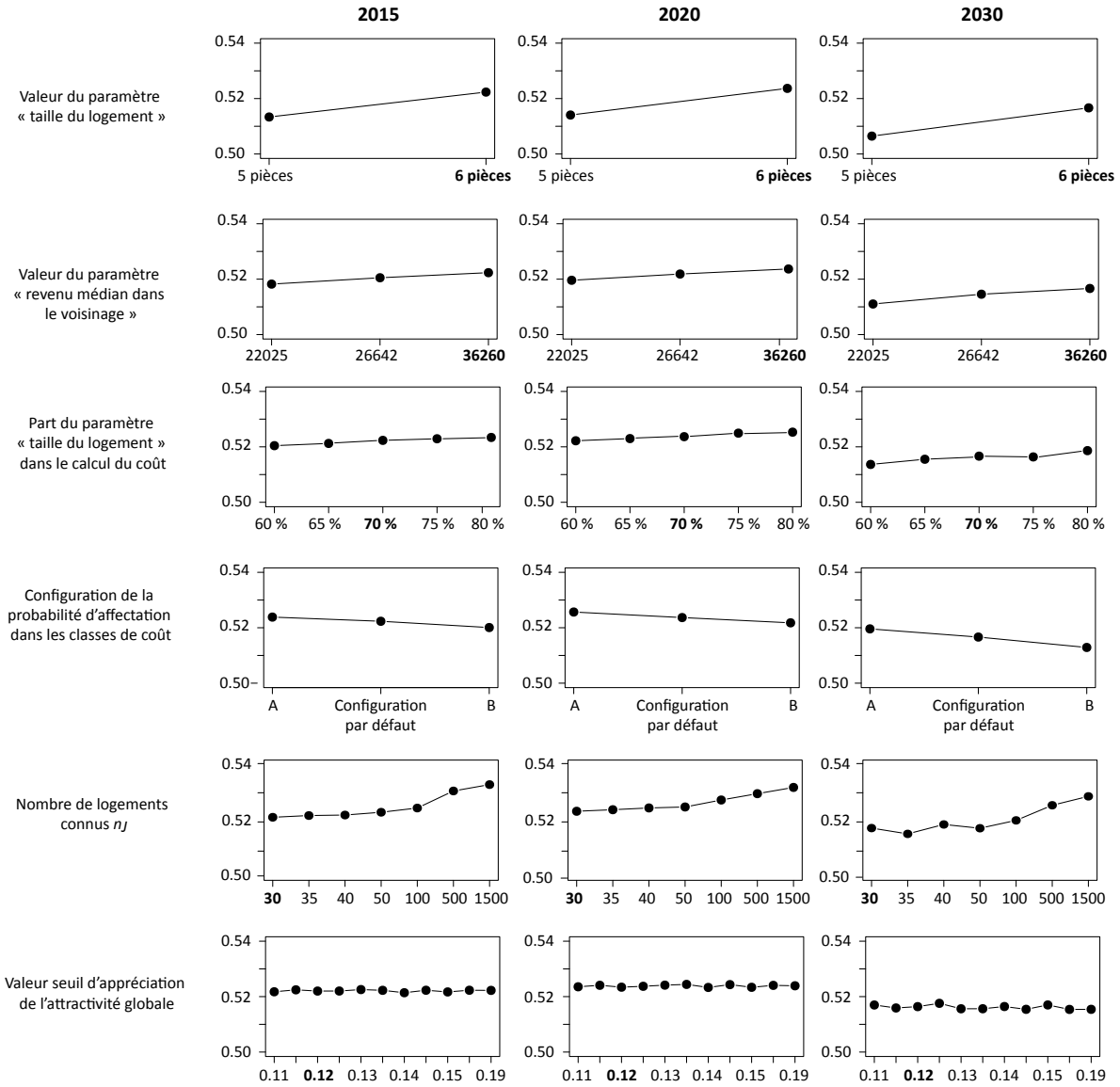


FIGURE 7.81 – Synthèse de la sensibilité de la satisfaction résidentielle moyenne des ménages à la modification de différents paramètres de Mobisim (Fig. 7.21, 7.25, 7.29, 7.33, 7.45 et 7.51)

migration moyen augmente également. Énoncé de la sorte, ce constat peut sembler simpliste, mais il montre l'influence non négligeable de ce paramètre dans Mobisiom-MR, ce qu'il n'était pas possible d'affirmer avant l'exploration du modèle dans cette analyse de sensibilité.

La figure 7.83 nous permet d'identifier assez facilement les leviers sur lesquels nous appuyer pour faire évoluer le taux annuel de migration vers des valeurs plus réalistes compte tenu des comportements observés sur la communauté d'agglomération du Grand Besançon, où le taux de migration est de 13,7 % en 2005. Nous rappelons que l'objectif du paramétrage de Mobisim-MR (cf. chapitre 5) est de parvenir à si-

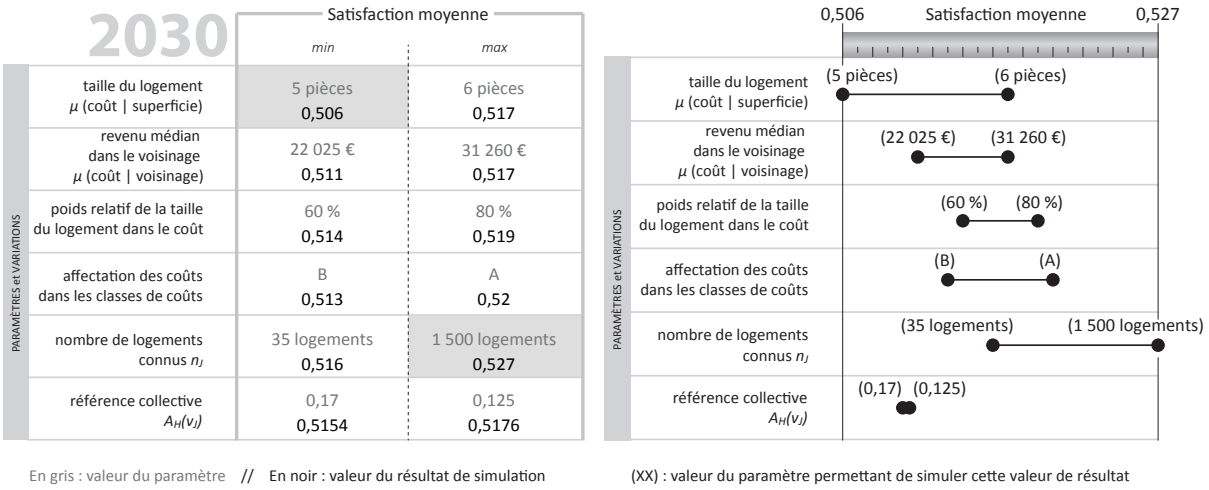


FIGURE 7.82 – Synthèse de la sensibilité de la satisfaction résidentielle moyenne des ménages aux différents paramètres de Mobisim : le point en 2030

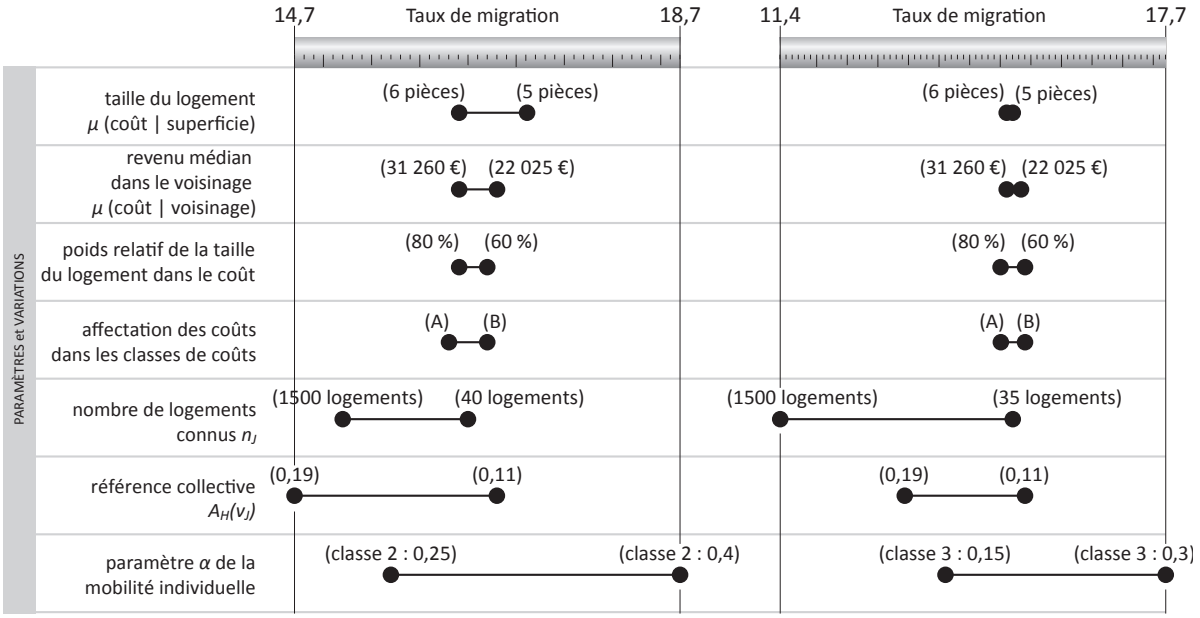
muler un taux annuel de migration dans les premières années de simulation qui soit proche de cette valeur. Dans l'état actuel de notre exploration du modèle, le taux annuel de migration minimum simulé avec Mobisim-MR est de 14,7% en 2015. Ce taux est atteint en modélisant un comportement très exigeant des ménages vis-à-vis de leur attractivité connue v_J, en considérant qu'elle doit atteindre 0,19 pour être considérée comme une opportunité de déménager. C'est donc plutôt vers ce premier ajustement que nous pourrons nous tourner pour calibrer plus précisément le modèle, bien qu'à première vue, cette solution réduise légèrement la capacité du modèle à simuler des comportements hétérogènes entre les ménages (Fig. 7.49).

Enfin, un résultat attire plus particulièrement notre attention. Le taux de migration minimum simulé en 2030 en modifiant les valeurs des différents paramètres est de 11,4%, lorsque le nombre de logements connus par un ménage est de 1500 (Fig. 7.83). Si cette valeur permet aux ménages d'améliorer en moyenne leur satisfaction résidentielle en 2030 (Fig. 7.81 et 7.82), elle est également à l'origine d'une baisse radicale de leur intérêt global à déménager (Fig. 7.44), de leur probabilité de déménager (Fig. 7.43) et donc de leur taux de migration (Fig. 7.84). Nous savons que le nombre de logements vacants attractifs sur l'agglomération diminue en fin de simulation (Fig. 7.36), et nous pouvons supposer que les logements restants, compte tenu de la satisfaction résidentielle enregistrée ne sont pas assez attractifs pour permettre aux ménages d'envisager de déménager.

Ce résultat de sensibilité pose aussi la question d'une saturation de la satisfaction résidentielle compte tenu de l'offre sur l'agglomération : les logements très attractifs sont-ils à un moment donné de la simulation tous occupés ? Existe-t-il un type de loge-

PARAMÈTRES et VARIATIONS	Taux de migration 2015 min	Taux de migration 2015 max	Taux de migration 2030 min	Taux de migration 2030 max
taille du logement μ (coût | superficie)	6 pièces 16,4	5 pièces 17,1	6 pièces 15,1	5 pièces 15,2
revenu médian dans le voisinage μ (coût | voisinage)	31 260 € 16,4	22 025 € 16,8	31 260 € 15,1	22 025 € 15,4
poids relatif de la taille du logement dans le coût	80 % 16,4	60 % 16,7	80 % 15	60 % 15,4
affectation des coûts dans les classes de coûts	A 16,3	B 16,7	A 15	B 15,4
nombre de logements connus n_J	1 500 logements 15,2	40 logements 16,5	1 500 logements 11,4	35 logements 15,2
référence collective $A_H(v_J)$	0,19 14,7	0,11 16,8	0,19 13,3	0,11 15,4
paramètre α de la mobilité individuelle	classe 2 : 0,25 15,7	classe 2 : 0,4 18,7	classe 3 : 0,15 14,1	classe 3 : 0,3 17,7

En gris : valeur du paramètre // En noir : valeur du résultat de simulation



(XX) : valeur du paramètre permettant de simuler cette valeur de résultat

FIGURE 7.83 – Synthèse de la sensibilité du taux annuel de migration aux différents paramètres de Mobisim : le point en 2015 et en 2030

ment qui fait consensus en termes d'intérêt manifesté par l'ensemble des ménages ? Nous avons vu dans l'exploration des attractivités que les valeurs d'attractivité n'étaient pas structurées selon les caractéristiques des ménages, aussi doit-on plutôt se tourner vers d'autres facteurs explicatifs pour comprendre ce résultat : quelle est la localisation des logements vacants attractifs en fin de simulation ? Quels types de ménages sont réellement satisfaits ? L'intérêt d'une analyse agrégée atteint ici ses limites, et montre que

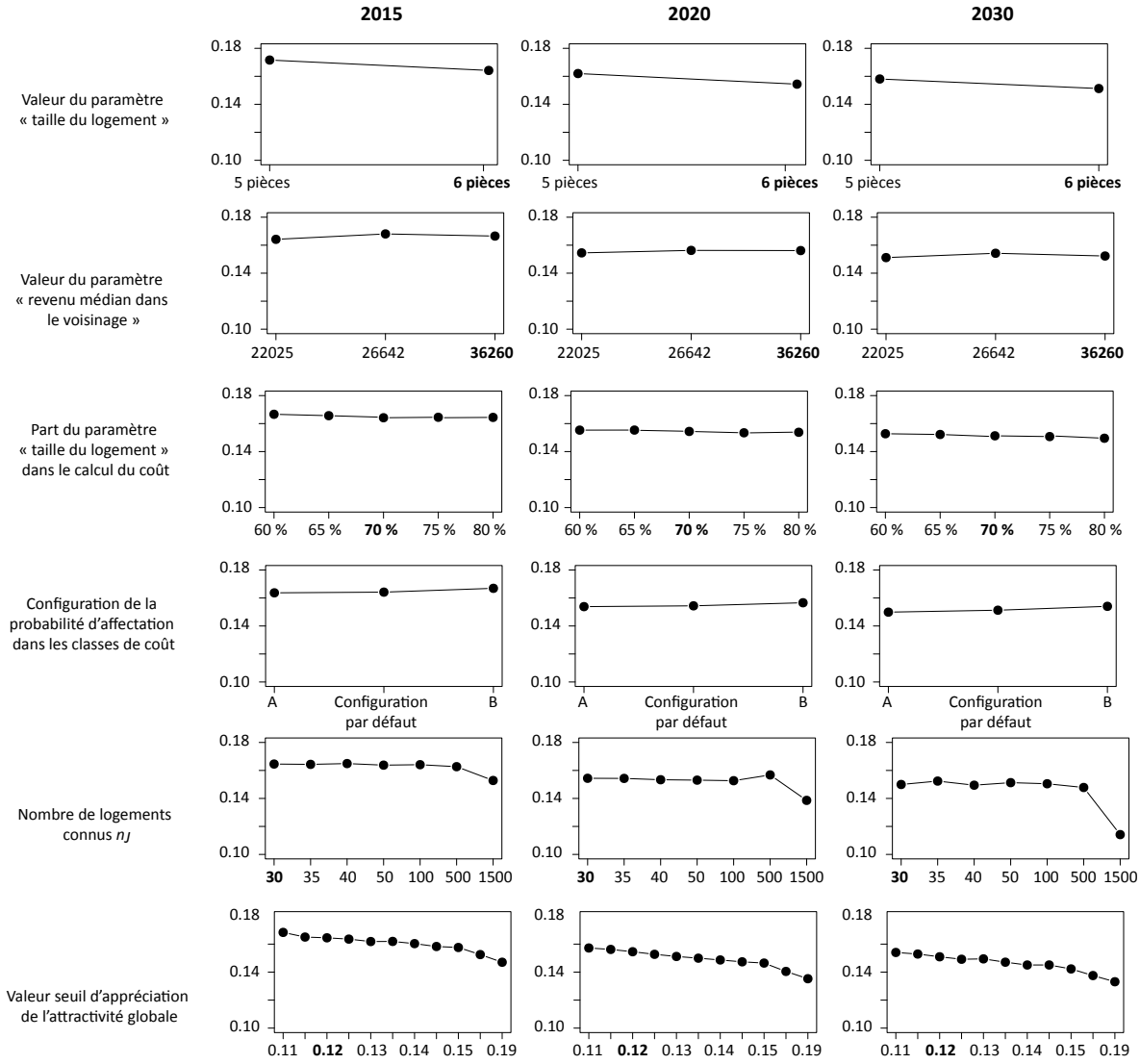


FIGURE 7.84 – Synthèse de la sensibilité du taux de migration moyen sur l'agglomération aux modifications des différents paramètres de Mobisim-MR

l'approfondissement de certaines questions soulevées nécessite une analyse précise des comportements résidentiels simulés.

7.6.2 Bilan de l'analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité telle que nous l'avons menée ne permet pas de quantifier le rôle de chaque paramètre dans la variance des résultats, ni de tester la sensibilité des résultats de simulation aux interactions entre les paramètres, ce qui la rend partielle au regard de la formalisation sur laquelle repose le modèle. Ce choix à la fois nous est imposé par des contraintes techniques liées à la simulation avec Mobisim et est assumé pour procéder dans un premier temps à une analyse simple où il est possible de saisir les tenants et aboutissants des résultats. Elle est d'autant plus partielle que

les résultats de simulation sont considérés de manière agrégée (pour l'ensemble des ménages), ne nous permettant pas de déceler si la modification d'un des paramètres a un impact local sur l'un d'entre eux : la modification d'un paramètre peut affecter de manière plus accentuée le comportement d'un type de ménages en particulier. Seuls les résultats de simulation de la mobilité individuelle φ ont été analysés de manière plus fine, distinction des ménages selon cinq types.

Malgré ces lacunes évidentes, cette analyse nous a permis d'explorer l'effet de chaque paramètre sur le modèle, en fonction de valeurs définies spécifiquement et de résultats de simulation choisis selon le lien avec le paramètre ou leur positionnement dans les sorties du modèle : résultat intermédiaire, résultat général, résultat constituant un critère d'évaluation du paramétrage du modèle.

Ce travail nous a ainsi permis de vérifier que la plupart des résultats de simulation sont cohérents avec les hypothèses sous-jacentes à leur formalisation, malgré le caractère possiblement non-linéaire des dynamiques modélisées : si la plupart des constats qui ont été faits dans ce chapitre peuvent paraître triviaux voire « enfoncer des portes ouvertes », il n'en était pas moins indispensable de tester le comportement du modèle pour pouvoir s'en assurer.

De manière plus spécifique, nous avons pu également cibler le comportement global des variables, en identifiant les intervalles de valeurs simulées, quelles que soient les valeurs de leurs paramètres : cantonnement des valeurs d'attractivités connue entre 0 et 0,2 ; part des ménages dont l'intérêt global à déménager est maximal ; intervalles des valeurs de probabilités de déménager rarement à supérieures à 0,4 ; etc. L'hétérogénéité des ménages existe, quelles que soient les modifications apportées aux paramètres, et nous pouvons donc supposer qu'elle émane principalement des paramètres d'appréciations des ménages. Ceci nous permet d'argumenter en faveur de l'utilisation de ce grand nombre de paramètres dans le modèle : dans l'état actuel de nos connaissances sur le fonctionnement du modèle, tous paraissent jouer un rôle particulier dans les résultats de simulation.

De par ce qu'elle permet et ne permet pas d'analyser, l'analyse de sensibilité de Mobisim soulève des questions et fait naître des perspectives d'approfondissement sur la compréhension des processus de décision résidentielle des ménages. L'explication de certains résultats reste difficile en l'état actuel de l'analyse (pourquoi cette évolution dans les distributions de valeurs de satisfactions résidentielles des ménages selon les échelles d'importance ? Pourquoi l'augmentation du nombre de logements entraîne une

diminution du taux annuel de migration ?). D'autres explorations pourraient être menées pour mieux connaître les comportements du modèle, à travers ceux des variables qu'il génère, comme l'exploration de certains résultats de simulation sur des intervalles de valeurs plus fins par exemple.

Il est important de rappeler que ces résultats de sensibilité ne sont valables que pour les paramètres et valeurs testés et qu'il serait audacieux de les généraliser davantage. Le cas de l'appréciation du logement en est un bon exemple. Chaque sensibilité observée ne prend sens que dans l'ensemble de la configuration des paramètres de la simulation correspondante (Schmitt *et al.*, à paraître), et l'impact de chaque valeur de paramètre n'a de signification que dans la modification qu'elle induit sur la relation avec les autres variables simulées. Cela souligne encore l'importance des valeurs de paramètres choisies pour explorer le modèle d'une part et pour anticiper le calibrage d'autre part. La question des variables observées pour évaluer la sensibilité du modèle a également son importance, et en choisissant systématiquement des résultats de simulation très proches des paramètres ainsi que des résultats de simulation plus éloignés ou très globaux, nous questionnons la persistance de l'impact d'un paramètre à travers les différentes agrégations qu'il subit d'une part, et soulignons la sensibilité même des résultats de simulation aux modifications des paramètres d'autre part.

Après les étapes de paramétrage par défaut, d'analyse de stabilité et de stochasticité, le calibrage de Mobisim-MR devrait être l'étape suivante dans la validation du modèle Mobisim-MR. Il se révèle d'autant plus utile que nous avons soulevé des points de perfectionnement possibles à travers cette analyse de sensibilité. Le taux annuel de migration des ménages, trop élevé dans les simulations à l'heure actuelle, peut être diminué grâce à plusieurs leviers : augmentation du nombre de logements connus, augmentation de l'exigence des ménages vis-à-vis de leur attractivité et diminution du taux annuel de migration intra-classe pour les cinq classes de mobilité individuelle. Cela étant, ce dernier point souligne une limite des informations dont nous disposons actuellement pour calibrer certains paramètres de manière pertinente.

Les taux annuels de migrations intra-classes simulés avec Mobisim-MR (Tabl. 7.10) semblent très élevés, notamment pour les deux premières classes. Les valeurs que nous avons obtenues à partir de la base MIGCOM (Tabl. 7.11) ne peuvent être utilisées comme référence ou objectif à atteindre puisque, comme nous l'avions énoncé au moment du paramétrage, la méthode employée pour les calculer sous-estime le taux annuel

de migration réel [29]. Aussi, la comparaison avec ces valeurs (Tabl. 7.11) n'est faite ici qu'à titre indicatif. Néanmoins, nous pouvons nous demander dans quelle mesure le fort différentiel entre les valeurs de taux du tableau 7.11 pour chaque type de ménage est imputable à la simplification de notre calcul ou à une surestimation des valeurs affectées aux différents paramètres α. Sans complément d'information ou sans nouvelles données sur les comportements démographiques et résidentiels de ces différents types de ménages, il est délicat de formuler des hypothèses tangibles sur lesquelles fonder le réajustement des valeurs des différents paramètres α. Ces informations sont à rechercher du côté des travaux menés par les démographes notamment, tant dans la bibliographie (Authier *et al.*, 2010a; Authier *et al.*, 2010b) que dans d'autres enquêtes (enquête Logement ou enquête Emploi de l'INSEE, par exemple), que nous n'avons pas exploité pour ce travail.

Tableau 7.11 – Taux annuel de migration des ménages de chaque classe de mobilité individuelle : valeurs données par MIGCOM et valeurs simulées par Mobisim avec les valeurs par défaut des paramètres

Type de ménage	Part de migrants par classe (MIGCOM 2008)	Taux de migration intra-classe simulé avec Mobisim-MR
Moins de 30 ans avec enfant(s)	16,83 %	48,4%
Moins de 30 ans sans enfant	14,28 %	25,0%
30 à 44 ans	10,03 %	17,4%
45 à 59 ans	4,22 %	11,2%
Plus de 60 ans	2,08 %	9,5%

En l'état actuel de ce travail, il nous est possible de calibrer Mobisim-MR sur des hypothèses méthodologiques (le modèle réagit de telle manière à la modification des paramètres), mais plus sur des hypothèses thématiques. C'est la raison pour laquelle le calibrage du modèle Mobisim-MR n'a pas été réalisé dans le cadre de la thèse.

En maintenant les paramètres du modèle à leur valeur par défaut, nous ne permettons pas à Mobisim-MR de simuler un taux annuel de migration plus faible sur l'agglomération bisontine, mais nous fournissons néanmoins un modèle dont la configuration des paramètres permet de simuler les décisions résidentielles des ménages de manière cohérente. Parce qu'il permet de simuler l'hétérogénéité des comportements

29. Le calcul utilisé pour transformer les données MIGCOM en taux annuel de migration pour chacune des classes - annualisation d'un nombre de migrants sur 5 ans - ne tient pas compte des migrations multiples (Donzeau et Shon, 2009)

des ménages, Mobisim-MR présente un intérêt certain dans la simulation des mobilités résidentielles en géographie.

Conclusion de la troisième partie

L'ensemble des analyses effectuées dans cette partie de la thèse a permis de tester le comportement de Mobisim-MR, à la fois vis-à-vis de la stochasticité induite par sa formalisation (quelle est la fiabilité d'un résultat de simulation moyen en fonction du nombre de réplications dont il est issu ?) et vis-à-vis de l'incertitude émanant des valeurs affectées à ses différents paramètres. L'objectif de ces analyses n'était cependant pas de diminuer l'incertitude qui fait partie intégrante du modèle, mais de mieux la cerner pour en tenir compte dans l'interprétation que l'on peut faire des résultats de simulation.

Les résultats de l'analyse de stabilité et de l'analyse de sensibilité vis-à-vis des différents paramètres, bien que toutes les deux partielles au regard de la structure du modèle, nous permettent d'améliorer notre connaissance du fonctionnement de Mobisim-MR et d'enrichir notre compréhension des résultats de simulation.

Des différentes sources d'incertitude étudiées dans l'analyse de sensibilité de Mobisim-MR, seules sont considérées les valeurs des paramètres ; cette analyse ne constitue donc qu'un commencement au regard de toutes les sources d'incertitudes possibles dans Mobisim : incertitude provenant de la situation initiale (quel est l'impact de la zone d'étude dans les résultats de simulation du modèle ? Seraient-ils identiques sur une autre agglomération ?) ou des autres modèles de Mobisim, générateurs d'*inputs* pour le modèle des mobilités résidentielles. Un autre point fondamental dans la considération de ces différents résultats d'analyses est le niveau d'agrégation considéré : la stabilité du modèle a été attestée à l'échelle de toute l'agglomération, et pour l'ensemble des ménages, et affirmer que le modèle est aussi stable à une échelle plus fine (un groupe de communes ou une commune) nécessiterait d'effectuer d'autres analyses. Il en est de même pour la sensibilité des résultats de simulation, comme nous l'avons évoqué dans la conclusion du chapitre 7. Les résultats de sensibilité conduits sur les cinq classes de ménages, bien que partiels eux aussi, montrent que les comportements paraissent stables également à cette échelle d'analyse.

Avoir effectué ces différents tests nous permet d'aborder l'interprétation des résultats de manière plus avisée, bien que nous ne connaissions pas encore le fonctionnement de Mobisim-MR dans son intégralité (sensibilité des résultats du modèle aux modification des valeurs de paramètres en interaction, et non plus indépendamment les unes des autres). L'exploration des attractivités a permis de souligner les différentes réactions des ménages simulés face à des situations résidentielles similaires : certains ménages ont une connaissance qui surestime le marché du logement, et pourront aviser en conséquence de leur choix résidentiels, tandis que d'autres ne bénéficient pas de la même connaissance, ce qui peut ne pas les déranger dans leur réflexion mais peut également les contraindre à patienter en attendant de trouver de meilleures opportunités pour envisager de déménager. Ces résultats soulignent l'intérêt de Mobisim-MR pour la simulation des mobilités résidentielles dans une agglomération, comme résultantes d'une décision influencée par des caractéristiques individuelles des ménages mais également par des facteurs extérieurs qu'il n'est pas évident de modéliser précisément (connaissance biaisée ou partielle de l'offre attractive disponible, contraintes financières, exigence dans la décision). Les résultats de l'analyse de sensibilité viennent appuyer ces constats, en confirmant par ailleurs la cohérence des résultats de simulation avec les hypothèses selon lesquelles ils ont été modélisés.

L'ensemble de ces conclusions nous permet de valider les résultats de simulation du modèle, dans la configuration des paramètres testée et à cette échelle spatiale d'observation. Cette validation autorise une certaine fiabilité dans les résultats de simulation, notamment en vue d'interprétations et d'exploitations. Nous ne sous-entendons pas que le modèle est juste dans l'absolu, mais qu'il permet, en modélisant des faits stylisés, de modéliser des comportements résidentiels individuels cohérents dont les interactions permettent de faire émerger des mobilités résidentielles à l'échelle d'une agglomération. En cela, Mobisim-MR, au sein de la plateforme de simulation Mobisim peut être considéré comme un outil intéressant en géographie quantitative : *"what is required for a succsessful agent-based model in geography is to assemble a set of individual-based mechanisms adapted to the level of resolution of the problem and to evaluate its ability to answer this problem with a high level of confidence"* [30] (Schmitt *et al.*, à paraître).

30. « Ce qui est attendu d'un modèle multi-agents réussit en géographie est l'assemblage d'un ensemble de mécanismes individu-centrés adapté au niveau de résolution du problème, et l'évaluation de sa capacité à répondre à ce problème avec un certain niveau de confiance. »

Quatrième partie

Analyses thématiques

"I can't get no satisfaction"

The Rolling Stones

Introduction de la quatrième partie

Mobisim-Démo et Mobisim-MR, outre l'intérêt en modélisation qu'ils présentent séparément, ont un intérêt conjoint quand ils sont intégrés au sein de la plateforme de simulation LUTI. Cette plateforme a été conçue spécifiquement pour aider à la décision en aménagement du territoire : les résultats de simulation peuvent apporter des éclairages sur l'impact d'aménagements sur les comportements de mobilités (quotidienne et résidentielle) des ménages.

La modélisation individu-centrée de Mobisim permet d'aborder les questions d'aménagement sous différents angles : spatialement, en tenant compte des entités spatiales que sont les communes et les IRIS, ou plus finement, les bâtiments et les logements, et socialement, en considérant les individus et les ménages de la population synthétique. Compte tenu de la diversité des caractéristiques de chaque entité, il est possible de se focaliser sur une question particulière, concernant un type de logements (maisons individuelles ou appartements, grands ou petits logements) ou un type de ménages en particulier (jeunes ménages célibataires, ménages modestes, familles avec enfant(s)).

L'analyse thématique présentée dans cette quatrième partie de la thèse en est un exemple : elle est le fruit d'un travail mené par Cécile Tannier (ThéMA), en collaboration avec des acteurs opérationnels [31] de la direction « Urbanisme, Projets et Planification » de la Ville de Besançon, auquel j'ai activement participé [32]. La cartographie des résultats (traitements des données) et leur visualisation ont été réalisées par Armelle Couillet (ingénieure cartographe à ThéMA).

31. Ce terme nous permet d'évoquer les différentes personnes avec lesquelles nous avons travaillé, à savoir un directeur de service et un chargé d'opération, c'est-à-dire des techniciens et non des élus de la municipalité.

32. Tannier C., Hirtzel J., Stephenson R., Couillet A., Vuidel G., Youssoufi S. - Conditions for the usefulness of a complex simulation platform in a planning decision process. Feedback from an experiment in the city of Besançon, France. Article soumis en octobre 2014 dans la revue *"Progress in Planning"*

Le contexte : l'agglomération bisontine

La communauté d'agglomération du Grand Besançon (CAGB - Fig. 7.85) est l'autorité intercommunale responsable de politiques locales incluant l'aménagement du territoire et les transports. L'agglomération comprend une ville-centre de 117 000 habitants - administrée par une collectivité locale, la Ville de Besançon - et des communes périurbaines [33], où les densités de population sont plus faibles et dont la plus importante n'excède pas 3 300 habitants. L'agglomération compte au total 177 000 habitants.

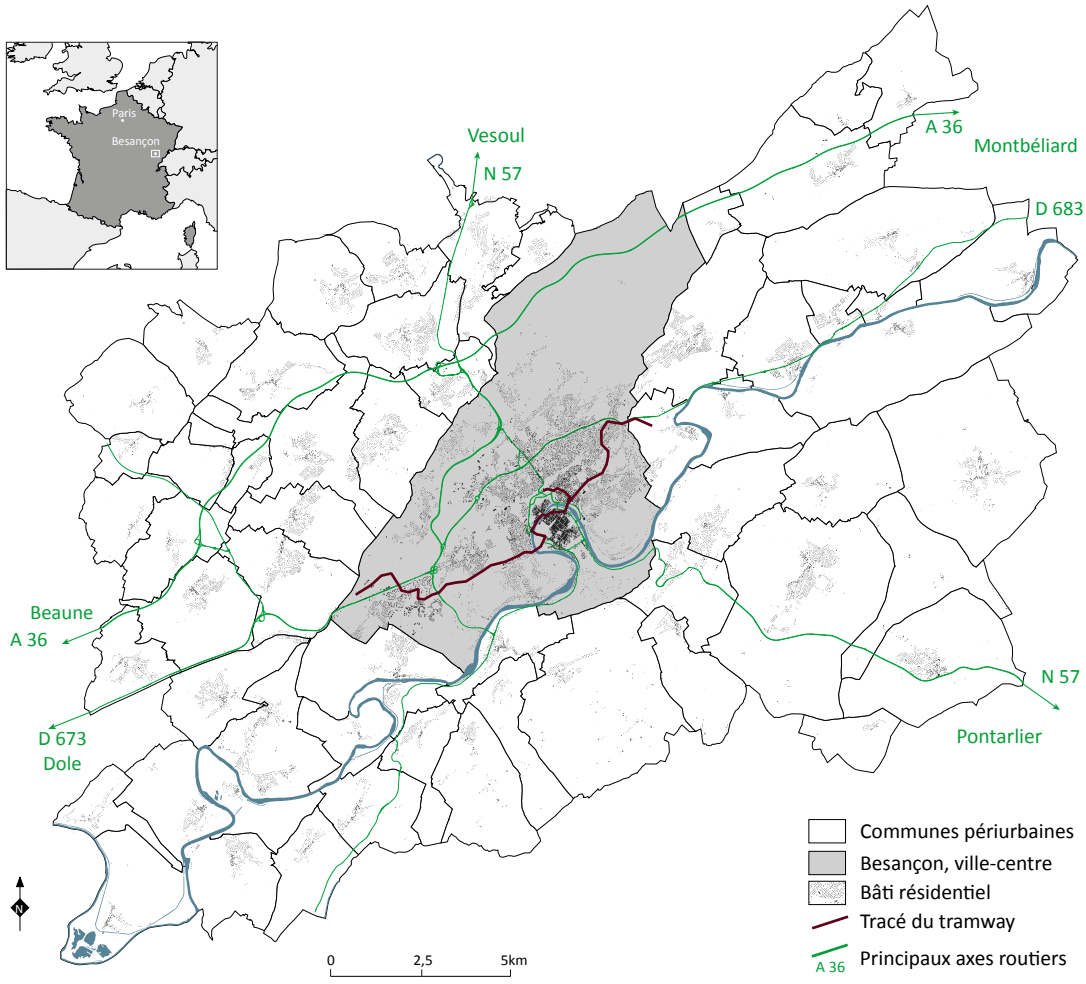


FIGURE 7.85 – Présentation de la communauté d'agglomération du Grand Besançon

En France, dans les villes de taille moyenne, les familles à revenus moyens ou élevés ont tendance à quitter les villes-centres pour s'installer dans les zones périurbaines, et Besançon ne fait pas exception (Youssoufi, 2011). L'explication classique de ce comportement se trouve dans les préférences de ces ménages pour une maison individuelle dans

33. Au moment où cette thèse se termine, la communauté d'agglomération du Grand Besançon comprend 59 communes, qui sont représentées sur les cartes. Depuis le 1er janvier 2015, deux communes - Auxon-Dessus et Auxon-Dessous - ont fusionné, et la communauté d'agglomération ne comprend donc plus que 58 communes en tout.

un environnement résidentiel plus vert où les coûts du logement (prix de l'immobilier et taxes locales) sont plus bas, malgré des dépenses en transport souvent plus élevées.

Malgré cette perte de population déplorée par la Ville de Besançon, le nombre d'habitants et le nombre de ménages sont tous les deux en augmentation sur l'ensemble de l'agglomération bisontine. L'emploi étant principalement concentré dans la ville-centre, les déplacements quotidiens en voiture particulière augmentent, à la fois en fréquence et en distances parcourues. En conséquence, la congestion sur les routes augmente également aux entrées et à l'intérieur de la ville-centre. Pour contrer ce phénomène, une ligne de tramway (Fig. 7.85) a été mise en place à Besançon en septembre 2014. Combinée à la création de parkings relais à proximité des entrées de ville, elle a pour ambition de réduire l'utilisation de la voiture dans la ville.

En plus de concentrer la plupart des emplois de l'agglomération, la commune de Besançon héberge également la plupart des ménages aux revenus faibles. Plus de 90% des logements sociaux de l'agglomération sont localisés dans la ville-centre, et une large part des habitants de la ville dispose de revenus inférieurs au seuil de l'impôt sur le revenu.

Cette situation démographique a orienté les politiques publiques du Schéma de Cohérence Territoriale (document de planification stratégique de l'occupation des sols, également appelé SCoT) (2011), qui établit que 60% des nouveaux logements sur le périmètre du SCoT doivent être construits dans la ville-centre, et 40% dans les communes périurbaines. Il est important de souligner que la ville de Besançon dispose encore de foncier disponible pour de nouvelles constructions de logements, dont une partie se trouve à proximité des arrêts de tramway. Parallèlement à cela, le SCoT et le PLH (Plan Local de l'Habitat - 2010) encouragent chaque commune périurbaine à inclure une part minimum de logements sociaux dans leur croissance résidentielle attendue. La loi SRU (Solidarité et Renouvellement Urbain) de 2000 impose une part minimale de 20% de logements sociaux dans les communes de plus de 3 500 habitants comprises dans une agglomération de plus de 50 000 habitants, condition que le Grand Besançon remplit d'ores et déjà. Aussi cet objectif permet-il simplement de rééquilibrer un peu la distribution des logements sociaux entre les différentes communes de l'agglomération.

Dans ce contexte, un objectif des élus de la Ville de Besançon (i.e. le maire et autres représentants politiques) est d'encourager les familles aux revenus moyens et élevés à rester dans la ville-centre. Les arguments en faveur de cet objectif sont la réduction des

déplacements en voiture sur l'agglomération, et à plus forte raison dans la ville-centre (par l'utilisation de transports en commun), et le bénéfice potentiel des ressources économiques de ces ménages (leur revenu les rend imposables, et ils ont généralement un niveau de consommation relativement élevé). Il est important de souligner que la volonté du conseil municipal de la Ville de Besançon n'est pas de pousser les ménages modestes en dehors de la ville (Watson, 2009). L'objectif est plutôt d'attirer et/ou de retenir les ménages aisés, en vue d'augmenter son assiette fiscale et ainsi sa capacité à financer les politiques sociales (ex. gratuité de l'accueil périscolaire).

La question posée

Répondre à ces objectifs signifie proposer à ces ménages une offre correspondant à leurs préférences résidentielles dans la ville-centre ; cette question s'adresse donc directement au département garant du PLH, à savoir la direction « Urbanisme, Projets et Planification » de la Ville de Besançon [34]. Compte tenu des constats évoqués précédemment, une des préoccupations des acteurs opérationnels est de savoir si les politiques du SCoT et du PLH, combinées à la tendance actuelle de l'augmentation du prix du carburant et à la construction de la ligne de tramway à Besançon, peuvent encourager les familles aux revenus moyens et élevés à s'installer dans la ville-centre. Dans le cas contraire, ils souhaitent également savoir quelle politique publique additionnelle pourrait réduire les flux migratoires de la ville-centre vers les communes périurbaines.

Plusieurs questions découlent de ces deux préoccupations : quels sont les critères fondamentaux pour les ménages qui souhaitent investir dans un logement ? La taille et le coût des logements sont-ils les attributs les plus importants, ou est-ce que le type de logement (appartement ou maison individuelle) ou même l'environnement résidentiel sont également significatifs dans leur réflexion ? L'intérêt des ménages pour les transports en commun peut-il augmenter avec l'augmentation du prix du carburant ?

Pour essayer de répondre à ces questions, les techniciens de la direction « Urbanisme, Projets et Planification » de la Ville de Besançon envisageaient de conduire une enquête sur les préférences résidentielles des ménages dans la ville-centre, mais plusieurs discussions ont abouti sur la conclusion que les résultats n'apporteraient peut être pas beaucoup plus d'informations que des faits déjà connus. En effet, plusieurs enquêtes ont déjà été menées dans d'autres villes françaises et européennes (Bonaiuto *et al.*, 2003; Ellis *et al.*, 2006; Hur *et al.*, 2010), et plus localement, une enquête a

34. Ce service est responsable de la planification urbaine, et par le biais des documents de planification, influence la typologie des logements et des constructions à venir dans la ville de Besançon.

été réalisée dans le cadre d'une thèse (Youssoufi, 2011) sur 11 communes du secteur périurbain de Besançon (Youssoufi et Foltête, 2013) [35].

Mobisim pour apporter des réponses ?

Pour tenter de répondre aux questions des aménageurs de la Ville de Besançon, nous avons choisi, en collaboration avec ces derniers, de simuler deux scénarios d'aménagements réalistes, et d'en évaluer les impacts sur les mobilités résidentielles des ménages ciblés (les ménages avec enfant(s) et dont les revenus sont moyens ou élevés) et sur leur satisfaction résidentielle. Les scénarios choisis sont les suivants :

1. Un scénario de référence, qui consiste à prolonger les tendances actuelles de construction sur 20 ans. Il permet d'évaluer dans un premier temps les configurations émergentes dans un contexte de « laisser faire » résidentiel.
2. Un scénario actif de la part de la Ville de Besançon dans la politique de constructions à moyen terme : il simule un développement résidentiel contrôlé sur certaines zones de la ville-centre, en focalisant sur la construction de certains types de logements. Ce scénario nous permet d'effectuer des comparaisons avec les résultats de simulation du scénario précédent, pour tenter d'identifier des leviers d'actions en matière d'aménagement.

Cette dernière partie de la thèse permet de présenter deux exemples de scénarisation d'aménagement avec Mobisim, ainsi que les analyses thématiques effectuées pour essayer d'apporter, par la simulation, des réponses aux aménageurs. C'est aussi l'occasion de confronter le modèle Mobisim à des questions concrètes et précises posées par les aménageurs, et d'évaluer sa capacité à effectivement apporter des éléments de réflexion pour aider à la décision sur une politique de logements à conduire.

Seront présentés dans les chapitres 8 et 9 la modélisation de ces deux scénarios d'aménagement et leurs résultats de simulation, dont l'interprétation se focalise sur les questions posées par la Ville de Besançon.

35. Cette enquête portait sur la satisfaction résidentielle des ménages vis-à-vis de leur environnement résidentiel, notamment paysager, et une partie des résultats ont été utilisés pour paramétrer Mobisim-MR - cf. Chapitre 5.

Chapitre 8

Simulation d'un prolongement des tendances sur l'agglomération du Grand Besançon

La simulation du scénario d'un prolongement des tendances actuelles permet d'établir une base de référence pour les analyses thématiques : les tendances actuelles sont connues, dans le présent, mais même en faisant preuve d'une certaine abstraction, il est difficile de se représenter mentalement la configuration démographique et résidentielle d'une agglomération à échéance 2030. Ces premiers résultats de simulation nous permettent donc de créer une image de l'agglomération en 2030, afin de répondre aux questions suivantes :

1. Que signifie un prolongement des tendances actuelles des constructions des logements ? Quels logements peuvent être construits si cette tendance se prolonge ? Où seraient-ils construits ?
2. Compte tenu des comportements résidentiels modélisés dans Mobisim, quelles peuvent être les réactions des ménages, tant en ce qui concerne les déménagements que leur satisfaction résidentielle, face à un prolongement des tendances actuelles ?
3. Quelle peut être la localisation des ménages avec enfant(s) en 2030 ? Où habiteraient-ils ? Quelle serait leur satisfaction résidentielle ? Quelle serait l'offre en logements pour ces ménages ?

Ce chapitre nous permet de répondre à ces questions en abordant successivement les choix de paramétrage pour simuler le prolongement des tendances actuelles sur l'agglomération bisontine, et les résultats de simulation avec deux angles d'analyse : un état des lieux général de la situation telle que Mobisim la simule en 2030 (satisfaction

résidentielle et offre en logements) et une considération plus spécifique des ménages avec enfant(s) (couples avec enfant(s) et familles monoparentales) dont les revenus sont moyens ou élevés. Pour faciliter le discours, nous appellerons ces ménages les « ménages cibles ».

8.1 Paramétrage du scénario « prolongement de tendances actuelles »

8.1.1 La situation initiale : données sources

Pour définir la situation initiale (2010) de Mobisim, nous utilisons des données socio-économiques qui permettent de caractériser les individus, les ménages et les logements au niveau de l'IRIS pour les zones intra-urbaines et des communes pour les zones périurbaines (Recensement Général de la Population (RGP) - INSEE, 2009). Ces données sont utilisées pour générer la population synthétique des individus et des logements de Mobisim (cf. Chapitre 1).

Des données cartographiques très détaillées (cartes vectorielles) sont utilisées pour représenter la configuration spatiale de la zone d'étude en 2010 :

- les bâtiments existants, caractérisés par leur utilisation (résidentielle, industrielle, commerciale et autres), sont représentés par des polygones géoréférencés (BD TOPO - IGN, 2011) ;
- les activités économiques (usines, commerces et services, etc) correspondent aux établissement de la base SIRENE 2012 (géolocalisés de manière semi-automatique à partir de l'adresse postale pour cette étude), classés selon les types d'activités et leur nombre d'employés ;
- les parcs et squares correspondent aux espaces verts de moins de 2500 mètres carrés, identifiés sur la couche Végétation de la BD TOPO (IGN, 2010). Seuls les espaces verts intra-urbains, c'est-à-dire dans la ville de Besançon, ont été considérés ;
- les zones non constructibles sont également représentées par des polygones : zones protégées et zones de protection des eaux (DREAL, 2009), pentes raides (BD TOPO DEM - IGN, 2010), étendues d'eau (BD TOPO IGN, 2010), zones inondables (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie – http ://cartorisque.prim.net/ en août 2012) ;
- les réseaux de routes et de chemins sont représentés par des lignes (BD TOPO

- IGN, 2010), associées aux caractéristiques fonctionnelles des segments (capacité, vitesse, direction du trafic, pente). La voie des Mercureaux (Fig. 8.1) est également représentée bien qu'elle n'ait été ouverte qu'en juillet 2011 [1] ;
– le réseau de transports publics (bus, tram, et lignes ferroviaires régionales (TER)) est représenté par les arrêts et gares correspondantes, associés à des fiches horaires de passage (données saisies manuellement à partir de plans donnés par la CAGB).

Toutes ces données s'imbriquent pour représenter le plus fidèlement possible la communauté d'agglomération du Grand Besançon dans sa situation initiale, c'est-à-dire à l'heure actuelle, avant le début de la simulation. Les données cartographiques ou simulées (population synthétique d'individus, de ménages et de logements), et les activités économiques ont été associées à des bâtiments, géoréférencés dans l'espace.

Cette situation initiale configure la zone d'étude au temps $t_0 = 2010$. Elle est la base sur laquelle vont s'opérer les différentes évolutions simulées à partir des différents modèles et de la configuration de leurs paramètres.

8.1.2 Scénarisation des prolongements de tendance (BAU)

La simulation d'un scénario BAU [2] consiste à prolonger toutes les tendances actuelles pour la période 2010 - 2030, qu'il s'agisse des tendances démographiques, de comportements de mobilités (quotidiennes ou résidentielles) ou des tendances en développement résidentiel. Pour cela, il convient d'identifier quelles sont les tendances actuelles et de quantifier les valeurs de paramètres permettant de les reproduire.

8.1.2.1 Évolutions démographiques et comportements de mobilités

La configuration des paramètres pour le prolongement de tendance des évolutions démographiques est celle qui a été présentée dans le chapitre 4. Elle permet de reproduire une croissance de la population de +9% et une augmentation du nombre de ménages de +23% [3]. En 2030, les ménages sont en moyenne composés de 1,86 personnes, contre 2,09 en 2011 dans la CAGB [4].

1. La voie des Mercureaux est la partie sud-ouest de la voie de contournement de Besançon, construite entre 1996 et 2011 pour décongestionner l'entrée sud de la ville.
2. Built As Usual, ou scénario « laisser faire ».
3. Rappel des résultats du paramétrage de Mobisim-Démo dans le chapitre 4 - tableau 4.15.
4. Source : www.insee.fr

La configuration des paramètres de Mobisim-MR dans les simulations présentées ici est celle des valeurs par défaut, telles qu'elles ont été présentées dans le chapitre 5. Ces travaux ont été menés entre 2012 et 2014, aussi les conclusions issues de l'analyse de sensibilité (chapitre 7) du modèle n'ont pas été intégrées. Cette configuration des paramètres nous permet de représenter des comportements résidentiels tels qu'on les observe à l'heure actuelle, en France et sur l'agglomération bisontine. Ils restent les mêmes tout au long de la simulation : les ménages ne modifient pas leurs préférences résidentielles ou leurs exigences en cours de simulation.

À partir de la configuration initiale des réseaux de routes, des réseaux de transports en commun et de la localisation des différentes activités et des logements, le modèle de simulation des mobilités quotidiennes a été calibré en utilisant l'enquête ménages déplacements (EMD) de 2004-2005, réalisée conjointement par la CAGB, l'INSEE et le CERTU (Antoni *et al.*, 2011). Cela permet de simuler des chaînes de déplacements journaliers pour chaque individu, avec un mode de transport associé en fonction du temps de trajet (cf. chapitre 1 - section 1.2.3.1).

8.1.2.2 Évolutions des constructions de logements

Deux modèles permettent de simuler la croissance urbaine dans Mobisim : le développement résidentiel (définir les espaces propices à la construction des nouveaux logements sur l'ensemble de l'agglomération) et l'évolution des logements (définir les types de logements construits, leur nombre et leur localisation (entre Besançon et les communes périurbaines).

Les espaces disponibles à la construction (modèle de développement résidentiel) sont définis sur un fichier vectoriel (exclusion des zones non constructibles), et parmi eux, les zones présentant un intérêt à être urbanisées sont identifiées en amont de la simulation avec le logiciel MUP-City (Frankhauser *et al.*, 2010; Tannier *et al.*, 2010). Le fichier résultant est intégré comme un *input* du modèle (cf. chapitre 1 - section 1.2.2.2). La distribution spatiale des nouveaux logements à construire chaque année est définie par un second fichier d'*input*, représenté par une couche vectorielle des communes dans laquelle les effectifs d'appartements et de maisons sont des attributs.

La configuration des paramètres choisie pour simuler les nouvelles constructions du scénario de prolongement de tendances s'inspire des recommandations du SCoT de 2011 et du PLH de 2010. Pour l'ensemble de l'agglomération :

– 850 logements sont construits chaque année, dont 35% de maisons individuelles et 65% d'appartements.
– les maisons sont des logements de 5 pièces et plus. La taille des appartements est divisée de la manière suivante : 10% sont des studios, 20% des deux pièces, 25% disposent de 3 pièces, 25% de quatre pièces et 20% de cinq pièces et plus.

La distribution et la répartition spatiale des logements selon leur type sont présentées dans les tableaux 8.1 et 8.2.

Tableau 8.1 – Distribution des logements selon leur type et statut d'occupation

Type de logement	Statut d'occupation	Répartition
Maison	Propriétaire	35 %
	Locataire	8 %
	Bailleur social	0 %
Appartement	Propriétaire	20 %
	Locataire	21 %
	Bailleur social	16 %
Total		100 %

Tableau 8.2 – Répartition spatiale des logements selon leur type

Répartition spatiale	Type de logement	Répartition
Besançon	Maisons	14 %
	Appartements	86 %
Très petites communes	Maisons	100 %
Petites communes	Maisons	90 %
Communes moyennes	Maisons	86 %
Communes moyennes avec logements sociaux	Maisons	80 %

Au niveau local, 500 logements sont annuellement construits dans la ville de Besançon, contre 350 dans les communes périurbaines, distribués selon la part de population de l'agglomération dans chaque commune. Dans la ville de Besançon, 14% des logements sont des maisons, et 86% sont des appartements. En dehors de Besançon, 100% des logements construits dans les très petites communes sont des maisons, et cette valeur est dégressive lorsque la taille de la commune augmente (Tabl. 8.2). Les communes moyennes où est prévue la construction de logements sociaux proposent le moins de maisons individuelles. La taille des communes est définie de manière empirique, à partir des effectifs de population de chacune d'entre elles.

8.1.2.3 Contexte économique

Dans le modèle des mobilités quotidiennes est modélisé le prix du carburant, qui permet aux ménages d'évaluer le mode de transport qui leur coûtera le moins cher pour un déplacement donné. Ce paramètre nous permet également de simuler un changement du contexte économique global avec notamment l'augmentation régulière du prix du carburant au fil des années.

Le prix d'un baril de pétrole utilisé dans la simulation est de 78 $ en 2010 (selon le cours du dollars en 2009) et atteint 123,2 $ en 2030 [5]. Selon des chiffres donnés par le bureau d'étude ADETEC [6], le coût réel de l'utilisation de la voiture est de 0,34 € du kilomètre, dont le coût du carburant représente 30%.

Récapitulatif

Les changements simulés dans Mobisim pour le scénario BAU chaque année entre 2011 et 2030 sont les suivants :

- les caractéristiques des ménages. L'âge, le nombre d'enfant(s) et la composition du ménage sont modifiées par le modèle des évolutions démographiques. Les changements de revenus des ménages sont uniquement des répercussions de changements de composition des ménages (unions, séparations, naissances et décès), mais les revenus des individus ne changent pas. Les styles de vie des ménages changent de manière endogène également lorsque ceux-ci changent d'environnement résidentiel (urbain ou rural) et / ou à travers les changement de modes de transport préférés (voiture d'une part, et transport public, vélo et marche à pied d'autre part) ;
- l'offre en logements : elle augmente *via* le développement résidentiel, et varie dans le temps au gré de la vacance résultant des mobilités résidentielles des ménages aux itérations précédentes ;
- le prix du carburant ;
- le réseau de transports en commun est modifié en 2015, avec l'introduction du tramway, d'un nouveau réseau de bus et la création de deux nouvelles gares ferroviaires inscrites dans les documents de planification (Fig. 8.1).

D'autres variables restent inchangées par ailleurs :

5. Source : U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook 2011, DOE/EIA-0484 (2011)

6. http ://www.adetec-deplacements.com/ - décembre 2012

- le revenu des individus et leur CSP ;
- le nombre et la localisation des emplois, commerces et services ;
- le calcul du coût des logements, qui est basé sur les informations du marché du logement actuel. En d'autres termes, l'impact potentiel de la crise ou autres facteurs macroéconomiques n'est pas considéré ;
- les choix des ménages relatifs à leur logement et leur comportement de déplacements quotidiens : les ménages ont des comportements constants dans le temps.

8.2 Résultats de simulation du scénario BAU

Le scénario BAU a été simulé dix fois, et chaque résultat de simulation présenté ici est un résultat moyen des 10 réplications. Les premiers résultats présentés concernent l'ensemble des ménages, sur l'ensemble de l'agglomération. Ils permettent de constater les grandes tendances simulées sur la CAGB (ex. croissance démographique, tendances migratoires, satisfaction résidentielle globale), et de faire un état des lieux de la situation résidentielle globale telle que Mobisim la simule en 2030. Nous analyserons pour cela plusieurs variables : évolution de l'offre immobilière, revenus des ménages, répartition et le nombre de logements selon leur type d'occupation. Nous nous concentrerons ensuite sur la situation des ménages cibles, afin d'évaluer leur comportement dans le contexte immobilier simulé.

8.2.1 Résultats généraux

8.2.1.1 Développement résidentiel simulé

La carte 8.1 présente la configuration du bâti résidentiel (i.e. les logements) de l'agglomération telle qu'elle est simulée par Mobisim en 2030 avec le scénario en prolongement des tendances actuelles. Elle permet également de situer les deux nouvelles gares ferroviaires et de la ligne de tramway. En toute logique, l'ensemble des communes bénéficie de nouvelles constructions de logements, même si les communes périurbaines les plus importantes connaissent un développement résidentiel plus marqué.

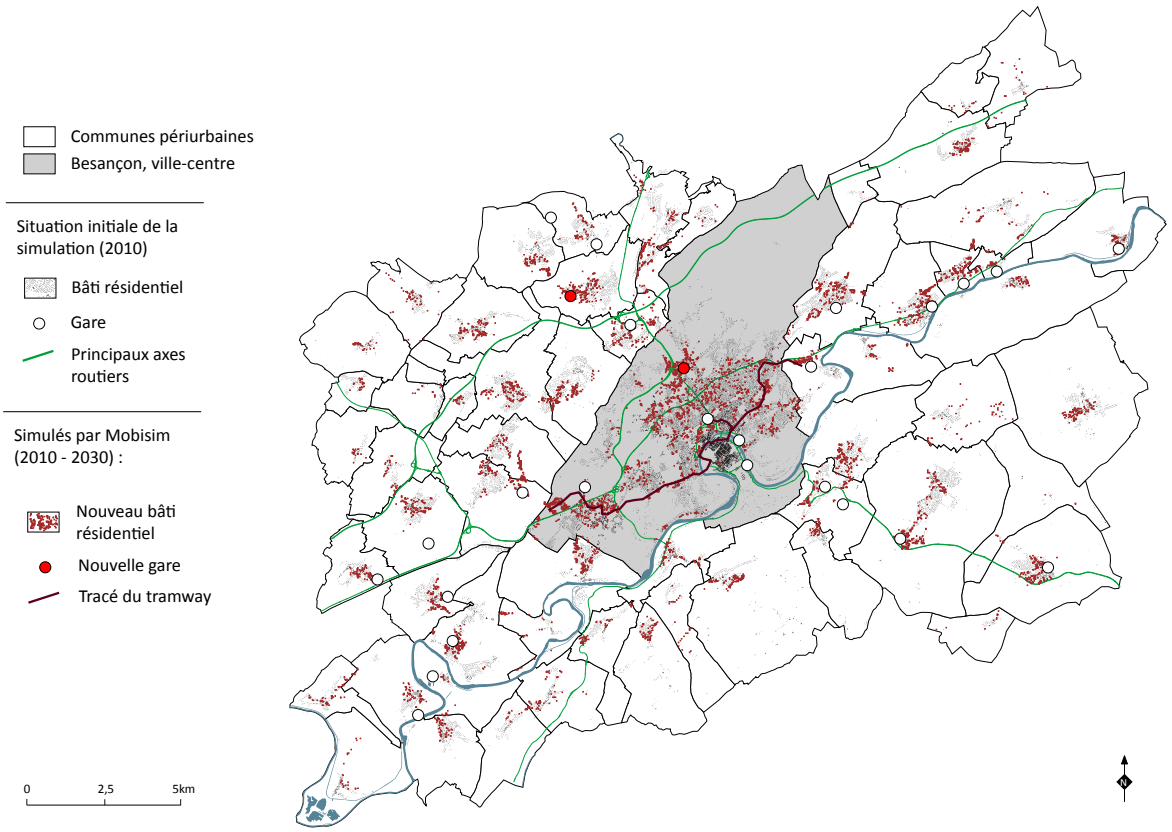


FIGURE 8.1 – Scénario BAU : configuration résidentielle simulée de l'agglomération bisontine en 2030

8.2.1.2 Évolutions démographiques simulées

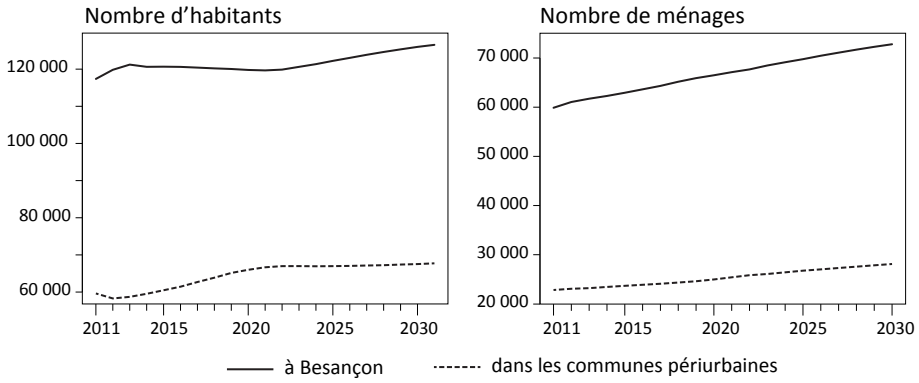


FIGURE 8.2 – Scénario BAU : évolution du nombre d'habitants et de ménages à Besançon, et dans les communes périurbaines

Le nombre d'habitants et de ménages augmente au cours de la simulation, à Besançon et dans les communes périurbaines (Fig. 8.2), néanmoins, le rythme de la croissance démographique est différent dans les deux cas. Le nombre d'habitants augmente seulement pendant les dix premières années de simulation dans les communes périurbaines, alors qu'il augmente seulement pendant les dix dernières années simulées à Besançon.

Le nombre de ménages augmente lui régulièrement pendant toutes la période de simulation, et ce plus fortement à Besançon que dans les communes périurbaines. En 2030, la CAGB compte au total plus de 104 900 ménages simulés ; elle n'en comptait que 87 041 en 2012.

8.2.1.3 Migrations et satisfaction résidentielles

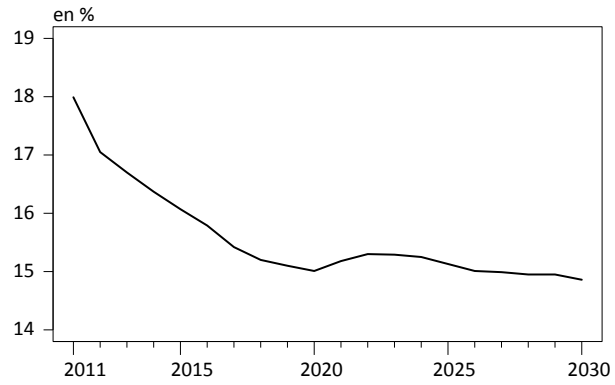


FIGURE 8.3 – Scénario BAU : taux annuel de migration dans l'agglomération

Le taux annuel de migration moyen simulé dans ce scénario de référence est de 18% en début de simulation (Fig. 8.3), ce qui est élevé comparé au taux de 13,7% attesté sur la CAGB en 2005 dans les documents d'urbanisme locaux (Source : PLH, 2005). Il diminue au cours des itérations, pour se stabiliser autour de 15% dans l'année 2020 simulée, ce qui nous rapproche d'une valeur plus réaliste.

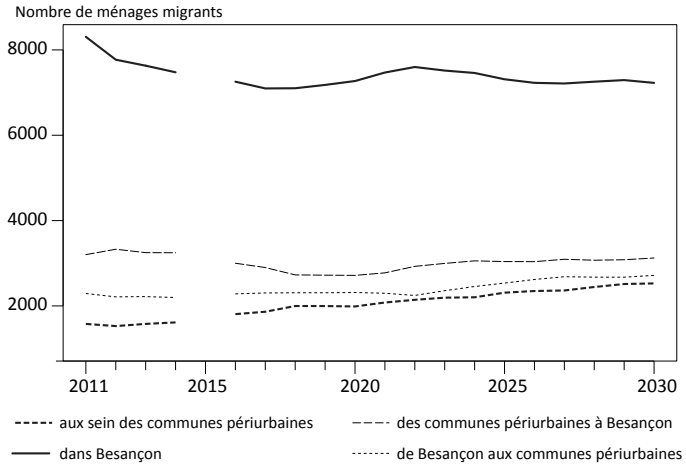


FIGURE 8.4 – Scénario BAU : évolution du nombre de migrants selon le sens de migration dans l'agglomération.
NB. Le nombre de migrants n'est pas calculé pour l'année 2015, parce que l'introduction du tram dans Mobisim se fait par une suspension de la simulation à cette date.

Deux constats peuvent être faits quant à l'organisation des migrations (Fig. 8.4) :

- la plupart des déménagements réalisés chaque année dans l'agglomération se passe dans la ville de Besançon, ce qui est cohérent avec le fait que la majeure partie de la population de l'agglomération réside dans la ville-centre ;
- dans l'ensemble, les ménages quittent plus les communes périurbaines pour s'installer à Besançon que l'inverse.

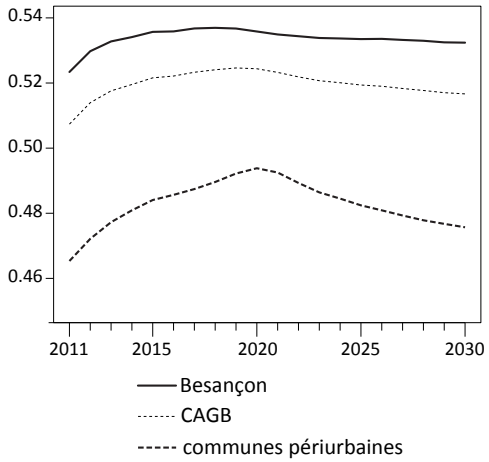


FIGURE 8.5 – Scénario BAU : évolution de la satisfaction moyenne sur l'agglomération entre 2011 et 2030

Enfin, la satisfaction résidentielle moyenne, c'est-à-dire ressentie par tous les ménages, est plus élevée à Besançon que dans les communes périurbaines (Fig. 8.5). Dans les zones périurbaines, elle augmente de 2011 à 2020, puis diminue. Cela peut provenir, au moins partiellement, de l'augmentation du prix du carburant : les ménages domiciliés dans le périurbain parcourent de plus grandes distances pour rejoindre leur lieu de travail ou exercer d'autres activités dans la journée.

8.2.1.4 Quelle offre en logements sur l'agglomération ?

Vacance des logements Le taux de vacance évolue beaucoup pendant les premières années de simulation - il augmente fortement dans les zones périurbaines et diminue dans les mêmes proportions à Besançon (Fig. 8.6) - puis diminue régulièrement. Après 2020, le taux de vacance dans les zones périurbaines se situe autour de 6%, ce qui correspond à une situation considérée comme « normale » par les acteurs opérationnels : un certain pourcentage de logements inoccupés est nécessaire dans le marché du logement pour que ce dernier puisse fonctionner correctement (Source : SCoT, CAGB - 2011). À Besançon pourtant, le taux de vacance simulé est assez bas,

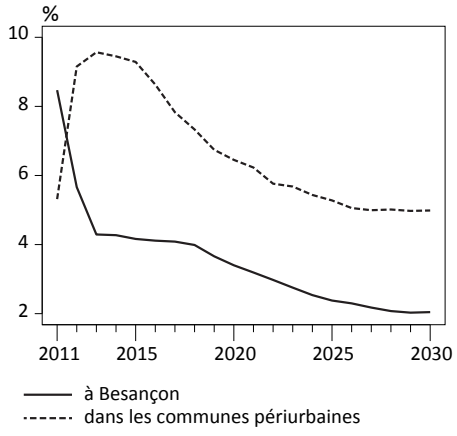


FIGURE 8.6 – Scénario BAU : vacance des logements

surtout en fin de simulation, ce qui signifie que le marché du logement y est saturé.

Les questions soulevées par la Ville de Besançon font intervenir, outre la composition des ménages et leur lieu de domicile, la question du revenu des ménages et du statut d'occupation recherché pour le logement. Pour compléter cet état des lieux très général et mieux comprendre quelle pourrait être la structure de l'offre en logements, nous avons donc souhaité étudier :

- la localisation des logements selon les différents statuts d'occupation ;
- la relation entre le revenu des ménages et leur statut d'occupation.

Localisation des logements selon le statut d'occupation La configuration spatiale de l'offre en logements ne change pas au cours de la simulation : les logements en location (du privé ou des bailleurs sociaux) restent principalement localisés à Besançon (Figures 8.7 and 8.8), tandis que les logements occupés par des propriétaires sont répartis plus uniformément dans toutes les communes de l'agglomération (Fig. 8.9). Au cours de la simulation, le nombre de logements disponibles à l'acquisition augmente plus que celui des logements en location, à la fois à Besançon et dans les autres communes.

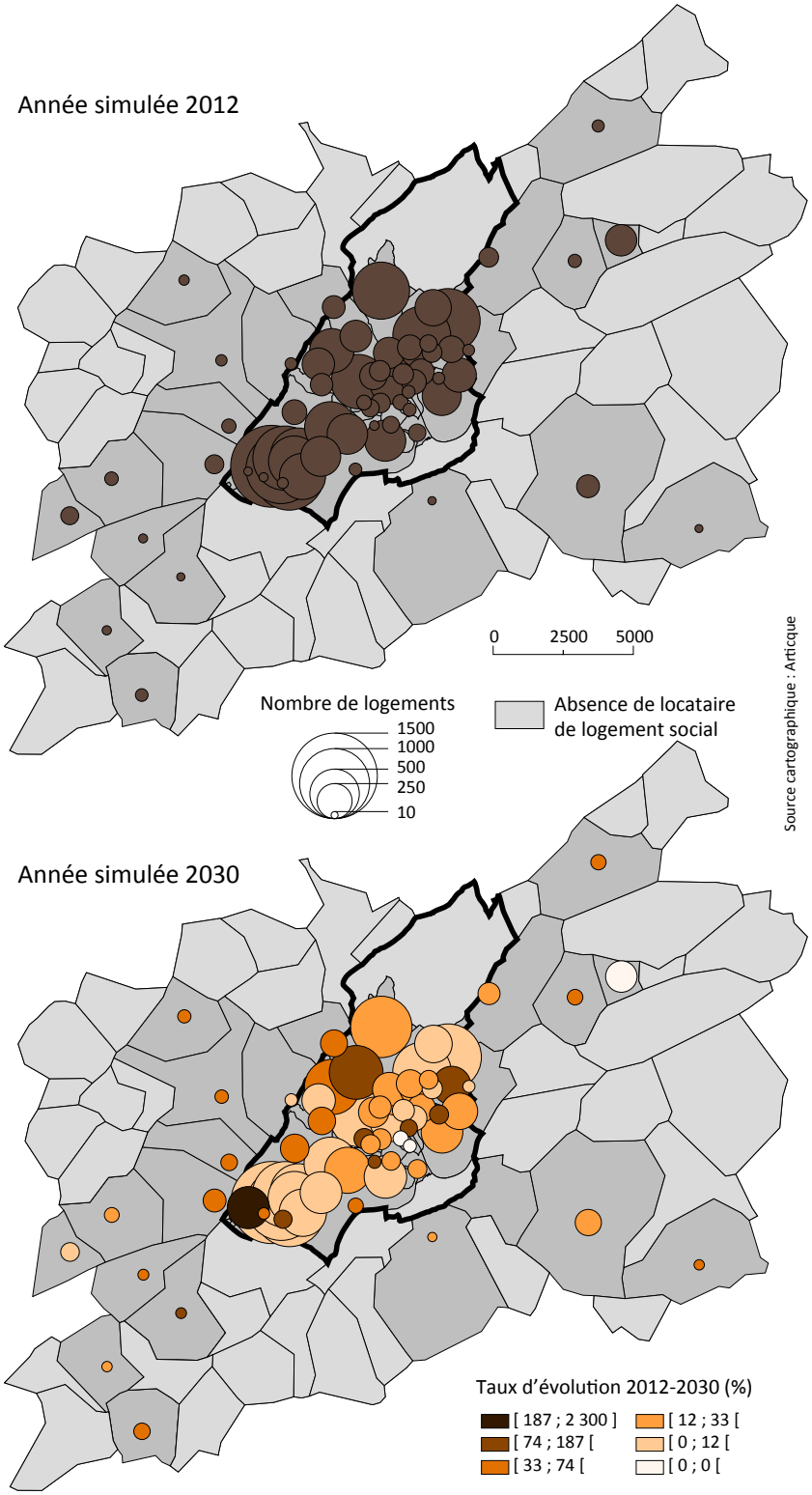


FIGURE 8.7 – Scénario BAU : localisation des logements sociaux

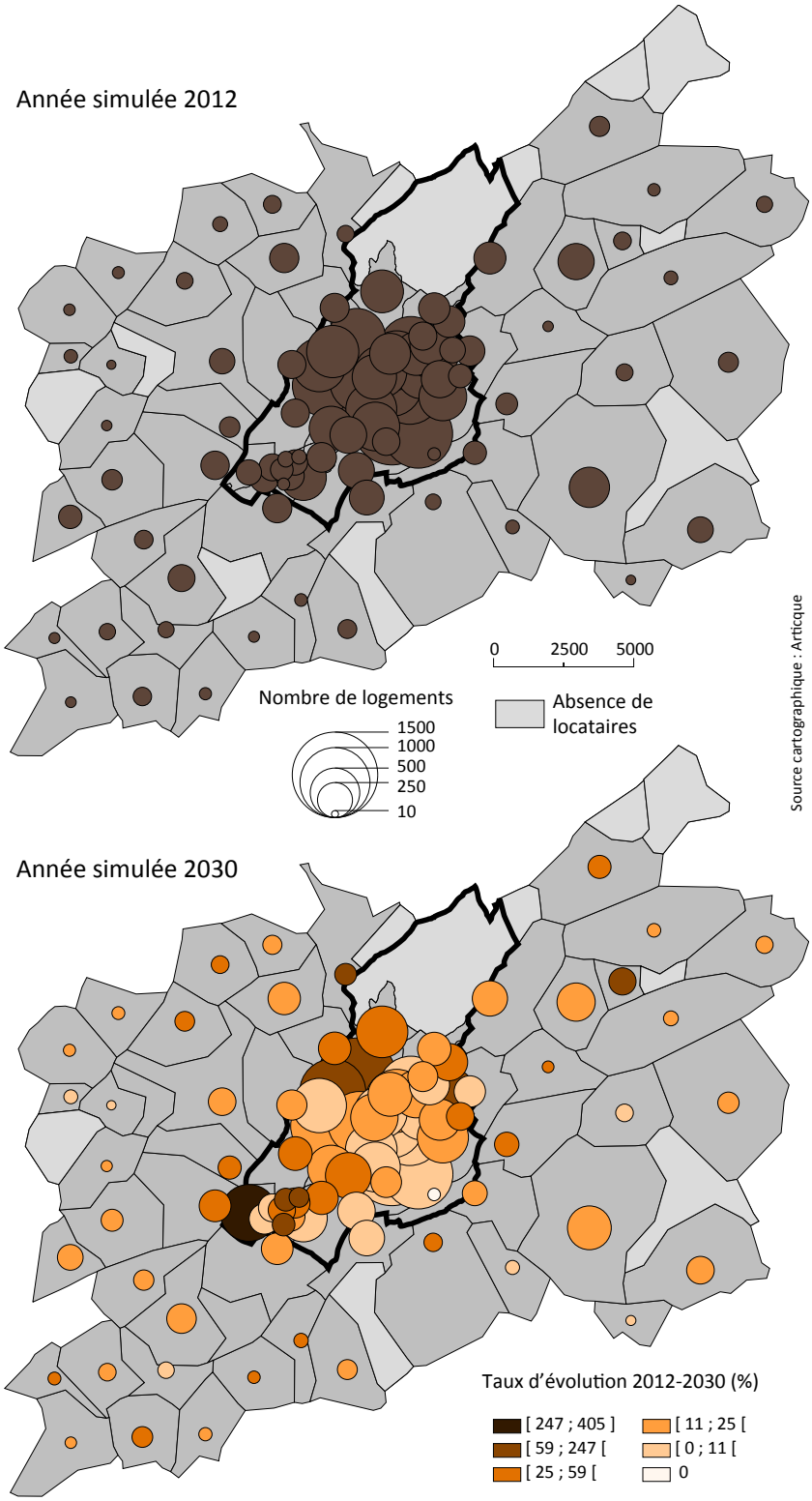


FIGURE 8.8 – Scénario BAU : localisation des logements en location

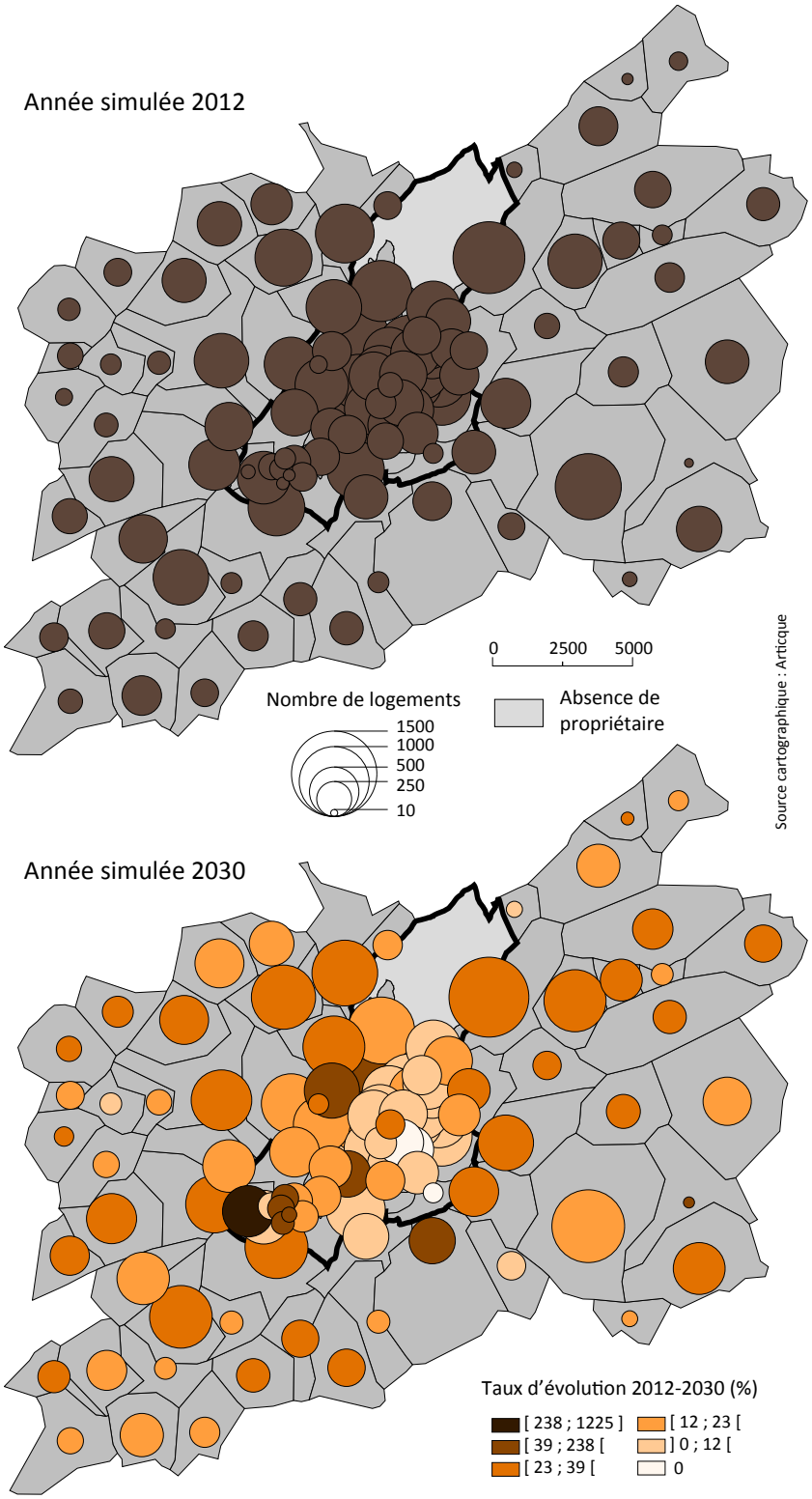


FIGURE 8.9 – Scénario BAU : localisation des logements occupés par des propriétaires

Revenu des ménages *versus* statut d'occupation des logements D'une manière générale, les propriétaires ont souvent des revenus plus élevés que les autres types d'occupants (Fig. 8.10), bien qu'ils soient tout de même environ 25% à disposer de revenus modestes. De manière assez attendue, la distribution des revenus des ménages occupant des logements sociaux est la plus basse mais on peut remarquer que les revenus des locataires privés sont également globalement plus faibles.

Par ailleurs, les revenus des ménages sont généralement plus élevés dans les communes périurbaines qu'à Besançon, et ce particulièrement pour l'ensemble des locataires (logements sociaux et privés). La distribution des revenus pour chaque statut d'occupation ne change pas au cours de la simulation, sauf pour les revenus moyens des locataires dans les communes périrurbaines qui diminuent régulièrement pendant les 20 années simulées.

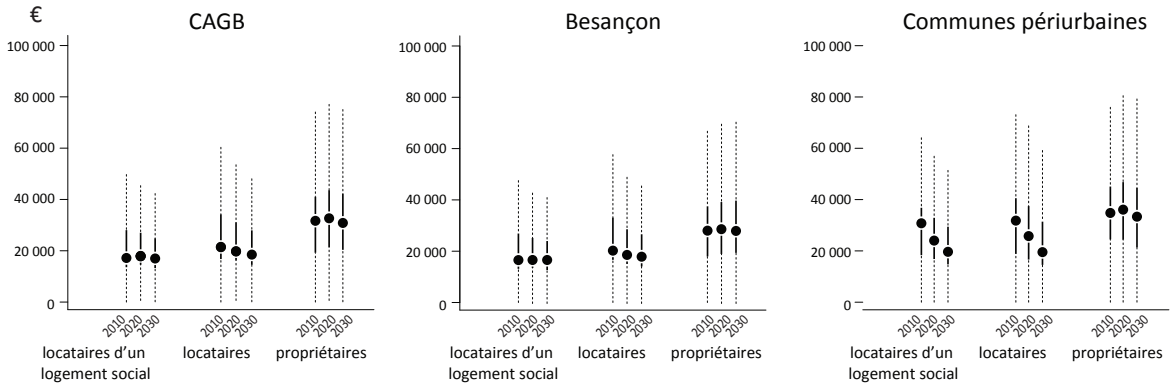


FIGURE 8.10 – Scénario BAU : distribution des revenus des ménages (en euros) selon le statut d'occupation de leur logement.

La représentation graphique de la distribution statistique du résultat est inspirée de l'alternative de E. Tufte à la boîte à moustache classique (Tufte, 2001). Le point noir représente la médiane de la distribution ; les extrémités des lignes noires représentent les valeurs des premier et troisième quartiles, et les extrémités des lignes pointillées correspondent aux valeurs minimum et maximum, sauf si cette valeur est supérieure à 1,5 fois l'écart inter-quartile (distance entre le premier et le troisième quartile). Les *outliers* (valeurs atypiques) supérieurs à 1,5 fois l'écart interquartile ne sont pas représentés.

Ces premiers résultats de simulation suggèrent que le modèle reproduit de manière assez satisfaisante les différences entre Besançon et les communes alentours, considérant ainsi les spécificités locales à savoir la concentration de la population et des logements

en location dans la ville de Besançon. L'évolution des deux variables cruciales pour l'étude des dynamiques résidentielles (le taux annuel de migration des ménages et le taux de vacance des logements) semblent assez réalistes, sauf pour les premières années de simulation. Cependant, ces instabilités constatées pour les premières années de simulation sont courantes dans la modélisation de systèmes complexes : à partir d'une situation initiale, il faut quelques itérations pour que les dynamiques simulées se stabilisent.

8.2.2 Focus sur les ménages cibles

8.2.2.1 Combien ? Où ? Quels revenus ?

En 2012, le nombre simulé de ménages avec enfant(s) et dont les revenus sont élevés ou moyens est de 22 552 sur la CAGB, soit 26% du nombre total de ménages de l'agglomération, et ils sont 20 073 en fin de simulation (19%), dont 78% sont des couples avec enfant(s). Globalement, le nombre de couples avec enfant(s) diminue donc sur la zone d'étude (Fig. 8.11). Ce déclin affecte la ville de Besançon pendant les dix premières années de simulation, puis les communes périurbaines à partir de 2020 et jusqu'à la fin de simulation. En fin de simulation (2030), il y a presque autant de couples avec enfant(s) dans le périurbain qu'à Besançon, alors qu'ils étaient moins nombreux dans les premières années simulées. En cours de simulation, le nombre de couples avec enfant(s) est même plus important dans les communes périurbaines.

La tendance est un peu différente pour les familles monoparentales, bien plus nombreuses à Besançon que dans les communes alentours. Au cours des itérations, leur effectif se stabilise à Besançon, et croît lentement dans le périurbain.

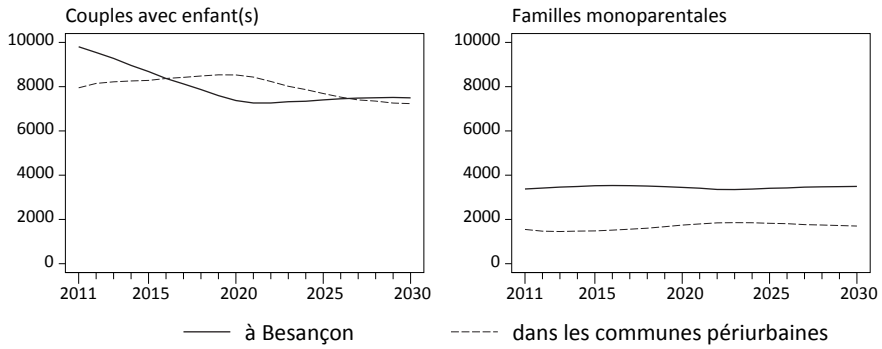


FIGURE 8.11 – Scénario BAU : évolution du nombre de ménages cibles, à Besançon et dans les communes périurbaines

La carte 8.12 permet de constater que le nombre de couples avec enfant(s) augmente entre 2012 et 2030 dans une vingtaine de communes périurbaines et seulement

cinq quartiers bisontins. Sur la figure 8.13, on peut voir que les augmentations et diminutions du nombre de familles monoparentales sont réparties de façon homogène dans les différentes zones de l'agglomération.

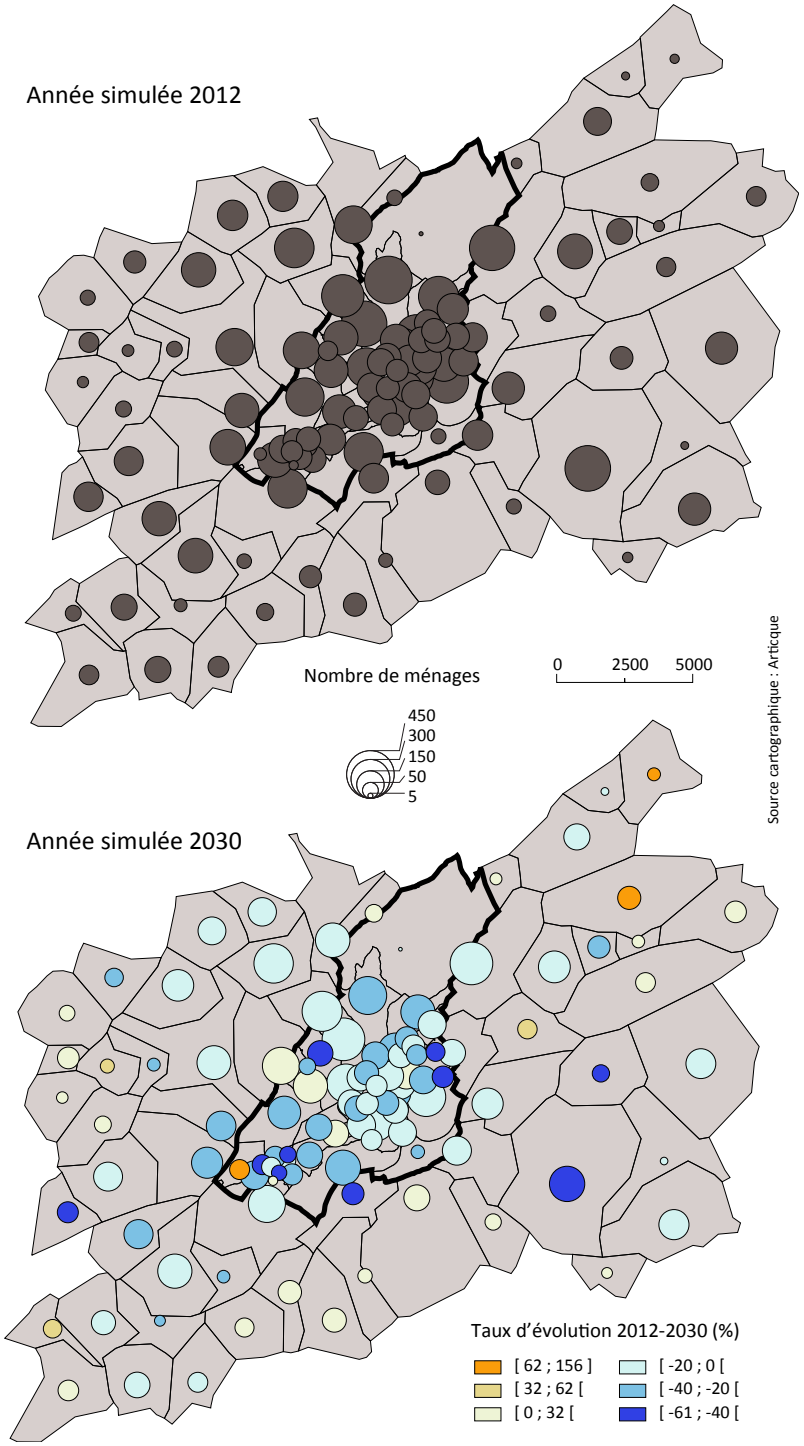


FIGURE 8.12 – Scénario BAU : localisation des couples avec enfant(s) aux revenus moyens ou élevés

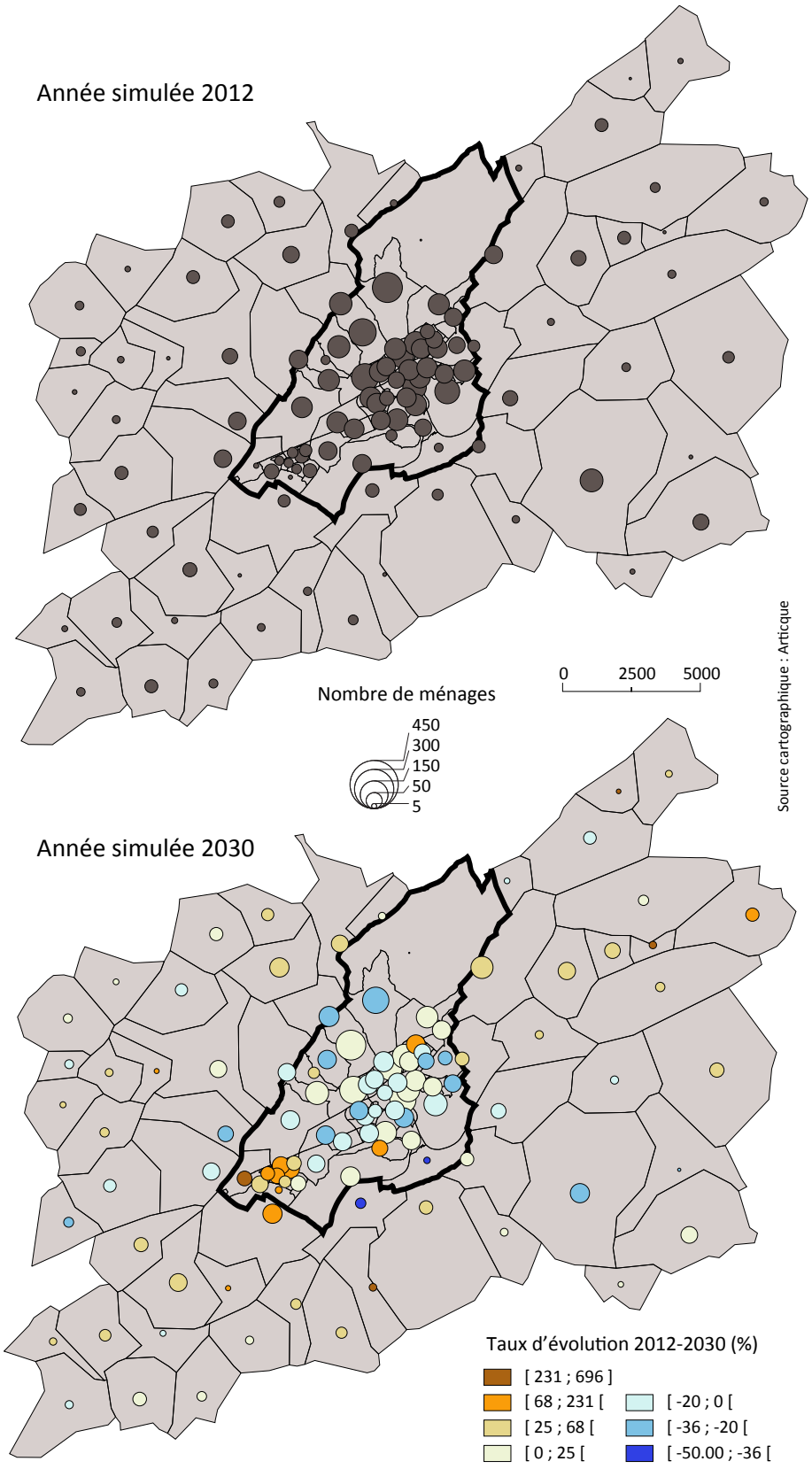


FIGURE 8.13 – Scénario BAU : localisation des familles monoparentales aux revenus moyens ou élevés

Les revenus des couples avec enfant(s) sont en général plus élevés que les revenus des familles monoparentales (Fig. 8.14), que ce soit à Besançon ou dans les communes périurbaines. Les revenus des couples avec enfant(s) diminuent lentement avec le temps, alors que ceux des familles monoparentales présentent plus ou moins la même distribution aux différentes étapes de simulation.

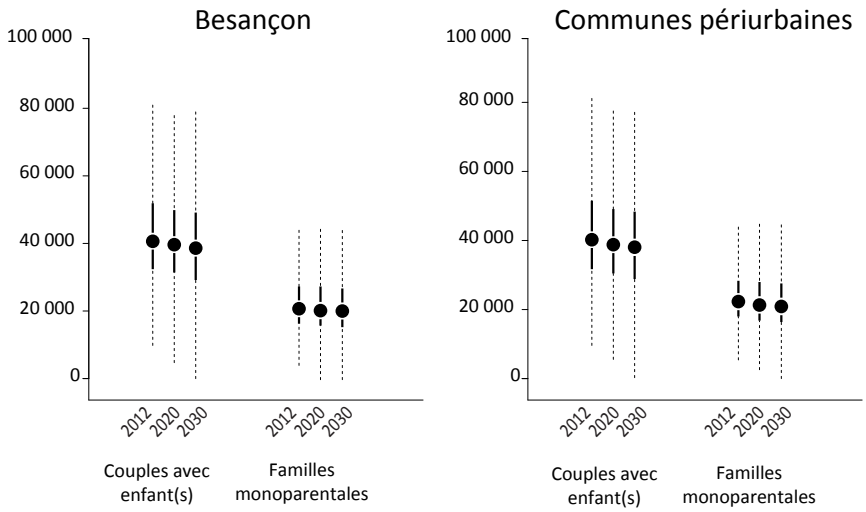


FIGURE 8.14 – Scénario BAU : distribution des revenus des ménages cibles (en euro) à Besançon et dans les communes périurbaines

8.2.2.2 Satisfaction résidentielle des ménages cibles

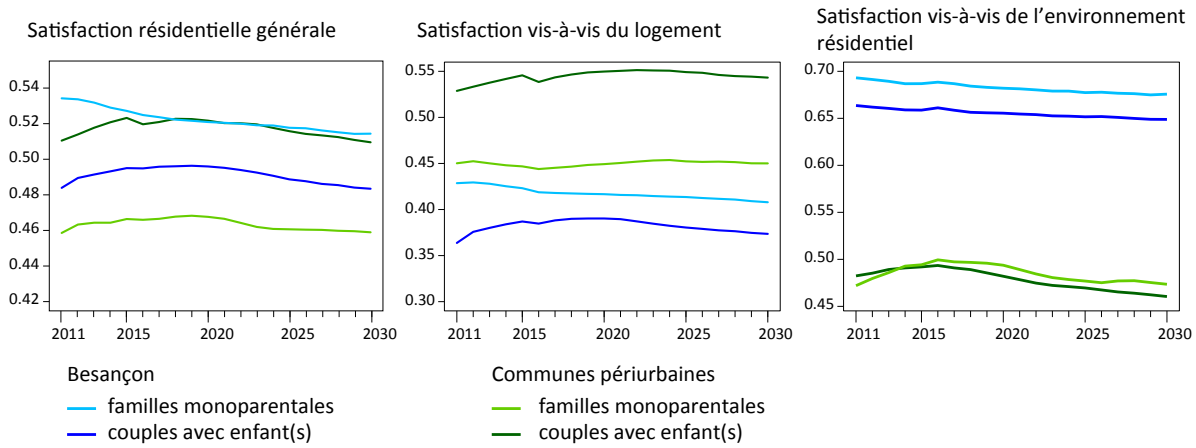


FIGURE 8.15 – Scénario BAU : satisfaction moyenne des ménages cibles
NB. Les axes des ordonnées sont différents sur les graphiques

La satisfaction résidentielle générale est en moyenne un peu plus faible pour les ménages cibles (Fig. 8.15) que pour l'ensemble de la population (Fig. 8.5). Les familles monoparentales résidant à Besançon et les couples avec enfant(s) résidant en périurbain

présentent des satisfactions parmi les plus élevées. Les premières sont particulièrement satisfaites de leur environnement résidentiel, et un peu moins de leur logement. À l'inverse, les seconds sont particulièrement satisfaits de leur logement et un peu moins de leur environnement résidentiel.

Pour les quatre groupes de ménages dissociés, la satisfaction à l'environnement résidentiel diminue avec le temps. Pour les ménages cibles résidant à Besançon, elle reste néanmoins particulièrement élevée. En conséquence, plus que l'insatisfaction à l'environnement résidentiel, c'est l'insatisfaction au logement, unanimement plus faible à Besançon, qui pousse les ménages cibles à quitter la ville-centre.

En se focalisant sur la satisfaction au logement uniquement, et en étudiant ses variations selon les caractéristiques des logements occupés par les ménages cibles, il est possible d'identifier assez clairement des points de mécontentement ou au contraire, des sources de satisfaction des ménages.

Tout d'abord, la satisfaction au logement des ménages cibles varie considérablement avec la taille du logement (Fig. 8.16 - 1 à 4). Sans grande surprise, les couples avec enfant(s) ne sont pas satisfaits dans des petits logements (une ou deux pièces), mais très peu de ménages sont dans cette situation : en 2012, 770 couples avec enfant(s) et 250 familles monoparentales, soit 1020 ménages au total, appartiennent à cette catégorie. Cependant, ce nombre croît pendant la simulation pour atteindre 1320 couples avec enfant(s) en 2030 et 420 familles monoparentales, soit 1740 ménages au total (ce qui reste moins de 10% du total des ménages cibles).

Ces résultats sont une conséquence de la diminution globale de la taille des ménages. En effet, seuls les plus petits ménages cibles (i.e. les familles monoparentales avec un ou deux enfants) sont plus nombreux en 2030 qu'en 2012 (environ 400 ménages supplémentaires dans cette catégorie). Inversement, le nombre de grands ménages a diminué au cours des simulations : 2800 couples avec un ou deux enfant(s) en moins en 2030, moins 800 familles nombreuses (couples avec trois enfants ou plus), et moins 100 ménages monoparentaux avec trois enfants ou plus.

La satisfaction des couples avec enfant(s) habitant dans des logements de trois ou quatre pièces est plus élevée (Fig. 8.16 - 2) ; sont concernés par cette situation un grand nombre de couples avec enfant(s) en 2012 (environ 5660), mais beaucoup moins en 2030 (environ 3610). Les familles monoparentales sont beaucoup plus satisfaites dans ces logements, mais elles sont peu nombreuses à en bénéficier, et ce nombre diminue encore avec le temps dans la simulation (2170 en 2012 contre 1370 en 2030).

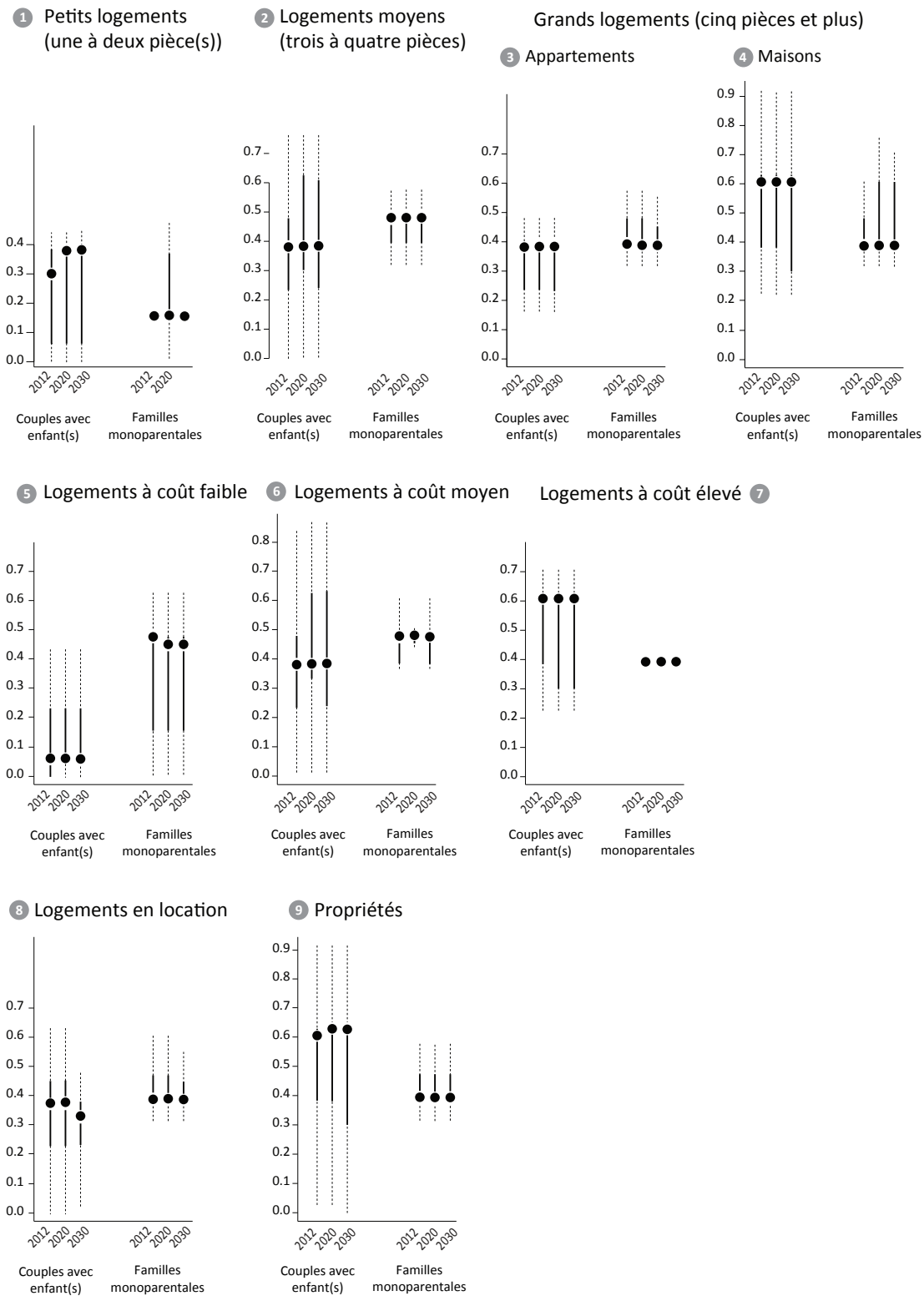


FIGURE 8.16 – Scénario BAU : distribution des valeurs de satisfaction vis-à-vis du logement, selon les caractéristiques du logement occupé

Néanmoins, l'augmentation de la satisfaction au logement n'est pas linéaire avec la taille de ce dernier : les ménages cibles ne sont pas forcément plus satisfaits lorsqu'ils occupent des logements plus grands (cinq pièces ou plus - numéros 3 et 4 sur la figure).

Seules les grandes maisons permettent d'augmenter un peu la satisfaction vis-à-vis des grands logements, mais seulement pour les couples avec enfant(s), pour lesquels la satisfaction médiane au logement atteint des valeurs de 0,6. 9867 ménages sont dans cette situation en 2020, 8291 en 2030. Cela étant, les autres valeurs de la distribution des satisfactions ne sont pas majoritairement élevées, puisque le premier quartile de la distribution des valeurs de satisfaction vis-à-vis du logement est compris entre 0,3 et 0,4 en 2030.

La satisfaction au logement des familles monoparentales lorsqu'elles habitent dans une maison est globalement plus faible que celle des couples avec enfant(s), bien qu'elle atteigne 0,6 ou plus pour quelques unes d'entre elles (moins de 200 en 2012, environ 400 en 2030).

Le lien entre la satisfaction vis-à-vis du logement et le revenu n'est pas intuitif pour l'ensemble des ménages cibles (Fig. 8.16 - 5 à 7). Les couples avec enfant(s), bénéficiant généralement de revenus plus élevés que les familles monoparentales, sont peu satisfaits de vivre dans des logements moins chers. Leur satisfaction dans des logements au coût moyen est assez diversifiée, avec une médiane autour de 0,35. Par contre, des coûts plus élevés n'entament pas forcément leur satisfaction au logement. La satisfaction au logement des familles monoparentales, quant à elle, augmente à mesure que le coût du logement diminue.

Enfin, en ce qui concerne les statuts d'occupation des logements (Fig. 8.16 - 8 et 9), les couples avec enfant(s) sont plus satisfaits lorsqu'ils sont propriétaires que lorsqu'ils sont locataires. Pour les familles monoparentales, leur satisfaction au logement ne varie pas avec le statut d'occupation.

Ces différents résultats nous permettent de dresser des profils de satisfaction vis-à-vis du logement pour les ménages cibles dans l'agglomération bisontine : maisons et accès à la propriété pour les couples avec enfant(s) qui peuvent également se satisfaire de logements plus chers alors que les familles monoparentales sont clairement plus satisfaites par des prix modérés voire faibles, dans des logements de taille moyenne.

8.2.2.3 Structure de l'offre en logements

Au regard des résultats qui viennent d'être exposés, nous nous intéressons maintenant à l'offre en logements, et sa répartition spatiale sur l'agglomération. La majorité des logements de taille moyenne est située à Besançon (Fig. 8.17). Ils sont souvent

associés à des coûts moyens, un peu moins souvent à des coûts faibles et sont très rarement chers. Deux tiers d'entre eux sont à la location, et un petit tiers en accès à la propriété. Au cours de la simulation, leur construction augmente régulièrement à Besançon. Comme nous venons de le voir, ces logements conviennent plus aux familles monoparentales qu'aux couples avec enfant(s). Par ailleurs, on trouve peu de logements de taille moyenne dans les communes périurbaines pour satisfaire ces ménages monoparentaux.

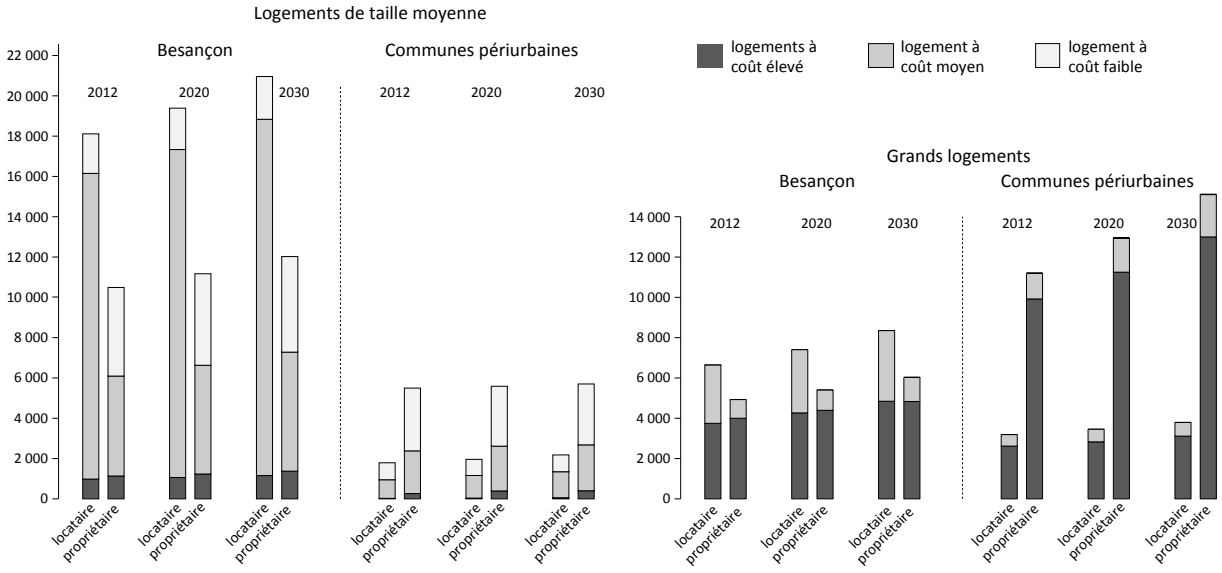


FIGURE 8.17 – Scénario BAU : nombre de logements grands et moyens selon leur coût et leur statut d'occupation, à Besançon et dans le périurbain.

Les grands logements sont beaucoup plus nombreux dans le périurbain qu'à Besançon, et leur nombre croît significativement tout au long de la simulation : en 2012, on dénombre 11 580 grands logements à Besançon et 14 390 dans le périurbain, et en 2030, 14 380 à Besançon et 18 910 dans le périurbain. La plupart d'entre eux ont des coûts élevés (et donc ne conviennent pas aux ménages monoparentaux). Plus rares sont les grands logements aux coûts moyens, et ceux-ci sont avant tout à la location dans la ville-centre. Assez logiquement, on ne trouve quasiment pas de grands logements à des coûts dits faibles dans Mobisim, à tel point qu'ils n'apparaissent pas sur les graphiques.

Les grands logements dans la CAGB sont principalement des maisons individuelles situées dans les communes périurbaines. Les appartements (principalement en location) se trouvent à Besançon, bien qu'il y ait aussi des maisons (la moitié en location, l'autre moitié en accès à la propriété) (Fig. 8.18). Le nombre de grands appartements croît à Besançon entre 2012 et 2030, mais plus lentement que dans les communes périurbaines.

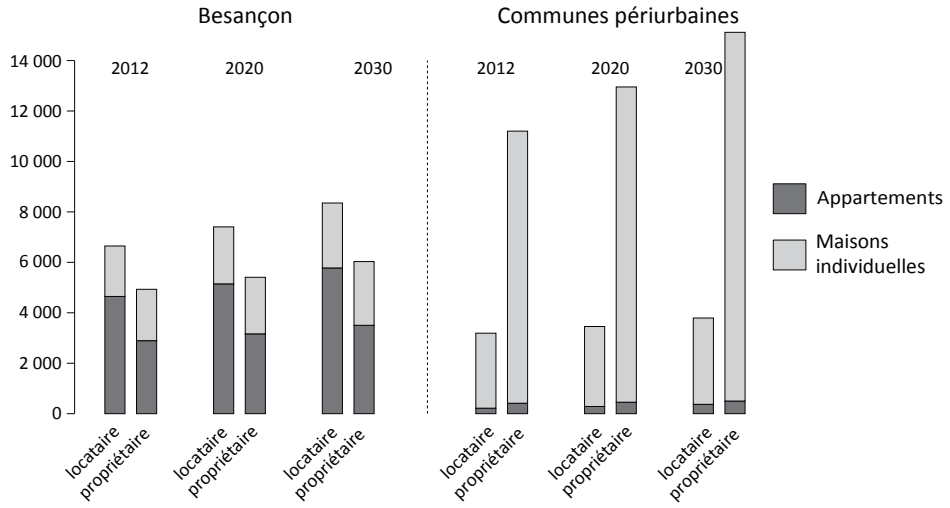


FIGURE 8.18 – Scénario BAU : nombre de grands logements selon leur type et leur statut d'occupation, à Besançon et dans le périurbain.

Très peu de maisons sont construites à Besançon, et inversement, très peu d'appartements sont construits dans le périurbain.

Les cartes 8.19 et 8.20 synthétisent l'ensemble des constats de cette étude sur la situation résidentielle des ménages cibles (satisfaction résidentielle des ménages et offre en logement), et permettent une perspective spatiale plus détaillée sur les résultats que l'on vient de présenter. Elles présentent l'une et l'autre la localisation de la vacance attractive pour les deux types de ménages cibles.

Les deux cartes montrent que le nombre de logements vacants dans la ville de Besançon diminue drastiquement entre le début et la fin de la simulation, alors que la diminution est moins prononcée dans les communes périurbaines. L'attractivité des logements vacants diminue également dans bon nombre de quartiers à Besançon. Cette baisse est particulièrement marquée pour les couples avec enfant(s). La vacance attractive dans les communes périurbaines est plus souvent élevée pour les familles monoparentales en 2030 qu'en 2012, alors qu'elle est plus faible pour les couples avec enfant(s).

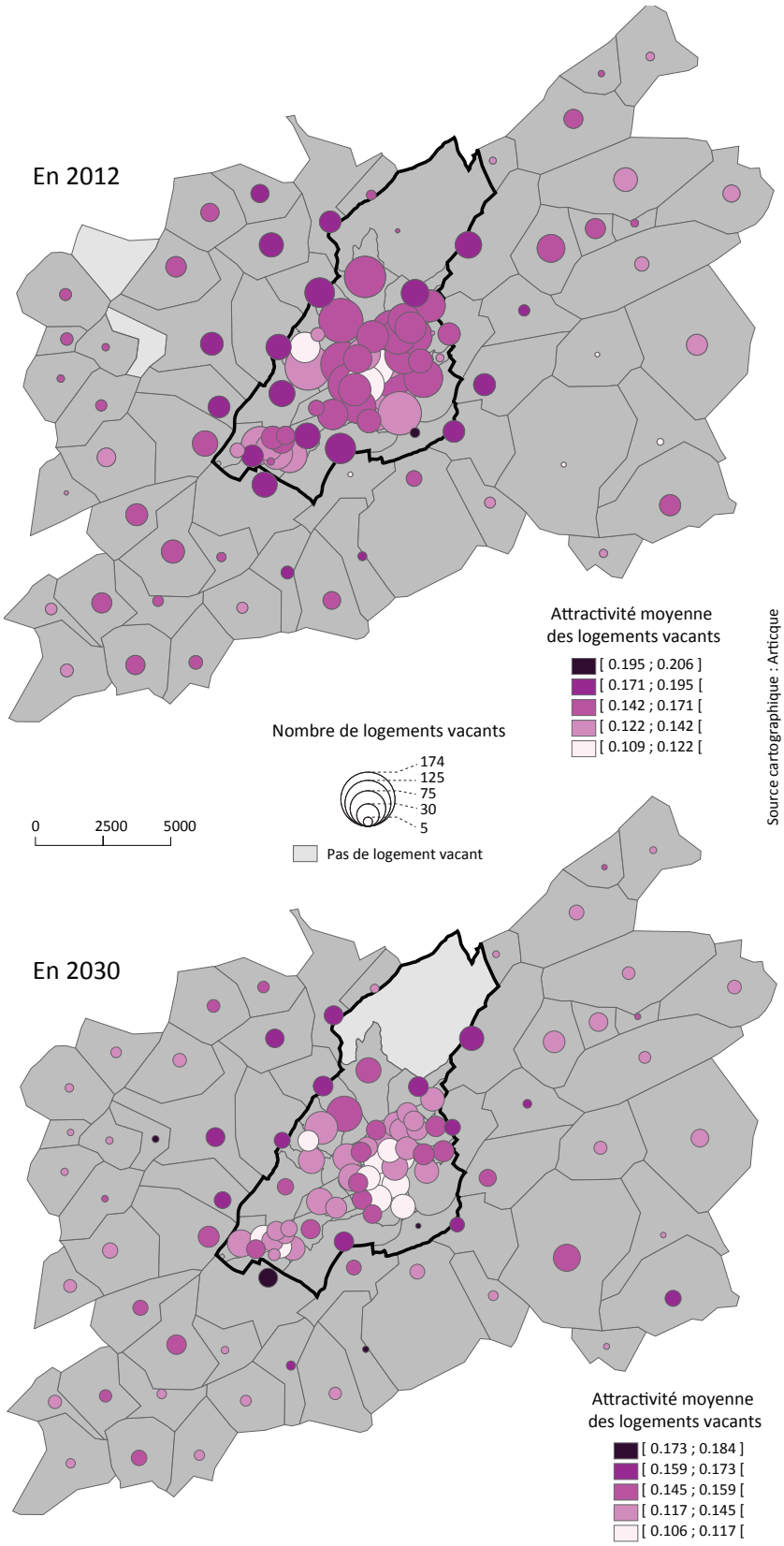


FIGURE 8.19 – Scénario BAU : nombre et attractivité moyenne des logements vacants pour les couples avec enfant(s) aux revenus moyens et élevés en 2012 et 2030 par communes / IRIS

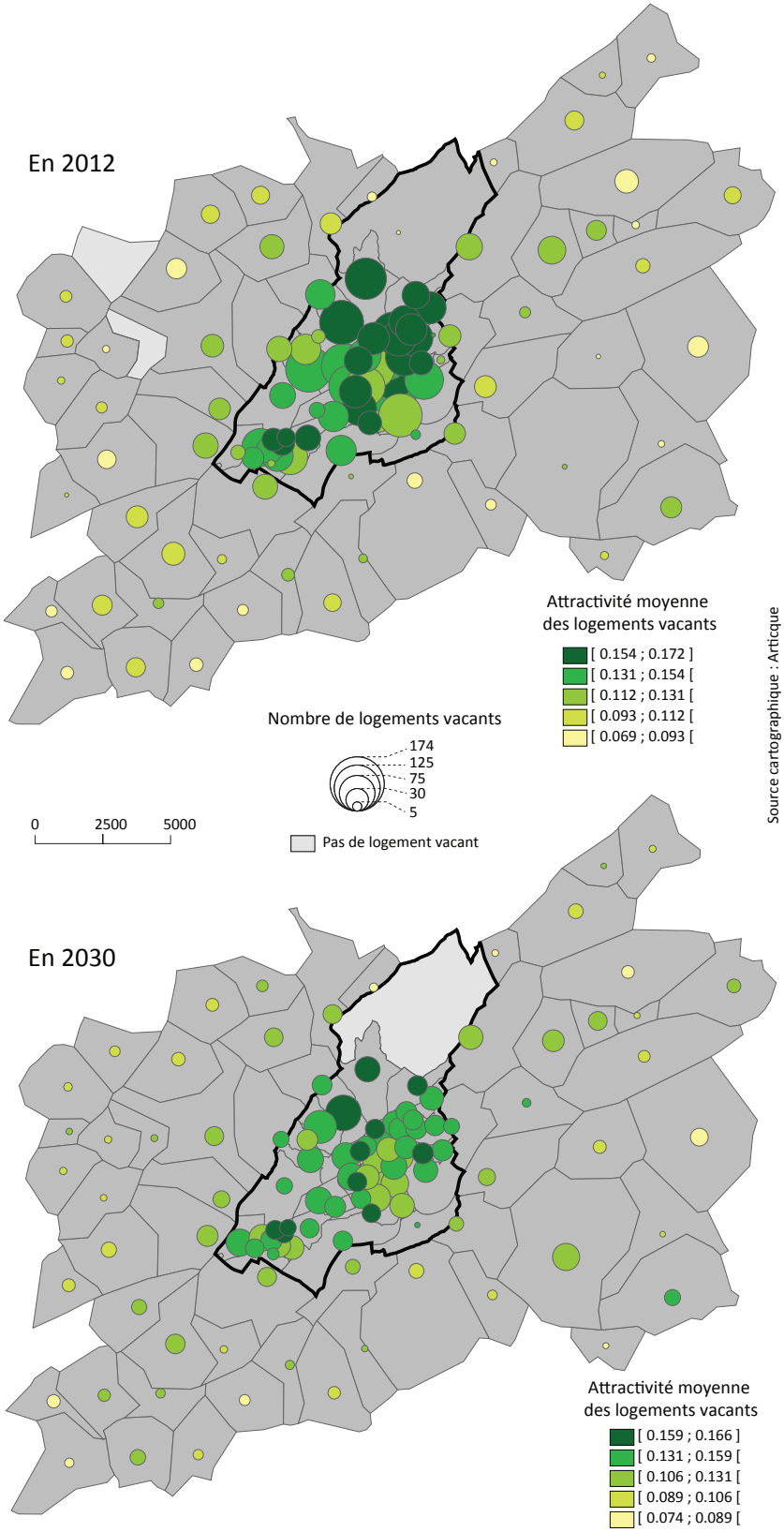


FIGURE 8.20 – Scénario BAU : nombre et attractivité moyenne des logements vacants pour les familles monoparentales aux revenus moyens et élevés en 2012 et 2030 par communes / IRIS

8.3 Conclusion des analyses sur le scénario prolongement de tendances

Le nombre de migrants selon le sens de migration pour les ménages cibles ne changent pas fondamentalement entre 2012 et 2030, en dépit de la considération dans ce scénario des objectifs préconisés par les documents de planification locaux (SCoT et PLH), de l'augmentation du prix du carburant et de l'introduction du tramway à Besançon.

Peu de logements vacants sont attractifs pour les couples avec enfant(s) dans la ville-centre, alors qu'ils sont plus nombreux dans les communes périurbaines. À cause de cette pénurie de grands logements disponibles à l'acquisition, devenir propriétaire dans la ville de Besançon est actuellement difficile pour un grand nombre de ces ménages. D'une manière générale, l'accès à la propriété est un désir répandu en France, ce qui renforce le fait que le coût de la location est relativement élevé comparé aux coûts d'achat. De plus, les grands logements disponibles à l'acquisition à Besançon sont principalement des appartements, et plus rarement des maisons individuelles, ce qui clairement ne satisfait pas les familles bi-parentales.

D'un autre côté, l'offre en logements à Besançon semble plus attractive pour les familles monoparentales. Plus précisément, le nombre de logements abordables, de taille moyenne et en location est important. En réalité, bon nombre des logements disponibles à l'acquisition sont des copropriétés peu entretenues et sont souvent inconfortables (faible isolation thermique et phonique, petites pièces). Ils présentent donc peu d'intérêt pour les ménages cibles. De plus, comme le montrent les résultats du modèle, l'offre à Besançon est moins attractive que l'offre en périurbain qui, bien que faible en nombre comparé à Besançon, n'est pas négligeable dans la totalité des logements disponibles à l'acquisition (Fig. 8.17). Ainsi, les ménages aux revenus moyens peuvent soit louer un appartement dans la ville-centre, soit acheter une maison à un prix abordable dans une commune périurbaine pour atteindre une satisfaction raisonnable vis-à-vis de leur logement.

Chapitre 9

Simulation de la mise en œuvre d'une politique volontariste de construction de logements par la Ville de Besançon

Les résultats simulés avec le scénario BAU ont donné une base pour mener une réflexion, avec les acteurs opérationnels de direction Urbanisme, sur l'identification des politiques d'aménagement qui peuvent être mises en place pour encourager les familles, mono- et biparentales, aux revenus moyens et élevés à vivre à Besançon même.

La première possibilité est de construire plus de maisons disponibles à l'acquisition à Besançon, notamment dans les zones les mieux desservies par les transports en commun, et plus particulièrement à proximité des arrêts de tramway, et bénéficiant d'une qualité paysagère élevée. Il se trouve qu'une des collines de Besançon (Rosemont) remplit ces critères parfaitement. Ainsi, cette première option pourrait être réalisée en autorisant la construction de maisons individuelles (plutôt que des appartements) au pied de la colline dans le Plan Local d'Urbanisme (PLU), et en imposant à la fois des critères architecturaux et paysagers de qualité dans le voisinage. L'investissement de la commune requis pour un tel projet serait amoindri et cela pourrait attirer des ménages avec enfant(s).

Cependant, cette solution irait à l'encontre des choix politiques de la Ville de Besançon : la construction des collines a été interdite dans les 30 dernières années, et le développement résidentiel à proximité est limitée à la construction de petits immeubles collectifs seulement.

Une autre possibilité envisagée serait d'appliquer des taxes d'habitation et taxes

foncières unifiées sur l'ensemble de l'agglomération, ce qui augmenterait considérablement les taxes dans les communes périurbaines, et les réduirait à Besançon. Cela pourrait se justifier par le fait que la population bisontine doit supporter les coûts (économiques et environnementaux) d'un grand nombre de services et d'équipements qui sont également utilisés par les périurbains. À l'heure actuelle, de nombreux élus des communes périphériques s'opposent fortement à une telle décision fiscale. Par ailleurs, nous n'avons pas souhaité tenir compte de cette possibilité dans le scénario présenté ici.

Une troisième possibilité est d'augmenter le nombre de logements grands et à coût élevé disponibles à l'acquisition, autres que des maisons individuelles (appartements avec terrasse ou petit jardin, à proximité d'une aire de jeux pour les enfants, et de voies piétonnes et cyclistes sécurisées) à Besançon, et d'augmenter le nombre de grands logements (tous types confondus) à faible coût, disponibles à l'achat également, dans la ville de Besançon. L'hypothèse est que la différence du total des coûts (prix du logement et coût des déplacements) encouragera les ménages à préférer un appartement en ville plutôt qu'une maison dans le périurbain.

Après avoir considéré ces différentes options, les acteurs opérationnels de la direction Urbanisme ont finalement défini un ambitieux projet de construction de logements pour les 15 prochaines années. L'objectif est de contrôler le développement résidentiel en réduisant la part des nouveaux logements construits par les promoteurs immobiliers, ce qui permet aux investisseurs privés de construire principalement de petits immeubles. Les opérations de contrôle des logements prennent la forme de négociations entre le conseil municipal de la Ville de Besançon et les investisseurs privés. Le but est d'imposer (principalement par la signature d'accords) une taille minimum des logements (quatre ou cinq pièces) et une part minimum (15%) des logements dont le prix maximum est fixé à l'avance (pour s'assurer d'une certaine quantité de logements abordables financièrement). Ces négociations s'ajoutent à la politique volontariste de construction de logements de la part de la Ville de Besançon, qui représente un coût significatif pour la municipalité et implique une certaine prise de risque. Le projet va-t-il réussir à modifier le nombre de ménages migrant en direction de Besançon ? Est-ce que les logements nouvellement construits seront occupés et, si oui, par quels types de ménages ?

Avec Mobisim, il est possible de simuler les développements résidentiels ainsi programmés par la Ville de Besançon et d'en étudier les impacts sur les migrations résidentielles intra-urbaines à horizon 2030. En ce qui concerne la modélisation, cela suppose de modifier seulement les développements résidentiels sur lesquels la Ville de Besançon

exerce un contrôle, tout en gardant les autres aspects du modèle constants (évolutions démographiques, comportements de mobilités, augmentation du prix du carburant).

9.1 Paramétrage du scénario de développement résidentiel contrôlé (DC)

La configuration de ce second scénario est issue d'une réflexion collective sur les modifications à apporter aux valeurs de paramètres du scénario BAU afin de simuler une politique de développement contrôlé en matière de construction de logements à moyen terme.

Ainsi, nous avons choisi de construire 1120 logements chaque année sur l'ensemble de l'agglomération, contre les 850 du scénario BAU. Dans les limites administratives de la Ville de Besançon, 770 logements sont construits annuellement, contre 500 pour le scénario BAU. Alors que le développement résidentiel du scénario BAU correspond simplement à un développement spontané (auto-organisation du développement résidentiel dans les différentes communes), le scénario « Développement contrôlé » (DC) intègre à la fois du développement spontané (450 logements par an à Besançon) et les projets contrôlés par la Ville de Besançon (environ 320 logements par an à Besançon entre 2010 et 2022, et 150 logements par an de 2023 à 2029).

Tableau 9.1 – Répartition des nouvelles constructions pour le développement résidentiel simulé : différence entre le scénario de développement contrôlé (DC) et le scénario du prolongement des tendances actuelles (BAU)

	Nombre de logements construits dans le scénario DC	Nombre de logements construits dans le scénario BAU
Total des constructions annuelles	1120	850
... à Besançon	770	500

Les logements issus du projet de la Ville sont composés de quatre ou cinq pièces ; 8,8 % des logements sont des maisons individuelles (ce qui représente 41% des nouvelles constructions). Les logements collectifs sont relativement petits : trois ou quatre étages seulement pour une emprise spatiale de 200 à 2500 m^2. Par exemple, un immeuble de 1000 m^2 correspond à deux logements de cinq pièces, trois logements de quatre pièces et deux logements de trois pièces par étage, soit 28 logements et 112 pièces au total. Comme l'emprise spatiale du bâtiment construit par la simulation est faible (400 m^2), on considère que chaque bâtiment contient environ 30 pièces. La taille des maisons

individuelles est de cinq pièces ou plus.

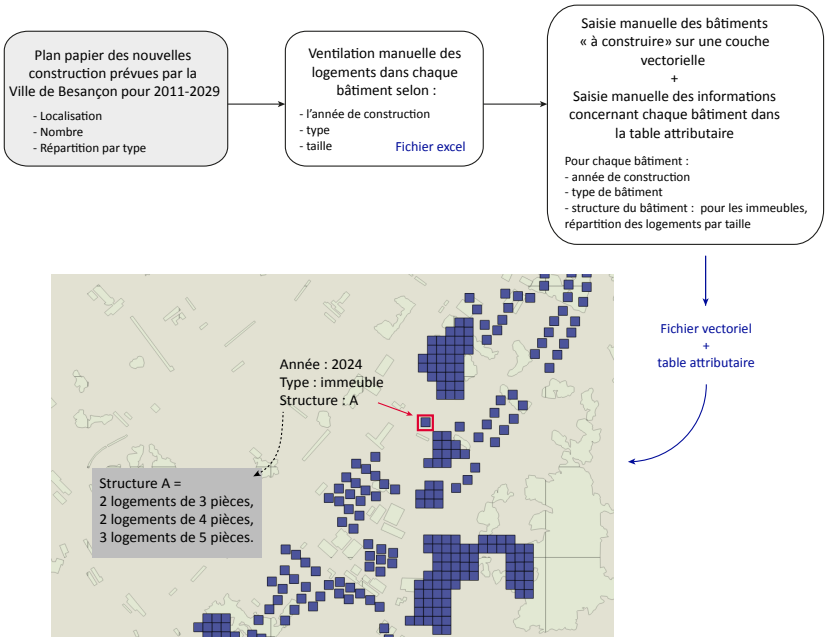


FIGURE 9.1 – Création du fichier des nouvelles constructions du scénario de développement résidentiel sur la ville de Besançon

Les techniciens de la direction Urbanisme nous ont fourni une carte détaillée des localisations de l'ensemble des projets contrôlés de logement sur la ville de Besançon, incluant le nombre de logements prévus pour chaque zone et pour chaque année entre 2011 et 2029, ainsi que leur répartition par type (appartements ou maisons individuelles). À partir de ces informations, nous avons ventilé le nombre de logements dans le nombre total de bâtiments à construire au cours de la simulation, puis créé et localisé manuellement chaque bâtiment dans la ville de Besançon sur une couche vectorielle (Fig. 9.1). À chaque bâtiment ont été affectés une date de construction, un type de construction (maison individuelle ou immeuble) et un certain nombre de logements pour les immeubles. Bâtiments et logements se sont vus attribuer des identifiants [1]. Au total, 10 IRIS sont concernés par la construction volontariste de la Ville de Besançon (Fig. 9.2).

1. Le paramétrage et la création de la couche vectorielle du scénario de développement résidentiel contrôlé ont été réalisés par Cécile Tannier et Armelle Kaufman.

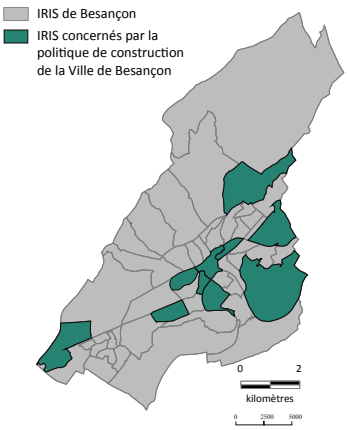


FIGURE 9.2 – IRIS concernés par la politique de construction volontaristes de la Ville de Besançon

9.2 Résultats de simulation : comparaison des deux scénarios

La simulation du premier scénario - prolongement des tendances actuelles - nous a permis d'identifier quelle configuration pourrait avoir la communauté d'agglomération du Grand Besançon (CAGB) en 2030 si les tendances actuelles se prolongeaient : offre en logement, satisfaction résidentielle des ménages et plus particulièrement, des ménages cibles, à savoir les ménages avec enfant(s) aux revenus moyen et élevés. Les résultats de ce premier scénario, dit "de référence", sont comparés à ceux issus du scénario de développement résidentiel contrôlé sur la ville de Besançon. Cette comparaison permettra d'évaluer dans quelle mesure le second scénario influence la mobilité résidentielle des ménages cibles.

9.2.1 Migrations et satisfaction résidentielle

Avec le scénario de développement résidentiel contrôlé dans la ville de Besançon (DC), le taux annuel de migration de tous les ménages dans l'agglomération est plus important que pour le scénario BAU (Fig. 9.3). On peut expliquer ce résultat par une offre en logement plus importante du fait du nombre plus élevé de logements construits chaque année.

La part des ménages déménageant de Besançon vers une commune périurbaine sur le total des migrants est clairement inférieure avec le scénario DC qu'avec le scénario en prolongement de tendances (Fig. 9.4). La politique de logements simulée a donc un effet positif compte tenu des questions posées.

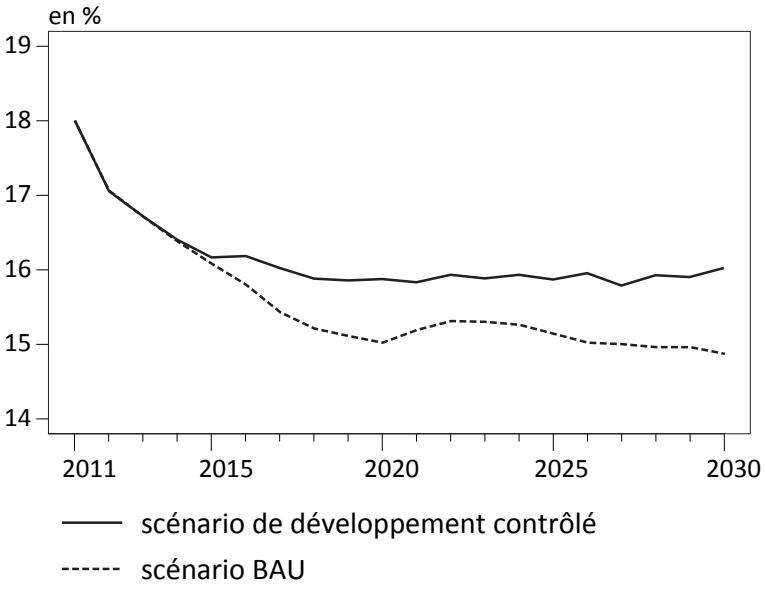


FIGURE 9.3 – Comparaison des deux scénarios : taux annuel de migration dans l'agglomération

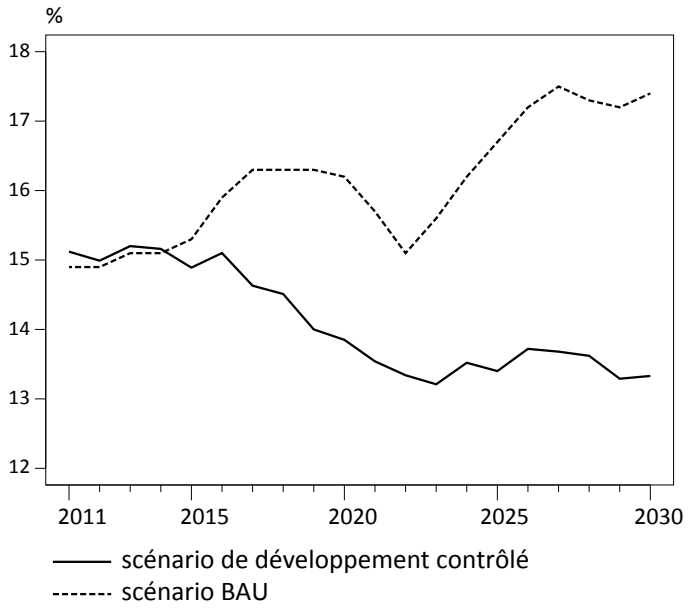


FIGURE 9.4 – Comparaison des deux scénarios : part des ménages migrants de Besançon aux communes périurbaines parmis l'ensemble des ménages migrants dans l'agglomération

Concernant la localisation résidentielle des ménages cibles (Fig. 9.5), le nombre de couples avec enfant(s) résidant à Besançon augmente en milieu de simulation pour le scénario du développement contrôlé. Cependant, l'effet disparaît en fin de simulation : cela peut s'expliquer par le fait que la politique de construction de logements par la Ville est moins active à partir de 2022.

Les familles monoparentales sont un peu plus nombreuses à Besançon que dans le scénario BAU, sur l'ensemble de la période. Dans tous les cas, la différence entre les

deux scénarios est plus tranchée sur la figure 9.4, qui comprend tous les ménages de l'agglomération que sur la figure 9.5, qui ne considère que les ménages cibles. Ce résultat suggère que les logements construits à Besançon suite à la politique contrôlée du développement résidentiel sont plus fréquemment occupés par des ménages avec enfant(s).

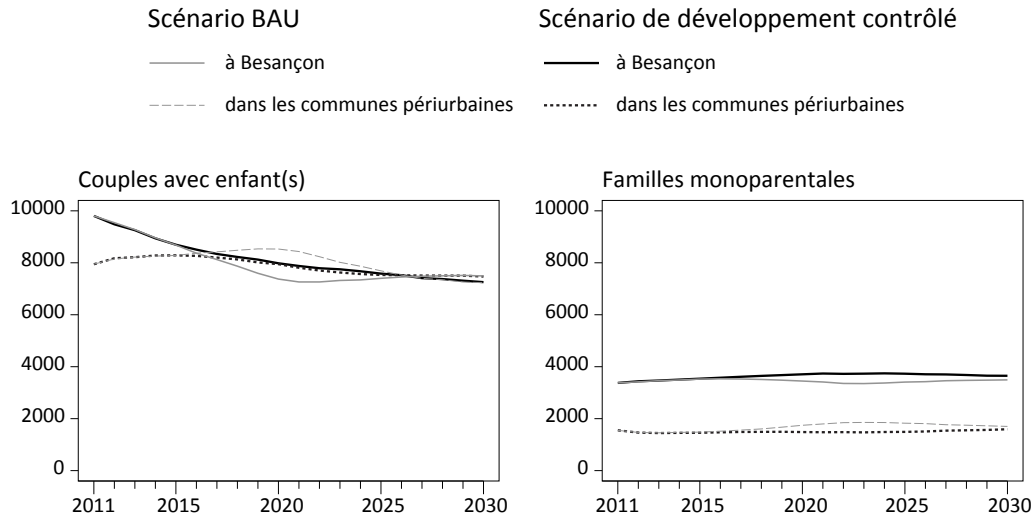


FIGURE 9.5 – Comparaison des deux scénarios : évolution du nombre de ménages cibles selon les lieux de résidence

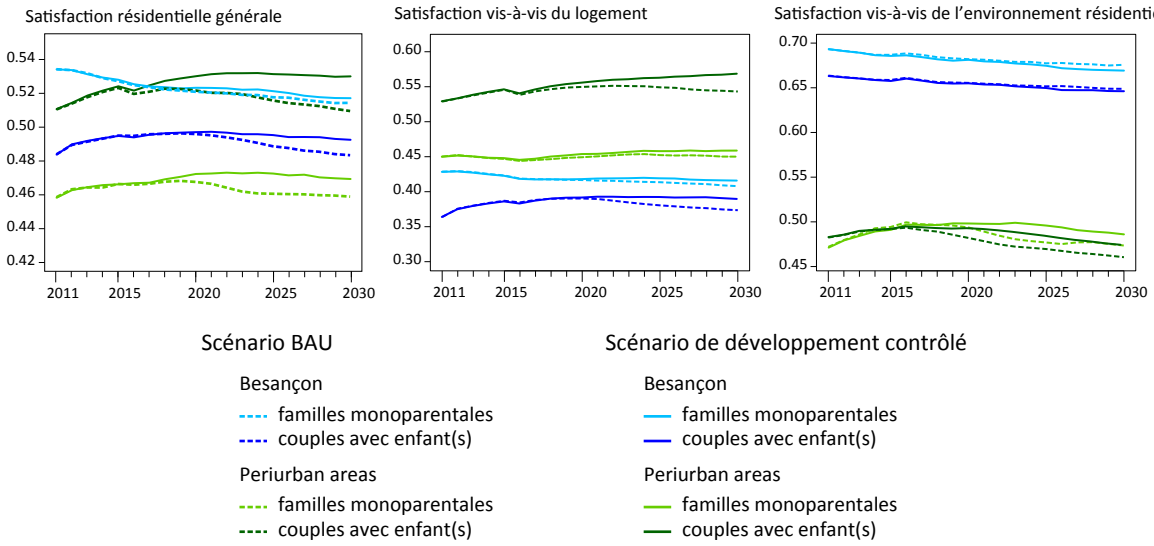


FIGURE 9.6 – Comparaison des deux scénarios : satisfaction moyenne des ménages cibles
NB. L'axe des ordonnées est différent sur les trois graphiques

La satisfaction résidentielle des ménages cibles, quels qu'ils soient, est plus élevée à Besançon dans le scénario de développement contrôlé que dans le scénario BAU (Fig. 9.6). On peut voir sur le premier graphique que la satisfaction n'est pas seulement plus élevée à Besançon mais qu'elle l'est également dans le périurbain. Une explication

possible est que les autres types de ménages résidant dans les communes périurbaines, et plus particulièrement les ménages retraités sans enfant, choisissent de quitter ces lieux de vie pour venir s'installer dans les nouveaux logements construits par la Ville de Besançon. Les couples avec enfant(s) peuvent alors occuper les logements laissés vacants dans le périurbain par les déménagements des ménages plus âgés. Cette hypothèse doit cependant être vérifiée. Si c'était le cas, elle confirmerait alors l'attractivité des logements construits volontairement par la Ville de Besançon, mais ne permettrait pas de répondre de manière satisfaisante aux objectifs de la municipalité.

9.2.2 Localisation des ménages cibles dans l'agglomération

Le nombre de couples avec enfant(s) en 2030 est plus élevé dans certaines communes périurbaines et dans les quartiers de Besançon concernés par les nouvelles constructions impulsées par la Ville de Besançon (Fig. 9.2), mais il est plus faible dans les autres communes ou quartiers de la ville centre (Fig. 9.7). Les différences respectivement positives et négatives entre les deux scénarios sont distribuées de manière régulière dans l'ensemble de l'agglomération. La situation est différente pour les familles monoparentales : dans la plupart des cas, elles sont plus nombreuses en 2030 à Besançon et moins nombreuses dans les communes périurbaines avec le scénario de développement contrôlé (Fig. 9.8).

9.2.3 Localisation de l'offre vacante attractive pour les ménages cibles

Les figures 9.9 et 9.10 montrent que le nombre de logements vacants attractifs à la fin de la simulation est clairement plus important dans le scénario de développement contrôlé que dans le scénario BAU, surtout pour la ville de Besançon. Les logements vacants sont en général moins attractifs dans le scénario de développement résidentiel contrôlé que dans le scénario BAU pour les familles monoparentales, surtout dans les communes périurbaines (Fig. 9.10). Cependant, le différentiel des valeurs d'attractivité entre tous les quartiers et communes est clairement en faveur de Besançon.

La situation est un peu différente pour les couples avec enfant(s) (Fig. 9.9) : les valeurs d'attractivité moyenne des logements vacants sont en général plus élevées avec le scénario de développement résidentiel contrôlé à la fois dans les quartiers bisontins et dans les communes périurbaines. Pourtant, le différentiel entre les valeurs moyennes d'attractivité entre les quartiers et les communes n'est pas particulièrement favorable à Besançon.

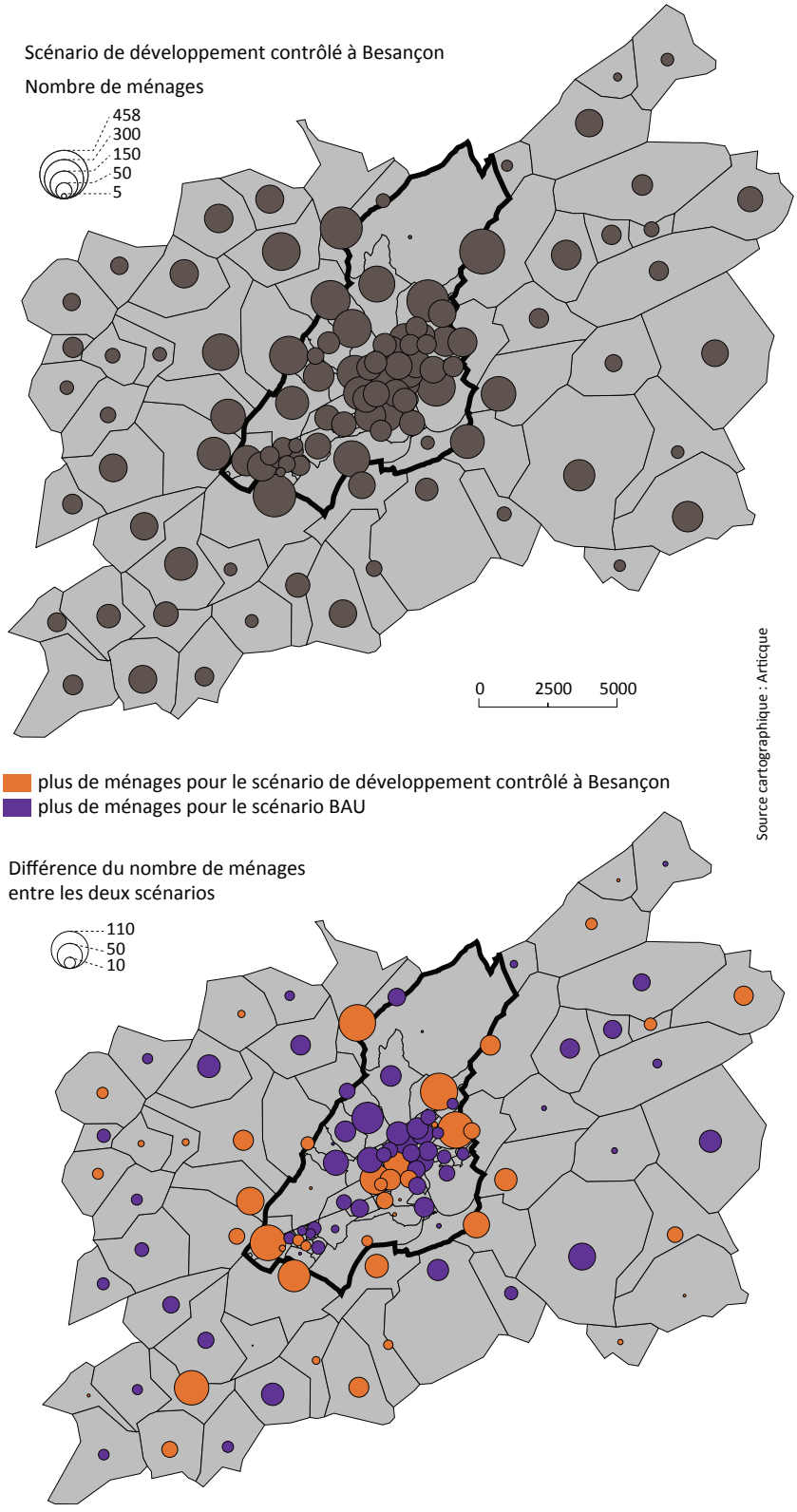


FIGURE 9.7 – Localisation des couples avec enfant(s) aux revenus moyens et élevés en 2012 et 2030 simulés

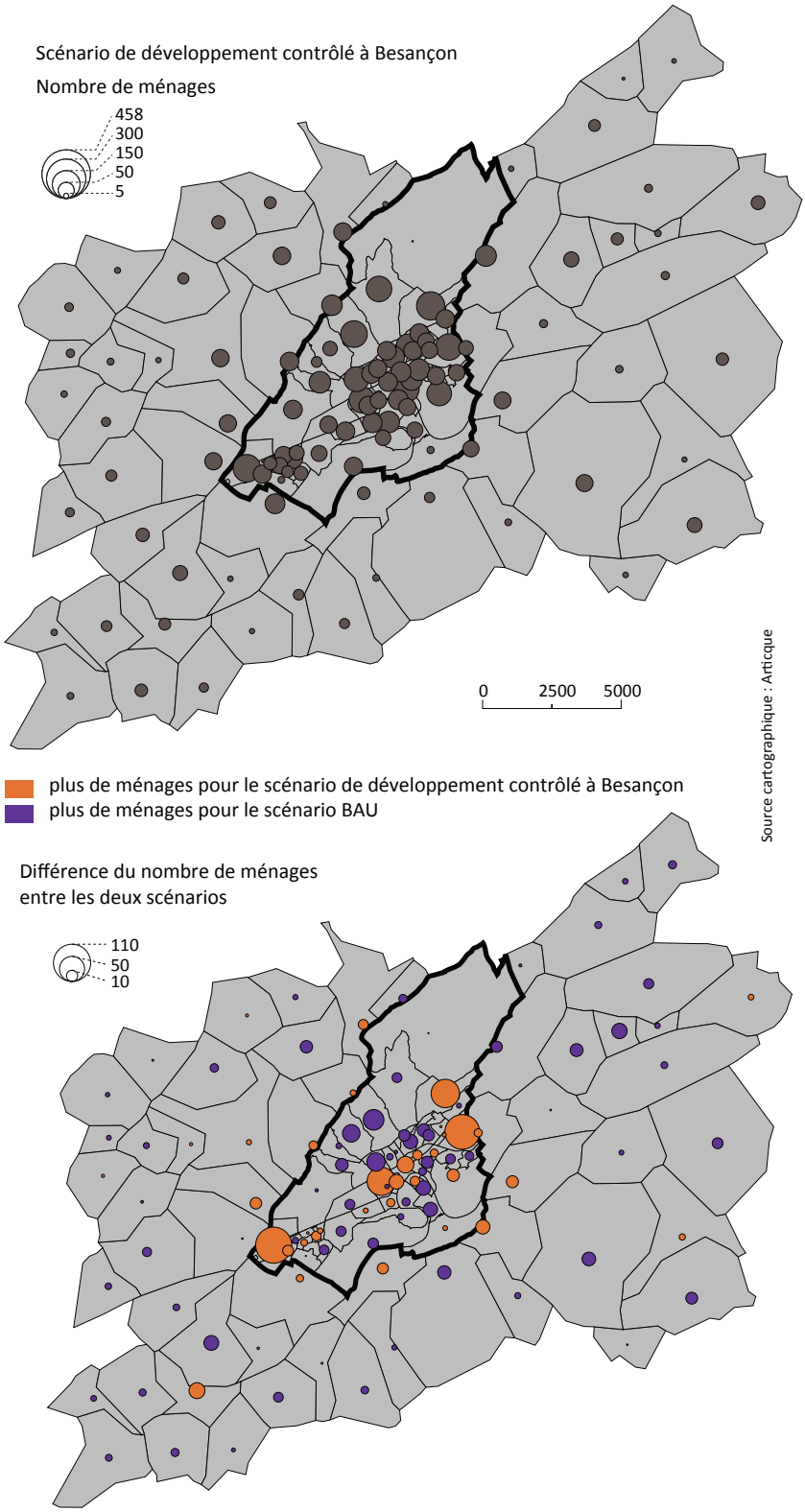


FIGURE 9.8 – Localisation des familles monoparentales aux revenus moyens et élevés en 2012 et 2030 simulés

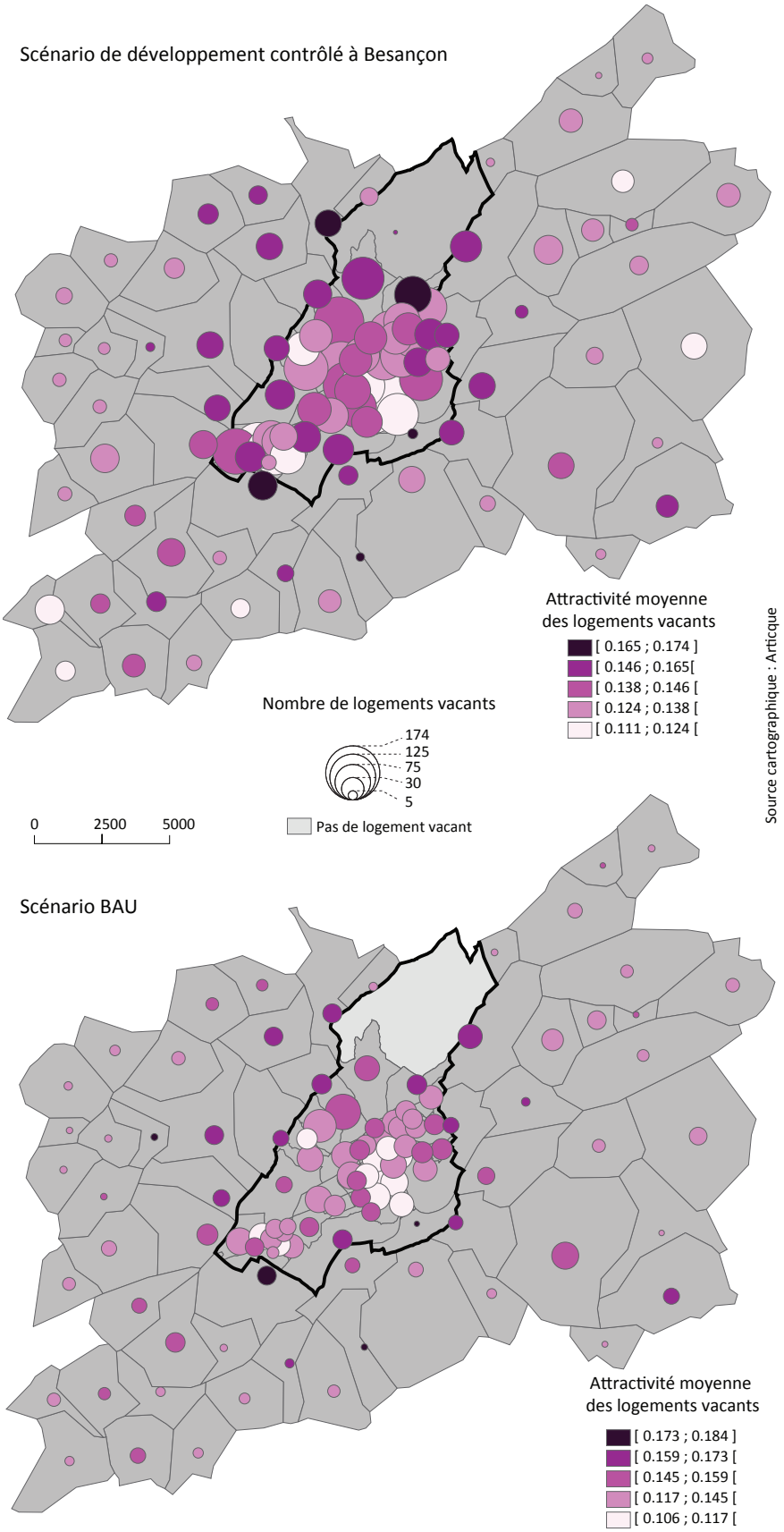


FIGURE 9.9 – Comparaison des deux scénarios : nombre et attractivité moyenne des logements vacants pour les couples avec enfant(s) aux revenus moyens et élevés en 2030 par communes / IRIS

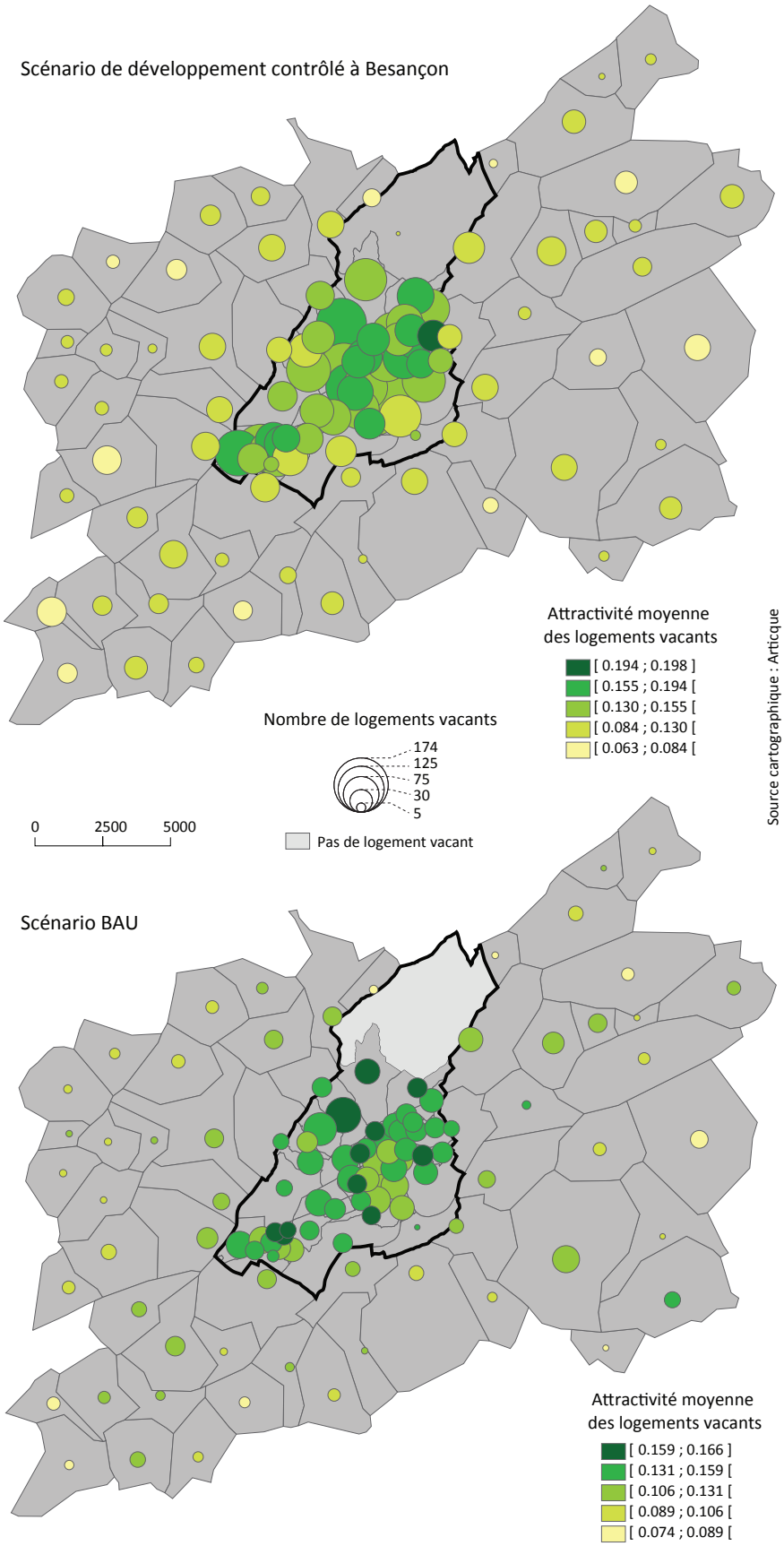


FIGURE 9.10 – Comparaison des deux scénarios : nombre et attractivité moyenne des logements vacants pour les familles monoparentales aux revenus moyens et élevés en 2030 par communes / IRIS

9.3 Bilan de cette analyse

Dans les conditions représentées par le modèle, le scénario de développement résidentiel contrôlé sur la ville de Besançon permet une réduction globale deu nombre de migrants en direction des communes périurbaines depuis Besançon. Davantage de familles monoparentales choisissent de vivre à Besançon pendant l'ensemble de la simulation (2011-2030). Les couples avec enfant(s) par ailleurs préfèrent vivre à Besançon jusqu'à l'année 2022 simulée seulement. À partir de cette date, la politique volontariste de construction de logement est moins active, ce qui peut expliquer cette moindre préférence. En 2030, le nombre de couples avec enfant(s) est légèrement plus élevé dans le périurbain comparé à la ville de Besançon (Fig. 9.5), ce qui est l'inverse de ce que l'on pouvait observer dans le scénario BAU (Fig. 8.11).

Ainsi, en résultat des mécanismes complexes façonnant les processus de localisations résidentielles simulées, en particulier le phénomène d'inertie et de compensation qui se produit au cours du temps, le scénario DC donne des résultats plus satisfaisants pour les acteurs opérationnels de la direction Urbanisme en milieu de simulation (année 2022) mais moins satisfaisants à la fin (2030).

Les résultats de simulation de ce second scénario peuvent encore être approfondis, de manière à estimer plus précisément le potentiel de réussite de cette politique de développement résidentiel contrôlé : qui occupe les logements nouvellement construits au cours de la simulation ? Quelle est la satisfaction des ménages cibles dans ces nouveaux logements ? Quel est le comportement des autres types de ménages en réaction à ces nouveaux aménagements ?

Conclusion de la quatrième partie

Ce travail mené avec la Ville de Besançon a permis de tester deux scénarios d'aménagement résidentiel sur l'agglomération du Grand Besançon, et de comparer l'impact de chacun d'entre eux sur les comportements résidentiels des ménages, et en particulier des ménages avec enfant(s) dont les revenus sont moyens et élevés. La question posée par les acteurs opérationnels de la Ville de Besançon correspond bien aux questions auxquelles la plateforme de simulation Mobisim peut répondre : le problème concerne un type de ménage particulier et certains types de logements parmi d'autres. La modélisation totalement individu-centrée de Mobisim (espace et individus) permet de cibler les entités questionnées et d'explorer les différents résultats de simulation les concernant, en combinant les points de vue (les ménages d'une part, les logements d'autre part mais également quels ménages dans quels logements).

De plus, l'exploration des résultats de simulation peut être élargie à d'autres types de ménages ou d'autres points de vue, en complément des premiers résultats. Ces résultats dépendent-ils uniquement des caractéristiques socio-démographiques des ménages ou dépendent-ils aussi de leurs styles de vie ? Quelle est la satisfaction vis-à-vis de l'environnement résidentiel dans les logements nouvellement construits ? Les déplacements quotidiens diminuent-ils avec le second scénario ?

Une autre qualité du modèle pour l'aide à la décision est de pouvoir apporter aux acteurs opérationnels des indicateurs comme la satisfaction résidentielle des ménages ou l'attractivité résidentielle de différents endroits de l'agglomération pour eux. Les résultats des différentes analyses exploratoires du modèle nous ont montré que Mobisim simule des résultats cohérents, ce qui signifie que ces indicateurs peuvent être utilisés comme des révélateurs de réactions des ménages aux différents aménagements qui leur sont proposés. Cela permet de ne pas seulement apporter une réponse comptable des impacts de chaque scénario (combien de ménages cibles habiteraient dans des grands logements ?) mais de pouvoir évaluer le « succès » des scénarios testés à travers l'attitude modélisée des ménages : il y aurait plus de logements qui correspondent potentiellement aux attentes des ménages cibles, mais permetteraient-ils effectivement de

les satisfaire ? L'augmentation du nombre de logements augmenterait-t-elle réellement les opportunités pour les ménages cibles ?

Ces deux caractéristiques de Mobisim nous ont permis d'aborder ce questionnement avec une certaine précision dans les réponses apportées (ex. la satisfaction des ménages cibles dans leur logement selon les attributs de ces logements), permettant ainsi de faire avancer le débat sur les solutions à mettre en place pour enrayer les processus déplorés par la Ville de Besançon (fuite des ménages avec enfant(s) vers les communes périurbaines). En tenant compte des interactions entre les ménages et des différents aspects du système urbain, Mobisim permet d'expérimenter par la simulation ce qui ressort habituellement de l'hypothétique, et d'enrichir ainsi la connaissance sur les dynamiques résidentielles des ménages.

Mobisim est capable de répondre à des questions concrètes posées par les acteurs opérationnels. Sa capacité à implémenter des scénarios d'aménagement de manière assez réaliste (localisation géoréférencée sur le territoire, nombre et caractéristiques des logements) et sa flexibilité dans la manipulation des résultats de simulation (pouvoir disposer d'autant de points de vue que les entités n'ont de caractéristiques et pouvoir croiser les résultats entre eux) lui confère une place de choix dans les outils d'aide à la décision.

Dans ces discussions avec les acteurs opérationnels de la Ville de Besançon, Mobisim a servi de médian, de support de discussion. Ce modèle n'est pas tant un outil technique qu'un outil de soutien à la réflexion sur des questions concrètes d'aménagement, qui permet de confronter des idées et de le mettre à l'épreuve du modèle.

Conclusion générale

Entre 2008 et 2012, la plateforme de simulation Mobisim a connu de profondes modifications : chaque composante a été réappropriée, modifiée, améliorée. Son modèle des mobilités résidentielles, fondé jusqu'en 2010 sur un modèle d'automates cellulaires, a été repensé par Cécile Tannier, pour aboutir à la version multi-agents présentée et utilisée dans cette thèse. Alors que de nombreux modèles des mobilités résidentielles proviennent de travaux de recherche en économie, le modèle de Mobisim développe une approche très géographique. Il modélise en effet la décision des ménages sur la base d'attributs spatiaux, et la dynamique urbaine résulte de la différenciation entre les lieux combinée aux caractéristiques des ménages (Mathian et Tannier, à paraître) : le « moteur de la dynamique endogène au niveau des ménages est le différentiel d'interactions potentielles entre les ménages et leur environnement, autrement dit l'attractivité différenciée des localisations résidentielles pour chaque ménage ».

En 2010, lorsque cette thèse débute, Mobisim-MR est formalisé, implémenté dans la plateforme et prêt à être paramétré. Le travail qui a été fait pendant cette thèse a permis de quantifier chacun des paramètres afin de faire fonctionner le modèle d'une part, et a consisté à explorer la cohérence des résultats de simulation qu'il génère en sortie d'autre part.

Rendre Mobisim-MR opérationnel pour la simulation des mobilités résidentielles

La première étape de cette « mise en route » du modèle a été de créer, au sein de la plateforme Mobisim, un modèle permettent de simuler de manière dynamique et individu-centrée les évolutions démographiques d'une population. La conception du modèle s'est inspirée de la microsimulation et du modèle Destinie de l'INSEE (Bonnet *et al.*, 1999). Le modèle Mobisim-Démo a été paramétré à partir d'informations issues de différents recensements de la population, afin de reproduire les comportements démographiques actuellement observés. La calibrage du modèle résulte d'une démarche d'ajustement des valeurs de paramètres par essai-erreur, pour atteindre une projec-

tion démographique estimée dans le cadre de ce travail. Ces résultats de simulation interviennent comme des *inputs* de Mobisim-MR : chaque année de simulation, chaque individu de Mobisim évolue dans sa « vie personnelle », ce qui modifie potentiellement ses besoins résidentiels.

Il a ensuite fallu donner du corps aux paramètres de Mobisim-MR, en attribuant à chacun d'entre eux une valeur qui permette de simuler le comportement auquel il correspond : l'appréciation d'un attribut du logement ou de l'environnement résidentiel, le nombre de logements connus, la manière de considérer l'attractivité des lieux, la tolérance à l'insatisfaction résidentielle, etc. La nature des paramètres (évaluations subjectives de la part des ménages) et la diversité des données auxquelles il est possible de les confronter nous ont conduit à procéder manuellement à ce paramétrage, de manière itérative. Les données mobilisées pour quantifier ces évaluations subjectives sont de plusieurs natures : informations extraites de la littérature, données de recensement, données simulées par Mobisim. Le manque de connaissance sur certaines variables modélisées (ex. attractivité connue v_J, référence collective $A_H(v_J)$, paramètre β) a été pallié en attribuant arbitrairement une valeur par défaut aux paramètres en question.

Les paramètres étant quantifiés, il a été possible d'exécuter des simulations avec le modèle. Compte tenu des interactions entre les ménages et leur environnement et de la non-linéarité potentielle des dynamiques modélisées, il était néanmoins nécessaire de s'assurer de la cohérence des résultats de simulation. La dernière étape de cette « mise en route » de Mobisim-MR a donc consisté à explorer le fonctionnement du modèle à travers la répétition d'un grand nombre de simulations à configuration de paramètres constante d'une part (analyse de stabilité des résultats de simulation) et à travers des modifications successives des valeurs de ses paramètres d'autre part (analyse de sensibilité des résultats de simulation aux variations des valeurs de paramètres).

Deux caractéristiques liées au modèle lui-même ont conditionné les méthodes choisies :

1. les contraintes techniques liées à la simulation avec Mobisim ;
2. le grand nombre de paramètres de Mobisim-MR qui, considérés les uns par rapport aux autres, décuplent les possibilités de tests.

Nous avons privilégié des approches simples mais partielles (plutôt qu'exhaustives), qui nous ont permis d'apporter deux informations importantes pour l'utilisation des résultats de simulation : dans les configurations de paramètres testées, le modèle est stable et les résultats qu'il produit sont cohérents.

Une démarche adaptée et dépendante du projet Mobisim

Travailler sur un modèle intégré dans une plateforme de simulation implique une certaine dépendance de la temporalité du projet et de ses ambitions propres. Les différents modèles de la plateforme ont beaucoup évolué entre 2008 et 2012, parallèlement, les modifications des uns entraînant parfois des modifications sur les *inputs* des autres. Ce fut notamment le cas de la composante démographique, pour laquelle des modifications dans la génération de la population synthétique ont nécessité un nouveau calibrage du modèle Mobisim-Démo. Des exemples similaires ont eu lieu, dans une moindre mesure, entre le modèle des mobilités quotidiennes et le calibrage des appréciations des attributs de l'environnement résidentiel global (coûts d'accès au centre-ville et accessibilités généralisées aux zones d'emplois). L'avancée de chaque modèle de Mobisim dépend de l'avancée de tous les modèles, conjointement.

La philosophie du projet Mobisim est de pouvoir exécuter les simulations sur d'autres zones d'études : les démarches de paramétrages doivent donc être les plus généralistes possibles, et les données utilisées facilement accessibles. C'est pourquoi nous avons fortement restreint l'utilisation de données obtenues localement (enquêtes de terrain) pour favoriser autant que possible des données générales (recensement national). Un compromis doit donc être trouvé entre réalisme et simplicité.

Une grande majorité des valeurs définies pour les paramètres sont valables sur d'autres zones d'étude (dans ce contexte culturel donné), et seuls quelques paramètres nécessitent d'être quantifiés différemment à chaque application de Mobisim sur une nouvelle zone d'étude. La démarche de calibrage est ainsi considérablement réduite pour de nouvelles applications du modèle. Cela a d'ailleurs été éprouvé pour l'agglomération dijonnaise (Région Bourgogne), terrain d'étude en construction pour Mobisim, sur lequel le calibrage de Mobisim-Démo a impliqué le calcul de la projection linéaire et quelques ajustements de valeurs de paramètres seulement. Le calibrage de Mobisim-Démo sur Dijon, réalisé par Armelle Couillet, a nécessité une semaine de travail, contre plusieurs mois pour le paramétrage et le calibrage sur Besançon.

Exploration par la simulation

Le caractère en apparence très technique du travail qui a été mené pendant cette thèse apporte néanmoins des connaissances thématiques sur les comportements résidentiels des ménages, et ce grâce à la simulation. La validation du modèle dans l'absolu étant impossible, c'est par l'exploration de l'espace des valeurs des paramètres qu'il est

possible d'évaluer dans quelle mesure les résultats de simulation du modèle permettent d'aboutir ou non à des résultats cohérents avec une certaine réalité. En rapprochant les paramètres de leur signification thématique, même lorsqu'elle est vague (ex. tolérance des ménages vis-à-vis de leur insatisfaction résidentielle), on apporte une validation sur la capacité du modèle à retranscrire globalement des comportements individuels. Ainsi, nous avons pu constater que le modèle représente l'hétérogénéité des comportements simulés entre les différents types de ménages, aux différentes étapes du calcul de la décision résidentielle. L'exploration des résultats d'attractivités a permis de montrer que les ménages simulés ne réagissent pas tous de la même manière aux situations résidentielles dans lesquelles ils se trouvent. Certains ménages vont avoir une connaissance avantagée de la situation du logement, tandis que pour d'autres il est plus difficile de trouver une offre attractive, ce qui peut les amener à ne pas déménager tout de suite et à attendre de trouver mieux pour passer à l'acte. En ce sens, la simulation est une démarche « quasi expérimentale » (Schmitt, 2014), qui permet de valider le modèle en évaluant la pertinence de ses résultats de simulation.

De surcroît, la simulation multi-agents permet d'obtenir des résultats à l'échelle d'une agglomération « difficilement déductibles directement des dynamiques individuelles » (Deffuant *et al.*, 2003). Mobisim-MR permet de tester par l'expérimentation ce qui relève de l'hypothétique dans les comportements des ménages : les ménages déménagent moins lorsqu'ils sont plus exigeants avec l'offre en logements ; ils sont plus satisfaits lorsque les coûts de l'immobilier sont plus faibles, etc. Étudiés sur des scénarios de développements résidentiels différents, ces résultats de simulation permettent d'enrichir les réflexions menées en aménagement du territoire. L'expérience du travail avec la Ville de Besançon le souligne : les résultats de simulation permettent de mettre à l'épreuve du modèle les préférences de certains ménages pour la maison individuelle dans le périurbain et de localiser l'offre attractive pour chaque type de ménage, ce qui créé un cadre de discussion avec les acteurs locaux.

Ce modèle est un modèle géographique, qui ne considère pas certains facteurs habituellement associés à la décision résidentielle : la formalisation du revenu sous la forme d'une contrainte budgétaire, le fonctionnement économique du marché immobilier. Mobisim ne néglige pour autant pas ces facteurs puisqu'il tient compte de ces variables économiques, et les résultats des différentes explorations soulignent la capacité du modèle à simuler des comportements cohérents. Le modèle permet de représenter le comportement limité ou insatisfait des ménages dans leur décision de déménager : les ménages aux revenus plus faibles sont moins satisfaits dans des logements à coûts

moyens et élevés, certains ménages ne trouvent pas d'offre leur correspondant, etc.

Cela souligne également l'importance de chaque paramètre. Par exemple, la diversité des appréciations des ménages permet de simuler des comportements des ménages également diversifiés. Bien que l'analyse de sensibilité menée dans ce travail ne soit pas complète au regard de toutes les possibilités de comportement du modèle, elle souligne l'importance de chaque paramètre dans la simulation du processus de décision.

En géographie, la démarche d'exploration d'un modèle multi-agents par la simulation n'est pas nouvelle mais elle est relativement récente. En France, on peut citer les travaux menés au laboratoire Géographie-cités à Paris. La thèse de Clara Schmitt (2014) notamment porte sur la modélisation des systèmes de villes et présente la mise en place d'un protocole de modélisation, allant de la construction de deux modèles à l'exploration par la simulation. Cette exploration est réalisée *via* un calibrage automatique par algorithmes génétiques, méthodes qui ne peuvent pas être appliquées sur Mobisim mais qui soulignent la volonté des géographes de s'approprier la démarche de modélisation de manière plus active.

Perspectives de recherche

Ce travail ne constitue qu'un commencement au regard du potentiel de Mobisim-MR, intégré dans la plateforme Mobisim. L'exploration du fonctionnement du modèle peut être approfondie, en testant notamment la sensibilité du modèle d'une manière plus globale, à savoir dans la variation simultanée des valeurs de paramètres. Le rôle respectif de l'intérêt global à migrer M et la mobilité individuelle φ dans le calcul de la probabilité de déménager Ω doit notamment être identifié plus précisément, afin de mieux comprendre le fonctionnement de cette interaction *push-pull*. Cela nécessite non seulement de faire varier les paramètres ensemble mais également l'application de Mobisim sur une autre zone d'étude, afin de tester l'impact de l'offre en logements sur les résultats du modèle. Réaliser l'analyse de sensibilité sur une autre agglomération permettrait également de tester la sensibilité du modèle aux conditions initiales de simulation (structure démographique, configuration spatiale de l'offre, répartition des ménages dans les logements). La sensibilité de Mobisim-MR aux autres modèles de la plateforme mériterait également d'être testée.

Un autre lien, pourtant évoqué dans les hypothèses sous-jacentes à la décision résidentielle, mériterait aussi d'être exploré : l'évolution des ménages dans leur cycle de vie et la décision de déménager. Le modèle des évolutions démographiques de Mobi-

sim a été conçu pour intégrer à la décision des ménages les facteurs *push* que sont les évènements démographiques, mais nous n'avons pas encore pu tester la relation entre ces évènements et les changements de localisation résidentielle des ménages (impulsion de l'évènement et choix du nouveau logement). Cette exploration permettrait 1) de vérifier que les évènements démographiques constituent bien des facteurs *push* dans le choix des ménages et 2) d'explorer l'impact de ces évènements sur les choix résidentiels (ex. la mise en couple de deux célibataires ou de deux célibataires en familles monoparentales n'entraîne pas les mêmes besoins en logements) ou sur l'offre en logements (ex. libération d'un logement par le départ en retraite de personnes âgées).

D'une manière plus générale encore, l'exploration des interactions *push-pull* dans la décision résidentielle n'a pas été effectuée. Les résultats thématiques de la quatrième partie de la thèse soulignent les nombreuses pistes de recherche sur la connaissance des dynamiques résidentielles, et le potentiel qu'offre en ce sens Mobisim. Cibler le comportement d'un type de ménages questionne sur les comportements parallèles des autres types de ménages : que se passe-t-il pour les célibataires ou les couples sans enfant ou des ménages aux revenus faibles dans le scénario de politique volontariste de construction de logements à Besançon ? Quelles sont les trajectoires résidentielles des ménages ? Existe-t-il des trajectoires types dans l'agglomération bisontine, et sont-elles les mêmes selon les différents scénarios testés ?

Par ailleurs, la relation entre les configurations spatiales émergentes des comportements de mobilité résidentielle des ménages et l'environnement résidentiel alentour nous paraît particulièrement intéressant : y a t-il des lieux plus propices que d'autres en ce qui concerne les accessibilités aux commerces et services ou la proximité aux espaces verts par exemple, pour aménager de nouveaux logements ? Mobisim permet d'identifier des profils spatiaux de lieux permettant de satisfaire certains types de ménages plus que d'autres. Quelles est la configuration spatiale de l'offre en logements, selon le type d'environnement résidentiel ? Et quelle est la configuration spatiale de la satisfaction résidentielle des ménages dans l'agglomération selon cette offre ou selon l'environnement résidentiel uniquement ? Autant de questions auxquelles Mobisim est prêt à répondre.

Bibliographie

Adamowicz, W., Louviere, J. et Williams, M. (1994). Combining Revealed and Stated Preference Methods for Valuing Environmental Amenities. *Journal of Environmental Economics and Management*, 26(3):271–292.

Alonso, W. (1964). *Location and land use : toward a general theory of land rent*. Harvard University Press, Cambridge.

Amblard, F. (2003). *Comprendre le fonctionnement de simulations sociales - Application à des modèles de dynamiques d'opinions*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont 2, 127 p.

Amblard, F., Bommel, P. et Rouchier, J. (2007). Assessment and validation of multi-agent models. *In* Phan, D. et Amblard, F., (eds) : *Agent-based modelling and simulation in the social and human science*, 93–114. Bardwell Press, Oxford, english ed édition.

Amblard, F., Rouchier, J. et Bommel, P. (2006). Evaluation et validation des modèles multi-agents. *In* Amblard, F. et Phan, D., (eds) : *Modélisation et simulation multi-agents ; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, 103–140. Hermès Science Publication, Paris.

Antoni, J.-P. (2011). *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*. Economica, Paris.

Antoni, J.-P., Tannier, C., Vuidel, G. et Hirtzel, J. (2011). *Mobisim*. Rapport final PREDIT, Groupe Opérationnel n°6, Recherche 09MTCV34, Besançon.

Apparicio, P. et Seguin, A. (2006). Measuring the accessibility of services and facilities for residents of public housing in Montréal. *Urban Studies*, 43(1):187–211.

Arentze, T. et Timmermans, H. J. (2004). A learning based transportation oriented simulation system. *Transportation Research Part B : Methodological*, 38(7):613–633.

Attwell, K. (2000). Urban land resources and urban planning - case studies from Denmark. *Landscape and Urban planning*, 52(2-3):145–163.

AUDAB (2005). *Programme Local de l'Habitat du Grand Besançon - Diagnostic.* Agence d'Urbanisme du Grand Besançon, Besançon.

Authier, J.-Y., Bidet, J., Collet, A., Gilbert, P. et Steinmetz, H. (2010a). *Etat des lieux sur les trajectoires résidentielles.* PUCA Recherche.

Authier, J.-Y., Bonvalet, C. et Lévy, J.-P. (2010b). *Élire domicile. La construction sociale des choix résidentiels.* Presses universitaires de Lyon, Lyon.

Baker, E. (2002). *Public Housing Tenant Relocation : Residential Mobility, Satisfaction, and the Development of a Tenant's Spatial Decision Support System.* Thèse de doctorat, University of Adelaide, 277 p., Adelaide, Australie.

Barrios Garcia, J. et Rodriguez Hernández, J. (2008). Housing demand in Spain according to dwelling type : Microeconometric evidence. *Regional Science and Urban Economics*, 38(4):363–377.

Barros, J. (2012). Exploring Urban Dynamics in Latin American Cities Using an Agent-Based Simulation Approach. *In* Heppenstall, A., Crooks, A., See, L. et Batty, M., (eds) : *Agent-Based Models of Geographical Systems*, 571–589. Springer Netherlands, Dordrecht.

Batty, M., Crooks, A. T., See, L. M. et Heppenstall, A. J. (2012). Perspectives on Agent-Based Models of Geographical Systems. *In* Heppenstall, A. J., Crooks, A. T., See, L. M. et Batty, M., (eds) : *Agent-Based Models of Geographical Systems*, 1–15. Springer Netherlands, Dordrecht.

Batty, M. et Torrens, P. M. (2005). Modelling and prediction in a complex world. *Futures*, 37:745–766.

Baumont, C. (2009). Spatial effects of urban public policies on housing values. *Papers in Regional Science*, 88(2):301–326.

Ben-Akiva, M. et Palma, A. (1986). Analysis of a dynamic residential location choice model with transaction costs. *Journal of Regional Science*, 26(2):321–341.

Benabou, R. (1993). Workings of a city : location, education, and production. *The Quarterly Journal of Economics*, 108(3):619–652.

Benenson, I. (1998). Multi-agent simulations of residential dynamics in the city. *Computers, Environment and Urban Systems*, 22(1):25–42.

Benenson, I. (2004). Agent-Based Modeling : From Individual Residential Choice to Urban Residential Dynamics. *In* Goodchild, M. F. et Jannelle, D. G., (eds) : *Spatially Integrated Social Science : examples in best practice*, 67–95. Oxford University Press, New Brunswick.

Benenson, I., Omer, I. et Hatna, E. (2002). Entity-based modeling of urban residential dynamics : the case of Yaffo, Tel Aviv. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 29(4):491–512.

Bigot, R. (2010). *Les difficultés de logement des classes moyennes et les besoins de mobilité résidentielle*. Enquête "Conditions de vie et Aspirations des français". Enquête n° 263 : "Conditions de vie et aspriations des Français", Paris.

Bigot, R. et Hoibian, S. (2009). *Les difficultés des français face au logement*. Cahier de recherche n°265. Centre de Recherche pour l'Etude et l'Observation des Conditions de Vie (CREDOC), Paris.

Birkin, M. et Wu, B. (2012). A Review of Microsimulation and Hybrid Agent-Based Approaches. *In* Heppenstall, A., Crooks, A., See, L. et Batty, M., (eds) : *Agent-Based Models of Geographical Systems*, 51–68. Springer Netherlands, Dordrecht.

Bonaiuto, M., Fornara, F. et Bonnes, M. (2003). Indexes of perceived residential environment quality and neighbourhood attachment in urban environments : a confirmation study on the city of Rome. *Landscape and Urban Planning*, 65:41–52.

Bonnet, C., Burricand, C., Colin, C., Flipo, A., Mahieu, R., Ralle, P. et Sédillot, B. (1999). *Le modèle de microsimulation dynamique DESTINIE*. Série des documents de travail de la Direction des Etudes et Synthèses Economiques - G9913, INSEE, Paris.

Bonvalet, C. (2005). Logement et vie familiale. *Informations sociales*, 3(123):56–65.

Bonvalet, C. (2010). Les logiques des choix résidentiels des franciliens. *In* Authier, J.-Y., Bonvalet, C. et Lévy, J.-P., (eds) : *Elire Domicile - La construction sociale des choix résidentiels*, 55–75. Presses universitaires de Lyon, Lyon.

Bonvalet, C. et Brun, J. (2002). Etat des lieux des recherches sur la mobilité résidentielle en France. *In* Lévy, J.-P. et Dureau, F., (eds) : *L'accès à la ville. Les mobilités spatiales en questions*, 15–64. L'Harmattan, Paris.

Booth, H. (2006). Demographic forecasting : 1980 to 2005 in review. *International Journal of Forecasting*, 22(3):547–581.

Bourgeois, M. (2012). *Développement résidentiel - Création de logements et formes urbaines*. Séminaire "Mobisim à la loupe", Arc-et-Senans.

Bramley, G. et Power, S. (2009). Urban form and social sustainability : the role of density and housing type. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 36(1):30–48.

Brown, D. G., Page, S., Riolo, R., Zellner, M. L. et Rand, W. (2005). Path dependence and the validation of agent-based spatial models of land use. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2):153–174.

Brown, L. et Moore, E. (1970). The intra-urban migration process : a perspective. *Geografiska Annaler. Series B, Human Geography*, 52(1):1–13.

Brueckner, J., Thisse, J.-F. et Zenou, Y. (1999). Why is central Paris rich and downtown Detroit poor ? An amenity-based theory. *European Economic Review*, 43:91–107.

Brummell, A. (1979). A model of intraurban mobility. *Economic Geography*, 55(4): 338–352.

Campolongo, F., Cariboni, J. et Saltelli, A. (2007). An effective screening design for sensitivity analysis of large models. *Environmental Modelling & Software*, 22(10):1509–1518.

Campolongo, F., Saltelli, A. et Cariboni, J. (2011). From screening to quantitative sensitivity analysis. A unified approach. *Computer Physics Communications*, 182(4):978–988.

Cao, X., Mokhtarian, P. et Handy, S. (2009). The relationship between the built environment and nonwork travel : a case study of northern California. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 43:548–559.

Cariboni, J., Gatelli, D., Liska, R. et Saltelli, A. (2007). The role of sensitivity analysis in ecological modelling. *Ecological Modelling*, 203(1-2):167–182.

Carpentier, S. et Gerber, P. (2009). De la mobilité quotidienne à la recomposition des espaces de vie quotidienne. *Recherche, Transports, Sécurité*, 102:61–72.

Casanova, P., Koltchanov, V., Legout, M., Martineau, Y., Faburel, G., Frankhauser, P., Raux, C., Routhier, J.-L. et Wiel, M. (2005). *Plateforme de simulation pour l'étude prospective de la mobilité urbaine des agglomérations françaises et européennes : MobiSim SMA - Rapport de recherche*. ATN, Paris.

Cavailhès, J., Brossard, T., Foltête, J., Hilal, M., Joly, D., Tourneux, F.-P., Tritz, C. et Wavresky, P. (2009). GIS-based hedonic pricing of landscape. *Environmental and Resource Economics*, 44(4):571–590.

Charlot, S., Hilal, M. et Schmitt, B. (2009). La périurbanisation renforce-t-elle la ségrégation résidentielle urbaine en France ? *Espaces Populations Sociétés*, 1:29–44.

Chen, C. et Lin, H. (2011). Decomposing residential self-selection via a life-course perspective. *Environment and Planning A*, 43:2608–2626.

Chingcuanco, F. et , E. J. (2013). *A Demographic Microsimulation Model for the Integrated Land Use, Transportation, 2 Environment (ILUTE) Model System*. TRB 2013 Annual Meeting.

Cho, S., Poudyal, N. et Roberts, R. (2008). Spatial analysis of the amenity value of green open space. *Ecological Economics*, 66:403–416.

Clark, W., Deurloo, M. et Dieleman, F. (1984). Housing consumption and residential mobility. *Annals of the Association of American Geographers*, 74(1):29–43.

Clark, W., Deurloo, M. et Dieleman, F. (1994). Tenure changes in the context of micro-level family and macro-level economic shifts. *Urban Studies*, 31(1):137–154.

Clark, W. et Dieleman, F. (1996). *Households and housing : Choice and outcomes in the housing market*. Center for Urban Policy Research, New Brunswick.

Clark, W., Huff, J. et Burt, J. (1979). Calibrating a model of the decision to move. *Environment and Planning A*, 11(6):689–704.

Clark, W. et Mulder, C. (2000). Leaving home and entering the housing market. *Environment and Planning A*, 32(9):1657–1672.

Clark, W. et Onaka, J. (1983). Life cycle and housing adjustment as explanations of residential mobility. *Urban Studies*, 20(1):47–57.

Confalonieri, R., Bellocchi, G., Bregaglio, S., Donatelli, M. et Acutis, M. (2010). Comparison of sensitivity analysis techniques : A case study with the rice model WARM. *Ecological Modelling*, 221(16):1897–1906.

Cornelis, E., Barthelemy, J., Pauly, X. et Walle, F. (2012). Modélisation de la mobilité résidentielle en vue d'une micro-simulation des évolutions de population. *Les cahiers scientifiques du transport*, 62:65–84.

Courgeau, D. (1984). Relations entre cycle de vie et migrations. *Population*, 3:483–514.

Crooks, A., Castle, C. et Batty, M. (2008). Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(6):417–430.

Crooks, A. et Heppenstall, A. (2012). Introduction to agent-based modelling. *In* Heppenstall, A. J., Crooks, A. T., See, L. M. et Batty, M., (eds) : *Agent-Based Models of Geographical Systems*, 85–101. Springer Netherlands, Dordrecht.

Crooks, A. T. (2010). Constructing and implementing an agent-based model of residential segregation through vector GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(5):661–675.

Crosetto, M., Tarantola, S. et Saltelli, A. (2000). Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 81(1):71–79.

De Groot, C., Mulder, C., Das, M. et Manting, D. (2011). Life events and the gap between intention to move and actual mobility. *Environment and Planning A*, 43(1):48–66.

De La Barra, T., Pérez, B. et Vera, N. (1984). TRANUS-J : putting large models into small computers. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 11(1): 87–101.

De Palma, A. et Thisse, J.-F. (1987). Les modèles de choix discrets. *Annales d'Économie et de Statistique*, (14):151–190.

Debrand, T. et Taffin, C. (2005). Les facteurs structurels et conjoncturels de la mobilité résidentielle depuis 20 ans. *Economie et statistique*, 381(1):125–146.

Debroux, J. (2012). Accéder à la maison individuelle en zone périurbaine : passé résidentiel, position dans le cycle de vie et sphères d'identification. *Métropoles [En ligne]*, 10.

Deffuant, G., Amblard, F., Dubos, R. et Ramat, E. (2003). Une démarche expérimentale pour la simulation individus-centrée. *In Actes des 10èmes Journées de Rochebrune, rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, statut épistémologique de la simulation*, 45–64, Rochebrune.

Descamps, A. et Gaschet, F. (2013). La contribution des effets de voisinage à la formation des prix du logement : une évaluation sur l'agglomération bordelaise. *Revue Economique*, 64(5):883 – 910.

Devisch, O., Timmermans, H. J. et Arentze, T. (2006). Modelling Residential Search and Location Choice-Framework and Numerical Experiments. *In* van Leeuwen, J. P. et Timmermans, H. J., (eds) : *Proc. 8th International Design and Decision Support Systems Conference*, 185–200, Eindhoven, Netherlands.

Devisch, O., Timmermans, H. J., Arentze, T. et Borgers, A. W. (2009). An agent-based model of residential choice dynamics in non-stationary housing markets. *Environment and Planning A*, 41(8):1997–2013.

Dieleman, F. (2001). Modelling residential mobility ; a review of recent trends in research. *Journal of Housing and the Built Environment*, 16(3):249–265.

Dieleman, F. et Mulder, C. (2002). The geography of residential choice. *In* Aragonés, J., Francescato, G. et Gärling, T., (eds) : *Residential environments : Choice, satisfaction, and behavior*, 35–54. Bergin & Garvey, Westport (Conn.).

Dijkstra, E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1:269–271.

Dodier, R. (2004). L'espace dans les stratégies résidentielles des ménages. *ESO Travaux et documents*, 21:115–123.

Donzeau, N. et Shon, J. (2009). L'évolution de la mobilité résidentielle en France entre 1973 et 2006 : nouvelles estimations. *Population*, 64(4):779–796.

Dureau, F. (2002). Les systèmes résidentiels : concepts et applications. *In* Lévy, J.-P. et Dureau, F., (eds) : *L'accès à la ville. Les mobilités spatiales en questions*, 355–382. L'Harmattan, Paris.

Earnhart, D. (2001). Combining revealed and stated preference methods to value environmental amenities at residential locations. *Land Economics*, 77(1):12–29.

Ellis, C., Lee, S.-W. et Kweon, B.-S. (2006). Retail land use, neighborhood satisfaction and the urban forest : an investigation into the moderating and mediating effects of trees and shrubs. *Landscape and Urban Planning*, 74:70–78.

ENA (2005). *Le logement des personnes âgées*. Séminaire relatif au logement - Groupe n°14. Direction des Etudes - Ecole Nationale d'Administration.

Ettema, D. (2011). A multi-agent model of urban processes : Modelling relocation processes and price setting in housing markets. *Computers, Environment and Urban Systems*, 45(4):283–295.

Ettema, D., Arentze, T. et Timmermans, H. J. (2011). Social influences on household location, mobility and activity choice in integrated micro-simulated models. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 45:283–295.

Ettema, D., Jong, K., Timmermans, H. J. et Bakema, A. (2007). PUMA : multi-agent modelling of urban systems. *Modelling Land-Use Change*, 90:237–258.

Evans, A. et Unsworth, R. (2012). Housing Densities and Consumer Choice. *Urban Studies*, 49(6):1163–1177.

Fagiolo, G., Moneta, A. et Windrum, P. (2007). A critical guide to empirical validation of agent-based models in economics : methodologies, procedures, and open problems. *Computational Economics*, 30:195–226.

Feijten, P. et Mulder, C. (2010). Gender, divorce and housing–a life course perspective. *In* Reuschke, D., (ed) : *Wohnen und Gender*, 175–193. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.

Feijten, P., Mulder, C. et Baizán, P. (2003). Age differentiation in the effect of household situation on first-time homeownership. *Journal of housing and the Built Environment*, 18(3):233–255.

Feijten, P. et van Ham, M. (2008). Residential mobility and migration of the divorced and separated. *Demographic Research*, 17:623–654.

Fernandez, L., Brown, D. G., Marans, R. et Nassauer, J. (2005). Characterizing location preferences in an exurban population : implications for agent-based modeling. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 32(6):799–820.

Filatova, T., Parker, D. C. et van der Veen, A. (2009). Agent-Based Urban Land Markets : Agent's Pricing Behavior, Land Prices and Urban Land Use Change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12(1):3.

Filippi, B., Funes, C., Nabos, H. et Tutin, C. (2007). *Marchés du logement et fractures urbaines en Ile-de-France*. PUCA Recherche.

Föbker, S. et Grotz, R. (2006). Everyday mobility of elderly people in different urban settings : the example of the city of Bonn, Germany. *Urban Studies*, 43(1):98–118.

Forgeot, G. et Gautié, J. (1997). *Insertion professionnelle des jeunes et processus de déclassement*. Série des documents de travail de la Direction des Etudes et Synthèses Economiques - G9711, INSEE. Série des documents de travail de la Direction des Etudes et Synthèses Economiques - G9711, INSEE, Paris.

Forsyth, A., Hearts, M., Oakes, J. et Schmitz, K. (2008). Design and destinations : factors influencing walking and total physical activity. *Urban Studies*, 45(9):1973–1996.

Francescato, G. (2002). Residential environments : choice, satisfaction, and behavior. *European Sociological Review*, 21(1):59 –71.

Frankhauser, P., Tannier, C., Houot, H. et Vuidel, G. (2010). *Développement urbain fractal sous contraintes d'accessibilités - Modèles et outils d'aide à la décision pour l'aménagement urbain*. Rapport PREDIT - MUP-City.

Frémeaux, N. et Leturcq, M. (2013). Plus ou moins mariés : l'évolution du mariage et des régimes matrimoniaux en France. *Economie et statistique*, (462-463):125–152.

Gärling, T. et Friman, M. (2002). A psychological conceptualization of residential choice and satisfaction. *In* Aragonés, J., Francescato, G. et Gärling, T., (eds) : *Residential environments : Choice, satisfaction, and behavior*, chapitre 4, 55–80. Bergin & Garvey, Westport (Conn.).

Gaube, V. et Remesch, A. (2013). Impact of urban planning on household's residential decisions : An agent-based simulation model for Vienna. *Environmental Modelling & Software*, 45:92–103.

Ge, J. et Hokao, K. (2006). Research on residential lifestyles in Japanese cities from the viewpoints of residential preference, residential choice and residential satisfaction. *Landscape and urban planning*, 78(3):165–178.

Geard, N., McCaw, J. M., Dorin, A., Korb, K. B. et McVernon, J. (2013). Synthetic Population Dynamics : A Model of Household Demography. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 16(1):8.

Gilbert, N. et Terna, P. (2000). How to build and use agent-based models in social science. *Mind & Society*, 1(1):57–72.

Ginot, V., Gaba, S., Beaudouin, R., Aries, F. et Monod, H. (2006). Combined use of local and ANOVA-based global sensitivity analyses for the investigation of a stochastic dynamic model : Application to the case study of an individual-based model of a fish population. *Ecological Modelling*, 193(3-4):479–491.

Ginot, V. et Monod, H. (2007). Exploring models by simulation - Application to sensitivity analysis. *In* Phan, D. et Amblard, F., (eds) : *Agent-based modelling and simulation in the social and human science*, 63–92. Bardwell Press, Oxford.

Grafmeyer, Y. (2010). Approches sociologiques des choix résidentiels. *In* Authier, J.-Y., Bonvalet, C. et Lévy, J.-P., (eds) : *Elire Domicile - La construction sociale des choix résidentiels*, 35–52. Presses universitaires de Lyon, Lyon.

Gram-Hanssen, K. et Bech-Danielsen, C. (2008). Home dissolution : what happens after separation ? *Housing Studies*, 23(3):507–522.

Greaves, S. et Stopher, P. (1998). A synthesis of GIS and Activity-based travelforecating. *Geographical Systems*, 5:59–89.

Grevisse, M. (1969). *Le bon usage*. Hatier, Paris.

Griffond-Boitier, A., Mariani-Rousset, S., Frankhauser, P., Valentin, J., Alexandre, V. et Nicod, B. (2012). Habiter : où et comment ? *In* Frankhauser, P. et Ansel, D., (eds) : *La décision d'habiter - Ici ou ailleurs*, 43–74. Economica, Anthropos, Paris.

Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., Goss-Custard, J., Grand, T., Heinz, S. K., Huse, G., Huth, A., Jepsen, J. U., Jø rgensen, C., Mooij, W. M., Müller, B., Pe'er, G., Piou, C., Railsback, S. F., Robbins, A. M., Robbins, M. M., Rossmanith, E., Rüger, N., Strand, E., Souissi, S., Stillman, R. A., Vabø, R., Visser, U. et DeAngelis, D. L. (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, 198(1-2):115–126.

Gusbin, D., Toint, P., Cornelis, E., Poulain, M. et Eggerickx, T. (2007). *Démographie, géographie et mobilité : perspectives à long terme et politiques pour*

un développement durable (MOBIDIC). Bureau fédéral du Plan, Université catholique de Louvain (GéDAP) et Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix (GRT), rapport final pour la politique scientifique fédérale (PADD II).

Haase, D., Lautenbach, S. et Seppelt, R. (2010). Modeling and simulating residential mobility in a shrinking city using an agent-based approach. *Environmental Modelling & Software*, 25(10):1225–1240.

Hamby, D. (1994). A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 32:135–154.

Handy, S., Cao, X. et Mokhtarian, P. (2005). Correlation or causality between the built environment and travel behavior ? Evidence from northern California. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 10:427–444.

Happe, K. (2005). Agent-based modelling and sensitivity analysis by experimental design and metamodelling : an application to modelling regional structural change. *In XIth Internationl congress of the European Association of Agricultural Economists, the Future of Rural Europe in the Global Agri-food System*, Copenhaguen, Denmark.

Hedman, L., van Ham, M. et Manley, D. (2011). Neighbourhood choice and neighbourhood reproduction. *Environment and Planning A*, 43(6):1381–1399.

Heppenstall, A. J., Evans, A. J. et Birkin, M. H. (2007). Genetic algorithm optimisation of an agent-based model for simulating a retail market. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 34:1051–1071.

Holm, E., Holme, K., Mäkilä, K., Mattsson-Kauppi, M. et Mörtvik, G. (2006). *The SVERIGE spatial microsimulation model*. 8th Nordic Seminar on Microsimulation Models, 8-9 June 2006, Oslo.

Homocianu, M. (2009). *Modélisation de l'intéraction transport-urbanisme-Choix résidentiels des ménages dans l'aire urbaine de Lyon*. Thèse de doctorat, Université Lumière Lyon 2, 311 p., Lyon.

Hooimeijer, P. et Oskamp, A. (1996). A simulation model of residential mobility and housing choice. *Journal of Housing and the Built Environment*, 11(3):313–336.

Hoshino, T. (2011). Estimation and Analysis of Preference Heterogeneity in Residential Choice Behaviour. *Urban Studies*, 48(2):363.

Huang, Q., Parker, D. C., Filatova, T. et Sun, S. (2013). A review of urban residential choice models using agent-based modeling. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 40:1–29.

Huff, D. (1964). Defining and Estimating a Trading Area. *Journal of Marketing*, 28(3):34–38.

Hur, M., Nasar, J. et Chun, B. (2010). Neighborhood satisfaction, physical and perceived naturalness and openness. *Journal of Environmental Psychology*, 30:52–59.

Ioannides, Y. (1987). Residential mobility and housing tenure choice. *Regional Science and Urban Economics*, 17(2):265–287.

Jago, R., Baranowski, T., Zakeri, I. et Harris, M. (2005). Observed environmental features and the physical activity of adolescent males : gis coding differences. *American Journal of Preventive Medicine*, 29(2):98–104.

Jordan, R., Birkin, M. et Evans, A. (2014). An agent-based model of residential mobility. Assessing the impacts of urban regenration policy in the EASEL district. *Computers, Environment and Urban Systems*, 48:49–63.

Jordan, R., Birkin, M. H. et Evans, A. (2011). Agent-based simulation modelling of housing choice and urban regeneration policy. *In* Bosse, T., Geller, A. et Jonker, C. M., (eds) : *Multi-Agent-Based Simulation XI*, 152–166. Springer, Berlin Heidelberg.

Kaplan, R. et Kaplan, S. (1989). *The experience of nature : A psychological perspective*. Cambridge University Press, New York.

Kendig, H. (1984). Housing Careers, Life Cycle and Residential Mobility : Implications for the Housing Market. *Urban Studies*, 21(3):271–283.

Kestens, Y., Thériault, M. et Des Rosiers, F. (2004). The impact of surrounding land use and vegetation on single-family house prices. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 31(4):539–567.

Kestens, Y., Thériault, M. et Des Rosiers, F. (2008). Choix résidentiels des ménages lors de l'acquisition d'une maison unifamiliale. *In* Thériault, M. et Des Rosiers, F., (eds) : *Information géographique et dynamiques urbaines 1, Analyse et simulation de la mobilité des personnes*, 197–226. Hermès Science, Lavoisier, Paris.

Kim, J. H., Pagliara, F. et Preston, J. (2005). The intention to move and residential location choice behaviour. *Urban Studies*, 42(9):1621–1636.

Kleijnen, J. P. (1999). Validation of models : statistical techniques and data availability. *In Simulation Conference Proceedings, 1999 Winter (Volume :1)*, 647–654, Phoenix. IEEE.

Klepper, O. (1997). Multivariate aspects of model uncertainty analysis : tools for sensitivity analysis and calibration. *Ecological Modelling*, 101(1):1–13.

Kordi, M. et Brandt, S. A. (2012). Effects of increasing fuzziness on analytic hierarchy process for spatial multicriteria decision analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(1):43–53.

Kweon, B., Ellis, C., Leiva, P. et Rogers, G. (2010). Landscape components, land use, and neighborhood satisfaction. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 37:500–517.

Laperrière, V., Badariotti, D., Banos, A. et Müller, J. P. (2009). Structural validation of an individual-based model for plague epidemics simulation. *Ecological Complexity*, 6(2):102–112.

Lauf, S., Haase, D., Seppelt, R. et Schwarz, N. (2012). Simulating demography and housing demand in an urban region under scenarios of growth and shrinkage. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 39(2):229–246.

Léon, O. et Desrivierre, D. (2011). *Le modèle de projection démographique Omphale 2010*. INSEE Méthodes n°124, Paris.

Lévy, J.-P. (2009). Mobilités urbaines : des pratiques sociales aux évolutions territoriales. *In* Dureau, F. et Hily, M.-A., (eds) : *Les Mondes de la mobilité*, 107–136. Presses universitaires de Rennes, Rennes.

Lindberg, E., Hartig, T., Garvill, J. et Garling, T. (1992). Residential-location preferences across the life span. *Journal of Environmental Psychology*, 12(2):187–198.

Long, L. (1992). Changing Residence : Comparative Perspectives on its Relationship to Age, Sex, and Marital Status. *Population Studies*, 46(1):141–158.

Magliocca, N., Safirova, E., McConnell, V. et Walls, M. (2011). An economic agent-based model of coupled housing and land markets (CHALMS). *Computers, Environment and Urban Systems*, 35(3):183–191.

Manson, S. (2003). Validation and verification of multi-agent models for ecosystem management. *In* Janssen, M., (ed) : *Complexity and ecosystem managements : the theory and practice of multi-agent approaches*, 63–74. Edward Elgar Publishers, Northampton, Massachusetts.

Manson, S., Sun, S. et Bonsal, D. (2012). Agent-based modeling and complexity. *In* Heppenstall, A. J., Crooks, A. T., See, L. M. et Batty, M., (eds) : *Agent-Based Models of Geographical Systems*, 125–139. Springer Netherlands, Dordrecht.

Mathian, H. et Tannier, C. (à paraître). Formalisation des interactions spatiales dans les modèles multi-agents : essai d'analyse comparative. *Revue internationale de géomatique - Numéro spécial "Dynamiques spatiales"*, 21 p.

Mazuy, M., Prioux, F. et Barbieri, M. (2011). L'évolution démographique récente en France. Quelques différences entre les départements d'outre-mer et la France métropolitaine. *Population*, 66(3-4):503–554.

McNally, M.-G. (2000). The four-step model. *In* Hensher, D. et Button, K.-J., (eds) : *Handbook of transport modeling*, 35–52. Pergamon, Amsterdam.

Megbolugbe, I., Sa-Aadu, J. et Shilling, J. D. (1999). Elderly Female-Headed Households and the Decision to Trade Down. *Journal of Housing Economics*, 8(4):285–300.

Merz, J. (1991). Microsimulation - A survey of principles, developments and applications. *International Journal of Forecasting*, 7(1):77–104.

Merz, J. (1996). MICSIM : Concept, Developments, and Applications of a PC Microsimulation Model for Research and Teaching. *In* Troitzsch, K. G., (ed) : *Social Science Microsimulation*, 33–64. Springer, Berlin.

Miller, E. J. et Salvini, P. A. (2000). The integrated Land-Use, Transportation, Environment (ILUTE) microsimulation modelling system : description and current status. *Travel Behaviour Research : The Leading Edge*, 711–724.

Monod, H., Naud, C. et Makowski, D. (2006). Uncertainty and sensitivity analysis for crop models. *In* Wallach, D., Makowski, D. et Jones, J. W., (eds) : *Working with dynamic crop models : evaluating, analysing, parameterinzing and using them*, 55–100. Elsevier, Amsterdam.

Morand, E., Toulemon, L., Pennec, S., Baggio, R. et Billari, F. (2010). *Demographic modelling : the state of the art.* Working Paper 2.1a. FP7-24455, Project SustainCity, INED, Paris.

Morris, M. D. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33(2):161–174.

Mulder, C. (1996). Housing choice : assumptions and approaches. *Journal of Housing and the Built Environment*, 11(3):209–232.

Murphy, M. (2003). Bringing behavior back into micro-simulation : feedback mechanisms in demographic models. *In* Billari, F. C. et Prskawetz, A., (eds) : *Agent-Based Computational Demography*, 159–174. Physica-Verlag HD.

Ngo, T. A. et See, L. M. (2012). Calibration and validation of agent-based models of land cover change. *In* Heppenstall, A., Crooks, A., See, L. et Batty, M., (eds) : *Agent-Based Models of Geographical Systems*, 181–197. Springer Netherlands, Dordrecht.

Nguyen-Luong, D. (2008). *An integrated land use-transport model for the Paris Region (SIMAURIF) : Ten lessons learned after four years of development.* Numéro 33. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile-de-France, Paris.

Nguyen-Luong, D. (2011). SIMAURIF : un modèle dynamique de simulation de l'interaction transport-urbanisation en région Ile-de-France. *In* Antoni, J.-P., (ed) : *Modéliser la ville. Forme urbaine et Politiques de transport.*, 78–119. Economica, Paris.

Nicod, B., Frankhauser, P. et Tannier, C. (2012). Déterminisme, probabilité et imprécision dans la décision. *In* Frankhauser, P. et Ansel, D., (eds) : *Décision d'habiter - Ici ou ailleurs*, 308–349. Economica, Anthropos, Paris.

Nicolas, J.-P., Bonnel, P., Cabrera, J., Godinot, C., Homocianu, M., Routhier, J.-L., Toilier, F. et Zucarello, P. (2009). *SImuler les MoBilités pour une Agglomération Durable.* Rapport final du projet Simbad - Laboratoire d'Économie des Transports, Lyon.

Nijkamp, P., van Wissen, L. et Rima, A. (1993). A household life cycle model for residential relocation behaviour. *Socio-Economic Planning Sciences*, 27(1):35–53.

Onaka, J. et Clark, W. (1983). A disaggregate model of residential mobility and housing choice. *Geographical Analysis*, 15(4):287–304.

Orcutt, G. (1957). A new type of socio-economic system. *The Review of Economics and Statistics*, 58:773–797.

Orcutt, G., Caldwell, S. et Wertheimer, R. (1976). *Policy Exploration through Microanalytic Simulation.* The Urban Institute, Washington DC.

Pagès, J. (2004). Analyse factorielle de données mixtes. *Revue de statistique appliquée*, 52(4):93–111.

Pattaroni, L., Thomas, M.-P. et Kaufmann, V. (2009). Habitat urbain durable pour les familles. Rapport technique, Lausanne, 75 p.

Pellegrini, P. et Fotheringham, A. (1999). lntermetropolitan migration and hierarchical destination choice : A disaggregate analysis from the us public use microdata samples. *Environment and Planning A*, 31(6):1093–1118.

Pellegrini, P. A. et Fotheringham, A. S. (2002). Modelling spatial choice : a review and synthesis in a migration context. *Progress in Human Geography*, 26(4):487–510.

Pfaffenbichler, P., Emberger, G. et Shepherd, S. (2008). The Integrated Dynamic Land Use and Transport Model MARS. *Networks and Spatial Economics*, 8(2-3):183–200.

Pickvance, C. G. (1973). Life cycle, housing tenure and intra-urban residential mobility : a causal model. *The Sociological Review*, 21(2):279–297.

Piron, V. et Delons, J. (2011). PIRANDELLO : un modèle d'équilibre urbain. *In* Antoni, J.-P., (ed) : *Modéliser la ville. Forme urbaine et Politiques de transport.*, 165–186. Economica, Paris.

Plischke, E., Borgonovo, E. et Smith, C. L. (2013). Global sensitivity measures from given data. *European Journal of Operational Research*, 226(3):536–550.

Pochet, P. et Routhier, J.-L. (2002). Mobilité résidentielle et allongement des distances domicile-travail dans la région urbaine de Lyon. *In* Lévy, J.-P. et Dureau, F., (eds) : *L'accès à la ville : Les mobilités spatiales en questions*, 167–184. L'Harmattan, Paris.

Prashker, J., Shiftan, Y. et Hershkovitch-Sarusi, P. (2008). Residential choice location, gender and the commute trip to work in Tel Aviv. *Journal of Transport Geography*, 16(5):332–341.

Prioux, F., Mazuy, M. et Barbieri, M. (2010). L'évolution démographique récente en France : les adultes vivent moins souvent en couple. *Population*, 65(3):421–474.

Putman, S. H. (1991). DRAM/EMPAL ITLUP - Integrated transportation land-use activity allocation models : general description. *S.H. Putman and Associates*, 29 p.

Quigley, J. M. et Weinberg, D. (1977). Intra-urban residential mobility : a review and synthesis. *International Regional Science Review*, 2(1):41–66.

Rabe, B. et Taylor, M. (2010). Residential mobility, quality of neighbourhood and life course events. *Journal of the Royal Statistical Society : Series A (Statistics in Society)*, 173(3):531–555.

Raju, K., Sikdar, P. et Dhingra, S. (1998). Micro-simulation of residential location choice and its variation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 22(3):203–218.

Ramade, F. (2008). *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement.* Dunod, Paris.

Ratiu, E. (2003). L'évaluation de l'environnement. *In* Moser, G. et Weiss, K., (eds) : *Espaces de vie. Aspects de la relation homme-environnement*, 85–112. Armand Colin, Paris.

Ravulaparthy, S. et Goulias, K. (2011). *Forecasting with Dynamic Microsimulation : Design, Implementation, and Demonstration.* Final report "Earlier Faculty Research", University of California Transportation Center, Santa Brabara.

Refsgaard, J., van der Sluijs, J., Hø jberg, A. L. et Vanrolleghem, P. A. (2007). Uncertainty in the environmental modelling process – A framework and guidance. *Environmental Modelling & Software*, 22:1543–1556.

Reuillon, R., Rey, S., Schmitt, C., Leclaire, M. et Pumain, D. (2012). Algorithmes évolutionnaires sur grille de calcul pour le calibrage de modèles géographiques. *In Journées scientifiques mésocentres et France Grilles 2012*, 5 p., Paris.

Richiardi, M., Leombruni, R., Saam, N. et Sonnessa, M. (2006). A Common Protocol for Agent-Based Social Simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(1):NP.

Rogers, A. et von Tessin, P. (2004). Multi-objective calibration for agent-based models. *In 5th Workshop on Agent-based Simulation*, 6 p., Lisbonne.

Rossi, P. (1955). *Why family move : a study in the social psychology of urban residential mobility.* Free Press, Glencoe, IL.

Royer, J.-F. (2007). *Quatre Observations sur la Mobilité Résidentielle en en France métropolitaine.* INSEE, Document de travail du CREST, n°2007-10.

Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15:234–281.

Saaty, T. L. (1990). How to make a decision : the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1):9–26.

Saltelli, A. et Annoni, P. (2010). How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. *Environmental Modelling & Software*, 25(12):1508–1517.

Saltelli, A., Chan, K. et Scott, E. (2000). *Sensitivity analysis.* John Wiley & Sons, New York.

Sanders, L. (1992). *Système de villes et synergétique.* Anthropos, Paris.

Sanders, L. (2006). Les modèles agent en géographie urbaine. *In* Amblard, F. et Phan, D., (eds) : *Modélisation et simulation multi-agents ; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, 151–168. Hermès Science Publication, Paris.

Sanders, L. (2007). Objets géographiques et simulation agent, entre thématique et méthodologie. *Revue internationale de géomatique*, 17(2):135–160.

Sanders, L., Favaro, J.-M., Glisse, B., Mathian, H. et Pumain, D. (2006). *Dynamics of the european urban network. final report in the framework of the european program "Time-Geographical approaches to Emergence and Sustainable Societies" (TiGrESS).* UMR Géographie-cités-LIP6, Paris.

Sargent, R. (2010). Verification and validation of simulation models. *In* Johansson, B., Jain, S., Montoya-Torres, J., Hugan, J. et Yücesan, E., (eds) : *Proceedings of the 37th conference on Winter simulation*, 130–143. IEEE.

Schmitt, C. (2014). *Modélisation de la dynamique des systèmes de peuplement : de SimpopLocal à SimpopNet.* Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon - Sorbonne, 386 p.

Schmitt, C., Rey-Coyrehourcq, S., Reuillon, R. et Pumain, D. (à paraître). Half a billion simulations : evolutionary algorithms and distributed computing for calibrating the SimpopLocal geographical model. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 16 p.

Schouten, M., Verwaart, T. et Heijman, W. (2014). Comparing two sensitivity analysis approaches for two scenarios with a spatially explicit rural agent-based model. *Environmental Modelling & Software*, 54:196–210.

Simmonds, D. (1999). The design of the DELTA land-use modelling package. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 26:665–684.

Smith, B. et Olaru, D. (2013). Lifecycle stages and residential location choice in the presence of latent preference heterogeneity. *Environment and Planning A*, 45(10):2495–2514.

Smith, T., Clark, W., Huff, J. et Shapiro, P. (1979). A Decision-Making and Search Model For Intraurban Migration. *Geographical Analysis*, 11(1):1–22.

Speare, A. (1970). Home Ownership, Life Cycle Stage, and Residential Mobility. *Demography*, 7(4):449–458.

Spielauer, M. (2011). What is Social Science Microsimulation ? *Social Science Computer Review*, 29(1):9–20.

Stockdale, A. et Catney, G. (2014). A Life Course Perspective on Urban – Rural Migration : the Importance of the Local Context. *Population, Space and Place*, 20(1):83–94.

Tannier, C. et Frankhauser, P. (2001). From the observations to the construction of a urban dynamics simulation model : an inductive approach. *Cybergeo : European Journal of Géography [En ligne]*, 191.

Tannier, C., Frankhauser, P., Houot, H. et Vuidel, G. (2004). Probabilistic modelling for simulating intra-urban residential migration - An application to the question of traffic noise annoyance. *In Penser et Agir*, 131–175, Besançon. Edition Le Manuscrit.

Tannier, C., Morer, M. et Ansel, D. (2012a). La décision spatiale, entre choix individuels et références collectives. *In* Frankhauser, P. et Ansel, D., (eds) : *La décision d'habiter - Ici ou ailleurs*, 147–174. Economica, Anthropos, Paris.

Tannier, C. et Vidberg, S. (1999). *Urban location strategies - some elements for a best understanding.* Besançon.

Tannier, C., Vuidel, G., Frankhauser, P. et Houot, H. (2010). Simulation fractale d'urbanisation - MUP-City, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles localisations résidentielles. *Revue internationale de géomatique*, 20(3):303–329.

Tannier, C., Vuidel, G., Houot, H. et Frankhauser, P. (2012b). Spatial accessibility to amenities in fractal and nonfractal urban patterns. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 39(5):801–819.

Thomas, M.-P., Aldy, H., Pattaroni, L., Kaufmann, V. et Galloux, S. (2011). *Choix résidentiels et modes de vie dans l'agglomération franco-valdo-Genévoise.* LaSUR, EPFL, Lausanne.

Timmermans, H. J., Borgers, A. W., van Dijk, J. et Oppewal, H. (1992). Residential choice behaviour of dual earner households : a decompositional joint choice model1. *Environment and Planning A*, 24:517–533.

TNS Sofres (2007). *Les Français et leur habitat Perception de la densité et des formes d'habitat.* Observatoire de la Ville.

Tufte, E. (2001). *The Visual Display of Quantitative Information.* Graphics Press, Cheshire, Connecticut.

Tyrväinen, L. et Miettinen, A. (2000). Property Prices and Urban Forest Amenities. *Journal of Environmental Economics and Management*, 39:205–223.

van Imhoff, E. et Post, W. (1998). Microsimulation methods for population projection. *Population. English selection*, 10(1):97–138.

van Lierop, W. et Rima, A. (1982). *Towards an operational disaggregate model of choice for the housing market - Second Interim Report.* The Free University, Amsterdam.

van Ommeren, J., Rietveld, P. et Nijkamp, P. (1999). Job Moving, Residential Moving, and Commuting : A Search Perspective. *Journal of Urban Economics*, 46(2):230–253.

Vasanen, A. (2012). Beyond stated and revealed preferences : the relationship between residential preferences and housing choices in the urban region of Turku, Finland. *Journal of Housing and the Built Environment*, 27(3):301–315.

von Bertalanffy, L. (1968). *General Systems Theory : fundations, development, applications*. Braziller, New York.

Waddell, P. (2000). A behavioral simulation model for metropolitan policy analysis and planning : residential location and housing market components of UrbanSim. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 27(2):247–264.

Waddell, P., Borning, A., Noth, M., Freier, N., Becke, M. et Ulfarsson, G. (2003). Microsimulation of urban development and location choices : Design and implementation of UrbanSim. *Networks and Spatial Economics*, 3(1):43–67.

Watson, V. (2009). 'The planned city sweeps the poor away...' : Urban planning and 21st century urbanisation. *Progress in Planning*, 72:151–193.

Wegener, M. (1985). The Dortmund housing market model A Monte Carlo simulation of a regional housing market. *Microeconomic Models of Housing Markets*, 239:144–191.

Wegener, M. (2004). Overview of land-use transport models. *In* Hensher, D. A. et Button, K., (eds) : *Transport Geography and Spatial Systems - Handbook in Transport*, 127–146. Pergamon, Kidlington.

Wegener, M. (2014). Land-use transport interaction models. *In* Fischer, M. M. et Nijkamp, P., (eds) : *Handbook of Regional Science*, 742–758. Springer Berlin Heidelberg, Dortmund.

Wegener, M. et Fürst, F. (1999). *Land-use transport interaction : state of the art.* TRANSLAND, IRPUD Report, Dortmund.

Wegener, M., Mackett, R. et Simmonds, D. (1991). One city, three models : comparison of land-use/transport policy simulation models for Dortmund. *Transport Reviews : A Transnational Transdisciplinary Journal*, 11(2):107–129.

Weidlich, W. (2006). Intentions and principles of sociodynamics. *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 2(2):161–164.

Weidlich, W. et Haag, G. (1987). A dynamic phase transition model for spatial agglomeration processes. *Journal of Regional Science*, 27(4):529–569.

Weidlich, W. et Haag, G. (1988). *Interregional migration : dynamic theory and comparative analysis.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Wilson, A. (2010). The general urban model : Retrospect and prospect. *Papers in Regional Science*, 89(1):27–42.

Windrum, P., Fagiolo, G. et Moneta, A. (2007). Empirical validation of agent-based models : Alternatives and prospects. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 10(2):8.

Wu, B. et Birkin, M. (2012). Agent-based extensions to a spatial microsimulation model of demographic change. *In* Heppenstall, A., Crooks, A., See, L. et Batty, M., (eds) : *Agent-Based Models of Geographical Systems*, 347–377. Springer Netherlands, Dordrecht.

Yager, R. (1977). Multiple objective decision-making using fuzzy sets. *International Journal of Man-Machine Studies*, 9(4):375–382.

Youssoufi, S. (2011). *Satisfaction résidentielle et configurations spatiales en milieu périurbain*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 363 p.

Youssoufi, S. et Foltête, J.-C. (2013). Determining appropriate neighborhood shapes and sizes for modeling landscape satisfaction. *Landscape and Urban Planning*, 110:12–24.

Zaidi, A. et Rake, K. (2001). *Dynamic Microsimulation Models : A Review and Some Lessons for SAGE*. Simulating Social Policy in an Ageing Society (SAGE), Discussion paper (2), ESRC Grant number M565-28-1001, London.

Zellner, M. L. (2008). Embracing complexity and uncertainty : the potential of agent-based modeling for environmental planning and policy. *Planning Theory & Practice*, 9(4):437–457.

Zellner, M. L., Riolo, R. L., Rand, W., Brown, D. G., Page, S. E. et Fernandez, L. E. (2010). The problem with zoning : nonlinear effects of interactions between location preferences and externalities on land use and utility. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 37:408–428.

Zhu, W. et Timmermans, H. J. (2010). Cognitive process model of individual choice behaviour incorporating principles of bounded rationality and heterogeneous decision heuristics. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 37(1):59–74.

Zondag, B. et Pieters, M. (2005). Influence of accessibility on residential location choice. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1902:63–70.

Table des figures

1.1 Boucle de rétroaction entre transport et utilisation du sol de Wegener (Wegener, 2004) 50
1.2 Architecture de la plateforme Mobisim 54
1.3 Structure de la population synthétique de Mobisim 59
1.4 Exemples d'attributs pour chacune des composantes de la population synthétique de Mobisim 60
1.5 Exemple de localisation des zones à urbaniser selon leur niveau d'évaluation par MUP-City dans un scénario en prolongement de tendances (Bourgeois, 2012) 64
1.6 Exemples de résultats du développement résidentiel dans Mobisim - Comparaison de deux scénarios 65

2.1 Distinction entre étape dans le cycle de vie et évènement démographique 76
2.2 Synthèse du fonctionnement des évènements démographiques familiaux dans Mobisim-Démo 89
2.3 Interactions entre les évènements démographiques familiaux 92
2.4 Évènements démographiques généraux 93

3.1 Architecture du modèle des mobilités résidentielles de Mobisim 100
3.2 Définition des deux variables $\mu(cout|superficie)$] et $\mu(cout|voisinage)$] 108
3.3 Distribution des probabilités pour l'affectation de la classe « coût » aux logements 109
3.4 Relation entre le statut « propriétaire » de l'attribut du logement « statut d'occupation » et chacune des quatre possibilités d'âge du ménage . . . 112
3.5 Relation entre l'attribut du logement « coût » et chacune des quatre possibilités de composition du ménage 113
3.6 Exemple d'appréciation vis-à-vis de l'environnement résidentiel : appréciation du nombre de commerces et services fréquentés de manière hebdomadaire situés à moins de 2000m du logement. 115
3.7 Appréciations des attributs de l'environnement résidentiel global 116
3.8 Formalisation du modèle 117

3.9 Connaissance imparfaite des logements vacants par les ménages 121
3.10 Variables intervenant dans le calcul de l'intérêt global à déménager M . 122
3.11 Variable d'appréciation de l'attractivité définie pour le calcul de l'intérêt global à déménager M 122
3.12 Séquence des différentes étapes dans la simulation 124

4.1 Correspondance diplôme-profession, Affichard (1981) mis à jour par l'INSEE - Source : Forgeot & Gautié (1997) 149
4.2 Calcul de la probabilité d'appartenir à une catégorie socioprofessionnelle selon le niveau de diplôme. 150
4.3 La démarche de paramétrage du modèle Mobisim-Démo 174

5.1 Valeurs d'appréciations des attributs de l'environnement résidentiel local 192
5.2 Valeurs seuil d'appréciations des attributs de l'environnement résidentiel global 194
5.3 Valeurs d'appréciations des attributs de l'environnement résidentiel global195
5.4 Quantification des valeurs d'importance 203
5.5 Impacts des variations des paramètres α et β sur la fonction logistique φ 206
5.6 Relation entre la satisfaction S des ménages et leur mobilité individuelle φ208
5.7 Paramétrage de l'intérêt global à migrer 209
5.8 Taux de migration annuel dans l'agglomération bisontine simulé avec les valeurs initiales des paramètres de Mobisim-MR 210
5.9 La démarche de paramétrage du modèle Mobisim-MR 212

6.1 Exemple de visualisation de résultats pour étudier l'évolution de la variabilité au fil des années de simulation 232
6.2 Évolution de la stabilité du nombre de déménagements annuels 233
6.3 Évolution de la stabilité de la médiane des satisfactions résidentielles . 233
6.4 Évolution de la stabilité du nombre de migrants selon le sens de migration234
6.5 Évolution de la stabilité du nombre de logements vacants attractifs . . 235
6.6 Évolution de la stabilité de l'accessibilité au centre-ville en voiture . . . 236
6.7 Évolution de la stabilité de l'accessibilité au centre-ville en transports en commun 236
6.8 Évolution de la stabilité du nombre de ménages entre 30 et 44 ans . . . 237
6.9 Évolution de la stabilité du nombre de ménages de moins de 30 ans avec enfant 237
6.10 Échantillonnage systématique des simulations pour définir le seuil de stabilité des résultats du modèle 239

6.11 Evolution des valeurs de coefficients de variation entre les 1000 échantillons selon la taille de l'échantillon - Nombre de déménagements.
NB. Les échelles des ordonnées sont différentes sur les trois graphiques. 240
6.12 Evolution des valeurs de coefficients de variation entre les 1000 échantillons selon la taille de l'échantillon - Nombre de logements vacants attractifs
NB. Les échelles des ordonnées sont différentes sur les trois graphiques. 240

7.1 Raisonnement suivi pour l'analyse de sensibilité "one-at-a-time" 246
7.2 Comparaison des méthodes OAT et Elementary Effects 248
7.3 Trame générale du protocole de l'analyse de sensibilité de Mobisim-MR 253
7.4 Présentation et lecture des résultats de l'analyse de sensibilité selon la nature du résultat de simulation analysé 259
7.5 Valeurs choisies pour tester l'impact de la modification de l'appréciation d'un logement de taille moyenne par les ménages aux revenus élevés sur les résultats de simulation 265
7.6 Sensibilité de la satisfaction des ménages aux revenus élevés vis-à-vis de leur logement actuel : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis d'un logement de taille moyenne 267
7.7 Sensibilité de la satisfaction résidentielle actuelle des ménages aux revenus élevés : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis d'un logement de taille moyenne 268
7.8 Sensibilité de l'intérêt maximal des ménages aux revenus élevés pour un autre logement que le leur : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis d'un logement de taille moyenne 271
7.9 Sensibilité de l'intérêt maximal des ménages aux revenus élevés pour une autre localisation résidentielle : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis d'un logement de taille moyenne 272
7.10 Les différentes formes prises par la variable continue de l'appréciation de la part des hauts revenus dans un voisinage de 200m autour du logement par les ménages aux revenus élevés en fonction des valeurs choisies pour tester l'impact de la modification d'une appréciation de l'environnement résidentiel sur les résultats de simulation 274
7.11 Sensibilité de la satisfaction des ménages aux revenus élevés vis-à-vis de leur environnement résidentiel actuel : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis de la part des ménages aux revenus élevés associée à un voisinage social favorable 275

7.12 Sensibilité de la satisfaction résidentielle actuelle des ménages aux revenus élevés : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis de la part des ménages aux revenus élevés associée à un voisinage social favorable 277

7.13 Sensibilité de l'intérêt maximal des ménages aux revenus élevés vis-à-vis d'un autre environnement résidentiel : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis de la part des ménages aux revenus élevés associée à un voisinage social favorable 279

7.14 Sensibilité de l'intérêt maximal des ménages aux revenus élevés vis-à-vis d'une autre localisation résidentielle : modification de leur valeur d'appréciation vis-à-vis de la part des ménages aux revenus élevés associée à un voisinage social favorable 280

7.15 Sensibilité de l'hétérogénéité entre les vecteurs propres des ménages par rapport aux échelles de valeurs testées pour les importances 285

7.16 Sensibilité de la distribution des valeurs de satisfaction résidentielle aux échelles de valeurs testées pour la quantification des importances 286

7.17 Sensibilité de la distribution des valeurs d'intérêt maximal des ménages pour une autre localisation résidentielle aux échelles de valeurs testées pour la quantification des importances 288

7.18 Les paramètres de l'estimation du coût du logement et leur valeur par défaut 293

7.19 Valeur testée pour étudier l'impact de la modification du paramètre « taille du logement » correspondant à un coût du logement maximal (égal à 1) 295

7.20 Sensibilité du nombre de logements par classe de coût à une modification du paramètre « taille du logement » correspondant à un coût du logement maximal (égale à 1) $\mu(cout|superficie)$ 295

7.21 Sensibilité de la satisfaction moyenne sur l'agglomération à une modification du paramètre « taille du logement » correspondant à un coût du logement maximal (égale à 1) $\mu(cout|superficie)$ 296

7.22 Sensibilité du taux annuel de migration à une modification du paramètre « taille du logement » correspondant à un coût du logement maximal (égale à 1) $\mu(cout|superficie)$ 297

7.23 Valeurs testées pour étudier l'impact de la modification du paramètre « revenu médian dans le voisinage » correspondant à un coût du logement maximal (égal à 1) 298

7.24 Sensibilité du nombre de logements par classe de coût à une modification du paramètre « revenu médian dans le voisinage » correspondant à un coût du logement maximal (égale à 1) $\mu(cout|voisinage)$ 298
7.25 Sensibilité de la satisfaction moyenne sur l'agglomération à une modification du paramètre « revenu médian dans le voisinage » correspondant à un coût du logement maximal (égale à 1) $\mu(cout|voisinage)$ 299
7.26 Sensibilité du taux annuel de migration à une modification du paramètre « revenu médian dans le voisinage » correspondant à un coût du logement maximal (égale à 1) $\mu(cout|voisinage)$ 299
7.27 Valeurs testées pour étudier l'impact de la modification de la part respective des paramètres « taille du logement » et « revenu médian dans le voisinage » dans le calcul du coût du logement 300
7.28 Sensibilité du nombre de logements par classe de coût à une modification de la part respective des paramètres « taille du logement » et « revenu médian dans le voisinage » dans le calcul du coût du logement μ 301
7.29 Sensibilité de la satisfaction moyenne sur l'agglomération à une modification de la part respective des paramètres « taille du logement » et « revenu médian dans le voisinage » dans le calcul du coût du logement μ302
7.30 Sensibilité du taux annuel de migration à une modification de la part respective des paramètres « taille du logement » et « revenu médian dans le voisinage » dans le calcul du coût du logement μ 302
7.31 Valeurs testées pour étudier l'impact de la modification de la probabilité d'affectation des valeurs de coût à chacune des classes de coût 303
7.32 Sensibilité du nombre de logements par classe de coût à une modification de la probabilité d'affectation des valeurs de $P(\kappa_1)$, $P(\kappa_2)$ et $P(\kappa_3)$ à chacune des classes de coût 304
7.33 Sensibilité de la satisfaction moyenne sur l'agglomération à une modification de la probabilité d'affectation des valeurs de $P(\kappa_1)$, $P(\kappa_2)$ et $P(\kappa_3)$ à chacune des classes de coût 306
7.34 Sensibilité du taux annuel de migration à une modification de la probabilité d'affectation des valeurs de $P(\kappa_1)$, $P(\kappa_2)$ et $P(\kappa_3)$ à chacune des classes de coût 306
7.35 Attractivité effective et attractivité connue 310
7.36 Distribution du nombre *nby* de logements vacants attractifs par ménage dans une réplication 312
7.37 Distribution des valeurs médianes $Y_{med}(H)$ des attractivités effectives de chaque ménage dans une réplication 313

7.38 Résultats de l'analyse factorielle de données mixtes, réalisée sur un échantillon de 10 000 ménages tirés aléatoirement (2015) 314
7.39 Distributions des valeurs d'attractivité connue $v_J(H)$ de chaque ménage dans une réplication 317
7.40 Relation entre la valeur d'attractivité effective $Y_{med}(H)$ et la valeur d'attractivité connue $v_J(H)$ de chaque ménage - en 2015 pour une réplication 318
7.41 Profil des ménages appartenant à chacune des classes de représentativité de l'attractivité effective $Y_{med}(H)$ par l'attractivité connue $v_J(H)$ - pour une réplication 321
7.42 Profil des ménages appartenant à chacune des classes de proximité de la valeur d'attractivité connue $v_J(H)$ à la référence collective $A_H(v_J) = 0,12$ - pour une réplication 324
7.43 Sensibilité des valeurs d'attractivité connue v_J, d'intérêt global à déménager M et de la probabilité de déménager ω à une modification du nombre de logements connus n_J 331
7.44 Sensibilité de la répartition des ménages selon leur valeur d'intérêt global à migrer M à la modification du nombre de logements connus n_J 333
7.45 Sensibilité de la satisfaction moyenne sur l'agglomération à une modification du nombre n_J de logements connus par le ménage 336
7.46 Sensibilité du taux annuel de migration à une modification du nombre n_J de logements connus par le ménage 336
7.47 Sensibilité du nombre de migrants selon le sens de migration à une modification du nombre n_J de logements connus par le ménage 337
7.48 Valeurs testées pour la modification du paramètre d'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale 339
7.49 Sensibilité des valeurs d'intérêt global à déménager M et de la probabilité de déménager Ω à une modification du paramètre d'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale des logements 340
7.50 Sensibilité de la répartition des ménages selon leur valeur d'intérêt global à migrer M à la modification du paramètre d'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale des logements 341
7.51 Sensibilité de la satisfaction résidentielle moyenne à une modification du paramètre d'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale 343
7.52 Sensibilité du taux annuel de migration à une modification du paramètre d'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale 344
7.53 Sensibilité du nombre de migrants selon le sens de migration à une modification du paramètre d'appréciation $A_H(v_J)$ de l'attractivité globale 345

7.54 Valeurs testées pour la modification du paramètre α de chaque classe de mobilité individuelle φ des ménages 346
7.55 Sensibilité des valeurs de φ au sein de la classe 1 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 1 . . . 349
7.56 Sensibilité des valeurs de φ au sein de la classe 2 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 2 . . . 350
7.57 Sensibilité des valeurs de φ au sein de la classe 3 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 3 . . . 351
7.58 Sensibilité des valeurs de φ au sein de la classe 4 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 4 . . . 352
7.59 Sensibilité des valeurs de φ au sein de la classe 5 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 5 . . . 353
7.60 Histogrammes de distribution de la part des ménages selon les valeurs de φ au sein de chaque classe de mobilité individuelle en 2015 : sensibilité à la modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de chaque classe 354
7.61 Histogrammes de distribution de la part des ménages selon les valeurs de φ au sein de chaque classe de mobilité individuelle en 2020 : sensibilité à la modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de chaque classe 355
7.62 Histogrammes de distribution de la part des ménages selon les valeurs de φ au sein de chaque classe de mobilité individuelle en 2030 : sensibilité à la modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de chaque classe 356
7.63 Sensibilité des valeurs de Ω au sein de la classe 1 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 1 . . . 357
7.64 Sensibilité des valeurs de Ω au sein de la classe 2 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 2 . . . 358
7.65 Sensibilité des valeurs de Ω au sein de la classe 3 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 3 . . . 359
7.66 Sensibilité des valeurs de Ω au sein de la classe 4 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 4 . . . 360
7.67 Sensibilité des valeurs de Ω au sein de la classe 5 : modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de la classe 5 . . . 361
7.68 Sensibilité des taux de migration intra-classes à la modification de la valeur de α dans le calcul de la mobilité individuelle de chacune des classes 363

7.69 Sensibilité des valeurs de mobilité individuelle φ pour tous les ménages en 2015 : modifications de la valeur de α 365
7.70 Sensibilité des valeurs de mobilité individuelle φ pour tous les ménages en 2020 : modifications de la valeur de α 366
7.71 Sensibilité des valeurs de mobilité individuelle φ de tous les ménages en 2030 : modifications de la valeur de α 367
7.72 Sensibilité des valeurs de probabilité de déménager Ω de tous les ménages en 2015 : modifications de la valeur de α 368
7.73 Sensibilité des valeurs de probabilité de déménager Ω de tous les ménages en 2020 : modifications de la valeur de α 369
7.74 Sensibilité des valeurs de probabilité de déménager Ω de tous les ménages en 2030 : modifications de la valeur de α 370
7.75 Sensibilité du taux de migration moyen selon α 371
7.76 Synthèse de la sensibilité de la satisfaction résidentielle des ménages aux revenus élevés selon les appréciations des attributs du logement et de l'environnement résidentiel actuels (Fig. 7.7 et 7.12) 373
7.77 Synthèse de la sensibilité de l'intérêt des ménages aux revenus élevés selon les appréciations des attributs d'autres logements et environnements résidentiels que le leur (Fig. 7.9 et 7.14) 374
7.78 Synthèse de la sensibilité du nombre de logements par classe de coût aux modifications des différents paramètres permettant d'estimer le coût d'un logement dans Mobisim : le point en 2030 375
7.79 Synthèse de la sensibilité de l'intérêt global à déménager M selon les paramètres n_J et $A_H(v_J)$ (figures 7.43 et 7.49) 377
7.80 Synthèse de la sensibilité de Ω selon les paramètres n_J, $A_H(v_J)$ et les cinq α (Fig. 7.43, 7.49, et 7.72 à 7.74) 379
7.81 Synthèse de la sensibilité de la satisfaction résidentielle moyenne des ménages à la modification de différents paramètres de Mobisim (Fig. 7.21, 7.25, 7.29, 7.33, 7.45 et 7.51) 381
7.82 Synthèse de la sensibilité de la satisfaction résidentielle moyenne des ménages aux différents paramètres de Mobisim : le point en 2030 382
7.83 Synthèse de la sensibilité du taux annuel de migration aux différents paramètres de Mobisim : le point en 2015 et en 2030 383
7.84 Synthèse de la sensibilité du taux de migration moyen sur l'agglomération aux modifications des différents paramètres de Mobisim-MR 384
7.85 Présentation de la communauté d'agglomération du Grand Besançon . 394

8.1 Scénario BAU : configuration résidentielle simulée de l'agglomération bisontine en 2030 406
8.2 Scénario BAU : évolution du nombre d'habitants et de ménages à Besançon, et dans les communes périurbaines 406
8.3 Scénario BAU : taux annuel de migration dans l'agglomération 407
8.4 Scénario BAU : évolution du nombre de migrants selon le sens de migration dans l'agglomération.
NB. Le nombre de migrants n'est pas calculé pour l'année 2015, parce que l'introduction du tram dans Mobisim se fait par une suspension de la simulation à cette date. 407
8.5 Scénario BAU : évolution de la satisfaction moyenne sur l'agglomération entre 2011 et 2030 408
8.6 Scénario BAU : vacance des logements 408
8.7 Scénario BAU : localisation des logements sociaux 410
8.8 Scénario BAU : localisation des logements en location 411
8.9 Scénario BAU : localisation des logements occupés par des propriétaires 412
8.10 Scénario BAU : distribution des revenus des ménages (en euros) selon le statut d'occupation de leur logement. 413
8.11 Scénario BAU : évolution du nombre de ménages cibles, à Besançon et dans les communes périurbaines 414
8.12 Scénario BAU : localisation des couples avec enfant(s) aux revenus moyens ou élevés 415
8.13 Scénario BAU : localisation des familles monoparentales aux revenus moyens ou élevés 416
8.14 Scénario BAU : distribution des revenus des ménages cibles (en euro) à Besançon et dans les communes périurbaines 417
8.15 Scénario BAU : satisfaction moyenne des ménages cibles
NB. Les axes des ordonnées sont différents sur les graphiques 417
8.16 Scénario BAU : distribution des valeurs de satisfaction vis-à-vis du logement, selon les caractéristiques du logement occupé 419
8.17 Scénario BAU : nombre de logements grands et moyens selon leur coût et leur statut d'occupation, à Besançon et dans le périurbain. 421
8.18 Scénario BAU : nombre de grands logements selon leur type et leur statut d'occupation, à Besançon et dans le périurbain. 422
8.19 Scénario BAU : nombre et attractivité moyenne des logements vacants pour les couples avec enfant(s) aux revenus moyens et élevés en 2012 et 2030 par communes / IRIS 423

8.20 Scénario BAU : nombre et attractivité moyenne des logements vacants pour les familles monoparentales aux revenus moyens et élevés en 2012 et 2030 par communes / IRIS 424

9.1 Création du fichier des nouvelles constructions du scénario de développement résidentiel sur la ville de Besançon 430
9.2 IRIS concernés par la politique de construction volontaristes de la Ville de Besançon 431
9.3 Comparaison des deux scénarios : taux annuel de migration dans l'agglomération 432
9.4 Comparaison des deux scénarios : part des ménages migrants de Besançon aux communes périurbaines parmis l'ensemble des ménages migrants dans l'agglomération 432
9.5 Comparaison des deux scénarios : évolution du nombre de ménages cibles selon les lieux de résidence 433
9.6 Comparaison des deux scénarios : satisfaction moyenne des ménages cibles
NB. L'axe des ordonnées est différent sur les trois graphiques 433
9.7 Localisation des couples avec enfant(s) aux revenus moyens et élevés en 2012 et 2030 simulés 435
9.8 Localisation des familles monoparentales aux revenus moyens et élevés en 2012 et 2030 simulés 436
9.9 Comparaison des deux scénarios : nombre et attractivité moyenne des logements vacants pour les couples avec enfant(s) aux revenus moyens et élevés en 2030 par communes / IRIS 437
9.10 Comparaison des deux scénarios : nombre et attractivité moyenne des logements vacants pour les familles monoparentales aux revenus moyens et élevés en 2030 par communes / IRIS 438

Liste des tableaux

2.1 Récapitulatif des évènements démographiques dans Mobisim 90

3.1 Caractéristiques générales de Mobisim-MR 104
3.2 Variables socio-économiques caractérisant les ménages 105
3.3 Variables caractérisant le logement 107

4.1 Calcul de la projection démographique à partir du PLH 143
4.2 Calcul de la projection démographique TEAM 145
4.3 Calcul de la projection démographique linéaire 145
4.4 Paramètres des évènements modélisés dans Mobisim-Démo 147
4.5 Valeurs initiales de paramètres - Probabilités de migration selon le type de ménage 152
4.6 Valeurs initiales de paramètres - Distribution des entrées selon l'âge . . 152
4.7 Valeurs initiales de paramètres - Distribution des sorties selon l'âge . . 153
4.8 Résultats de simulation avec les valeurs initiales des paramètres 157
4.9 Résultats obtenus avec les valeurs initiales de paramètres et effectifs des différentes projections sur 20 ans 158
4.10 Modifications apportées aux valeurs de paramètres pour atteindre l'objectif 1 (PLH) 160
4.11 Résultats du calibrage pour atteindre la projection PLH 161
4.12 Modifications apportées aux valeurs de paramètres pour atteindre l'objectif 2 (TEAM) 162
4.13 Résultats du calibrage pour atteindre la projection TEAM 163
4.14 Modifications apportées aux valeurs de paramètres pour atteindre l'objectif 3 (Linéaire) 164
4.15 Résultats du calibrage pour atteindre la projection linéaire 165
4.16 Valeurs initiales de paramètres - Mise en couple, primo-naissances et séparations 177
4.17 Valeurs initiales de paramètres - Décès 178
4.18 Valeurs initiales de paramètres - Naissances suivantes 179
4.19 Valeurs initiales de paramètres - Probabilités constantes 179

4.20 Valeurs finales (par défaut) de paramètres - Probabilités constantes . . 179
4.21 Valeurs finales (par défaut) des paramètres - Mise en couple, primo-naissances et séparations 180

5.1 Paramètres et données de Mobisim-MR 185
5.2 Appréciations des attributs du logement actuel I (en colonne) pour chaque caractéristique du ménage (en lignes) 190
5.3 Appréciations des attributs de chaque logement potentiel J (en colonne) pour chaque caractéristique du ménage (en lignes) 190
5.4 Table des comparaisons de Yager (1977) : poids associés à l'importance de l'attribut A comparée à celle de l'attribut B 196
5.5 Exemple de comparaisons de trois attributs deux à deux 197
5.6 Importances des attributs du logement actuel I (en colonne) pour chaque caractéristique du ménage (en lignes) 198
5.7 Importances des attributs de chaque logement potentiel J (en colonne) pour chaque caractéristique du ménage (en lignes) 199
5.8 Importances des attributs de l'environnement résidentiel actuel I (en colonne) pour chaque caractéristique du ménage (en lignes) 200
5.9 Importances des attributs des environnements résidentiels potentiels J (en colonne) pour chaque caractéristique du ménage (en lignes) 201
5.10 Table de comparaisons, adaptée de Saaty (1990) 202
5.11 Classement des cinq classes de ménages par taux annuel de migration . 207
5.12 Valeurs de α issues du paramétrage 208

6.1 Variables observées dans l'analyse de stabilité 226
6.2 Coefficients de variation entre les 100 simulations 231

7.1 Paramètres testés et résultats de simulation analysés dans l'analyse de sensibilité de Mobisim-MR 254
7.2 Valeurs testées pour chaque paramètre dans l'analyse de sensibilité de Mobisim-MR.
NB. En gras : les valeurs par défaut. 257
7.3 Nombre d'enregistrements par résultat de simulation pour l'analyse de sensibilité 262
7.4 Valeurs des neufs échelles d'importance testées 282
7.5 Valeurs de l'indice aléatoire de cohérence RI selon le nombre de critères n 290
7.6 Résultats du test de cohérence de Saaty 291

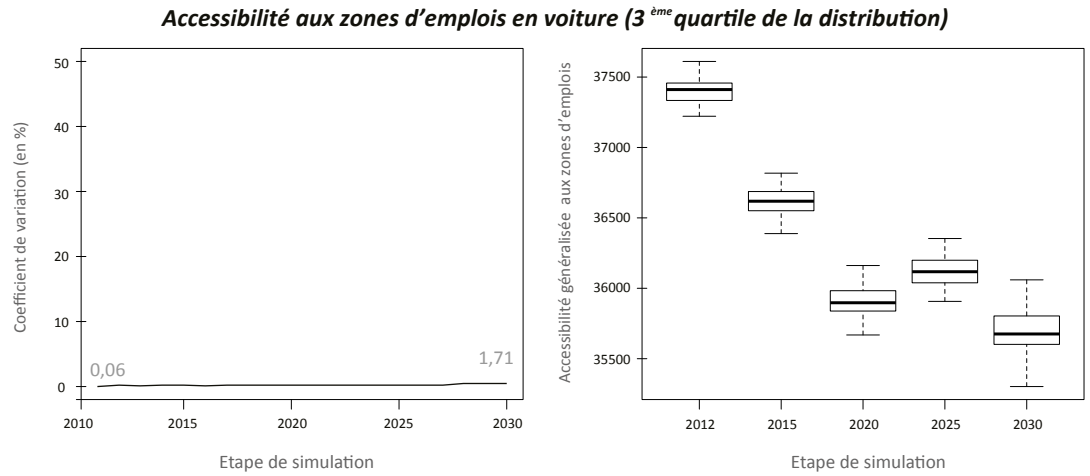
7.7 Répartition des ménages dans les trois classes de représentativité de l'attractivité effective $Y_{med}(H)$ par l'attractivité connue $v_J(H)$ 320
7.8 Répartition des ménages dans les trois classes de proximité des valeurs de $v_J(H)$ à la référence collective $A_H(v_J) = 0,12$ 323
7.9 Correspondance entre les classes de représentativité de $Y_{med}(H)$ par $v_J(H)$ et de proximité de $v_J(H)$ à $A_H(v_J)$ en 2015 - pour la réplication 1 327
7.10 Sensibilité du classement des cinq classes de ménages selon leur taux de migration pour chaque valeur de α testée 364
7.11 Taux annuel de migration des ménages de chaque classe de mobilité individuelle : valeurs données par MIGCOM et valeurs simulées par Mobisim avec les valeurs par défaut des paramètres 387

8.1 Distribution des logements selon leur type et statut d'occupation 403
8.2 Répartition spatiale des logements selon leur type 403

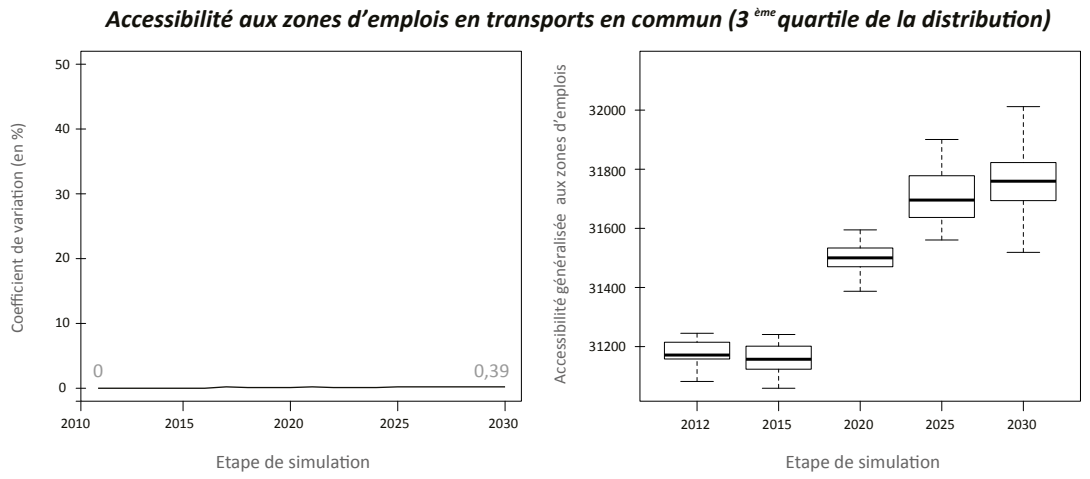
9.1 Répartition des nouvelles constructions pour le développement résidentiel simulé : différence entre le scénario de développement contrôlé (DC) et le scénario du prolongement des tendances actuelles (BAU) 429

Annexes

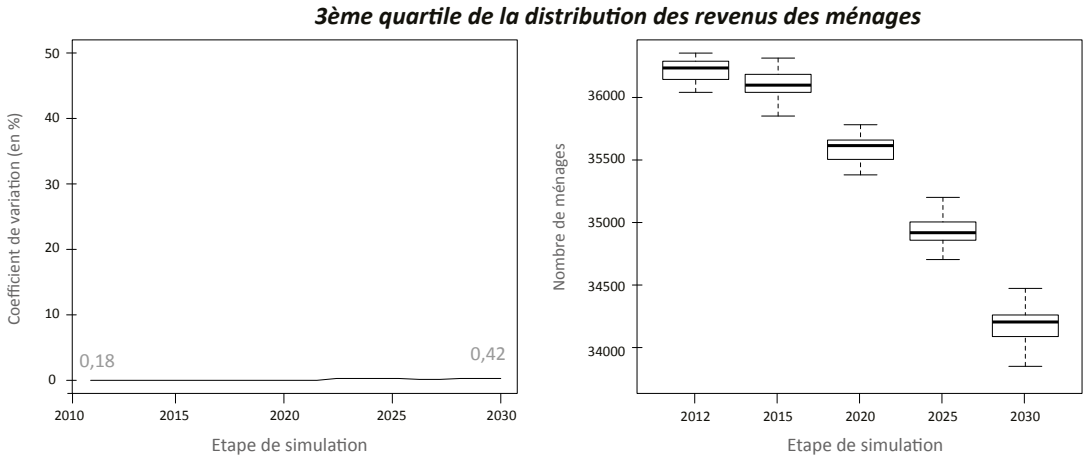
Annexe 1 - Analyse de stabilité : coefficients de variation entre les 100 réplications



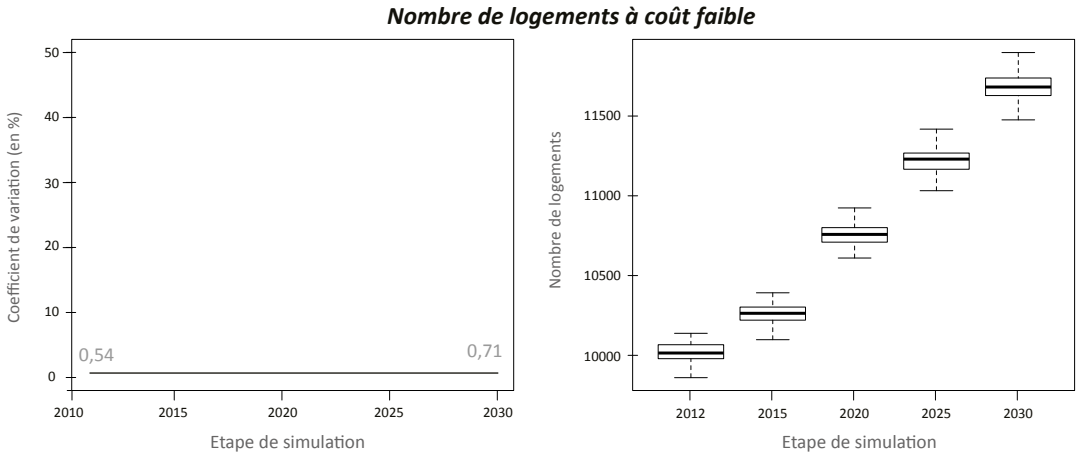
Évolution de la stabilité de l'accessibilité aux zones d'emploi en voiture



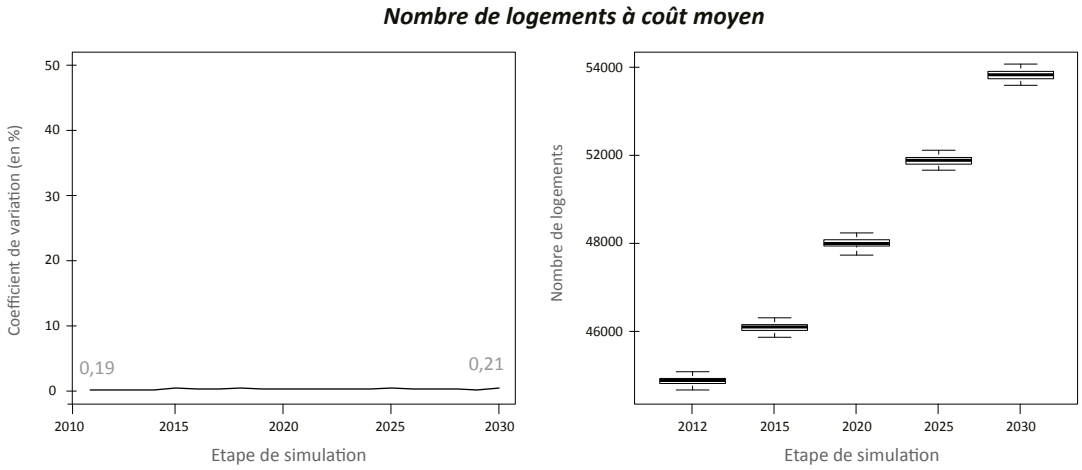
Évolution de la stabilité de l'accessibilité aux zones d'emploi en transports en commun



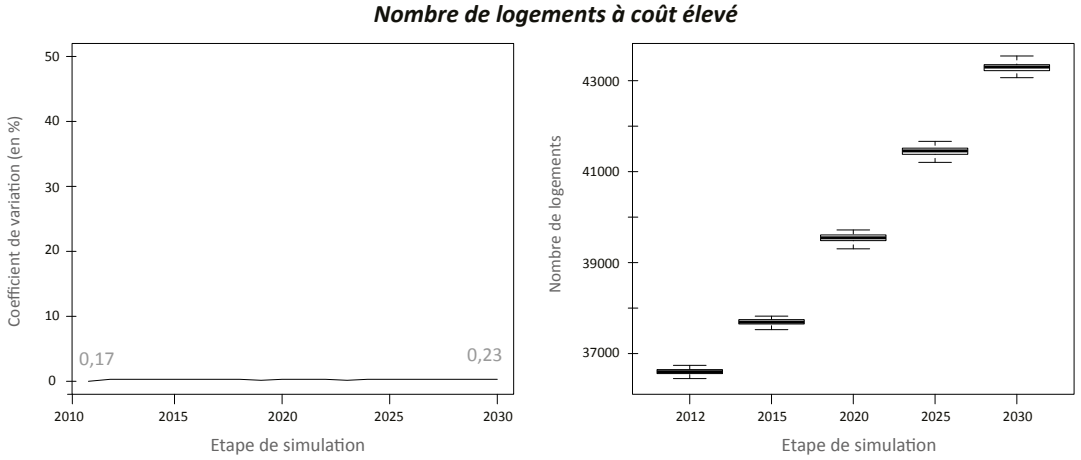
Évolution de la stabilité du troisième quartile de la distribution des revenus des ménages



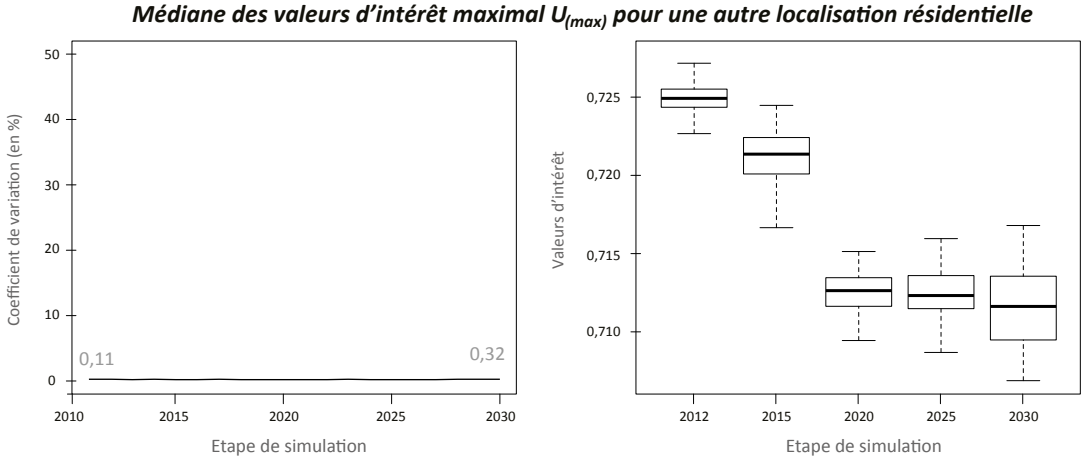
Évolution de la stabilité du nombre de logements à coût faible



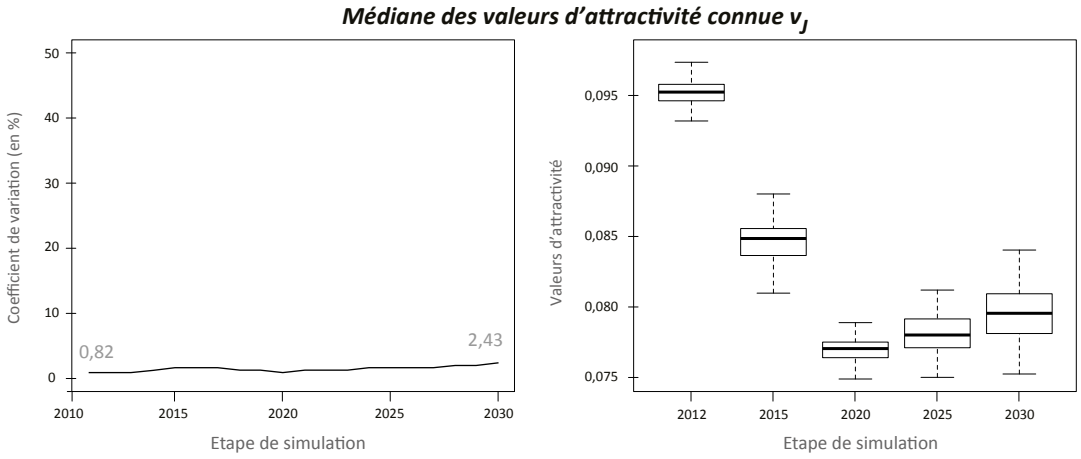
Évolution de la stabilité du nombre de logements à coût moyen



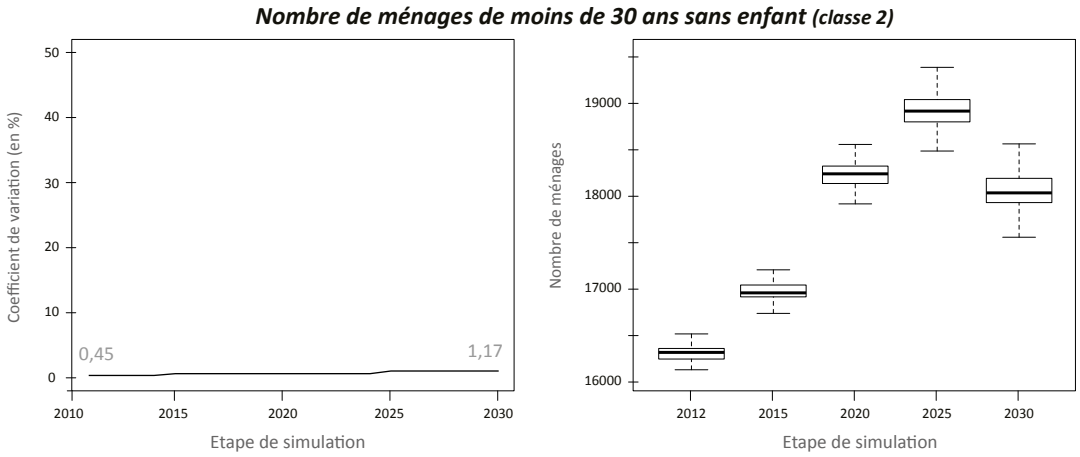
Évolution de la stabilité du nombre de logements à coût élevé



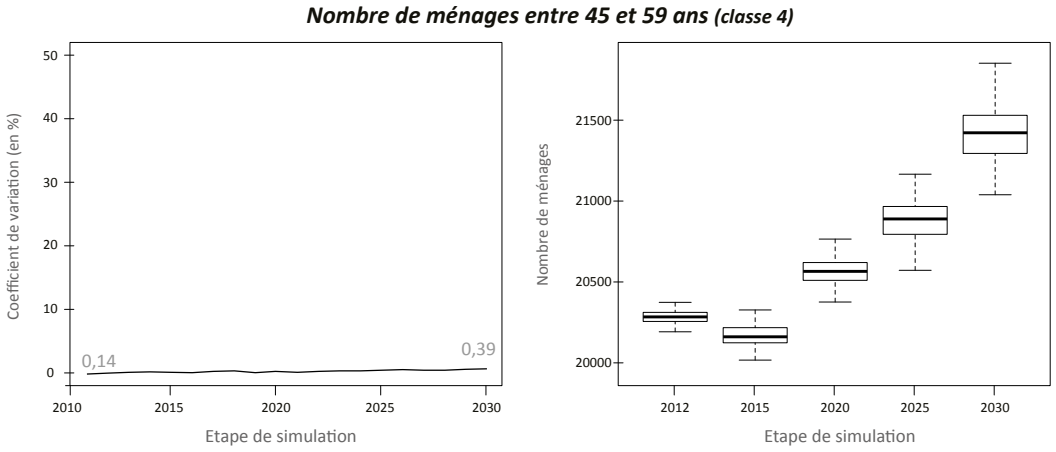
Évolution de la stabilité de la médiane des valeurs d'intérêt maximal des ménages pour une autre localisation résidentielle



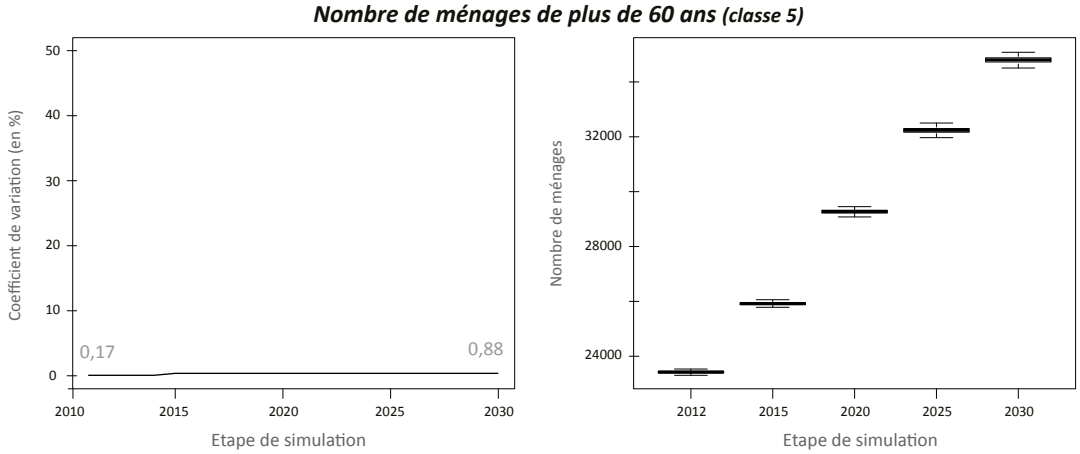
Évolution de la stabilité de la médiane des valeurs d'attractivité connue v_J



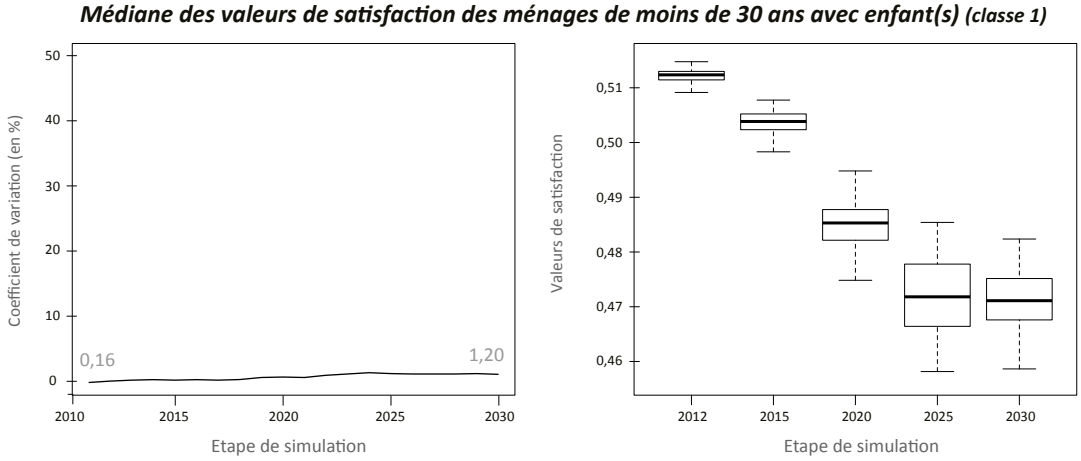
Évolution de la stabilité du nombre de ménages de moins de 30 ans sans enfant



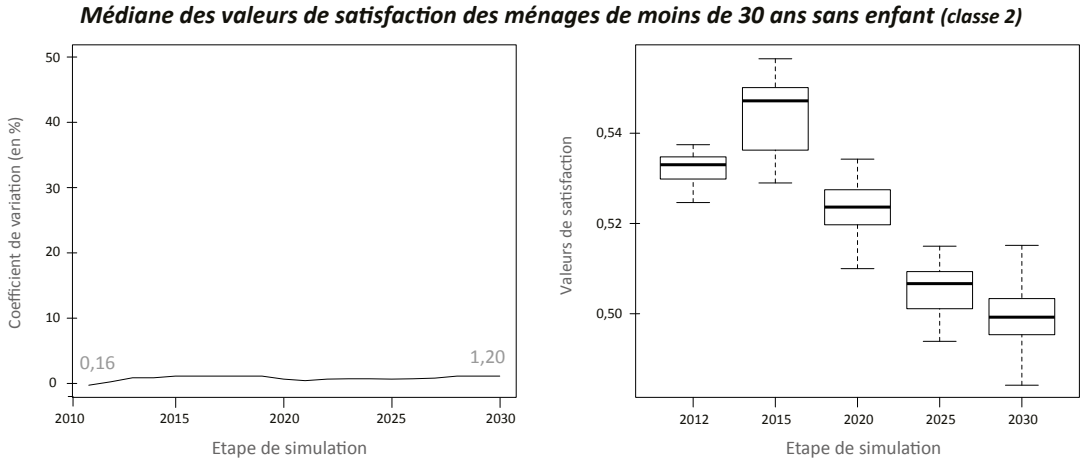
Évolution de la stabilité du nombre de ménages entre 45 et 59 ans



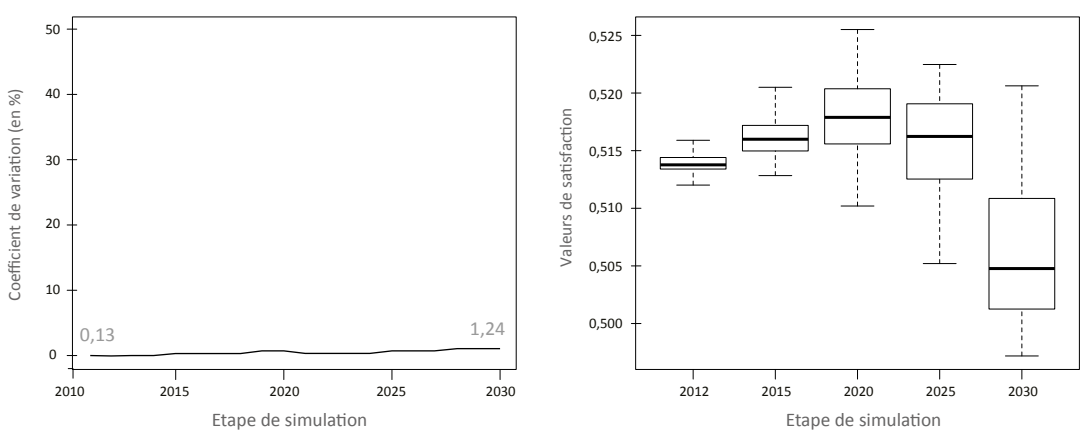
Évolution de la stabilité du nombre de ménages de plus de 60 ans



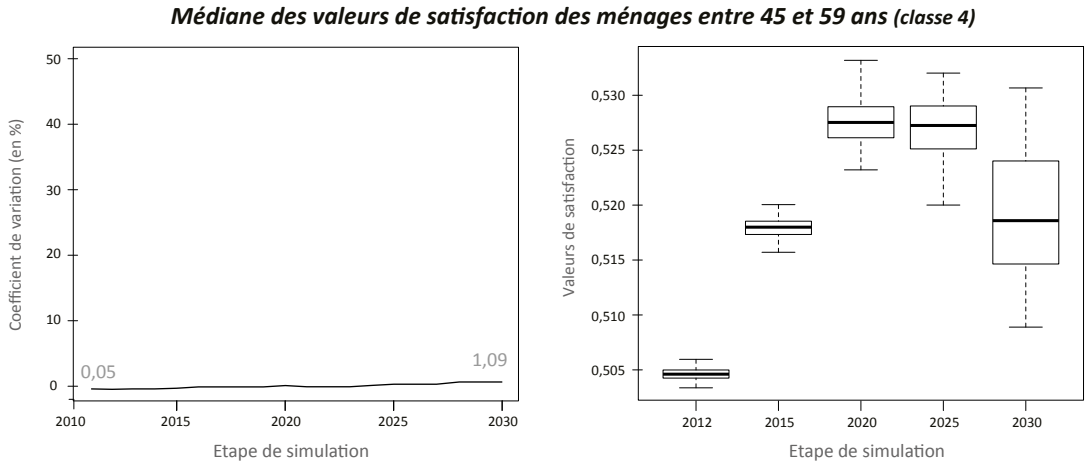
Évolution de la stabilité de la médiane des satisfactions résidentielles des ménages de moins de 30 ans avec enfant(s)



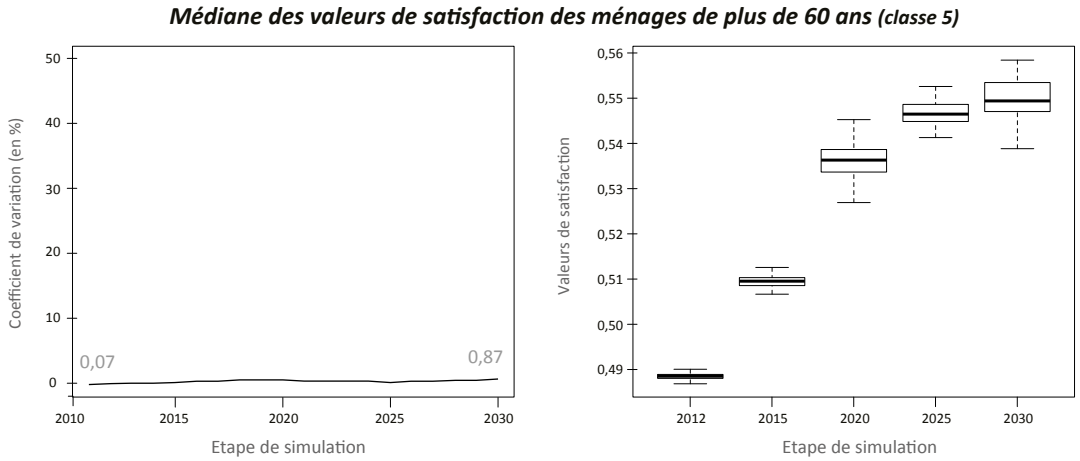
Évolution de la stabilité de la médiane des satisfactions résidentielles des ménages de moins de 30 ans sans enfant



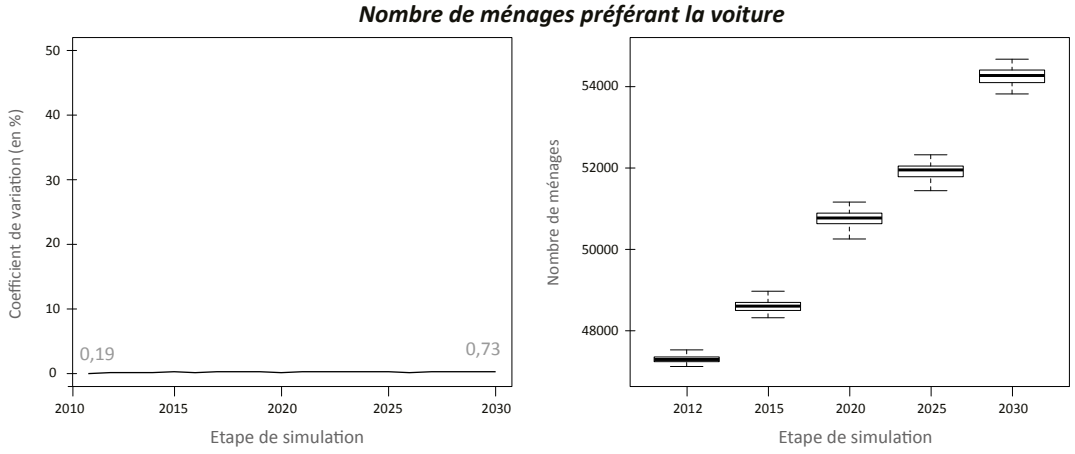
Évolution de la stabilité de la médiane des satisfactions résidentielles des ménages entre 30 et 44 ans



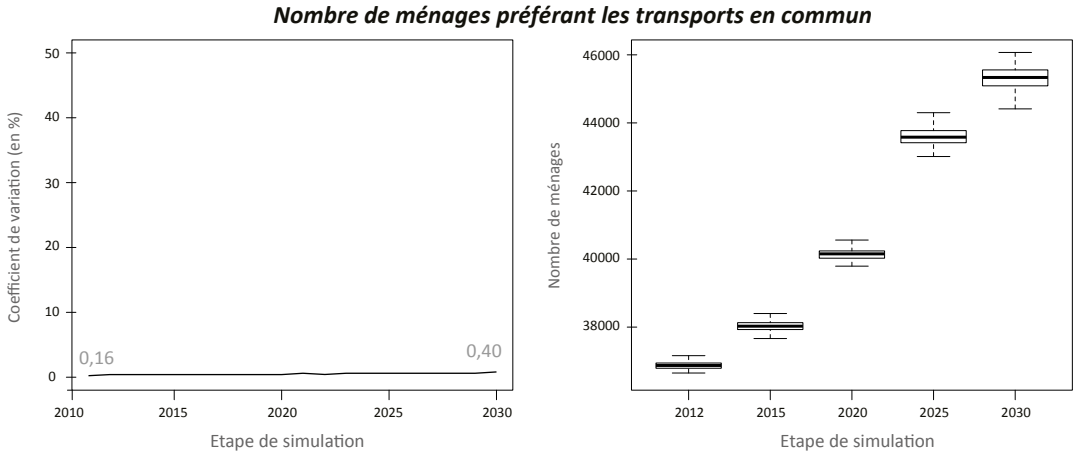
Évolution de la stabilité de la médiane des satisfactions résidentielles des ménages entre 45 et 59 ans



Évolution de la stabilité de la médiane des satisfactions résidentielles des ménages de plus de 60 ans



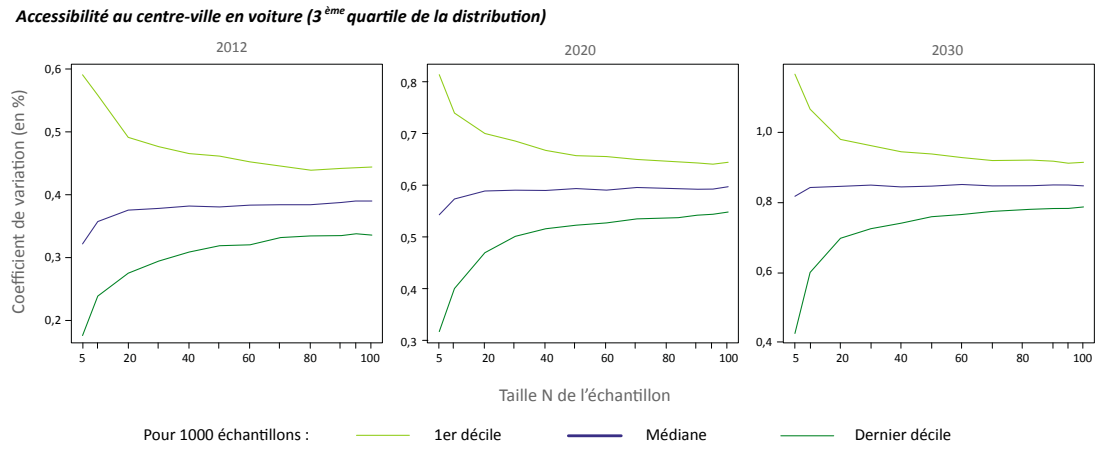
Évolution de la stabilité du nombre de ménages préférant la voiture



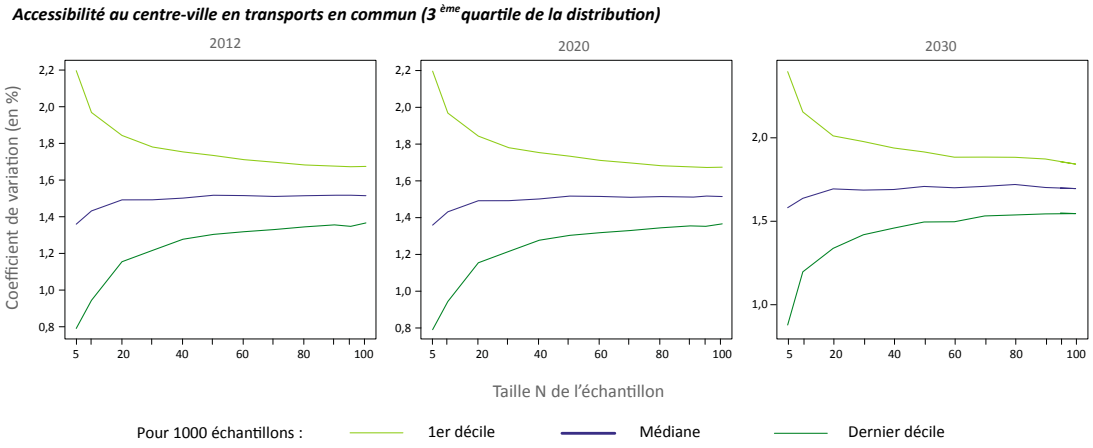
Évolution de la stabilité du nombre de ménages préférant les transports en commun

Annexe 2 - Analyse de stabilité : évolution des valeurs de coefficients de variations selon la taille de l'échantillon

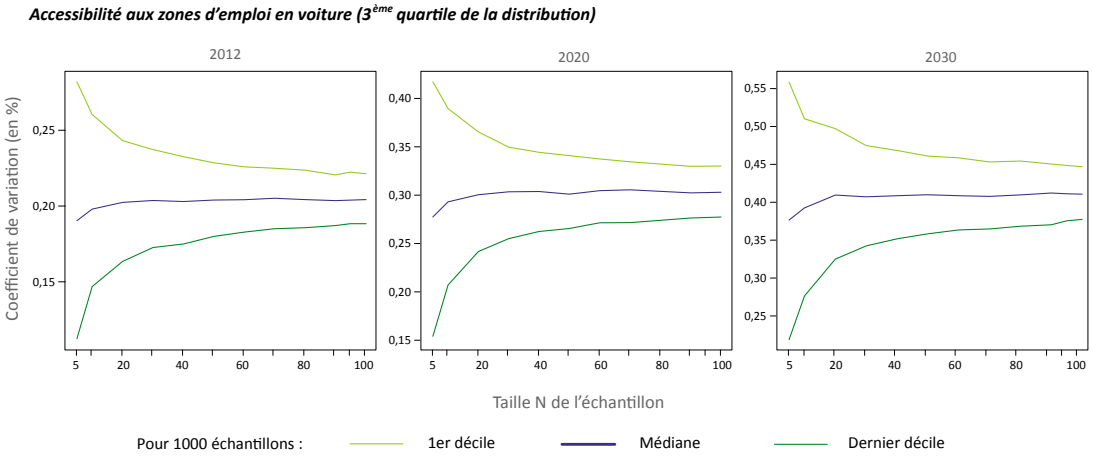
Les graphiques de cette annexe représentent, pour chaque variable, l'évolution des valeurs de coefficients de variation entre les 1000 échantillons, selon la taille de l'échantillon.



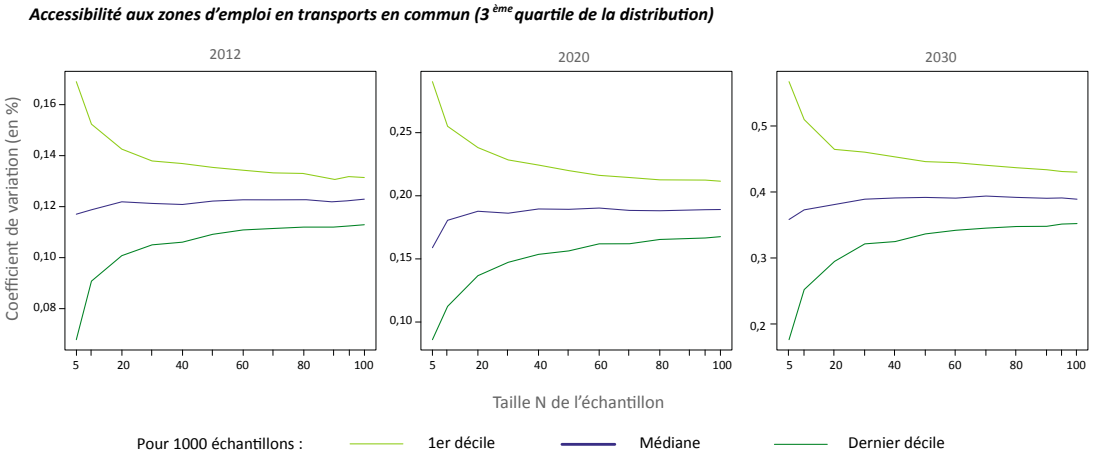
3ème quartile des accessibilités au centre-ville en voiture



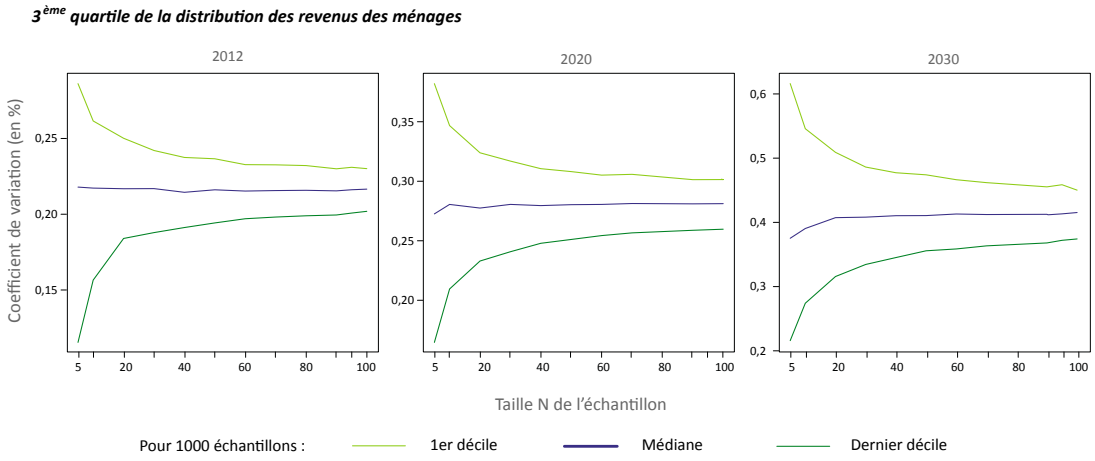
3ème quartile des accessibilités aux zones d'emploi en voiture



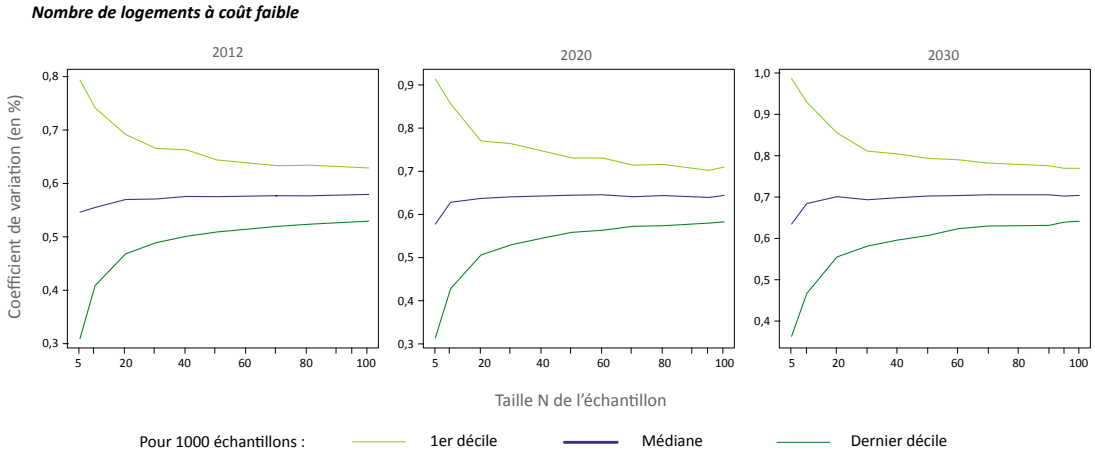
3ème quartile des accessibilités au centre-ville en transports en commun



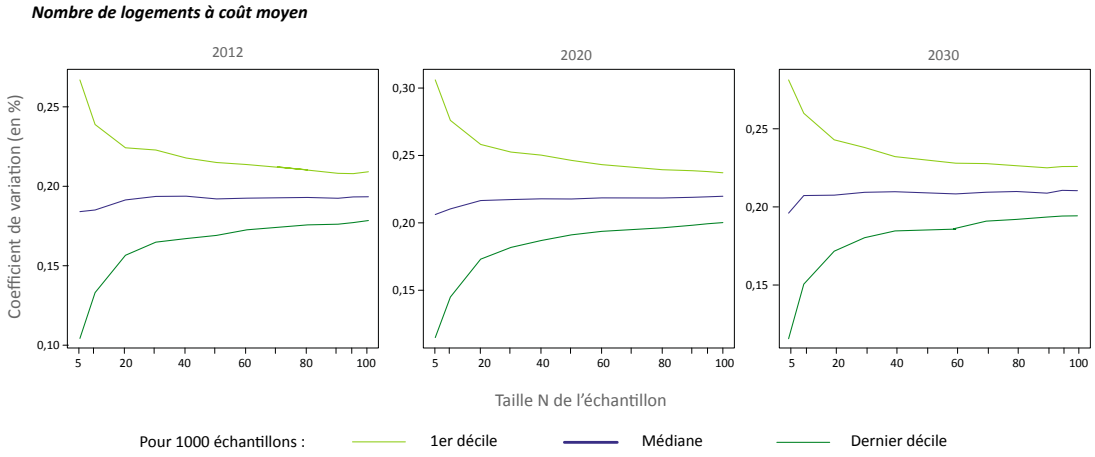
3ème quartile des accessibilités aux zones d'emploi aux transports en commun



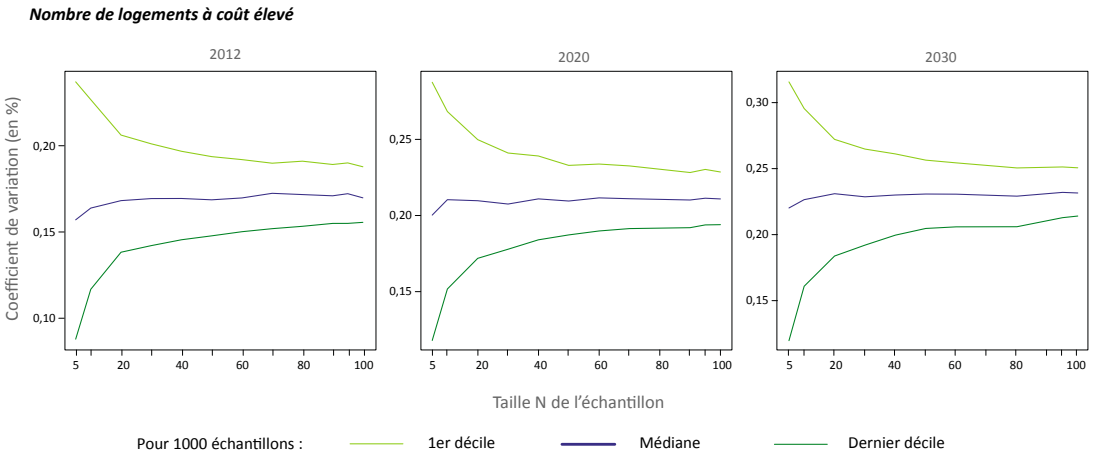
3ème quartile des revenus des ménages



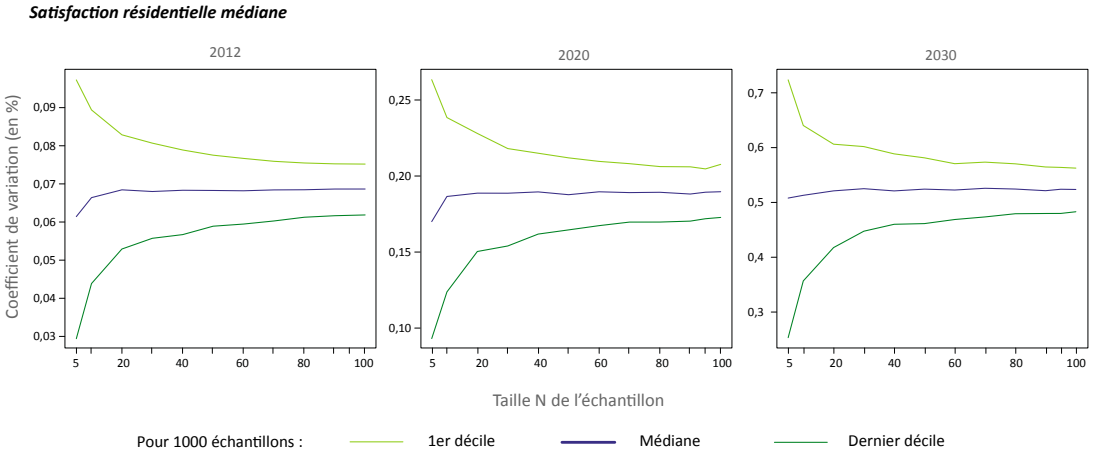
Nombre de logements à coût faible



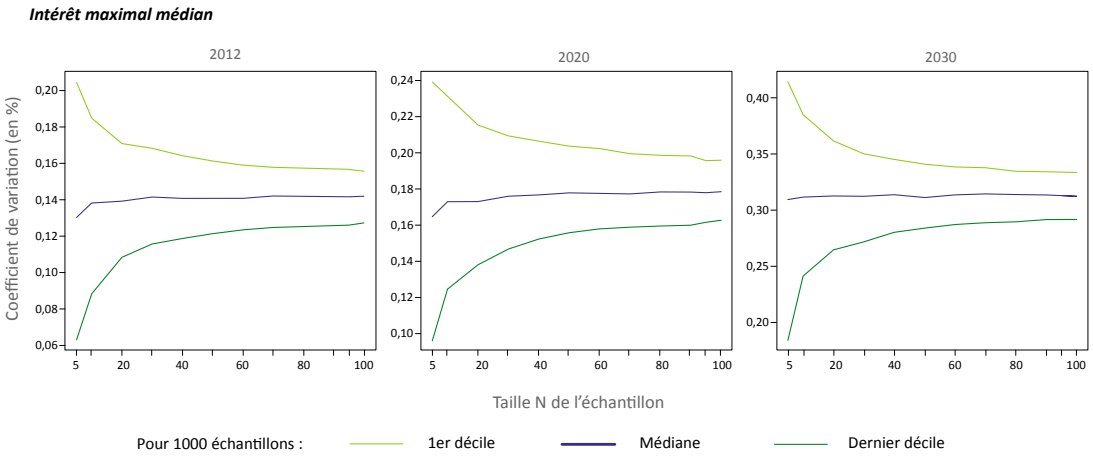
Nombre de logements à coût moyen



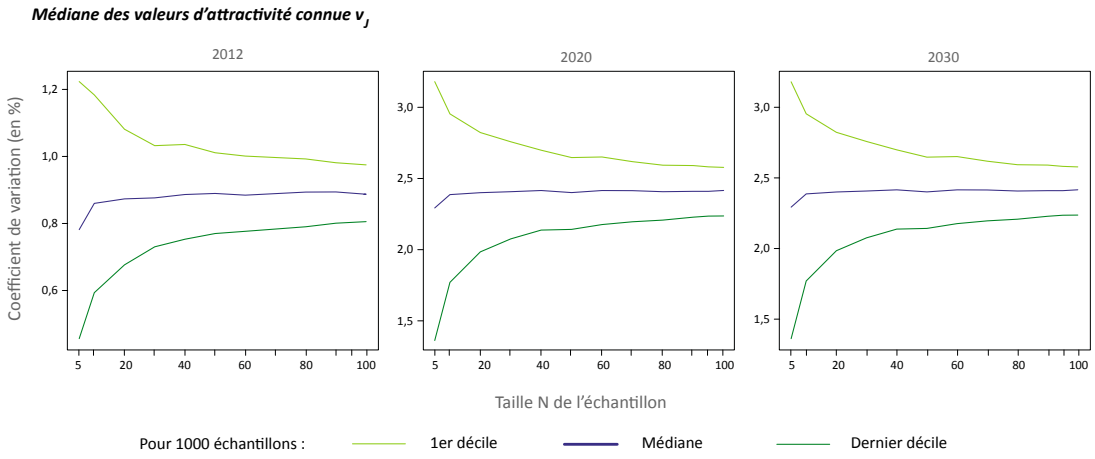
Nombre de logements à coût élevé



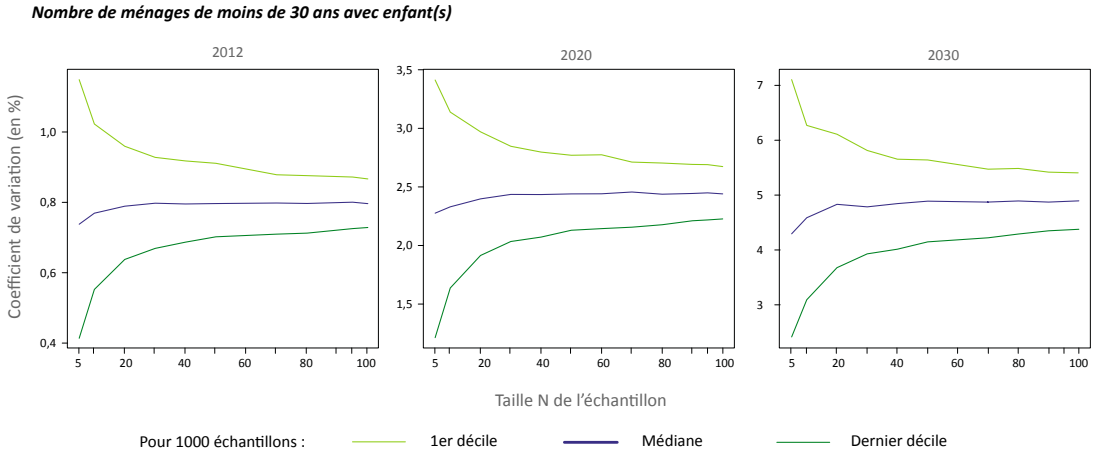
Médiane des valeurs de satisfaction résidentielle S



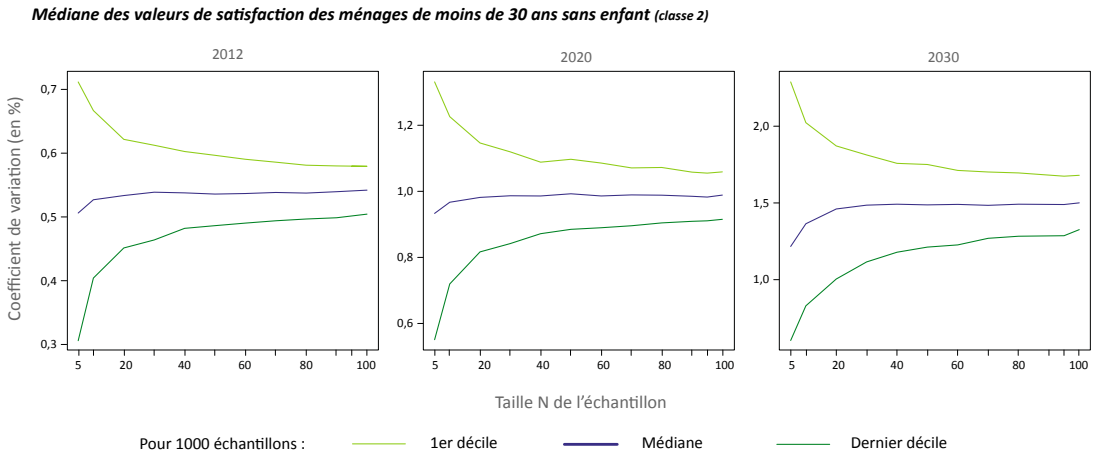
Médiane des valeurs d'intérêt maximal U_{max}



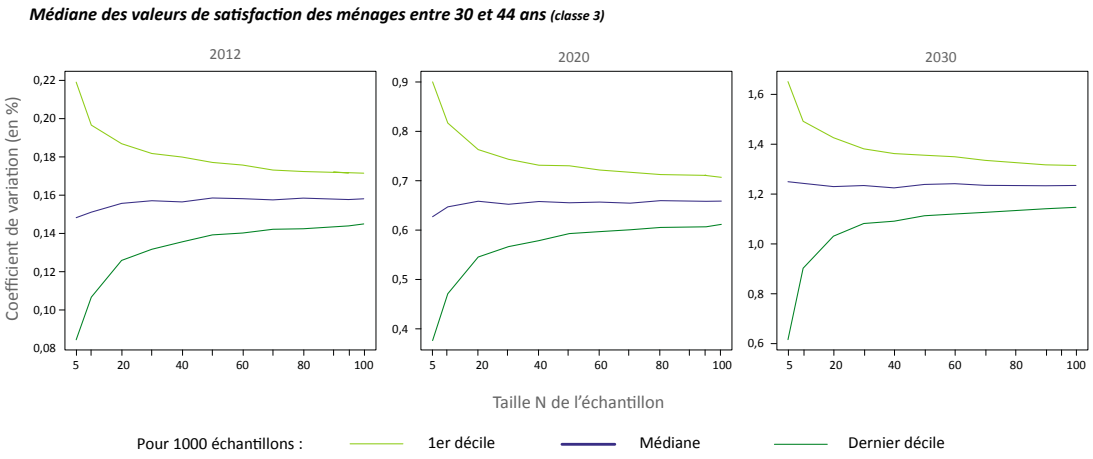
Médiane des valeurs d'attractivité connue v_J



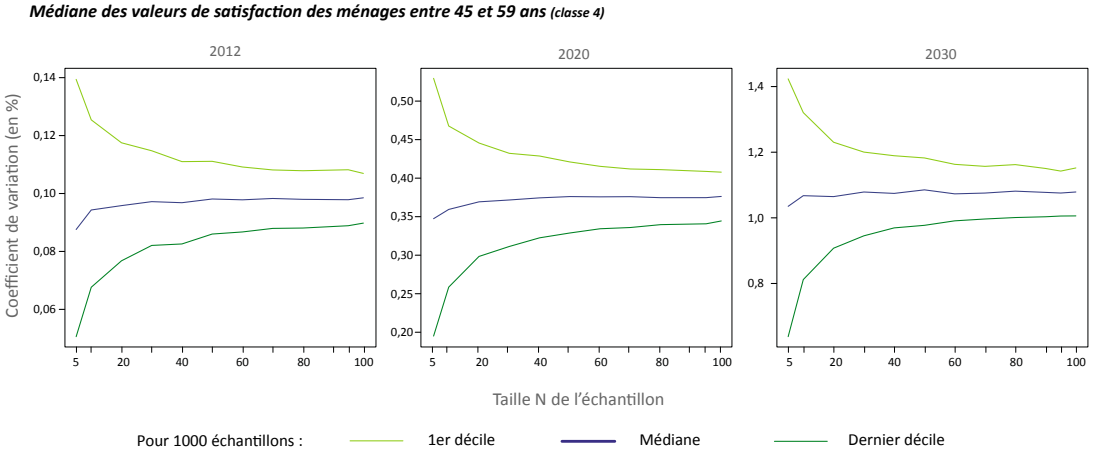
Nombre de ménages de moins de 30 ans avec enfant(s) - classe 1



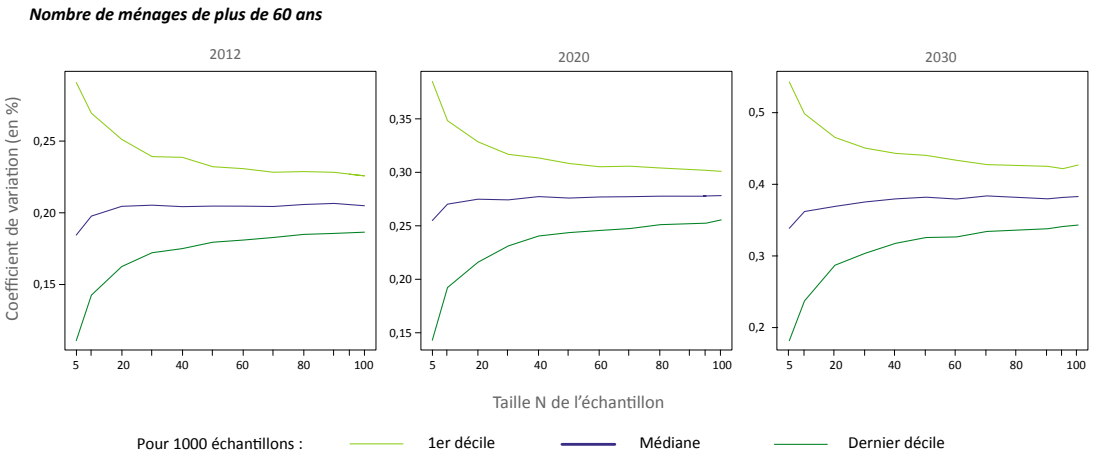
Nombre de ménages de moins de 30 ans sans enfant - classe 2



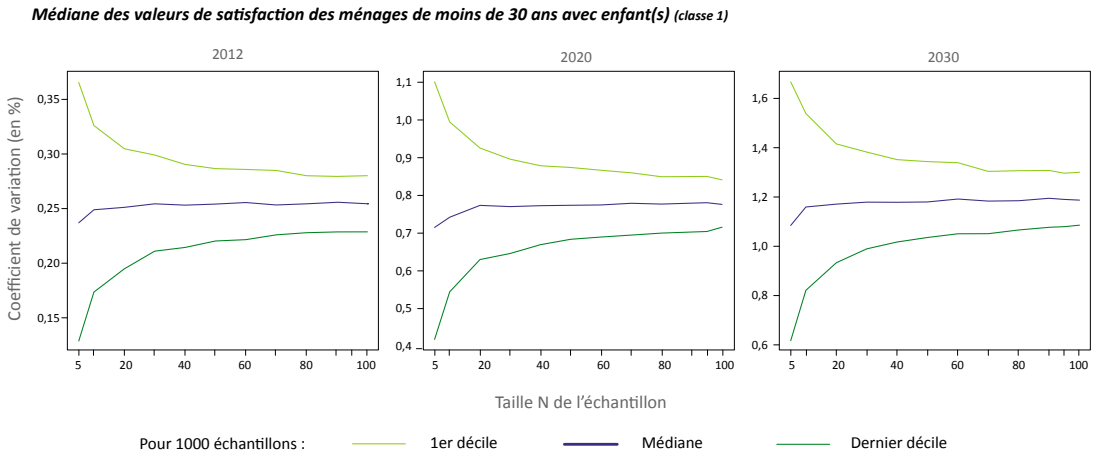
Nombre de ménages entre 30 et 44 ans - classe 3



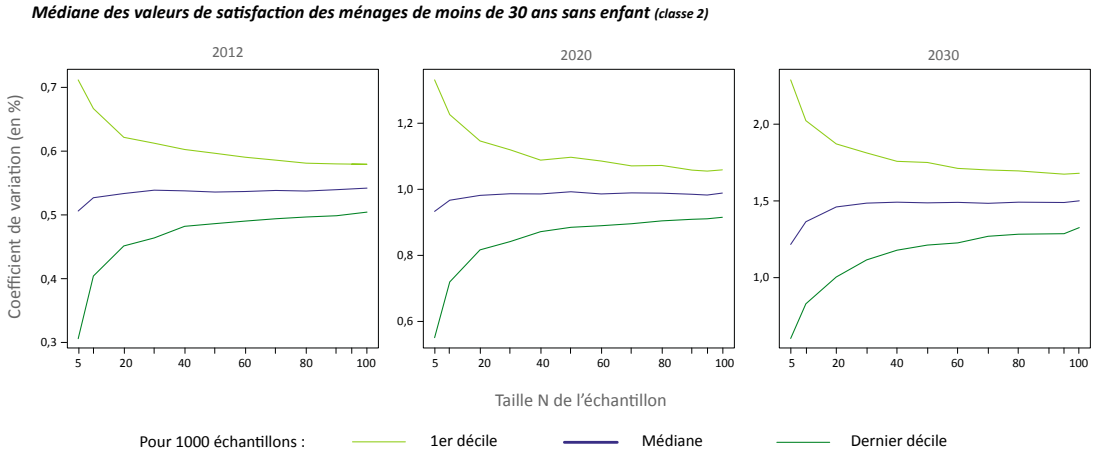
Nombre de ménages entre 45 et 59 ans - classe 4



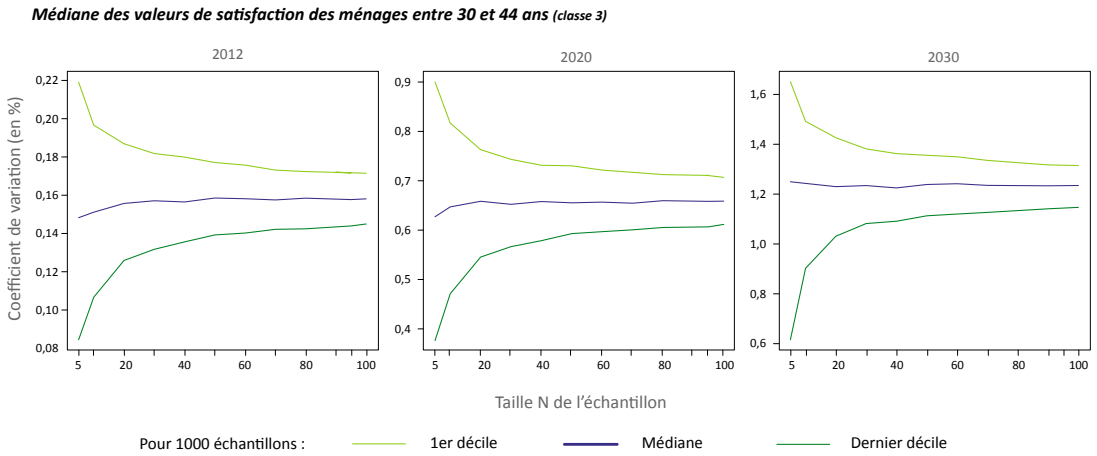
Nombre de ménages de plus de 60 ans - classe 5



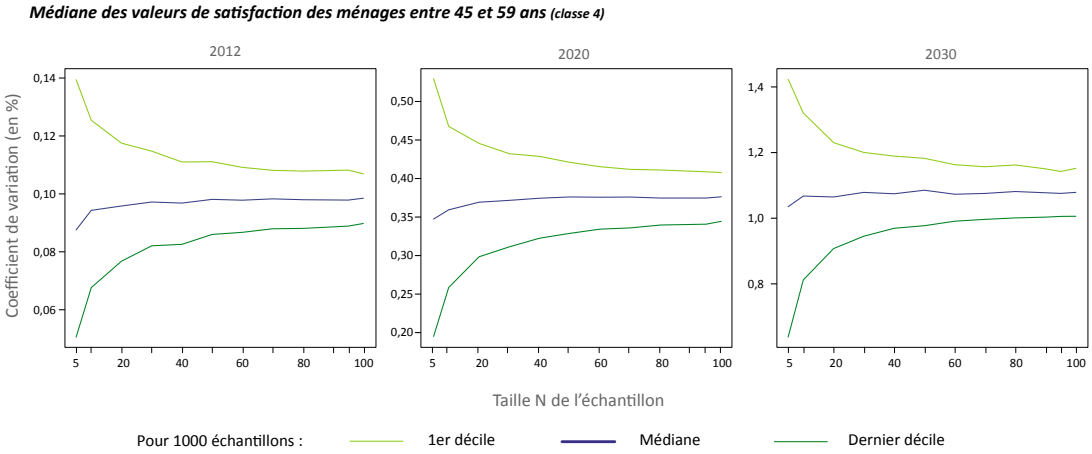
Médiane des valeurs de satisfaction des ménages de moins de 30 ans avec enfant(s) - classe 1



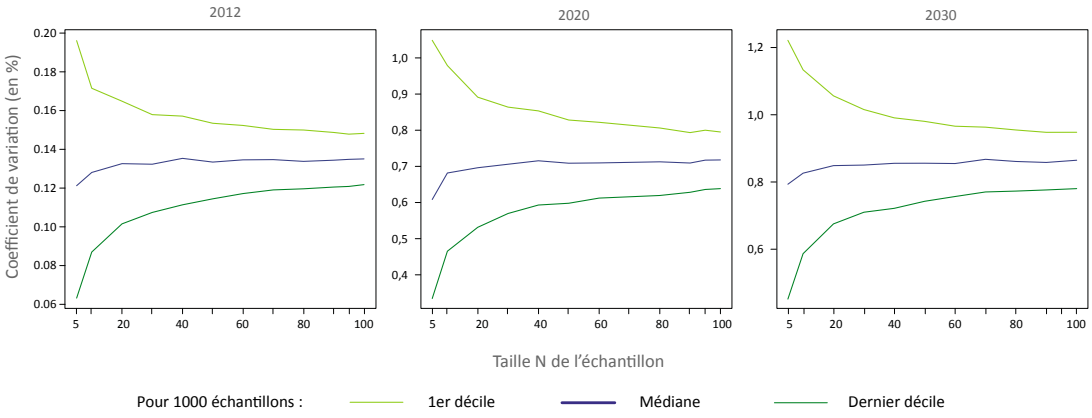
Médiane des valeurs de satisfaction des ménages de moins de 30 ans sans enfant - classe 2



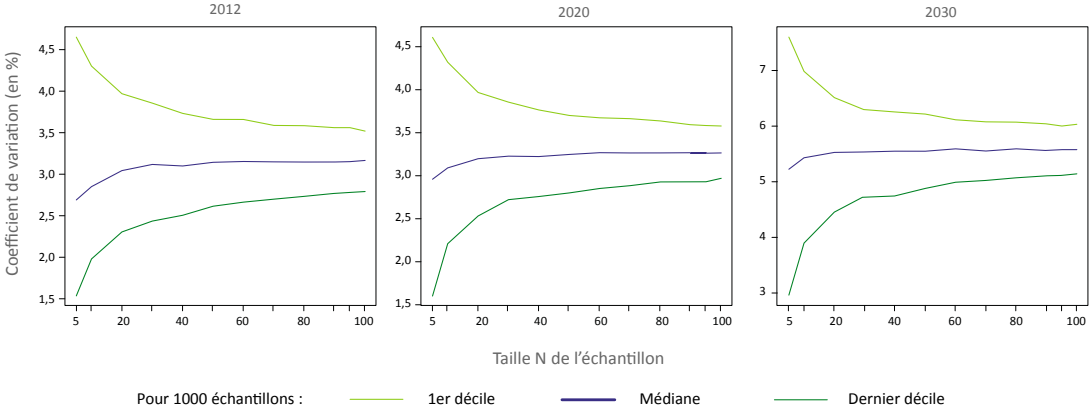
Médiane des valeurs de satisfaction des ménages entre 30 et 44 ans - classe 3



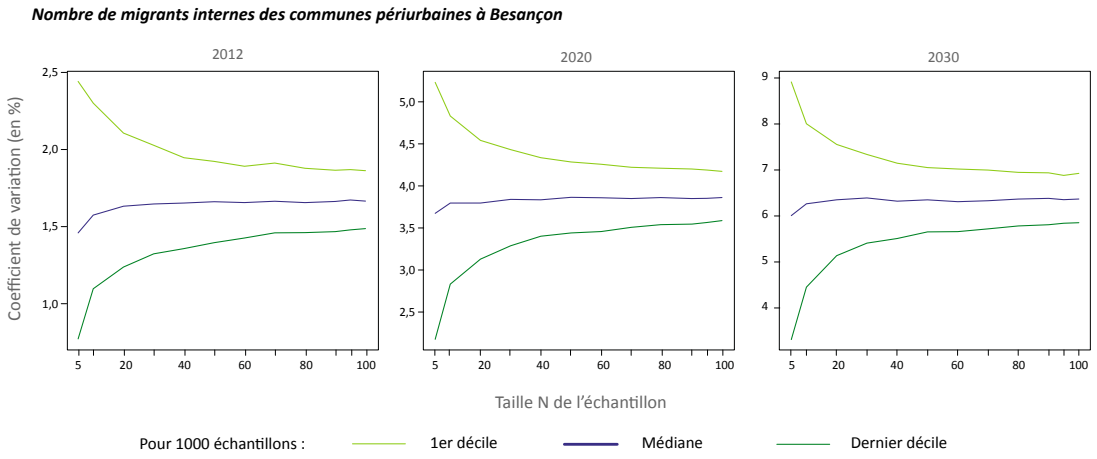
Médiane des valeurs de satisfaction des ménages entre 45 et 59 ans - classe 4



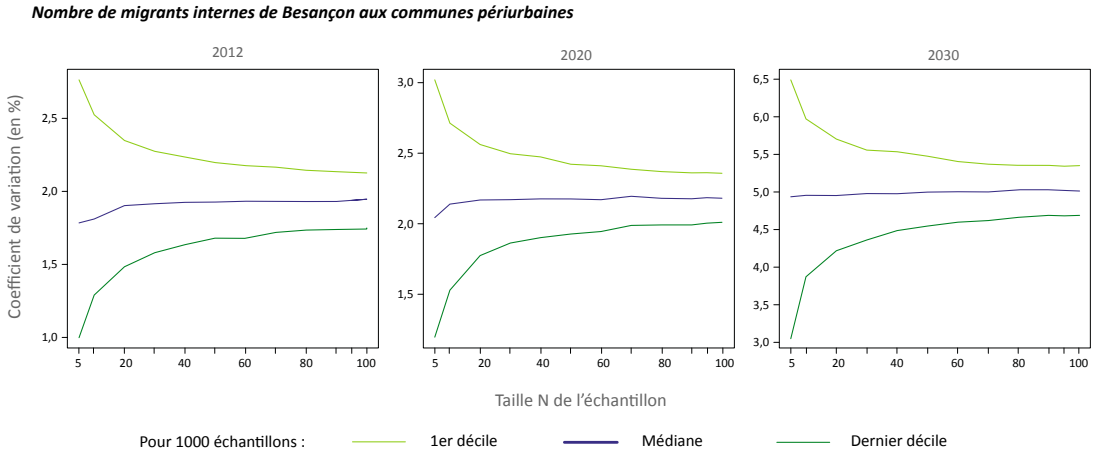
Médiane des valeurs de satisfaction des ménages de plus de 60 ans - classe 5



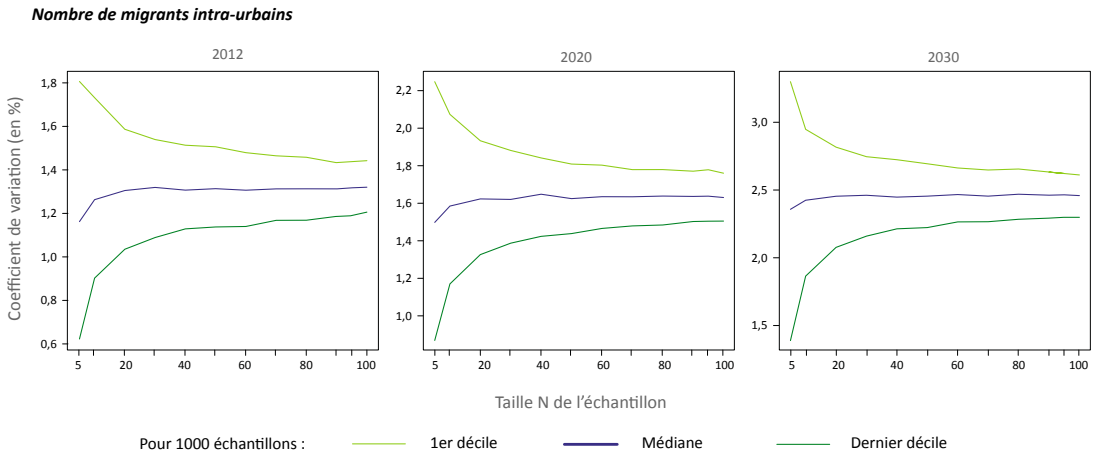
Nombre de migrants internes aux communes périurbaines



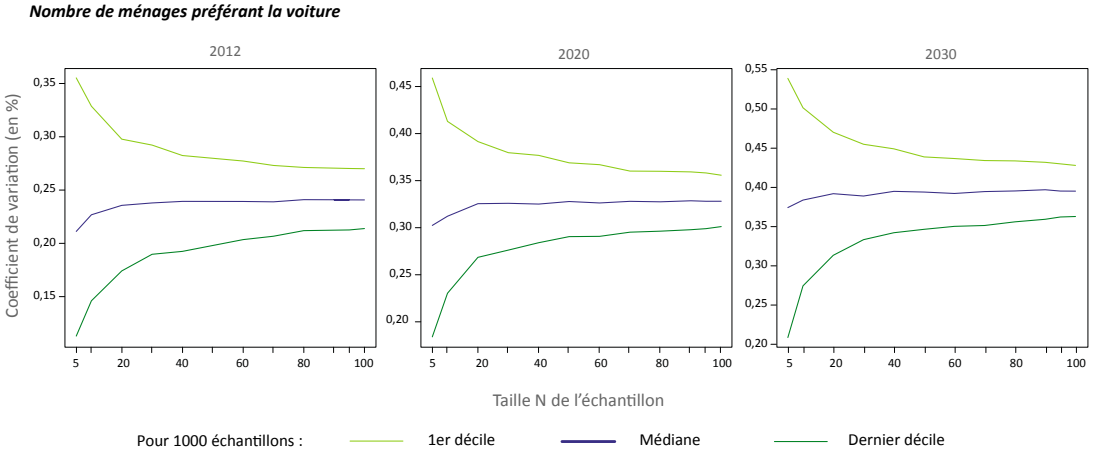
Nombre de migrants des communes périurbaines à Besançon



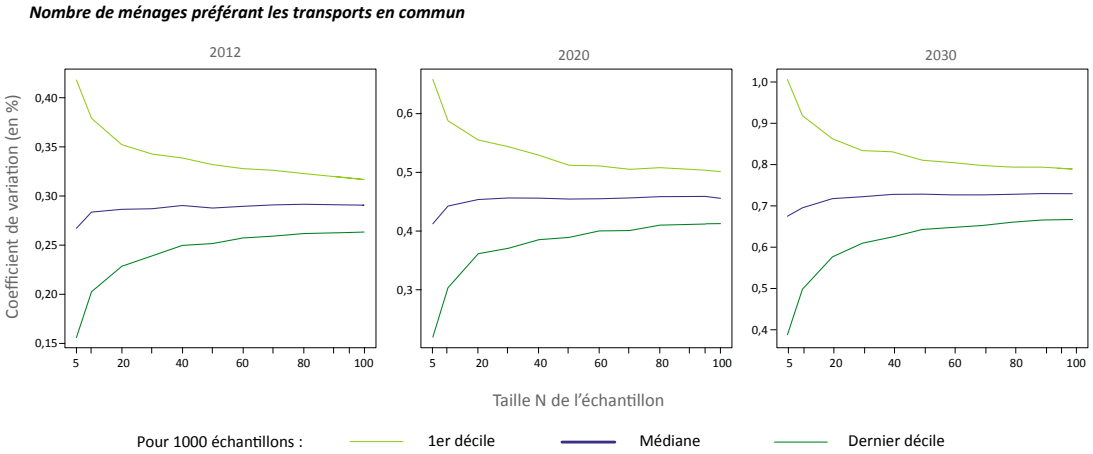
Nombre de migrants de Besançon aux communes périurbaines



Nombre de migrants intraurbains

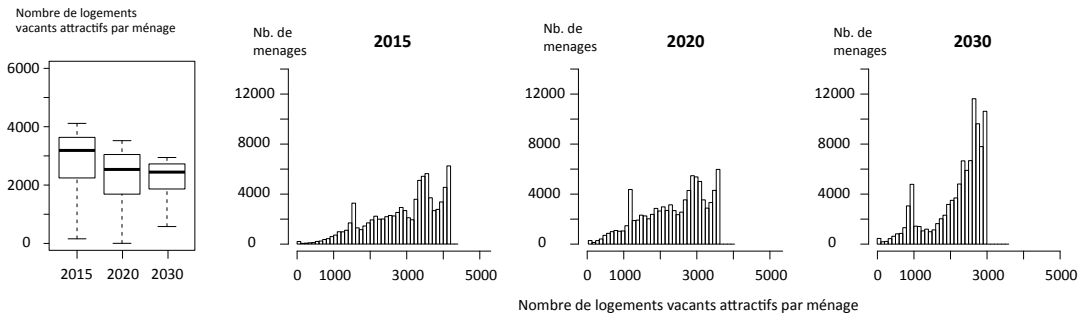


Nombre de ménages préférant la voiture

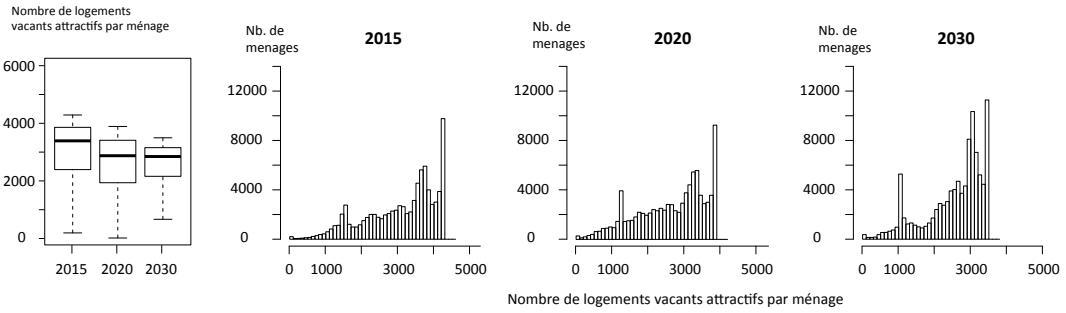


Nombre de ménages préférant les transports en commun

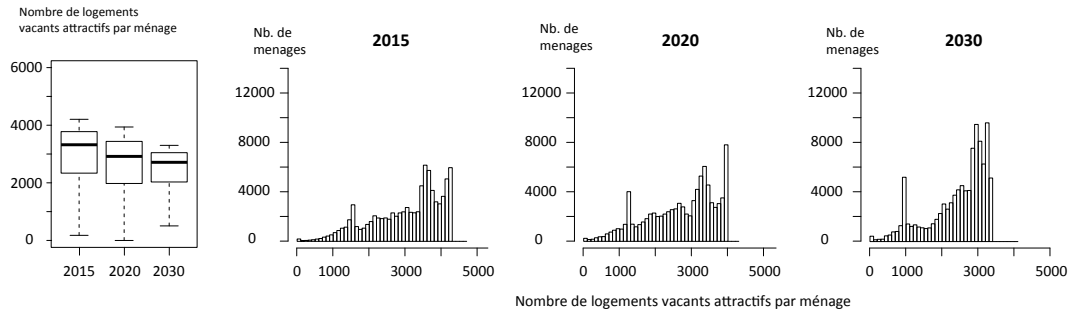
Annexe 3 - Exploration des attractivités : distribution du nombre de logements vacants attractifs dans les autres réplications



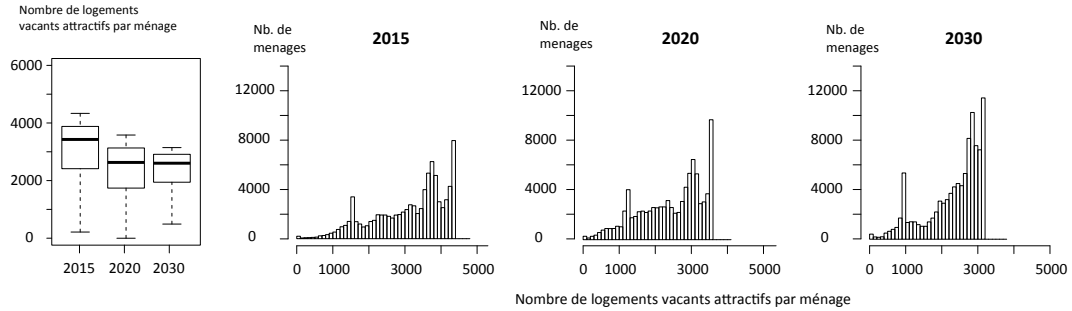
Distribution du nombre *nby* de logements vacants attractifs par ménage dans la simulation 2



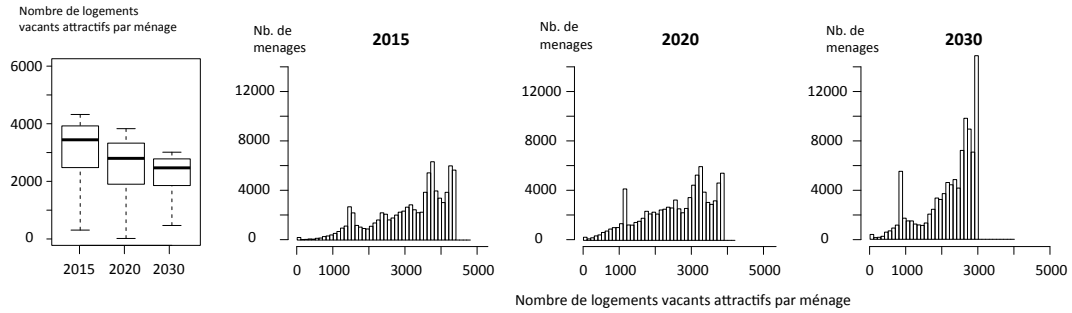
Distribution du nombre *nby* de logements vacants attractifs par ménage dans la simulation 3



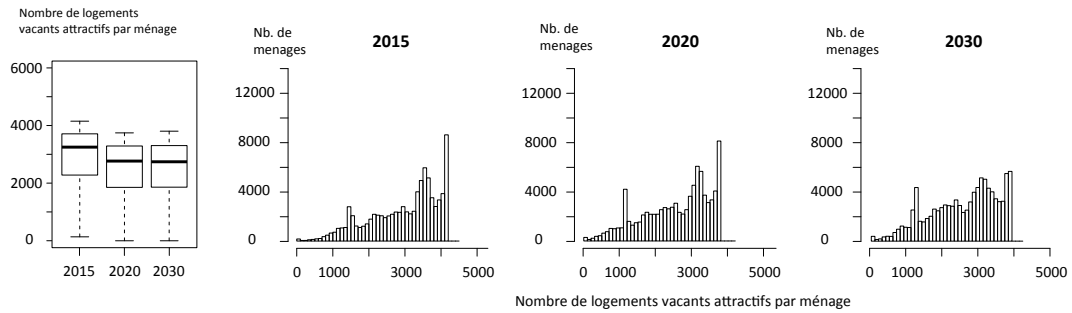
Distribution du nombre *nby* de logements vacants attractifs par ménage dans la simulation 4



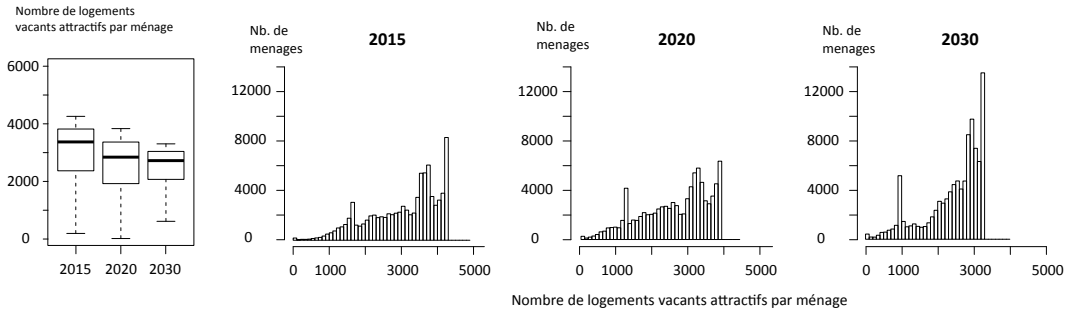
Distribution du nombre *nby* de logements vacants attractifs par ménage dans la simulation 5



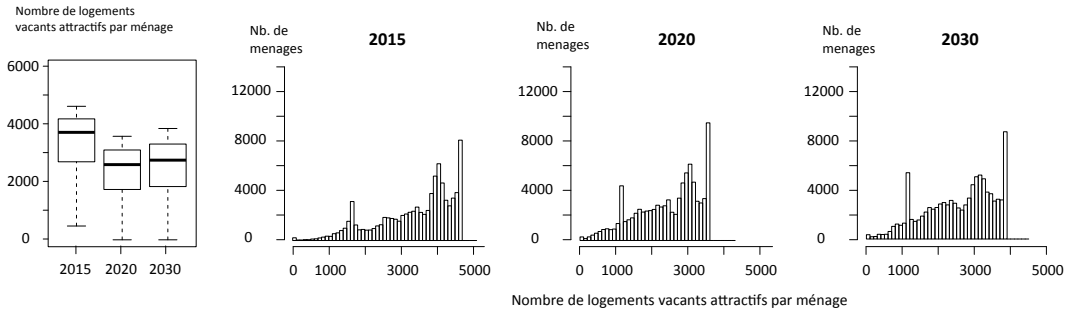
Distribution du nombre *nby* de logements vacants attractifs par ménage dans la simulation 6



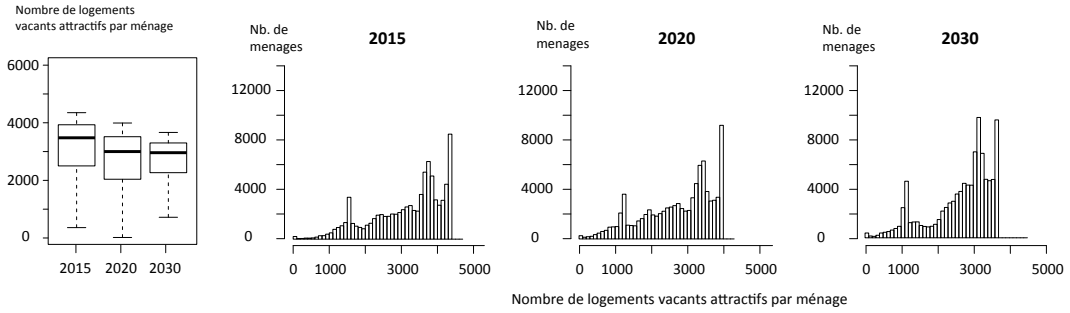
Distribution du nombre *nby* de logements vacants attractifs par ménage dans la simulation 7



Distribution du nombre *nby* de logements vacants attractifs par ménage dans la simulation 8

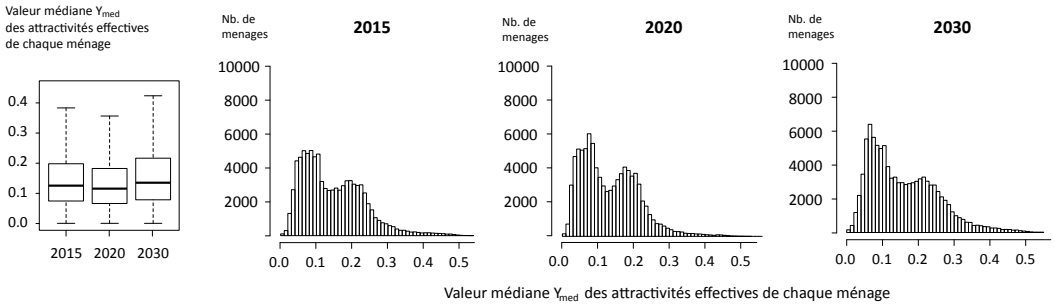


Distribution du nombre *nby* de logements vacants attractifs par ménage dans la simulation 9

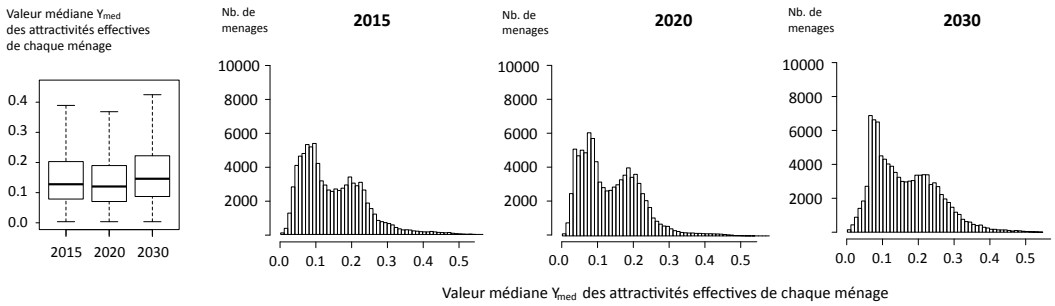


Distribution du nombre *nby* de logements vacants attractifs par ménage dans la simulation 10

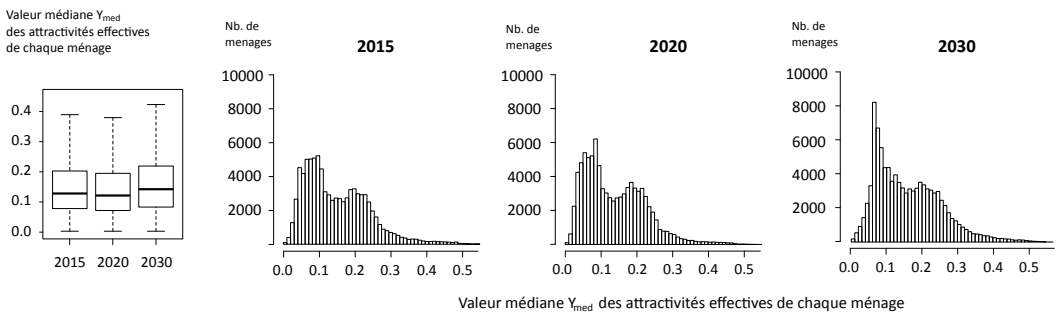
Annexe 4 - Exploration des attractivités : distribution des valeurs médianes $Y_{med}(H)$ des attractivités effectives dans les autres réplications



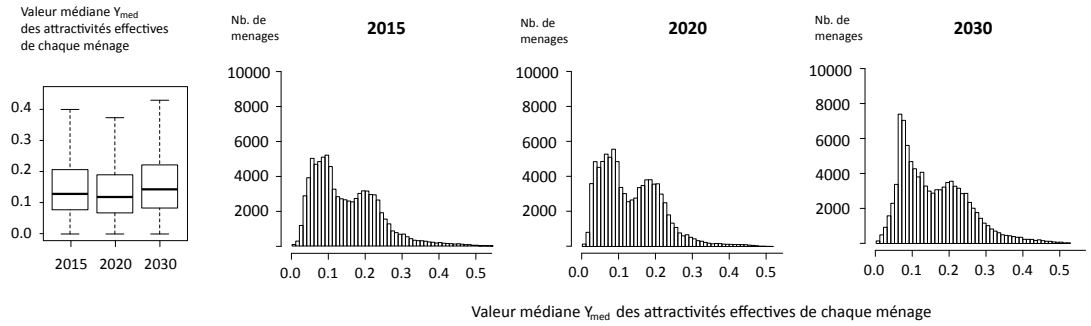
Distribution des valeurs médianes $Y_{med}(H)$ des attractivités effectives de chaque ménage dans la simulation 2



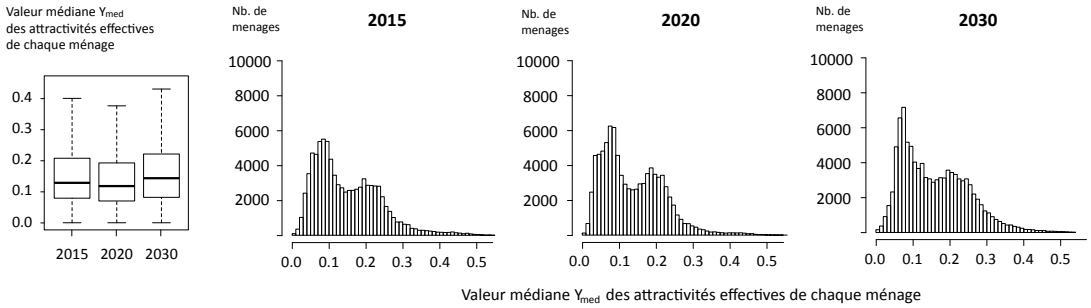
Distribution des valeurs médianes $Y_{med}(H)$ des attractivités effectives de chaque ménage dans la simulation 3



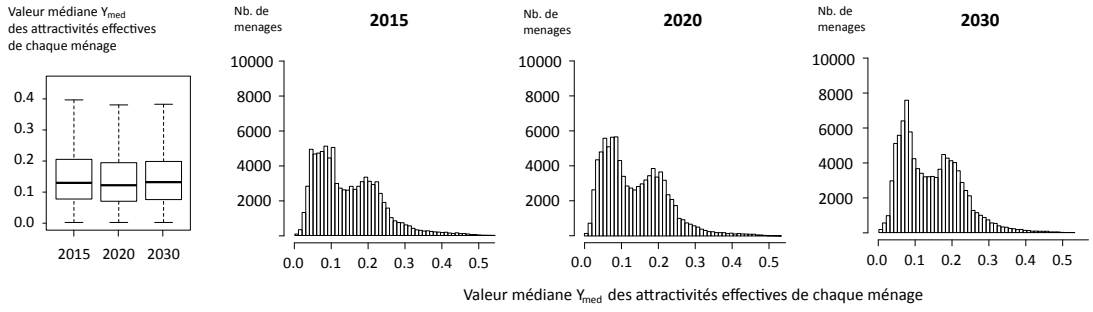
Distribution des valeurs médianes $Y_{med}(H)$ des attractivités effectives de chaque ménage dans la simulation 4



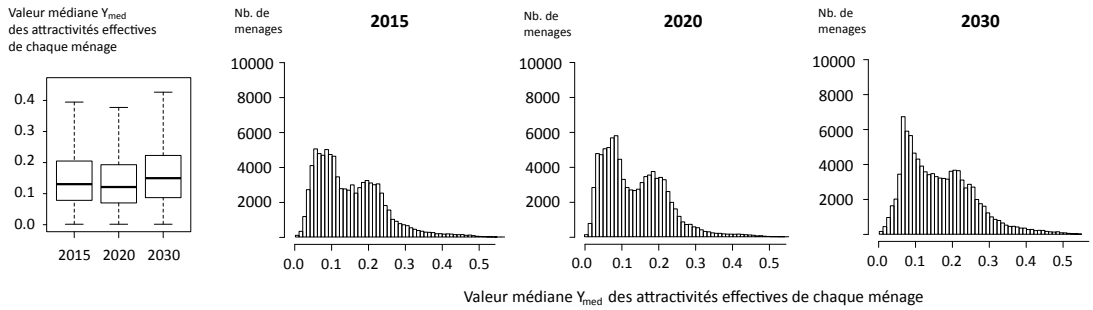
Distribution des valeurs médianes $Y_{med}(H)$ des attractivités effectives de chaque ménage dans la simulation 5



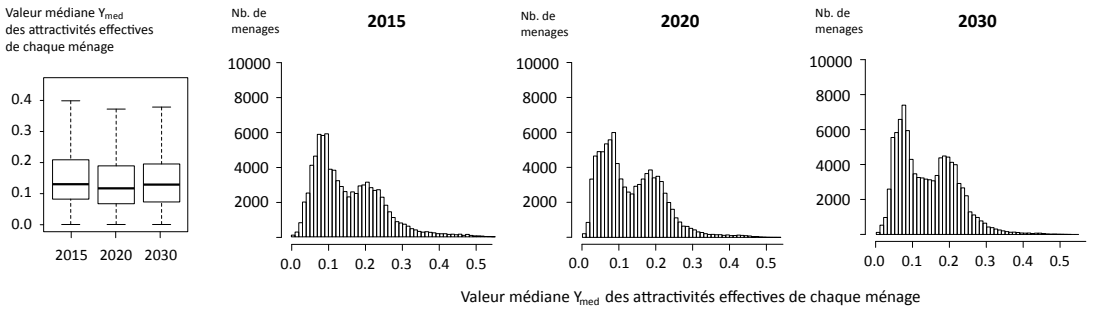
Distribution des valeurs médianes $Y_{med}(H)$ des attractivités effectives de chaque ménage dans la simulation 6



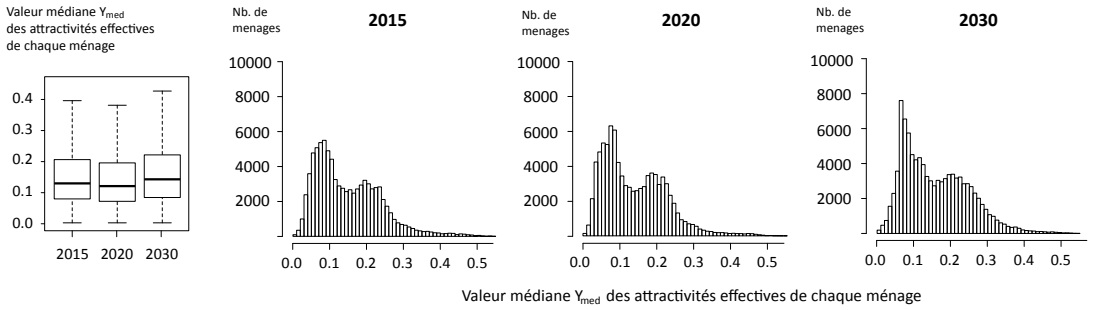
Distribution des valeurs médianes $Y_{med}(H)$ des attractivités effectives de chaque ménage dans la simulation 7



Distribution des valeurs médianes $Y_{med}(H)$ des attractivités effectives de chaque ménage dans la simulation 8

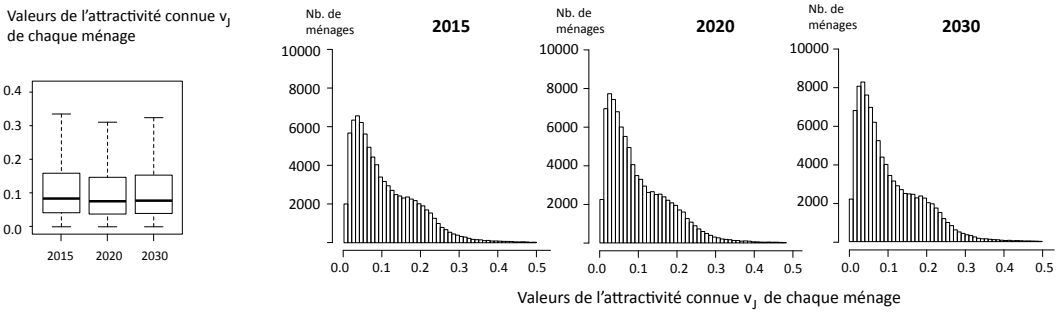


Distribution des valeurs médianes $Y_{med}(H)$ des attractivités effectives de chaque ménage dans la simulation 9

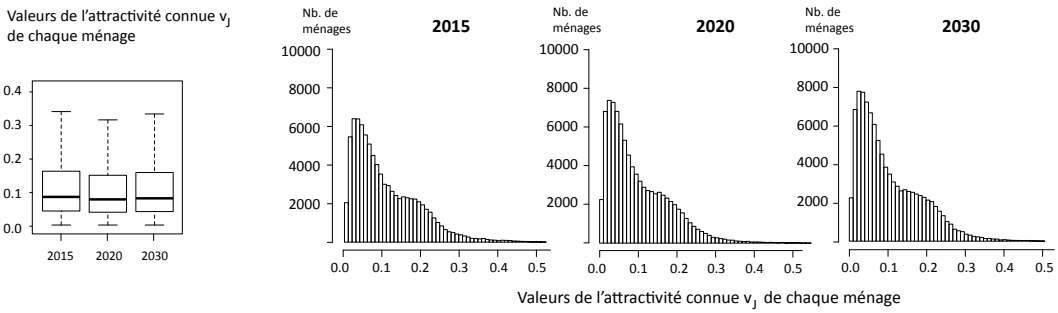


Distribution des valeurs médianes $Y_{med}(H)$ des attractivités effectives de chaque ménage dans la simulation 10

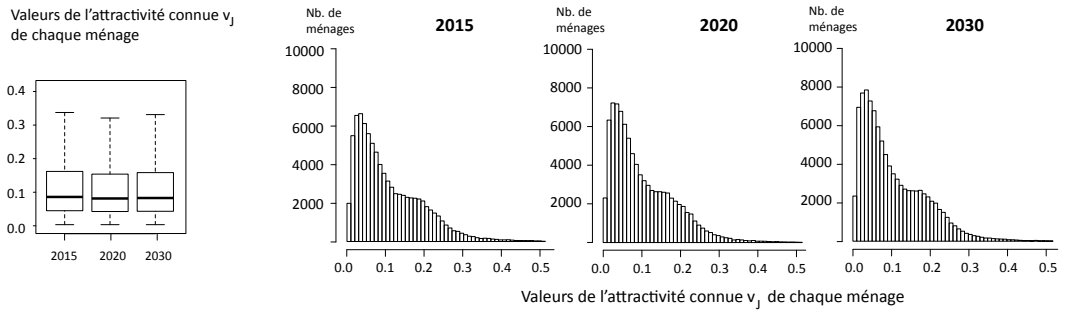
Annexe 5 - Exploration des attractivités : distribution des valeurs d'attractivité connue v_J dans les autres réplications



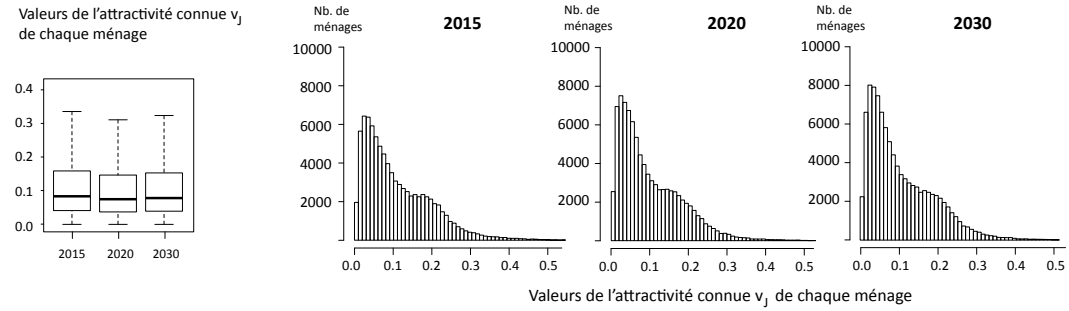
Distribution des valeurs d'attractivité connue v_J de chaque ménage dans la simulation 2



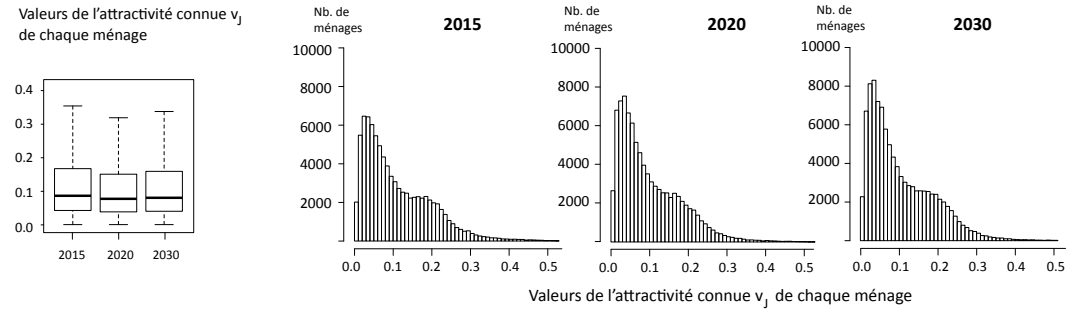
Distribution des valeurs d'attractivité connue v_J de chaque ménage dans la simulation 3



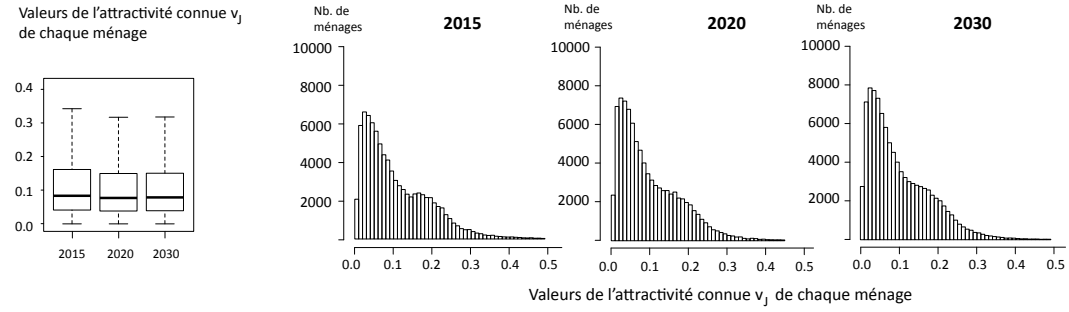
Distribution des valeurs d'attractivité connue v_J de chaque ménage dans la simulation 4



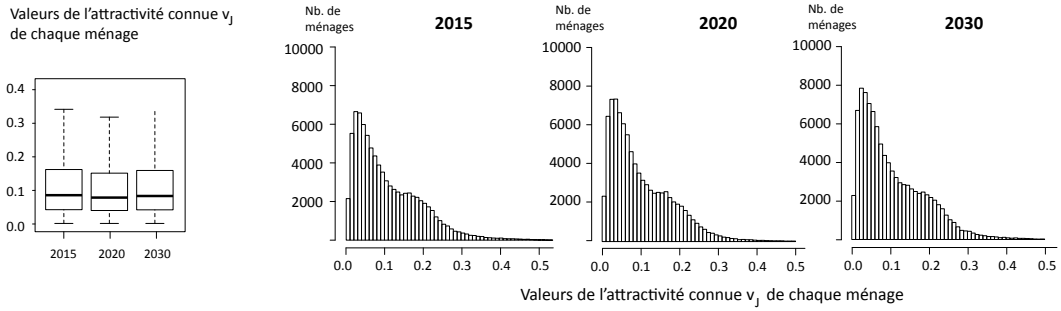
Distribution des valeurs d'attractivité connue v_J de chaque ménage dans la simulation 5



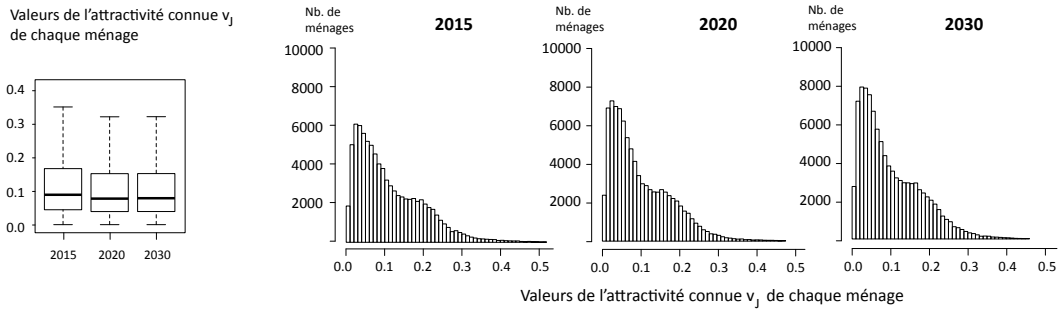
Distribution des valeurs d'attractivité connue v_J de chaque ménage dans la simulation 6



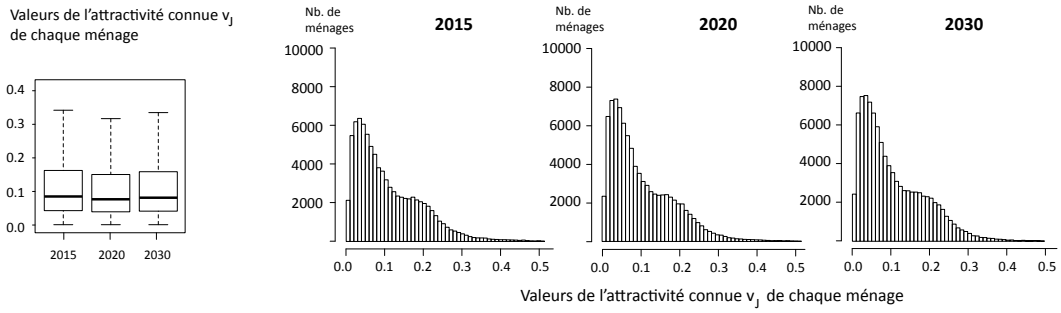
Distribution des valeurs d'attractivité connue v_J de chaque ménage dans la simulation 7



Distribution des valeurs d'attractivité connue v_J de chaque ménage dans la simulation 8



Distribution des valeurs d'attractivité connue v_J de chaque ménage dans la simulation 9



Distribution des valeurs d'attractivité connue v_J de chaque ménage dans la simulation 10

Cette thèse a été pensée à Tromsø, commencée rue Résal, racontée à Cotebrûne, présentée à Tours, cogitée à Alte Gut, communicated à Eindhoven, se former à Lyon, trimballée au Havre, continuée rue Battant, griffonnée à Edimbourg, exposée à Frasnes, composée quai Vauban, travaillée-le-dimanche chez les écologues à la Bouloie, rédigée à Vauchamps, partiellement écrite dans chacune des bibliothèques de Besançon, menée et terminée rue Mégevand. Cette thèse a été mobile, et cette thèse a même déménagé !

Bref, moi aussi j'ai fait une thèse.