

Résumé

La maîtrise des dynamiques urbaines, par exemple les interactions entre transport et occupation du sol, est un domaine classique de la géographie. L'analyse des dynamiques urbaines dans le cadre de l'approche LUTI permet d'analyser l'évolution de la ville et d'effectuer des projections complexes d'un système urbain. Cette méthode, couplée à des outils informatiques permet en effet d'observer les transformations de la ville et d'en extraire une vision prospective, une vision capable de fournir des informations précieuses sur les possibles futurs de la ville de Lausanne en particulier sous l'influence de politiques de transport et d'occupation du sol spécifique.

Mots clés

Géographie urbaine, transports publics, occupation du sol, modèle LUTI, système urbain, accessibilité, attractivité, simulations informatiques, scénarios, prospective.

Abstract

Understanding of urban dynamics, such as transport and land-use interactions, is a classic field of geography. The analysis of the urban dynamics under the light of LUTI approach, permit an observation of the evolution of the city and offer the ability to perform complex projections of changes of an urban system. This method, in relation with informatics tools, gives the possibility to observe the urban transformations and extract a prospective vision of the city. The prospective vision is able to provide some valuables information about the possible futures of the city of Lausanne under the influence of particular transport and land-use policies.

Keywords

Urban Geogrphahy, pubic transportation, land use, LUTI models, urban system, accessibility, attractivity, informatical simulations, scenarios, prospective.

Remerciements

Je souhaite avant tout remercier ma directrice de mémoire, Céline Rozenblat, pour sa précieuse contribution dans l'achèvement de ce travail; j'ai toujours pu bénéficier de ses conseils et de son soutien. Un grand merci aussi à François Bavaud pour avoir accepté l'expertise de mon travail de recherche.

Ce mémoire n'aurait pas vu le jour sans le soutien dont j'ai pu bénéficier pour la récolte des données: un grand merci à Maude Sartoretti. Merci également à Noé Steppacher, pour tous les conseils fournis et pour le temps qu'il a pu m'accorder.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes amis d'aventure : Lara Mazzi, Tommaso Piazza, Elisa Robbiani, Jacopo Schürch, Aron Somazzi et Enea Toschini qui m'ont soutenu et aidé dans mon parcours universitaire et tout au long de ce travail de recherche. Je n'aurais pas pu espérer de meilleurs camarades : les joies, les craintes, les fous rires et les projets partagés sur notre chemin restent un souvenir indélébile.

Enfin et surtout, le soutien de ma famille en particulier les encouragements de Yannick qui m'ont accompagné tout au long de ces derniers mois. Merci en particulier à mes parents pour avoir été les premiers à croire en ma réussite et m'avoir permis de faire des études à Lausanne; je tiens donc à leur témoigner mon affection.

Table des matières

INTRODUCTION.....	9
<u>PARTIE I: LA MODELISATION URBAINE: ENTRE OCCUPATION DU SOL ET SYSTEME DE TRANSPORT</u>	<u>11</u>
1. RETROSPECTIVE THEORIQUE : LES MODELES URBAINS D’HIER.....	12
1.1. THEORIES MICRO-ECONOMIQUES D’OCCUPATION DU SOL.....	12
1.1.1 CONCEPTS GENERAUX DES THEORIES MICRO-ECONOMIQUES	13
1.1.2 LE MODELE DE VON THÜNEN	13
1.1.3 LES MODELES DE WINGO ET ALONSO : APPLICATION AU CAS URBAIN	15
1.2. MODELES D’INTERACTION SPATIALE.....	16
1.2.1 CONCEPTS DE BASE DES MODELES D’INTERACTION SPATIALE.....	16
1.2.2 LES MODELES GRAVITATIONNELS D’INTERACTION SPATIALE.....	17
1.2.2.1 Le modèle urbain de Lowry.....	18
1.2.2.2 Le modèle urbain de Wilson.....	19
1.3. COMPARAISON ENTRE MODELES MICRO-ECONOMIQUES ET MODELES D’INTERACTION SPATIALE.....	19
<u>2. DYNAMIQUES DE LOCALISATION DES ACTIVITES DANS L’ESPACE</u>	<u>21</u>
2.1. LES ELEMENTS ET LES DYNAMIQUES DU SYSTEME D’ACTIVITES	21
2.2. LES DYNAMIQUES URBAINES ENTRE DISPONIBILITE DE SOL ET SYSTEME D’ACTIVITE	22
<u>3. LE SYSTEME DE TRANSPORT : SUPPORT DES DYNAMIQUES DU TERRITOIRE..</u>	<u>25</u>
3.1. LES ELEMENTS DU SYSTEME DE TRANSPORT	25
3.1.1 LE RESEAU DE TRANSPORT	27
3.1.2 L’OFFRE EN TRANSPORT	28
3.1.3 LA DEMANDE EN TRANSPORT	28
3.2. MODELES DE TRANSPORT : RENCONTRE ENTRE OFFRE ET DEMANDE.....	29
<u>4. MODELES D’INTERACTION « TRANSPORT-URBANISME ».....</u>	<u>31</u>
4.1. L’INTERACTION ENTRE OCCUPATION DU SOL ET TRANSPORT	32
4.2. LA COMPOSANTE OCCUPATION DU SOL.....	34
4.2.1 LA VALEUR FONCIERE.....	35
4.2.2 RELATION ENTRE LIEU DE RESIDENCE ET LIEU DE TRAVAIL	36
4.2.3 RELATION ENTRE LIEU DE RESIDENCE ET AUTRES FACTEURS	36

4.3. LA COMPOSANTE TRANSPORT	37
4.3.1 LES MODELES DE TRANSPORT EN QUATRE ETAPES.....	37
4.3.2 LES MODELES DE TRANSPORT PAR ACTIVITE.....	38
4.4. LES ACTEURS DU SYSTEME URBAIN	38
4.4.1 LES PROPRIETAIRES TERRIENS	39
4.4.2 LES MENAGES.....	39
4.4.3 LES ENTREPRISES	40
4.4.4 LES AUTORITES DE REGULATION ET LES POUVOIRS PUBLICS	40
4.5. LES MARCHES	41
<u>5. SIMULATION COMME OUTIL DE PROSPECTIVE DE L'INTERACTION ENTRE ESPACE DE LA VILLE ET LE SYSTEME DE TRANSPORT.....</u>	<u>43</u>
5.1. LES FAMILLES DE MODELES LUTI	43
5.2. LES MODELES DE MICRO-SIMULATION.....	45
5.2.1 LES AUTOMATES CELLULAIRES	45
5.2.2 MODELES MULTI-AGENTS	46
5.2.3 COUPLAGE D'UN AUTOMATE CELLULAIRE ET D'UN MODELE MULTI-AGENTS	47
<u>PARTIE II: MISE EN PLACE DU MODELE DE SIMULATION PROSPECTIF LUTI DU SYSTEME URBAIN DE LAUSANNE.....</u>	<u>49</u>
<u>6. ENJEUX, PERSPECTIVES ET SCENARIOS : POUR LE DEVELOPPEMENT D'UN MODELE LUTI A LAUSANNE.....</u>	<u>50</u>
6.1. LES FUTURES DU SYSTEME URBAIN DE LAUSANNE : DYNAMIQUES ET ENJEUX D'UNE VILLE EN MUTATION	51
6.1.1 POSITION DE LA VILLE DE LAUSANNE DANS LE SYSTEME URBAIN SUISSE	51
6.1.2 LES DYNAMIQUES DE LA VILLE DE LAUSANNE ET LES ENJEUX DEMOGRAPHIQUES.....	53
6.2. IMPACTS DES DYNAMIQUES DEMOGRAPHIQUES SUR LE SYSTEME DE TRANSPORT PUBLIC LAUSANNOIS.....	55
6.2.1 IMPACTS DES DYNAMIQUES DEMOGRAPHIQUES SUR LE MARCHE FONCIER LAUSANNOIS.....	57
6.3. QUESTIONS DE RECHERCHE, OBJECTIFS ET HYPOTHESES, QUELS SCENARIOS POUR LA VILLE DE LAUSANNE FACE AUX ENJEUX DEMOGRAPHIQUE?	59
6.3.1 OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	60
6.3.2 HYPOTHESES PROSPECTIVES POUR LES POSSIBLES FUTURES DU SYSTEME URBAIN DE LAUSANNE	61
6.3.2.1 Hypothèse de recherche H1 : dynamiques démographiques	61
6.3.2.2 Hypothèse de recherche H2 : dynamiques du système de transport public.....	62
6.3.2.3 Hypothèse de recherche H3 : dynamique du système d'occupation du sol.....	63

6.3.3	SCENARIOS POUR UNE CONCEPTUALISATION DES FUTURES DE LA VILLE DE LAUSANNE	63
6.3.3.1	Scénarios démographiques	64
6.3.3.2	Scénarios système de transport public	65
6.3.3.3	Scénarios d’occupation du sol	66
6.3.3.4	Les scénarios retenus pour la simulation	66
7.	<u>CONCEPTION DU MODELE DE SIMULATION COMME OUTILS PROSPECTIF</u>	69
7.1.	STRUCTURE DU MODELE LUTI	69
7.1.1	MODELE MULTI-AGENT : CARACTERISTIQUES DES AGENTS	70
7.1.2	AUTOMATE CELLULAIRE : CARACTERISTIQUES DES CELLULES	71
7.1.3	REGLES D’INTERACTION DES MODELES COUPLES	72
7.2.	INDICATEURS ET VARIABLES DU MODELE DE SIMULATION TRANSPORT-SOL	72
7.2.1	LES INDICATEURS DE TRANSPORT POUR UNE MODELISATION DE L’ACCESSIBILITE DU SYSTEME URBAIN LAUSANNOIS	74
7.2.1.1	La qualité de la desserte aux arrêts TP	74
7.2.1.2	Le temps de parcours pour rejoindre le centre-ville en TP	76
7.2.2	LES INDICATEURS D’OCCUPATION DU SOL POUR UNE MODELISATION DE L’ATTRACTIVITE DU SYSTEME URBAIN LAUSANNOIS	78
7.2.2.1	Les espaces verts	78
7.2.2.2	Les établissements d’enseignement obligatoire	79
7.2.2.3	La densité d’emplois	80
7.2.3	LA DENSITE DE POPULATION	81
	<u>PARTIE III: MODELISATION DU SYSTEME URBAIN LAUSANNOIS ET RESULTATS ...</u>	84
8.	<u>SIMULATION</u>	85
8.1.	METHODE D’EXPLORATION ET EVALUATION DES SCENARIOS	85
8.2.	METHODE DE CALIBRAGE DU MODELE ET DEFINITION DES INDICES D’ACCESSIBILITE ET D’ATTRACTIVITE	86
8.2.1	CLASSIFICATION ET REPRESENTATION DES DONNEES GEOGRAPHIQUES	86
8.2.2	L’INDICE D’ACCESSIBILITE TERRITORIALE DES TRANSPORTS PUBLICS	87
8.2.3	L’INDICE D’ATTRACTIVITE TERRITORIALE	89
8.3.	PARAMETRAGE DES VARIABLES DES SIMULATIONS	90
8.3.1	LES PARAMETRES FIXES DU MODELE	90
8.3.2	LES PARAMETRES VARIABLES DU MODELE	91
8.3.2.1	La variable nouveaux habitants	91
8.3.2.2	La diminution des temps de parcours	91
8.3.2.3	L’amélioration de la qualité de la desserte aux arrêts	91

8.3.2.4	La densité de population limite.....	92
8.3.3	METHODE D'ANALYSE DES RESULTATS.....	92
9.	RESULTATS DES 12 SIMULATIONS	93
9.1.	EVOLUTION DE L'ACCESSIBILITE ET DE L'ATTRACTIVITE : SCENARIOS A ET C	93
9.2.	EVOLUTION DE L'ACCESSIBILITE ET ATTRACTIVITE : SCENARIOS B ET D.....	94
9.3.	INTEGRATION DES CONTRAINTES D'OCCUPATION DU SOL	96
9.3.1	SCENARIOS A1, A2, A3	96
9.3.2	SCENARIOS B1, B2, B3	99
9.3.3	SCENARIOS C1, C2, C3	101
9.3.4	SCENARIOS D1, D2, D3.....	103
9.4.	SYNTHESE DES SCENARIOS	105
	CONCLUSIONS.....	109
	REFERENCES.....	114
	TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	119
	ANNEXES.....	121
	ANNEXE 1.1 CARTE DE REFERENCE.....	121
	ANNEXE 1.2 DONNEES STATISTIQUES	122
	ANNEXE 2.1. FICHE TECHNIQUE D'UTILISATION DU MODELE NETLOGO	125
	ANNEXE 2.2 CODE NETLOGO DU MODELE DE SIMULATION	127

Introduction

L'analyse du système de transport, du système d'occupation du sol et de leurs interactions est une étape fondamentale dans le processus de développement urbain. L'étude de l'évolution du système de transport est indissociable des processus de construction de la ville et du territoire dans lequel il s'inscrit. Il est donc important de reconnaître les incidences réciproques que le territoire urbain et le système de transport produisent, dans le but de comprendre quelles dynamiques sont à la base des choix de localisation des activités au sein du territoire urbain. L'approche des modèles d'interaction transport-sol considère le système de transport et le système d'occupation du sol tels que des éléments au service du système d'activité. Ce dernier, couplé à une dynamique démographique croissante, crée en effet une demande en mobilité et en sol auquel la ville doit répondre.

La qualité de l'offre en transports publics urbains soulève des enjeux importants au sein des agglomérations. Face à la forte croissance démographique et face aux exigences écologiques auxquelles le domaine des transports doit se soumettre, le système de transport doit garantir une qualité de l'offre qui doit être adaptée aux différents contextes et enjeux de la croissance de la population urbaine. De la même manière, l'offre en sol soulève des problématiques importantes dans le domaine du développement des villes notamment en termes de gestion de l'espace et des ressources en sol. Il s'agit en effet de pouvoir construire une ville capable d'accueillir une population urbaine croissante tout en considérant les exigences de qualité de vie.

L'objectif central de ce travail est celui de prédire les choix de localisation résidentielle des individus dans le but d'offrir une vision prospective de la ville au service des stratégies à mettre en œuvre en vue de la prise en charge des problématiques urbaines liées à la croissance démographique. C'est avec l'aide d'un modèle de simulation permettant de reproduire les dynamiques territoriales notamment sous l'influence de stratégies de densification et d'amélioration de la qualité de l'offre en transports publics diverses que nous tenterons de répondre à cette problématique.

Cette approche est mobilisée pour l'étude d'un cas urbain réel : celui de l'agglomération lausannoise.

**Partie I: La modélisation urbaine: Entre occupation
du sol et système de transport**

1. Rétrospective théorique : les modèles urbains d'hier

La modélisation de la ville est une discipline complexe qui aujourd'hui ouvre une nouvelle branche de recherche dans la compréhension et l'optimisation du système urbain. Avant d'en montrer les avancées les plus récentes, ce premier chapitre propose une rétrospective des premiers modèles visant à reproduire les dynamiques du territoire. Ces anciennes théories sont encore de nos jours à la base des modélisations urbaines plus complexes permises grâce aux progrès de l'informatique, des recherches empiriques et méthodologiques.

Revisiter les modèles spatiaux du milieu du 19^{ème} jusqu'à la deuxième partie du 20^{ème} siècle permettra de clarifier les bases pour une meilleure compréhension des théories liées à la modélisation urbaine contemporaine. La modélisation urbaine nécessite en premier lieu de comprendre les relations entre occupation du sol et choix individuels des acteurs du territoire, ceci à travers les théories micro-économiques d'occupation du sol (1.1). Deuxièmement, les modèles d'interaction spatiale permettent de comprendre la complexité de la question de l'occupation du sol à travers une compréhension des interactions entre différents systèmes territoriaux (1.2). La rétrospective théorique se conclura sur une comparaison des théories pour en déterminer les caractéristiques importantes de chacune (1.3).

1.1. Théories micro-économiques d'occupation du sol

Les premiers modèles mis en place pour comprendre la distribution spatiale des activités humaines se basent sur des théories micro-économiques. Les théories de la micro-économie urbaine tentent de comprendre le fonctionnement de la ville à partir d'une approche analytique. Les questions qui régissent ces théories reposent sur deux questions fondamentales issues des concepts de base de l'économie classique et néo-classique :

- Quelles sont les raisons rationnelles qui régulent la localisation des activités ?
- Quel est le processus qui produit la valeur foncière ?

Pour pouvoir répondre à ces questions, il est dans un premier temps nécessaire de définir les concepts généraux des théories micro-économiques (1.1.1) et de comprendre leur application dans des modèles qui ont fondé ces approches. C'est le cas de Von Thünen en 1825 (1.1.2) et de Wingo et Alonso un siècle et demi plus tard (1.1.3).

1.1.1 Concepts généraux des théories micro-économiques

Dans l'approche par la micro-économie, la localisation des activités est le résultat de la combinaison de trois éléments dans un mécanisme de marché : les biens, le sol et le transport (De La Barra, 1989). D'une part, le sol n'est autre que le support qui permet la réalisation d'opérations vouées à la production de biens mais pour satisfaire des besoins résidentiels en même temps. D'autre part, le transport est nécessaire pour déplacer le surplus de production de biens ou pour le transport de personnes. Ceci se traduit par des mouvements de biens matériels depuis le lieu de production vers le marché ou en déplacements de personnes entre lieu de résidence et de travail.

Dans les modèles micro-économiques, le sol est considéré comme une ressource inépuisable qui ne coûte rien en soi, ou du moins très peu. Le facteur unique de la valeur foncière est son accessibilité ou plus précisément son coût d'accès. Ainsi, le seul facteur de différenciation des sols n'est autre que la distance au centre (Masson, 2000). C'est un exercice auquel la nouvelle économie géographique (NEG) s'est parfois attelée en modélisant le choix de localisation des ménages et des entreprises uniquement par rapport au coût de transport engendré par le déplacement du lieu d'habitation au Central Business District (CBD) (Masson, 2000). Dans ce contexte, la distance (définie comme un frein aux déplacements) est l'unique facteur pris en compte. Ceci confère au transport un rôle majeur (Masson, 2000).

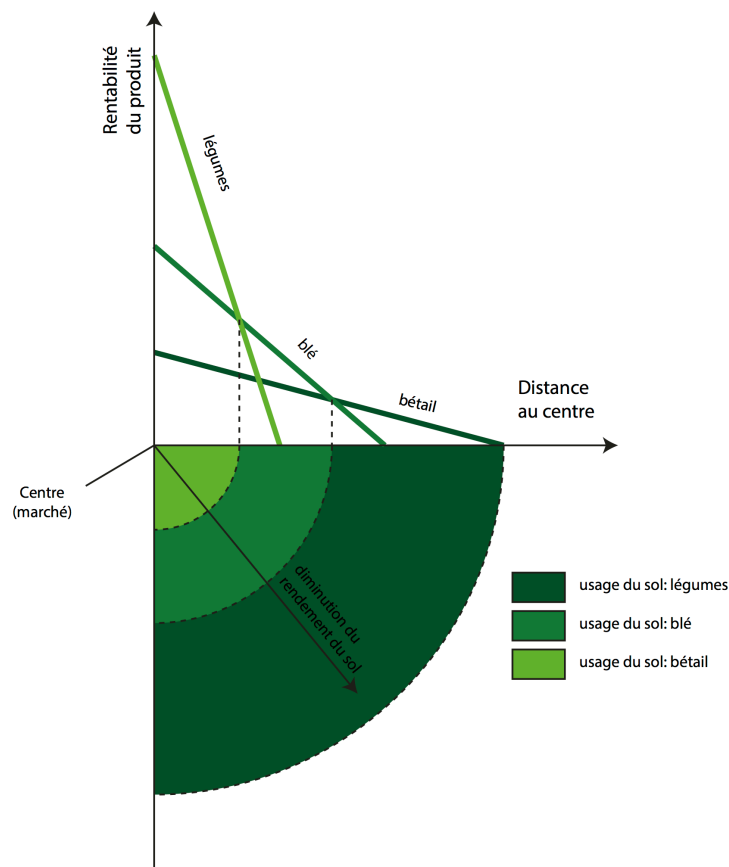
Les théories micro-économiques de l'usage du sol prennent en considération le processus de localisation des activités du point de vue de l'individu ou de l'entreprise. Les différentes activités sont en compétition pour l'occupation du sol en vue de maximiser les profits tout en optimisant les dépenses entre le coût et la taille du terrain. Ce qui déterminera la valeur du sol est donc issu du niveau de compétition à l'acquisition du terrain, un coût qui se répercute ensuite sur le prix des biens vendus sur le marché par l'entreprise localisée.

1.1.2 Le modèle de Von Thünen

Von Thünen (1825) est le premier à avoir tenté d'expliquer les effets du coût du transport sur la localisation des activités et le fonctionnement du marché foncier. Pour ce faire, il a proposé une région agricole théorique avec au centre un marché qui est le lieu où les agriculteurs vendent leurs produits et où le meilleur offrant s'approprie les terres dans un jeu de

concurrence de localisation. C'est donc la distance entre les zones agricoles et le marché qui détermine les prix des produits sur le marché. Les activités tendent alors à se localiser le plus près possible des marchés pour minimiser les coûts et maximiser les profits qui en découlent. Toutefois, certaines activités agricoles sont plus demandeuses que d'autres en sol et c'est ainsi que la concurrence s'installe, en obligeant certains producteurs à s'éloigner du centre. L'activité se développe si et seulement si le prix d'achat du produit sur le marché dépasse les coûts de production et les coûts de transport (Von Thünen, 1826).

Figure 1.1 : Modèle de Von Thünen



(X. Charles, 2017, d'après Von Thünen, 1826)

La Figure 1.1 est une représentation du modèle de Von Thünen montrant en exemple le développement de trois produits agricoles. Chaque produit a un prix différent sur le marché, un coût de production et un coût de transport. La rente de chaque bien est représentée par une droite décroissante qui peut être interprétée telle un gradient de rente décroissant entre centre et périphérie. De ce fait, les trois cultures se développent en cercles concentriques autour du centre car la parcelle est allouée au produit qui offre la meilleure rente au propriétaire. Par exemple pour la culture de légumes, malgré son prix élevé sur le marché, elle induit aussi des

coûts de transport et des coûts élevés de production. Le gradient est ainsi très marqué, la culture se développe près du centre mais sur une surface réduite car le blé devient rapidement plus rentable à mesure que l'on s'éloigne du centre.

1.1.3 Les modèles de Wingo et Alonso : application au cas urbain

Les premiers modèles appliqués à l'espace urbain sont proposés par Wingo (1961) et Alonso (1964). Ils se basent essentiellement sur le postulat de la compétition pour l'usage du sol entre des besoins résidentiels et entrepreneuriaux autour d'un centre d'emplois. L'application du modèle de Von Thünen au cas urbain se concrétise pour la première fois avec Wingo (1961). C'est la complémentarité entre le coût de transport et le prix du foncier qui est à la base des structures urbaines (Wingo, 1961). Le principe repose sur une complémentarité entre le coût de transport et la location ou le prix du terrain. Wingo est donc le premier à considérer la forte relation spatiale entre le lieu de vie et le lieu de travail. Ainsi, il souligne l'importance en milieu urbain de la demande en transport (Liu, 2008). Par rapport aux considérations de Von Thünen, Wingo considère que plus la distance au centre est élevée, plus les coûts de transport sont élevés mais par contre les prix du foncier diminuent. De cette complémentarité entre transport, foncier et le caractère rationnel des ménages, il conceptualise un gradient décroissant de la densité résidentielle entre centre et périphérie (Liu, 2008).

Tout comme Wingo, Alonso (1964) va transférer les travaux de Von Thünen pour les appliquer à l'espace urbain dans le but d'expliquer le mécanisme de localisation des ménages à l'intérieur de la ville. Le modèle de ville mobilisé par Alonso est un modèle très simple. Les postulats de base sont :

- Le centre concentre les emplois ;
- Le marché foncier est de qualité uniforme ;
- L'espace est doté d'un système de transport radio-centrique.

Dans ce cadre, le marché foncier est donc parfait et la fonction la plus offrante obtient le terrain désiré. La fixation de ces postulats permet de se rendre compte de la localisation des ménages uniquement par le jeu entre coût du logement et coût de transport. L'avantage du modèle d'Alonso est qu'il permet d'expliquer les dynamiques de la structure urbaine suite à une modification du système de transport ou sur l'offre du foncier. C'est le jeu de l'offre et de la demande qui détermine le prix du foncier. Les limites du modèle tiennent dans les forts

postulats de départ, mais celles-ci peuvent être dépassées par la prise en compte d'éléments tels que la congestion, différents modes de transport, ou la prise en compte d'aménités...

1.2. Modèles d'interaction spatiale

Les modèles micro-économiques, de par leur simplicité, mettent bien en évidence la forte relation entre occupation du sol et transport mais ne rendent pas compte de la forte interaction et rétroaction spatiale que ces deux éléments du territoire entretiennent. Il est possible de considérer l'origine des modèles d'interaction spatiale avec la publication de Hansen (1959) qui a ouvert un nouveau champ des possibles dans cette branche de recherche. La richesse de ces modèles tient dans leur facilité d'application à des cas réels. De plus, l'essor des modèles d'interaction spatiale peut s'expliquer par la grande demande d'analyse des transports dans les années 1960-1970, pour répondre à l'explosion urbaine ayant favorisé l'augmentation considérable de la motorisation individuelle et de l'étalement urbain effréné.

Afin de rendre compte des particularités de l'approche proposée par les modèles d'interaction spatiale, il est nécessaire de détailler les postulats scientifiques et économiques qui les régissent (1.2.1). Ce chapitre vise à comprendre l'articulation entre les modèles gravitaires théorisés par Ravenstein au 19^{ème} siècle et la théorie de la base économique proposée par Sombart au début du 20^{ème} siècle (1.2.2) et appliquée dans le contexte urbain par Lowry (1.2.2.1) et Wilson (1.2.2.2) dans la deuxième moitié du 20^{ème}.

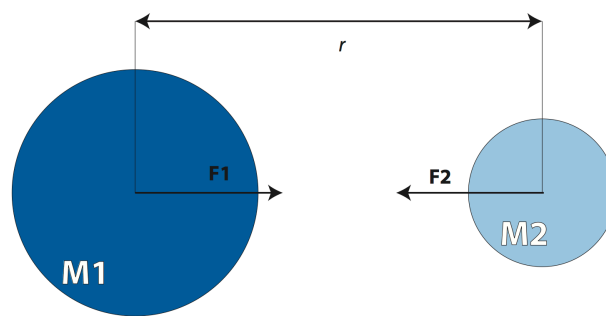
1.2.1 Concepts de base des modèles d'interaction spatiale

Si d'un côté les modèles micro-économiques peuvent être qualifiés d'approche désagrégée, car ils se concentrent autour du comportement des individus, l'approche par les modèles d'interaction spatiale est une approche agrégée, car tant l'espace que les activités sont regroupés dans des catégories discrètes (De La Barra, 1989). Il ne s'agit plus de prendre en considération des points particuliers dans l'espace mais d'analyser des zones contenant un grand nombre d'activités. C'est le cas des modèles gravitationnels d'interaction spatiale.

1.2.2 Les modèles gravitationnels d'interaction spatiale

Les premiers modèles d'interaction spatiale se basent essentiellement sur l'analogie gravitationnelle qui s'inspire de la formule de Newton (*Figure 1.2*). C'est à la fin du 18^{ème} siècle que Ravenstein applique l'analogie gravitationnelle dans le but de modéliser les dynamiques du territoire en particulier dans le cadre de la migration. C'est dans cette approche que Ravenstein fixe la loi des migrations (Ravenstein, 1885). Cette dernière ouvre un champ de recherche très vaste car le système territorial se décline en une multitude d'espaces, de sous-systèmes, de réseaux et de flux. C'est en effet dans l'optique d'appréhender la variété du territoire que les modèles d'interaction spatiale se sont développés.

Figure 1.2 : Modèle gravitaire classique : Analogie du modèle gravitaire universel de Newton



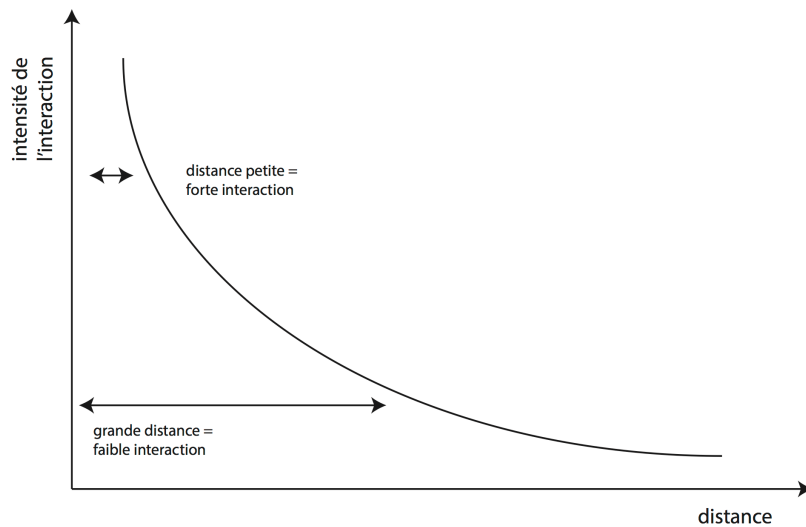
$$F1 = F2 = G \frac{M1 \times M2}{r^2}$$

(X. Charles, 2017, d'après Ravenstein, 1885)

Dans les modèles d'interaction spatiale, le système d'activité est défini tel des ensembles d'unités spatiales ou zones, contenant un certain nombre d'activités. Ces agrégats interagissent entre eux en générant des flux de personnes, d'argent ou de matériel, mais aussi des flux plus abstraits tels que des flux de connaissance, d'influences, de dépendance ou d'opportunité. Les différentes zones sont reliées entre elles par un réseau qui est le support des échanges. La force d'interaction entre deux zones, selon cette approche, est proportionnelle au nombre d'activités contenues dans chaque zone et inversement proportionnelle à la friction imposée par les contraintes du réseau qui les relie (*Fig.1.2*). Le concept de distance s'impose lorsqu'on aborde le terme de contrainte à l'interaction. Une distance peut être géographique, temporelle, ou encore interprétée en termes financiers

(Fig.1.3). D'autre part, le modèle de localisation des activités de Hansen (1959) se base sur la localisation des habitants d'une zone urbaine dont le nombre est proportionnel à l'accessibilité de celle-ci. L'accessibilité étant définie comme « *the potential of opportunities for interaction* » (Hansen, 1959), elle est associée au nombre d'activités attractives telles qu'emplois et services.

Figure 1.3 : Relation entre le degré d'interaction et la distance



(X. Charles, 2017, d'après Hansen, 1959)

1.2.2.1 Le modèle urbain de Lowry

Par rapport aux modèles discutés précédemment (1.1), Lowry (1964) propose un modèle se soumettant davantage au postulat de l'équilibre économique prôné dans les années 1960. Ce modèle est basé sur une combinaison de la théorie de la base économique et du modèle gravitaire. Lowry définit le système urbain tel un système composé de deux sous-systèmes, le sous-système des emplois, placés dans le centre et le sous-système des ménages qui se déploie autour du centre (Lowry, 1964). Lowry propose un modèle d'interaction spatiale basé sur des principes simples :

- la densité des ménages décroît en s'éloignant des centres d'emplois ;
- la localisation et le niveau des services sont directement liés à l'accessibilité des clients en termes de distance (Liu, 2008).

D'autres facteurs sont pris en considération dans le modèle tels que la disponibilité de terrain et l'accessibilité en termes de coût de transport. La proposition de Lowry permet d'imaginer la ville comme un ensemble de sous-systèmes (quartiers) reliés entre eux pour former un système complexe.

1.2.2.2 Le modèle urbain de Wilson

Dans la lignée de ces modèles d'interaction spatiale, Wilson (1970 - 1971) modélise plus précisément les flux qui se produisent entre les lieux. Chaque zone, grâce à son nombre d'activités, développe une force d'attractivité qui est proportionnelle à la magnitude du flux que ces activités engendrent. Pour mieux comprendre, l'analogie faite est celle des emplois et des employés. Le nombre de travailleurs se déplaçant vers une zone d'emplois est proportionnel au nombre d'emplois présent dans cette même zone. Wilson introduit la notion d'accessibilité aux opportunités, des opportunités plus accessibles lorsque la distance entre deux lieux est faible et limitées par la force d'attractivité du lieu émetteur. Ainsi, plus l'accessibilité à un lieu est élevée, plus les opportunités de ce lieu, toutes choses égales par ailleurs, sont concurrentes dans l'environnement. C'est une sorte d'avantage comparatif (la distance étant prise en compte). En poursuivant l'analogie, l'accessibilité accrue aux places de travail engendre une concurrence entre travailleurs. Or si l'accessibilité aux opportunités est limitée, la concurrence entre les employeurs sera également élevée (Karst *et al.* 2004).

1.3.Comparaison entre modèles micro-économiques et modèles d'interaction spatiale

Comparer les différences entre les approches micro-économiques et les approches d'interaction spatiale permet également de mieux souligner leurs apports respectifs.

Les modèles micro-économiques sont reconnaissables pour la place que prend le comportement rationnel de l'individu. En effet, celui-ci est au centre de leur analyse. L'individu peut se distinguer en consommateur (ménages et entreprises) et en fournisseur (propriétaires fonciers et employeurs). La confrontation entre ces différents acteurs sur le marché et la compétition pour le sol porte à un équilibre qui voit tous les terrains assignés là où les consommateurs maximisent leurs besoins selon les contraintes de budget et là où les

fournisseurs maximisent leurs revenus. Ceci confère aux modèles micro-économiques une structure théorique très solide issue de l'approche déductive qui, à partir de constructions abstraites, essaie de se rapprocher de la réalité. Mais les individus sont-ils vraiment parfaitement rationnels ? Les acteurs choisissent-ils nécessairement l'option qui maximise leurs revenus ? Les individus ont-ils vraiment connaissance de toutes les options que le système d'activité leur offre ?

Les modèles d'interaction spatiale sont plus largement structurés d'un point de vue théorique car ils se basent sur des hypothèses macros portant sur des comportements agrégés. C'est une simple analogie (théorie gravitationnelle) qui permet de tester les résultats simulés par rapport aux cas réels. A partir des résultats des confrontations des modèles à la réalité (résidus), de nouveaux modèles émergent et de nouvelles hypothèses apparaissent, créant ainsi une théorie s'élaborant de façon graduelle. Mais les acteurs sont-ils vraiment des individus qui se comportent de la façon la plus aléatoire possible ? Leur mobilité est-elle motivée par des facteurs d'attractivité externe sans aucune rationalité ? Il est toutefois important de souligner que les éléments clés mobilisés par l'approche micro-économique et l'interaction spatiale respectivement, sont les mêmes : le transport et l'occupation du sol.

2. Dynamiques de localisation des activités dans l'espace

Le chapitre précédent nous a permis de comprendre de quelles façons les interactions entre transport et occupation du sol ont été appréhendées à travers les premiers modèles spatiaux publiés déjà à partir du 19^{ème} siècle. Afin d'aller plus loin dans les interactions entre transport et occupation du sol, nous proposons d'approfondir séparément les éléments de cette interaction en mettant l'accent sur les dynamiques liées à l'occupation du sol. Ce chapitre mettra ainsi l'accent sur le système de localisation des activités humaines dans l'espace urbain, tout en identifiant quels sont les facteurs de la dynamique au sein de la ville en termes d'occupation du sol. Ainsi ce chapitre sera organisé de façon à premièrement identifier quels sont les éléments clés des dynamiques du territoire abordés dans l'approche systémique (2.1). C'est à travers la compréhension du système d'activités urbaines et de ses éléments qu'il sera ensuite possible de contextualiser les interactions entre transport et occupation du sol dans la réalité urbaine (2.2).

2.1. Les éléments et les dynamiques du système d'activités

Lorsqu'on aborde le sujet de la localisation et des interactions des activités dans l'espace urbain, il est judicieux de percevoir le système tel un système dynamique qui peut être vu comme un ensemble de personnes ayant une activité ou plusieurs dans un lieu particulier. Il est possible de résumer cette définition en « système d'activités » (Herbert, Stevens, 1960). Dans un tel système, les facteurs qui sont à l'origine de coûts sont, la main d'œuvre, le sol et le transport. C'est la relation entre offre et demande de ces trois éléments qui sont à la base des structures dynamiques du système dans un logique de marché.

Figure 2.1 : Représentation du modèle input – output



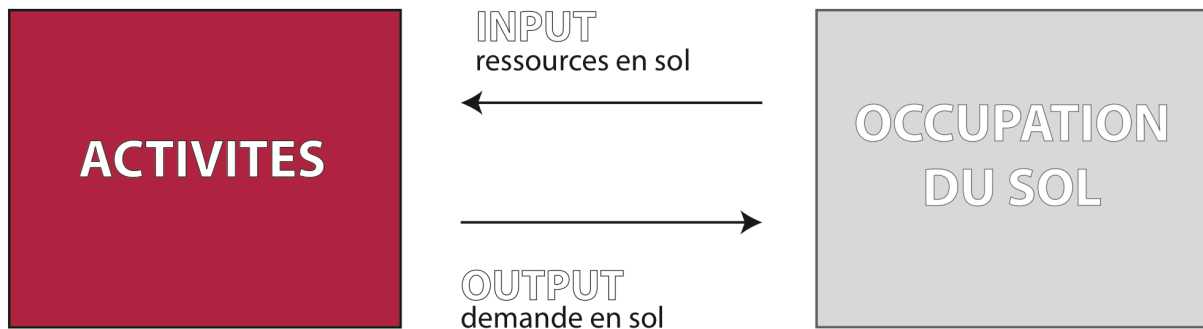
(X. Charles, 2017, d'après Forrester, 1969 et Broadbent, 1973)

Le système d'activités a d'abord été conçu tel un modèle « *input-output* » (Fig.2.1). Dans cette approche se placent les travaux de Forrester (1969) qui conceptualisent les dynamiques urbaines et les interactions sociales sur un plan mathématique (Gray et Pessel, 1972). Il propose un modèle complexe d'interrelation entre les différents éléments du système urbain. Sur la base des relations apparemment abstraites qu'entretiennent les entités du système urbain, Forrester les exprime en termes mathématiques. Pour ce faire, il modélise la ville en une matrice « *input-output* » (Forrester, 1969). Dans un même registre s'inscrit l'approche proposée par Broadbent (1973). Bien que reposant uniquement sur l'analyse des activités, Broadbent conçoit le système d'activités tel un agent consommateur et producteur de services. Les activités peuvent donc être, selon l'approche de Broadbent, considérées comme des facteurs de transformation des services en entrée (*input services*) en services de sortie (*output services*) (Broadbent, 1973) (Fig.2.1). Dans une optique d'interaction économique d'offre et de demande, il faut considérer que l'*output service* d'une activité est potentiellement l'*input service* d'une autre activité. Les approches de Forrester et de Broadbent sont un bon point de départ pour comprendre le système des dynamiques des activités et de l'occupation du sol dans le milieu urbain. C'est dans cette optique que s'inspirent les commentaires et les schémas utilisés dans ce travail pour appréhender la thématique des modèles LUTI.

2.2. Les dynamiques urbaines entre disponibilité de sol et système d'activité

Dans la perspective des modèles d' « *input-output* », les activités sont des productrices de services (génératrices d'offre) et consommatrices de services (génératrices de demande) (2.1). Dans l'optique de compréhension des relations avec l'occupation du sol des activités humaines, il est possible de considérer les activités comme des facteurs de consommation de sol, le sol étant un service en entrée (*input service*) au même titre que le transport (3.1) (Fig.2.2).

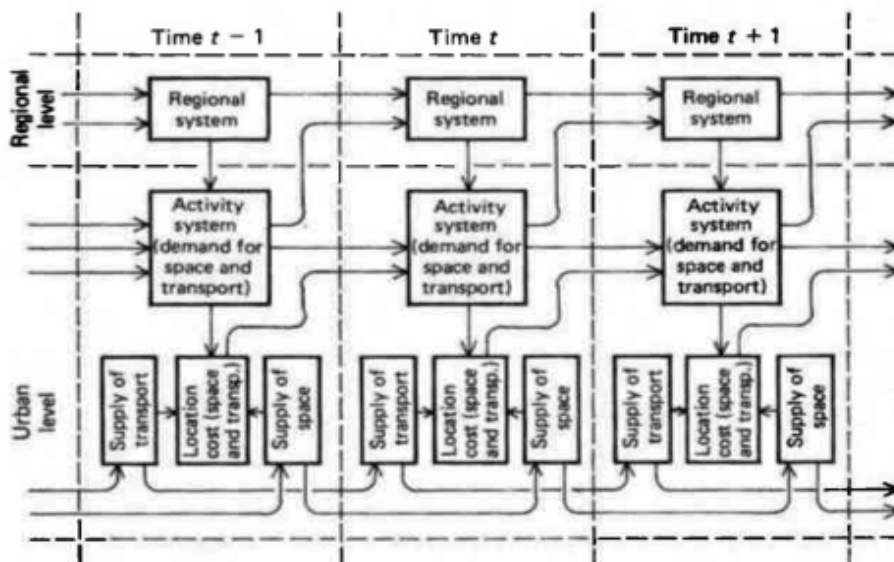
Figure 2.2 : Relation entre activités et occupation du sol



(X. Charles, 2017, d'après De la Barra, 1989)

Les activités génèrent donc une demande de sol au sein de l'espace urbain. Or la disponibilité en sol dans l'espace urbain est considérée comme limitée dans le temps. C'est le jeu de l'offre et de la demande qui détermine le prix et la valeur du terrain. Le système change lorsque les investisseurs ou les propriétaires fonciers introduisent sur le marché de nouvelles ressources en sol en modifiant ainsi l'offre et en déterminant un nouvel équilibre du système. De nouvelles opportunités s'offrent aux activités qui se développent et consomment ainsi de nouvelles ressources en sol (Karts *et al.* 2004). Ainsi les périodes se succèdent d'un équilibre à un autre (Fig.2.3).

Figure 2.3 : Les relations dynamiques du système d'activité



(Source : De la Barra, 1989)

La *Figure 2.3* est une schématisation du processus engendré par le système d'activité à plusieurs niveaux : régional et urbain. Le système d'activité est consommateur d'espace et de transport, en d'autres termes le système d'activité est créateur d'une demande en sol et en mobilité. Dans une unité de temps ($t - 1$) la demande est satisfaite par une offre en transport et en sol, ceci définit un nouvel ordre du système d'activité dans l'unité de temps (t) qui engendre une nouvelle demande en sol et en mobilité qui doit être satisfaite, et ainsi de suite de façon itérative. L'enjeu de l'estimation de la demande de sol que les activités sont prêtes à consommer n'est pas seulement le fait d'en comprendre l'ampleur mais surtout d'en prévoir l'endroit. Ici repose tout l'enjeu de la modélisation de cette problématique.

La *Figure 2.3* ne tient pas compte de plusieurs éléments comme l'intervention d'entités publiques. En effet, l'offre en sol est étroitement liée à la régulation de l'Etat qui, en changeant les règlements, a le pouvoir de changer le système. Dans le cas d'une régularisation de l'offre en sol dans des secteurs d'activités préférentiels, l'Etat a la possibilité d'intervenir. Si un terrain est sujet à l'achat ou à la vente, il n'observe pas pour autant un potentiel de développement d'une activité. En effet, l'Etat intervient dans la mise à disposition de sols utiles au développement, en agissant sur l'accessibilité des lieux et leur équipement en services publics de base (4.4.4). Dans le cadre de la modélisation de l'offre en sol, ces aspects sont considérés comme des facteurs exogènes (Broadbent, 1973). Toutefois, l'offre en surface exploitable à l'activité dépend de nombreux facteurs tels que la conjoncture économique du pays, le développement du secteur de la construction ou encore du secteur de la finance. Ainsi dans le cadre du modèle proposé par Broadbent ces éléments sont considérés comme acquis.

Dans l'exemple de la planification des transports, le système réagit de la même manière, c'est-à-dire que l'Etat est à même de perturber le système en décidant d'orienter les investissements dans un mode de transport plutôt qu'un autres (3.1.2). L'offre de travail ou de main d'œuvre en revanche est de nature différente car il s'agit d'une décision individuelle de se déplacer d'un endroit à l'autre dans le but de percevoir un salaire et d'améliorer ses conditions de vie (De la Barra, 1989).

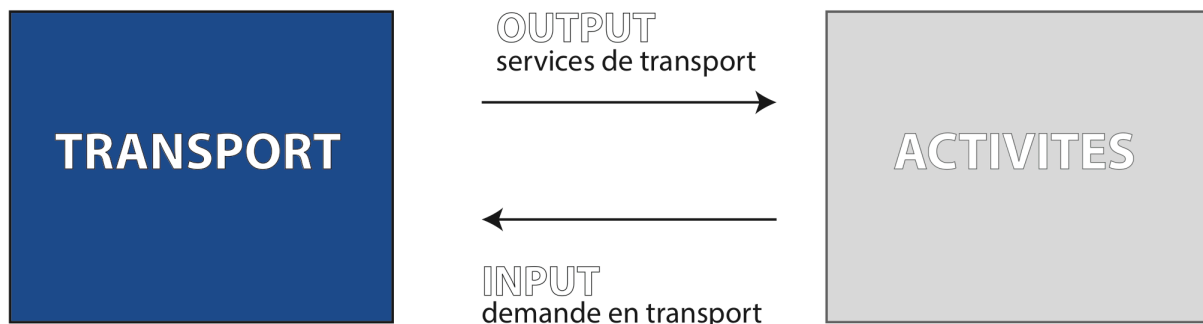
3. Le système de transport : support des dynamiques du territoire

A côté du système d'activités en relation avec les processus d'occupation du sol, reste à aborder le rôle des transports. La mobilité étant une demande dérivée de l'activité humaine, il s'agit d'identifier quels sont les éléments clés des dynamiques du territoire sous l'angle du système de transport et de son interaction avec les activités se développant sur le territoire (3.1). Dans un deuxième temps seront présentées les approches utilisées dans la mise en place de modèles destinés à la planification des transports en milieu urbain (3.2).

3.1. Les éléments du système de transport

Le système de transport a comme objectif primaire de transporter les personnes et les marchandises.

Figure 3.1 : Relation entre transport et activités

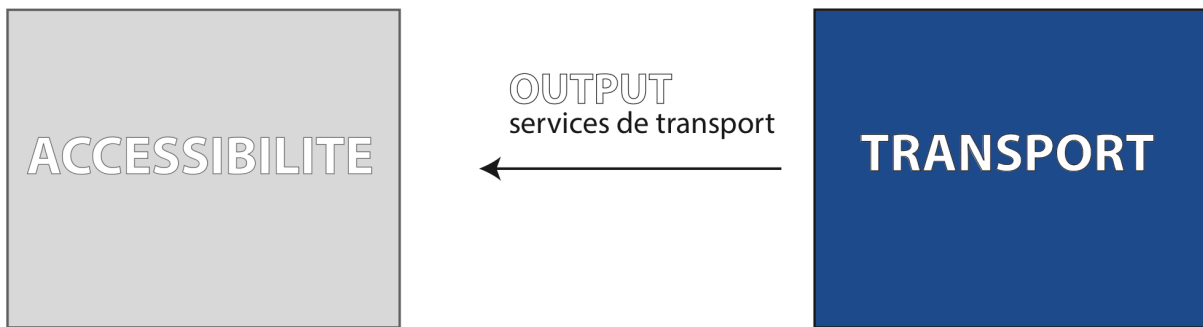


(X. Charles 2017, d'après Kaufmann, 2000)

Le système activité-transport n'est pas un système fermé, bien au contraire, ce système interagit avec le système territorial dans son ensemble. Ce dernier a un rôle de contrainte et de contrôle sur le développement du système de transport car le contexte territorial détermine ses limites : l'occupation du sol (ressource en sol et en énergie), le système d'activité (Fig.3.1), les autorités publiques (lois et règlements qui régissent la population et son comportement) ainsi que le niveau technologique qui régit la performance d'un système de transport. Ainsi le système de transport est aussi un générateur d'effets. L'objectif principal du système de transport étant celui de transporter, cela a comme principal effet de faciliter les échanges de personnes et de marchandises. Un second effet du système de transport est celui de

l'organisation du territoire dans la mesure où le système de transport produit une organisation spatiale de la société et donc du territoire. Si l'on pouvait résumer les effets cités ci-dessus nous pourrions dire que l'effet du système de transport est de rendre accessible les lieux (Fig.3.2).

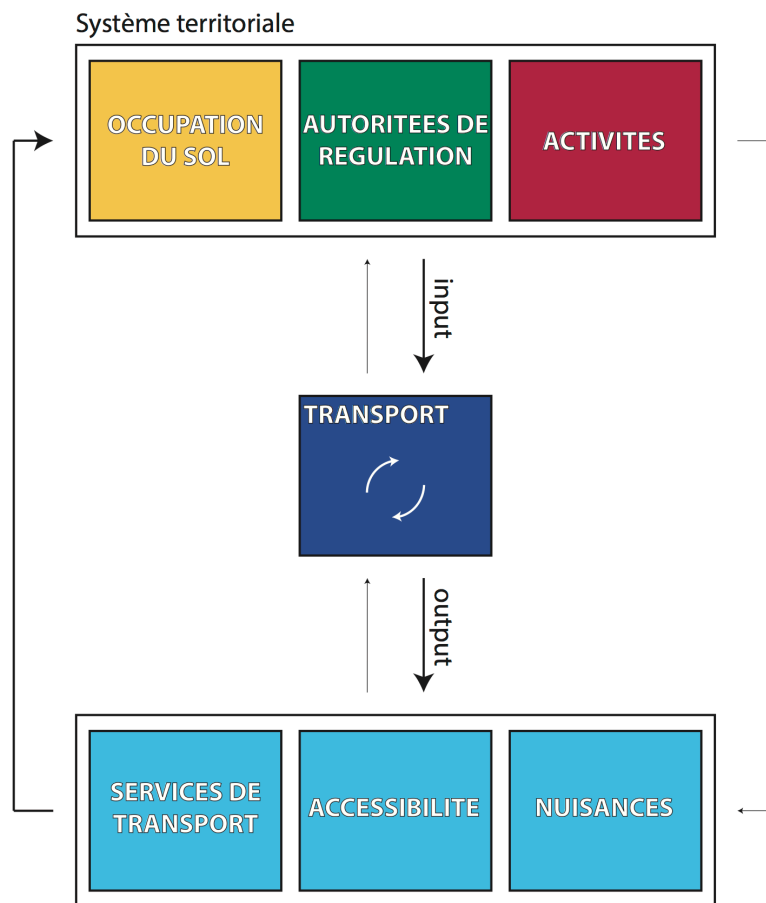
Figure 3.2 : Le produit du système de transport



(X. Charles, 2017, d'après Kaufmann, 2000)

Les effets ne sont pas forcément positifs. Comme tout système, des externalités (pollution, accidents, nuisances sonores, etc.) comportent des enjeux en termes de durabilité du système. Les produits du système de transport influencent à leur tour le système territorial dans son ensemble avec les sous-systèmes qui le composent (Fig.3.3). On comprendra donc que le système n'est pas indépendant mais interagit avec d'autres systèmes, comme par exemple avec le système d'activités (2.1). Le système de transport est régi par des facteurs économiques et répond à une logique de marché. Il fait correspondre l'offre à la demande. On peut toutefois s'interroger sur le contenu de ce système. Comment formaliser le système de transport en vue d'une modélisation ?

Figure 3.3 : Le système de transport



(X. Charles, 2017, d'après Pini, 2012)

3.1.1 Le réseau de transport

Un réseau en termes d'inscription sur le territoire peut se définir tel un « *Ensemble formé de lignes ou d'éléments qui communiquent ou s'entrecroisent de façon plus ou moins complexe ou régulière* » (Delaloye, p.7, 1994). Dans le réseau de transport, les nœuds sont des arrêts tandis que les lignes sont des liens ou moyens de transport qui relient les arrêts. Dans un réseau multimodal nous pouvons imaginer qu'un arrêt puisse être desservi par plusieurs lignes car de multiples moyens de transport peuvent exister entre deux mêmes arrêts (Mishra *et al.* 2012). La structure et la forme du réseau de transport sont centrales dans la détermination de la performance et de la couverture du réseau. Ces aspects sont fondamentaux dans l'analyse d'un réseau et dans la recherche de son optimisation dans la mesure où le réseau de transport est à la fois le support des échanges engendrés par le système d'activité (1.2), mais peut inversement contribuer à développer ces échanges.

3.1.2 L'offre en transport

L'offre de transport est composée de trois éléments principaux : les modes et techniques de transport, le régime d'organisation du système, les infrastructures, le réseau et les acteurs impliqués (Leurent, 2007). Les modes et techniques de transport sont simplement les techniques nécessaires pour permettre de satisfaire la demande de transport. Plusieurs modes de transport existent se définissant comme un ensemble de moyens ou comme une catégorie de moyens de transport, par exemple le mode aérien ou le mode routier.

Le régime et l'organisation du système de transport sont composés des règlements et des lois qui régissent son fonctionnement. Un exemple de norme inhérente au système de transport suisse est le fait de devoir circuler à droite ou l'interdiction pour les camions (TIR) de circuler le dimanche (OCR, 1962). Dans le cas du régime du système de transport, par exemple, les CFF ont un régime de monopole sur la gestion des transports ferrés de longues distances qui leur a été délégué par la Confédération.

D'autres aspects relatifs à l'offre de transport sont les infrastructures, la possibilité de les relier par un réseau connecté et les entreprises de transport qui animent ce réseau. Les infrastructures et le réseau permettent la circulation ou le stationnement des véhicules (gares, parkings, voies ferrées, routes, etc.). Le réseau de transport peut être déterminant par sa forme, son articulation et par sa gestion. Ces éléments nécessitent en effet une gestion de la part d'une entreprise de transport (privée ou publique). Il reste toutefois que l'offre de transport détermine la performance du système de transport de part la capacité à absorber ou non la demande de transport.

3.1.3 La demande en transport

La demande est un terme économique qui peut se définir comme la quantité d'un bien ou d'un service qu'un consommateur, à un moment donné, est disposé à acquérir en fonction du prix de ce bien ou de ce service sur le marché (Larousse, 2015). Lorsque l'on applique la théorie économique à la géographie des transports, il est important de procéder à quelques ajustements de la définition pour mieux comprendre et insérer la notion dans le contexte souhaité. La quantité de biens ou de services est à interpréter tout simplement comme un besoin de mobilité de la part d'un individu. Celui-ci est donc disposé à réaliser son besoin de

mobilité avec une contrainte : le prix. Lorsqu'on parle de prix il serait plus judicieux de parler de coût, car il ne s'agit pas seulement d'une contrainte monétaire mais il peut s'agir de contrainte temporelle (Pini, 2012), ou en général une contrainte liée à la qualité du service offert. Pour que le déplacement puisse se réaliser, l'individu doit dépenser une partie de son budget temps, de son budget financier... Lorsque la demande est satisfaite par l'offre, la demande en transport se réalise, dans le cas où l'offre ne satisfait pas la demande, on parle de demande latente. Mais comment quantifier la demande ?

La demande de mobilité n'est autre qu'une demande dérivée, soit une demande qui découle de l'organisation des activités sur le territoire. Il devient donc important de se pencher sur l'organisation spatiale des agglomérations, en particulier sur la répartition des densités de l'habitat et de toutes autres activités sur le territoire (Kaufmann, 2000). On rejoint ici le développement de nombreux modèles agrégés comme les modèles gravitaires (1.2.2).

Toutefois, certains théoriciens ont aussi développé des modèles désagrégés visant à expliquer les choix de déplacement des individus. Ils ont ainsi pu s'interroger sur les caractéristiques de l'espace et du territoire qui influencent le choix de déplacement des individus. Encore une fois, ces approches tentent d'y répondre grâce à des modèles quantitatifs qui partent, le plus souvent, de l'hypothèse de la rationalité des individus (Combes, 2012).

Dans les modèles macro-économiques de coûts de transport généralisé, la demande de transport s'appuie sur la base des coûts généralisés, ceux-ci prenant en compte la vitesse commerciale des services disponibles, leur fréquence, leur prix, la distance à parcourir ou encore le temps. Des données, souvent récoltées par des enquêtes de mobilité, sont traduites en modèles pour une rationalisation des déplacements des usagers.

3.2. Modèles de transport : rencontre entre offre et demande

L'étude de la géographie des transports comporte, telle que présentée dans la partie précédente, une analyse multidisciplinaire qui recouvre l'économie, la géographie et les sciences comportementales. La modélisation du système de transport doit prendre en considération tous ces aspects. Alan Voorhees (1987) a proposé un schéma en trois étapes qui continue à être mobilisé dans de nombreuses recherches (Leurent *et al.* 2012). Ce schéma

résume les étapes conceptuelles permettant de modéliser le système de transport tout en laissant au chercheur les modalités techniques de son application :

- La première étape consiste à comprendre comment se génère ou se compose la demande en transports, c'est-à-dire que cette étape consiste en une analyse des besoins en déplacement en fonction de l'occupation du sol et de la répartition des densités (population, surfaces commerciales emplois,...). A partir de ce constat, il est ensuite possible de modéliser des effectifs de déplacements agrégés respectivement émis et reçus par chaque zone, par motif d'activité (Leurent *et al.* 2012) ;
- Dans une deuxième étape, il est opportun de quantifier les flux de déplacements des personnes selon un matrice origine / destination basée sur le choix des trajets empruntés par les usagers pour effectuer les déplacements entre leur place de travail et leur lieu de résidence ou leurs zones de loisirs. Ceci est rapporté à une unité de mesure qui est le temps ou le coûts monétaire ;
- Dans une troisième étape, il s'agit de quantifier le trafic en additionnant tous les flux enregistrés dans l'étape précédente pour mettre en évidence les volumes locaux des flux qui traversent chaque segment du réseau.

Une fois que la demande est modélisée de manière agrégée, on a recours à des modèles d'optimisation de l'offre désagrégée pour adapter au mieux l'offre et la demande, afin que la rencontre soit la plus convenable pour les usagers (et leurs caractéristiques) et pour l'exploitant du réseau.

La volonté d'intégrer l'offre et la demande conduit à articuler les modèles agrégés et désagrégés. C'est là que se trouve la plus grande difficulté à laquelle se sont confrontés des modèles plus récents, notamment le modèle LUTI.

4. Modèles d'interaction « transport-urbanisme »

Les champs mobilisés par les modèles LUTI (Land Use and Transportation Interaction) sont très vastes et touchent à plusieurs domaines tels l'économie, la géographie, la psychologie et les sciences complexes. Comme vu dans les chapitres précédents, à un niveau global, les théories classiques micro-économiques de Von Thünen (1826), Wingo (1961) et Alonso (1964) et d'autres sont les références de base pour comprendre les relations entre l'usage du sol et le transport (1.1) Si auparavant le transport était intégré dans les modèles en tant que facteur économique contraignant, sous forme de coûts de transport, c'est avec Lowry (1964) et Wilson (1971) que le rapport de dépendance entre la répartition de l'activité humaine et le transport se dessine. C'est en effet la répartition des densités et des activités qui est génératrice des flux, le transport est ainsi le support des échanges entre les territoires (1.2). Cette idée est renforcée avec Broadbent (1973) qui conceptualise la demande de transport tel un « output » du système d'activité (2.2). C'est dans un troisième temps que le système de transport est considéré comme un système à part entière, capable de contraindre ou de favoriser le système d'activité (3.1).

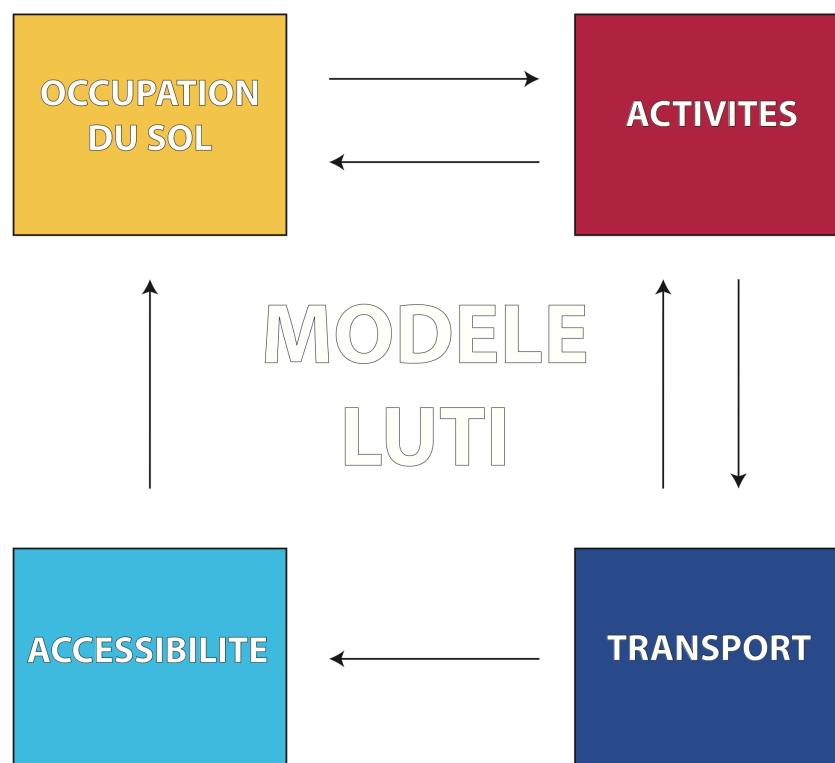
C'est dans cette dernière considération que s'inscrivent les modèles LUTI qui prônent une interdépendance entre le système d'occupation du sol et le système de transport. Ainsi, les modèles LUTI représentent un pont entre économie, géographie et sciences sociales qui permettent d'appréhender le développement des territoires de façon certes complexe mais en même temps de façon systémique et complète. Le but des modèles LUTI consiste donc à coupler deux approches systémiques des dynamiques urbaines auparavant appréhendées de façon séparée.

Ce chapitre montrera comment les modèles LUTI identifient le rapport d'interdépendance entre occupation du sol et transport dans le milieu urbain en particulier à travers les travaux de Wegener (4.1). Dans un deuxième temps, l'analyse se portera sur les deux composantes des modèles LUTI de façon séparée pour expliciter quels sont les éléments pris en charge dans une optique de couplage des systèmes (4.2, 4.3). Ensuite il sera question de préciser le rôle des acteurs de l'espace urbain (4.4) et en particulier du rôle des marchés économiques (4.5).

4.1.L'interaction entre occupation du sol et transport

La répartition des modes d'occupation du sol sur un territoire permet de localiser dans l'espace les différentes activités humaines (habitats, entreprises, ...). Cette distribution de l'activité engendre des flux de déplacement car une distance les sépare. Les flux se réalisent grâce au réseau de transport, celui-ci étant le support des déplacements et qui permet de connecter les différentes activités. De ce fait, la structure du réseau de transport et plus en général du système de transport, fixe les règles et les conditions de l'accessibilité aux lieux. Dans cette optique, on considère que la répartition de l'accessibilité sur le territoire exerce un impact sur les modes d'occupation du sol et par conséquent sur l'implantation des ménages, des entreprises et des activités en général (Lapparent, 2013) (Fig.4.1).

Figure 4.1 : Modèle simplifié de l'interaction entre transport et occupation du sol



(X. Charles, 2017, d'après Wegener, 2004)

Plusieurs concepts ont contribué à comprendre la nature du lien entre l'usage du sol et le transport. La boucle de rétroaction entre l'usage du sol et le transport (Fig.4.1) offre une vision simple pour décrire la complexité des rétroactions en jeu entre le système d'usage du sol et les systèmes de transport (Wegener, 2004).

particulier en ce qui concerne la vitesse de déplacement, conduit à affirmer que la mobilité n'est donc qu'une résultante des choix individuels de l'endroit où nous voulons habiter et de l'endroit où nous voulons réaliser ces activités (Massot, Orfeuil, 1995). Dans cette optique, l'individu possède un pouvoir organisateur de l'espace, dans les limites des capacités budgétaires et légales sur les marchés immobiliers, respectivement sur les règles d'aménagement (Massot, Orfeuil 1995).

Malgré la reconnaissance que l'usage du sol interagit avec le transport, au moins au niveau conceptuel, les mécanismes par lesquels les systèmes s'influencent mutuellement ont été difficiles à isoler et à mesurer empiriquement. C'est en raison de l'interaction complexe entre plusieurs forces physiques, sociodémographiques, économiques et politiques qui régissent la structure des systèmes d'usage du sol et de transport (Lundqvist, 2003 ; Wegener, 2004). Le terme « usage du sol », par exemple, englobe une variété de sous-systèmes tels que la résidence, le lieu de travail et l'infrastructure physique, ainsi que l'issue du processus complexe du marché urbain (Mackett, 1993). En effet, il semble y avoir peu de consensus dans la littérature sur les mécanismes causaux par lesquels la forme urbaine influence la mobilité et vice-versa. Certaines études ont conclu que les variables structurelles urbaines (c'est-à-dire la densité, la diversité, l'accessibilité à la destination et la distance au transport en commun) ont une influence statistiquement significative sur les comportements de déplacement (Meurs, Haaijer. 2001), tandis que d'autres ne reconnaissent pas cette forte influence d'un élément sur l'autre (Chowdhury, *et al.* 2013).

4.2. La composante occupation du sol

La difficulté à identifier les raisons sous-jacentes à l'interaction entre occupation du sol et transport et de conséquence des implications que la structure des villes peut avoir sur le comportement des déplacements et vice-versa, est la raison même de l'approche LUTI. Dans le cas des dynamiques visibles au sein du processus d'occupation du sol, il est intéressant de se pencher sur la mobilité quotidienne des individus en particulier par rapport au pouvoir structurant que peut avoir la relation lieu de travail et lieu de résidence (4.2.1), mais aussi la relation entre le lieu de résidence et d'autres activités et facteurs du territoire (4.2.2) mais dans un premier temps il est important de préciser quels sont les facteurs et les paradigmes qui permette de comprendre l'articulation entre valeur foncière et occupation du sol.

4.2.1 La valeur foncière

Dans les théories du 19^{ème} siècle la valeur foncière détermine l'usage du sol (Von Thünen, 1851) ou au contraire, l'usage du terrain détermine son prix (Pichet, 2004). Sur ces deux paradigmes, il est incontestable de reconnaître la relation dialectique entre usage du sol et valeur foncière. Pour déterminer la valeur foncière, il faut tenir compte des éléments matériels et immatériels du territoire, c'est à dire des infrastructures présentes et des perceptions des individus tel le sentiment de sécurité. Malgré cela il ne faut pas oublier la force de modulation de la rente foncière de la part des marchés qui, selon le jeu de l'offre et de la demande, influencent les prix.

Si l'on soutient le paradigme qui préconise une antériorité et une prédominance de l'usage du sol sur la valeur foncière, une théorie soutenue par Ricardo (1772–1823) (Lipietz, 1974), on propose alors que la valeur foncière ne serait que la somme des valeurs sociales, culturelles et économiques qui y sont attribuées (Halbwachs, 1909; Lipietz, 1974). Pour expliquer les variations du prix du foncier, Lipietz s'appuie sur le concept de division économique et sociale de l'espace en introduisant des facteurs endogènes et exogènes. Par exemple, une intervention de la part d'un promoteur immobilier dans le but d'obtenir une plus-value foncière est considérée comme un facteur endogène. Tandis que les facteurs exogènes sont les idées que les individus perçoivent par rapport à un espace. Dans le cas des centres villes, par exemple, les classes sociales aisées sont prêtes à payer le prix fort pour bénéficier des avantages de la centralité. Le choix de localisation des individus se fait dans le cadre d'une restriction budgétaire. Un budget plus élevé permet aux individus de se localiser dans les zones les plus prisées ou attractives.

Le paradigme attribué à Von Thünen pour lequel le prix du foncier en détermine l'usage, s'inscrit dans La Nouvelle Economie Urbaine (NEU) (Aveline, 2005). Dans cette optique, le choix de localisation des individus résulte d'un compromis entre la distance au centre-ville qui détermine les coûts de transport et la caractéristique du logement. De ce fait, les personnes les plus aisées peuvent habiter dans les zones de périphérie où ils bénéficient de logements plus grands, car ils ont par ailleurs un budget plus confortable pour les déplacements.

Dans le cadre de l'analyse de la valeur foncière d'un territoire, il est indéniable que la prise en compte de différents paradigmes est indispensable dans le cadre d'une analyse urbaine. Néanmoins, il est tout aussi important de reconnaître le rôle des acteurs et leurs comportements au sein du système.

4.2.2 Relation entre lieu de résidence et lieu de travail

Sont considérés dans la composante « utilisation du sol » des modèles LUTI, tous les lieux d'activités tels que le résidentiel, l'emploi et les activités auxiliaires, c'est-à-dire les achats, les loisirs et la formation. Un des intérêts des modèles LUTI est de comprendre les choix de comportements des individus ou des ménages, selon l'interdépendance qui se crée entre le lieu de résidence et le lieu de travail. Le lieu de résidence est considéré comme un choix à long terme qui définit l'ensemble des possibilités de déplacement pour réaliser les activités dont dispose un ménage ou une personne (Pinjari *et* Bhat, 2011). Des possibilités de mobilité qui se multiplient si le lieu de travail est pris en considération (Yang *et* Ferreira, 2008).

Selon la théorie classique de la maximisation de l'utilité individuelle, les personnes tendent à choisir le lieu de résidence le plus accessible par rapport au lieu de travail dans le but de minimiser les coûts de déplacement. En effet, le choix du lieu de travail est prédéterminé ou exogène au choix de l'emplacement résidentiel (Waddell *et al.*, 2007). Cette condition est un postulat de plusieurs modèles LUTI (Chapitre 5.1).

4.2.3 Relation entre lieu de résidence et autres facteurs

Le choix de localisation résidentielle est influencé par de nombreux facteurs tels que le type d'habitat, les nuisances sonores ou encore le loyer, les coûts de transport, l'accessibilité à des services de haute qualité tel que l'école ou encore l'aspect environnemental (Pagliara *et al.* 2010), le réseau social (Tilahun *et* Levinson, 2013). Pinjari *et* Bhat (2011) ont établi que le choix résidentiel et le choix du lieu de travail initial sont des décisions déterminées de façon conjointe, mais cet aspect multidimensionnel est plus difficile à implémenter dans un modèle car le nombre de possibilités est très élevé (Waddell *et al.* 2007).

4.3. La composante transport

La partie qui traite des systèmes de transport dans les modèles LUTI met plutôt l'accent sur la compréhension des comportements de déplacement des individus pour prévoir et gérer la demande de mobilité. Les principales questions ouvertes sont le choix modal, la planification des horaires ou encore les séquences de déplacement. La demande en déplacement est sujette aux structures urbaines et en même temps à des facteurs socio-économiques. Sans oublier les externalités du système de transport qui ont aussi un impact en termes d'utilisation de sol mais aussi du point de vue de la qualité de l'air ou plus largement de la qualité de l'environnement (3.1). Il s'agit ici de mettre en évidence les différentes possibilités de prendre en considération la composante transport dans l'approche LUTI, notamment en faisant allusion à l'approche en quatre étapes (4.3.1) ou encore l'approche par système (4.3.2).

4.3.1 Les modèles de transport en quatre étapes

Le modèle de demande de déplacement en quatre étapes est devenu l'outil traditionnel de prévision de la demande et d'évaluation des performances des systèmes de transport et des grands projets d'infrastructures de transport (McNally, 2000). La prédominance des modèles à quatre étapes utilisés dans le cadre du processus de planification des transports découle de leur attrait logique et simple (Bates, 2000).

Les quatre étapes consistent à distinguer et comprendre :

- Les générateurs des déplacements ;
- La distribution des déplacements ;
- La répartition modale des déplacements ;
- L'affectation des déplacements.

En d'autres termes, cette approche veut identifier les questions liées à la quantification des mobilités, comprendre leur origine et leur destination, déterminer le mode de transport à utiliser pour effectuer le déplacement et quelle route doit être empruntée pour réaliser le déplacement (Bates, 2000).

La compréhension des générateurs de déplacement se base sur l'analyse des arrivées et des départs d'une certaine zone pour en déduire la capacité d'attractivité et donc d'estimer l'ampleur des déplacements. La phase de distribution des déplacements vise à comprendre

comment des facteurs tels que le coût de déplacement en termes de temps ou de prix, influencent la répartition des flux tout en intégrant la question des générateurs de déplacements. Le choix modal permet donc de comprendre quel est le moyen de transport utilisé pour réaliser le déplacement, ce dernier étant ensuite dans l'étape finale affecté à un réseau propre ou à un mode de transport.

La limite de ces modèles repose sur le fait que l'approche basée sur les déplacements ignore complètement le fait que la demande de mobilité est une demande dérivée (2.2). En effet, cette approche ne tient pas compte des raisons qui poussent l'individu à se déplacer avant de réaliser le déplacement (McNally, 2000).

4.3.2 Les modèles de transport par activité

Les modèles basés sur l'approche par activité apparaissent dans les années 1990 pour combler les lacunes des modèles en quatre étapes. L'idée est celle d'apporter une orientation comportementale en introduisant des aspects issus de l'analyse du système d'activité et de l'économie comportementale (Achempong *et* Silva, 2014). Dans l'optique des modèles de transport basés sur l'approche par activité, le déplacement résulte bien d'une demande dérivée. Plus précisément, le besoin de déplacement découle du désir des individus de réaliser des activités.

En effet, les modèles de transport basés sur l'activité se réfèrent à une représentation de la chaîne des déplacements. Une chaîne de déplacements commence et finit dans un lieu-dit de base (par exemple le lieu d'habitation). Cela permet de distinguer les interdépendances des choix des individus en termes de temps, de mode de transport et de destinations pour réaliser les activités de loisir d'achat ou de travail.

La limite de ces modèles repose sur la difficulté de théoriser la prédiction des comportements de déplacement des individus (Recker 2001).

4.4. Les acteurs du système urbain

Les éléments et les facteurs des dynamiques du territoire agissant sur l'interaction entre l'occupation du sol et les transports sont largement dépendants des acteurs de ce territoire. Il

s'agit donc, dans cette quatrième partie, de distinguer quels sont les acteurs qui jouent un rôle de pouvoir, lesquels fixent les règles et lesquels les exploitent. Pour simplifier l'analyse il a été question d'identifier les acteurs économiques et politiques du système urbain en étant conscient de la multitude d'acteurs concernés dans la réalité urbaine. Il est possible de reconnaître 4 familles d'acteurs économiques qui régissent et qui participent au système dans une optique d'économie de marché (Lapparent, 2013) :

- Les propriétaires terriens (4.4.1) ;
- Les ménages (4.4.2) ;
- Les entreprises (4.4.3) ;
- Les autorités de régulation et de pouvoir public (4.4.4).

4.4.1 Les propriétaires terriens

Le propriétaire terrien, c'est-à-dire celui qui détient le sol, peut être un acteur public tel l'Etat ou une collectivité territoriale, ou agir dans le secteur privé tel un ménage ou une entreprise. Le terrain peut être déjà aménagé pour accueillir une ou plusieurs activités. Le marché foncier permet de soumettre à la vente, au don, à la location ou à la conservation le terrain. Dans une optique de maximisation du profit, l'agent propriétaire saura, selon l'état du marché, faire un choix rationnel de vendre, donner, louer ou respectivement conserver le terrain. La maximisation du profit n'est pas forcément le but de tout acteur en particulier pour l'Etat qui détient le pouvoir d'imposition sur l'usage de la parcelle selon ses stratégies politiques. Cela prend forme dans les plans directeurs ou les plans d'urbanisme.

4.4.2 Les ménages

Il est possible de considérer les ménages comme des entités consommatrices de biens et de services. Cette perspective permet d'inclure les consommations de biens tels qu'un logement, un terrain ou des biens primaires, mais aussi des consommations de services telles que des transports, loisirs... Dans la loi du marché économique, le choix du lieu de résidence des ménages est considéré comme une consommation d'espace. Les individus sont poussés par des choix résidentiels qui prennent en considération beaucoup de facteurs, par exemple l'offre de transport, l'offre en services spécialisés... (3.1). Les individus sont donc contraints de faire un choix rationnel entre le coût du logement, le coût du transport et autres. Pour faire face à

ces coûts, l'individu offre ses compétences sur le marché du travail en échange de rémunération, une rémunération qui permet donc la consommation des biens (logement) et de services (transport). Ce sont en effet les contraintes budgétaires et temporelles qui pèsent dans l'optimisation du bien-être (Lapparent, 2013).

4.4.3 Les entreprises

L'entreprise peut se définir comme un acteur producteur de biens et de services voués à la consommation dans le but principal d'en tirer du profit. Les entreprises sont des acteurs qui sont, comme pour les ménages, consommateurs de sol. Une particularité est que le secteur d'activité de la construction, à travers la mise à disposition de surface d'activité, permet aux administrations publiques, aux ménages et aux entreprises de s'installer. Le secteur d'activité de la construction est en charge de mettre en place les infrastructures et les immeubles selon les modes d'occupation du sol fixés par les propriétaires terriens et les règles d'aménagement.

En fonction du secteur d'activité, la quantité de sol occupé est la résultante de l'optimisation des profits par rapport aux coûts engendrés par l'acquisition des ressources nécessaires : l'accessibilité à la main d'œuvre, aux ressources en matières premières et au prix du terrain.

Les facteurs économiques tels que les effets d'agglomération d'activité et l'accessibilité au bassin de consommateurs sont aussi déterminants. Il est aussi important que le secteur d'activité des transports soit lui-même constitué d'entreprises qui développent les infrastructures et d'autres qui les exploitent. Les entreprises de transport sont aussi des acteurs déterminants dans la localisation des entreprises car elles détiennent le pouvoir de déterminer l'accessibilité entre les lieux de résidence, de consommation et de production (4.1).

4.4.4 Les autorités de régulation et les pouvoirs publics

Les pouvoirs publics ont un rôle de régulation et de planification sur les différents marchés, avec des objectifs parfois en contradiction, cherchant à trouver des consensus entre le libéralisme économique et le pouvoir strictement social. Les outils d'action de ces acteurs sont les lois et les normes sur le plan de la réglementation ainsi que les taxes et les impôts sur le plan fiscal. Le rôle de régulation de l'état peut toucher tous les domaines abordés dans les modèles LUTI tels que l'occupation du sol (4.2) ou le transport (4.3).

4.5. Les marchés

Les acteurs du système urbain sont multiples et détiennent chacun leur part de responsabilité ou de pouvoir dans les dynamiques urbaines en termes d'occupation du sol et de transport. En tant qu'acteurs du système d'activité et respectivement acteurs des interactions économiques et sociales au sein de l'espace urbain, chacun a quelque chose de différent à offrir et chacun a besoins de quelque chose. Le marché est le lieu de rencontre entre l'offre et la demande de sol (2.1) et de transport (3.1) où les agents économiques (4.4) entrent en relation. Il est important de souligner le degré de concurrence présent sur le marché entre les différents acteurs. Dans le cadre des modèles LUTI la concurrence est abordée de différentes manières :

- Soit la concurrence est parfaite et l'on considère que l'ajustement entre offre et demande est en parfait équilibre ;
- Soit la concurrence n'est pas modélisée et l'on tente « manuellement » de faire matcher les quantités demandées aux quantités offertes (Lapparent, 2013).

Dans l'approche des modèles LUTI, six types de marchés sont pris en considération et ce de différentes manières :

- Le marché foncier ;
- Le marché du transport ;
- Le marché du travail ;
- Le marché du logement ;
- Le marché du bâti ;
- Le marché de la consommation de biens et services.

La rencontre de l'offre et la demande sur ces grands marchés détermine l'équilibre du système urbain (Lapparent, 2013). Ici réside tout l'enjeu des modèles LUTI pour rendre compte des interactions entre les marchés et les acteurs et pour déterminer et prédire le fonctionnement du système urbain. Wegener (2004) distingue dans le grand système urbain huit sous-systèmes capables de rendre compte de la complexité du système urbain (Wegener, 2004) :

- Le sous-système des réseaux physiques qui comprend le transport, l'énergie l'eau et tous les autres réseaux physiques d'une ville ;
- Le sous-système d'occupation du sol et la distribution des modes d'occupation des

parcelles, tous deux gérés normalement par l'entité publique ;

- Le sous-système immobilier résidentiel qui permet l'installation des ménages ;
- Le sous-système immobilier non résidentiel, voué à accueillir les activités autres à celles résidentielles (bureaux, commerces, dépôts, ...) ;
- Le sous-système de localisation des ménages ;
- Le sous-système de localisation des entreprises ;
- Le sous-système de transport de passagers ;
- Le sous-système de transport de marchandises.

Dans une optique théorique, il est possible de qualifier l'ensemble des sous-systèmes cités ci-dessus. Or, l'enjeu réside dans le niveau de détails souhaité pour rendre au mieux de la « réalité ». Différents modèles sont proposés selon leur capacité à considérer avec plus ou moins de détails les interactions de la « réalité » urbaine. Le but étant de trouver un compromis entre la finesse de l'analyse et la facilité technique à gérer la quantité d'informations statistiques.

5. Simulation comme outil de prospective de l'interaction entre espace de la ville et le système de transport

La première partie de ce travail permet de prendre en considération l'espace urbain sous une approche systémique. A travers les études liées à l'espace urbain, il a été possible de déterminer les liens de rétroaction, les interactions et les rapports dialectiques et complexes qu'entretiennent les différents systèmes de l'espace urbain. Un système urbain dynamique est animé par des interactions sociales et économiques entre individus capables d'engendrer des flux de différentes natures. Un tel système doit être capable de générer des biens ou des besoins à la base des processus et des dynamiques du système urbain.

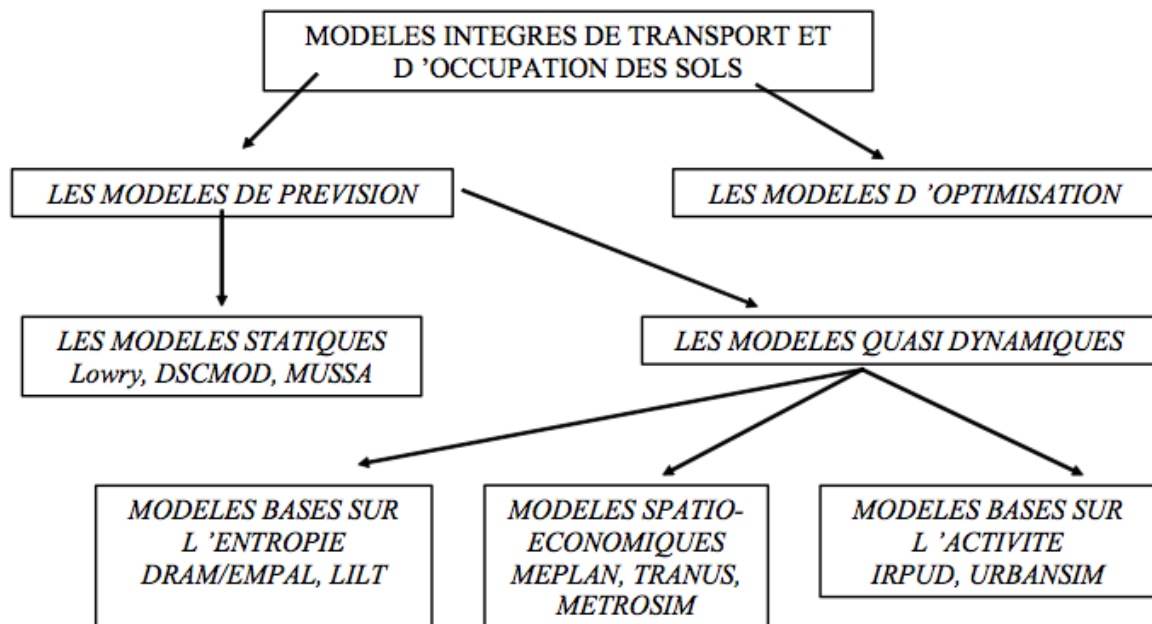
La simulation en tant qu'outils d'appropriation de la part des chercheurs pour appréhender les dynamiques de la ville dans un but prospectif s'avère être une arme puissante pour gérer les enjeux liés à l'aménagement des villes, notamment les enjeux liés au transport, à la densification, à l'environnement... Dans le cadre de la réalisation d'un outil informatique capable de simuler les dynamiques complexes de la ville, plus précisément de l'interaction qu'entretiennent le système d'occupation du sol et le système de transport, il est nécessaire de sélectionner les éléments et les facteurs économiques et sociaux des transformations urbaines, susceptibles d'avoir un impact sur le système urbain en le transformant. L'enjeu étant d'observer et de mesurer l'ampleur de la transformation des facteurs des dynamiques urbaines pour en analyser les possibles évolutions. Pour ce faire, il est nécessaire de dresser les typologies de modèles pour en déceler les caractéristiques et les méthodologies en vue d'une sélection appropriée pour la réalisation d'un modèle de simulation de la ville de Lausanne (5.1). La deuxième partie de ce chapitre mettra l'accent sur les modèles de micro-simulation qui se prêtent particulièrement bien à la représentation et à l'analyse des dynamiques urbaines (5.2).

5.1. Les familles de modèles LUTI

Le champ de recherche des modèles LUTI est aujourd'hui fortement développé. De nombreux modèles ont été mis en place, des outils à part entière utilisés dans les processus de planification urbaine. La diversité de ces modèles est très vaste mais elle peut être résumée sur la base de la classification de Simmonds et Bates (1999). Cette classification n'est pas

chronologique ou historique comme il en a été le cas dans les chapitres précédents de ce travail. Simmonds et Bates (1999) ont au contraire utilisé comme critères les finalités et les résultats fournis par les modèles (Deymier *et* Nicolas, 2005). Ce choix souligne les différents facteurs et éléments mobilisés par les familles de modèles afin d'anticiper les types de résultats auxquels l'analyse peut aboutir. Ainsi, cette typologie de modèle relie les modèles aux questions de recherche auxquelles ils répondent (Fig.5.1).

Figure 5.1 : Classification des modèles LUTI



(Simmond et Bates, 1999)

La Figure 5.1 présente la classification des familles de modèles d'interaction entre transport et occupation du sol. Dans un premier temps, il est possible de distinguer les modèles LUTI d'optimisation et ceux de prévision. Les premiers sont voués à optimiser la structure urbaine et son fonctionnement à un moment précis dans le temps. Au contraire, les modèles de prévision, comme leur nom l'indique, sont orientés à prédire les impacts des politiques d'aménagement ou de transport sur l'évolution de la structure urbaine. (Deymier *et* Nicolas, 2005). Les modèles de prévision peuvent être classifiés en deux sous-groupes. Le premier réunit les modèles statiques capables de prévoir la localisation de certaines variables du système urbain en considérant d'autres variables fixées dans l'espace-temps. A ces modèles, on reproche de ne pas refléter de façon exhaustive les processus de changement urbain (source, année). Nous retrouvons dans cette famille de modèles, le modèle de Lowry (1964)

(1.2.2). Au contraire, les modèles quasi-dynamiques peuvent prendre en compte les processus d'évolution du système urbain de façon plus précise. C'est en effet la famille de modèle qui a connu un fort développement en termes d'avancée scientifique.

Généralement, la classification de Simmond et Bates (*Figure 5.1*) propose trois grands groupes de modèles, chacun basé sur des théories différentes :

- les modèles basés sur la théorie de l'entropie ;
- Les modèles spatio-économiques ;
- Les modèles basés sur les activités.

C'est dans ce dernier groupe que s'inscrivent les modèles de micro-simulation urbaine.

5.2. Les modèles de micro-simulation

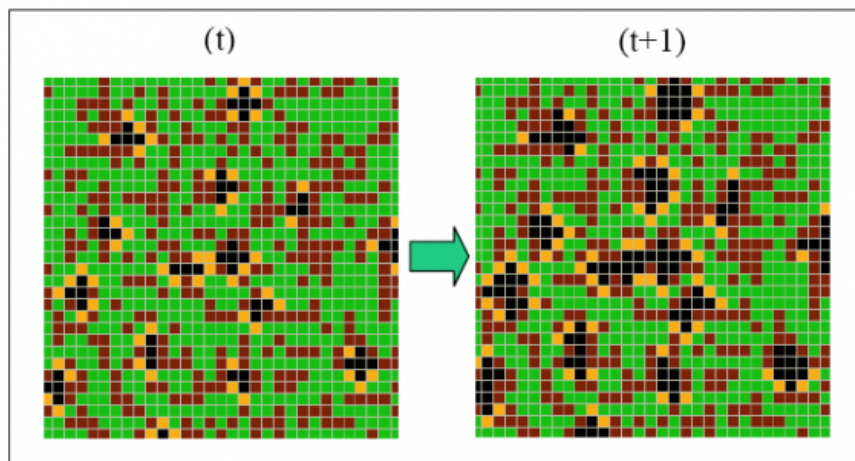
De nos jours, la micro-simulation se distingue des structures et des techniques de modélisation agrégées citées dans le chapitre précédent et ce, pour dépasser les faiblesses des méthodes. En effet, l'approche agrégée des modèles complexes ne permet pas de rendre compte des comportements individuels des acteurs du territoire face aux changements de l'état du système urbain (Deymier *et* Nicolas, 2005) mais plutôt de rendre compte des potentiels d'évolution d'une zone. Le zonage étant la limite des modèles agrégés qui impose de lisser l'information statistique au sein de chaque zone du territoire. C'est avec la micro-simulation, notamment les modèles d'automates cellulaires et les modèles multi-agents, que les chercheurs essaient de dépasser les faiblesses des méthodes agrégées. Les objectifs de ce travail sont précisément de comprendre les dynamiques des territoires par rapport aux choix individuels des acteurs du territoire face aux options et aux alternatives que le système urbain propose. Cela est rendu possible grâce aux automates cellulaires et aux modèles multi-agents.

5.2.1 Les automates cellulaires

Von Neumann est le principal théoricien des automates cellulaires et s'inspire largement de la technologie informatique de Turing (1936). Les machines de Turing sont en effet les plus vieux systèmes de simulation basés sur le principe d'universalité (Nazim, 2001). Les caractéristiques de ce type de simulateur sont relativement simples et permettent, sur la base d'une grille à deux dimensions, d'attribuer une valeur à chaque cellule de la grille. Chaque

cellule de la grille a la capacité d'influencer ou d'interagir avec les cellules voisines. L'aspect dynamique de cette simulation réside dans le fait que les cellules sont en mesure de changer de valeur. Ainsi la grille et les valeurs des cellules se transforment, selon la force d'influence de la cellule voisine, d'un état initial au temps (t) à un état différent au temps ($t+1$) (Fig.5.2). Dans le cadre de ce travail, l'intérêt de ce type de simulateur est son application dans le domaine de l'urbanisme (Batty, 1997, 2005 ; Caruso *et al.* 2011). Nous l'utiliserons plus précisément dans le but de mettre en avant des caractéristiques intrinsèques du territoire notamment la valeur foncière (4.2.1), son attractivité (4.1), son accessibilité et le niveau de service offert.

Figure 5.2 : Exemple d'automate cellulaire



(Notes et Poix, 2006)

5.2.2 Modèles multi-agents

Les modèles multi-agents permettent de simuler les règles d'interaction entre les agents. Malgré le fait que l'approche des modèles multi-agents soit issue de celle des automates cellulaires, les systèmes multi-agents s'en distinguent (Deymier *et* Nicolas, 2005). Ce ne sont pas des cellules fixes qui interagissent avec leurs voisins, mais biens des entités virtuelles mobiles capables d'interagir avec d'autres entités virtuelles. Ce type de simulation permet, à travers les effets systémiques de l'application conjointe des règles d'interaction, de rendre compte des processus de groupe (Steppacher, 2014). Ce type de simulation est très répandu et permet, particulièrement dans le domaine de la géographie, de coupler les dynamiques sociales avec des aspects spatiaux et temporels. Dans le cadre de ce travail, cela permet de prendre en considération les choix des acteurs du territoire, notamment les ménages (4.4.2) et

plus particulièrement du choix de localisation des ménages, induit par des facteurs tels que l'accessibilité (3.1), le prix des terrains, des logiques du marché de l'offre et de la demande (4.5) et d'optimisation économique.

5.2.3 Couplage d'un automate cellulaire et d'un modèle multi-agents

Le modèle mis en place dans le cadre de cette recherche couplera un modèle multi-agents avec un automate cellulaire. Le premier permet de décrire et de rendre compte des choix entrepris par les acteurs du territoire en l'occurrence des nouveaux habitants (7.1.1), le second intègre les caractéristiques du territoire (7.1.2). Dans un modèle de couplage entre un système multi-agent et un automate cellulaire nous retrouvons donc des agents et des cellules ayant chacun des caractéristiques différentes et des règles qui permettent de faire évoluer le système tout entier. C'est dans la deuxième partie de ce travail qu'il sera question de regrouper les mesures et les méthodes les plus pertinentes pour permettre une modélisation de la ville de Lausanne, ceci en vue de décrire des évolutions possibles du système urbain lausannois sur la base des théories et des modèles LUTI.

Partie II: Mise en place du modèle de simulation prospectif LUTI du système urbain de Lausanne

6. Enjeux, perspectives et scénarios : pour le développement d'un modèle LUTI à Lausanne

La ville peut être définie comme le produit des interactions entre les acteurs et de l'interaction entre les différents systèmes. Elle doit être perçue comme un système aux équilibres fragiles dans la mesure où la modification d'un paramètre du système (par exemple l'accessibilité de certains lieux) transforme le système dans son ensemble. L'objectif principal de ce travail est précisément de prévoir les transformations du système urbain sous l'effet de modifications de ce système et des sous-systèmes qui le composent, et ce dans une perspective prospective. Cet objectif constitue un enjeu prépondérant dans le cadre de la gouvernance des villes et le contrôle des dynamiques spatiales tel que le métropolisation.

Les dynamiques majeures soulignées tout au long de ce travail vont nous permettre d'extraire les règles et les indicateurs permettant de poser les bases du modèle de simulation. Deux grandes dynamiques du territoire sont mobilisées :

- les dynamiques liées au système d'occupation du sol ;
- les dynamiques liées au système de transport.

Ces deux dynamiques peuvent être simulées conjointement grâce à l'approche des modèles LUTI afin de déterminer, et ce à partir de scénarios de mise en place de nouvelles organisations des transports, les localisations des activités sur le territoire et les structures urbaines qui en découlent.

Cette recherche s'applique à la ville de Lausanne qui s'apprête à connaître une évolution démographique importante. Il s'agit ainsi de simuler l'évolution du système urbain de Lausanne en partant d'une situation initiale simplifiée et similaire à celle d'aujourd'hui. Le but étant de perturber le système et d'en observer les répercussions. Pour ce faire, ce chapitre s'articule de façon à poser les bases de la recherche pour la mise en place de différents scénarios visant à prévoir les trajectoires possibles des transformations la ville de Lausanne. Dans un premier temps, il est question d'identifier quels sont les enjeux majeurs auxquels la ville de Lausanne doit faire face en termes de croissance urbaine sur la base de la littérature et des statistiques (6.1). Cela permet de définir les questions de recherche et les hypothèses qui sont à la base du modèle de simulation mis en place dans le cadre de ce travail. Une fois les

hypothèses fixées, il sera possible de mettre en place les différents groupes de scénarios permettant de décrire les évolutions possibles du système urbain étudié (6.2).

6.1. Les futures du système urbain de Lausanne : dynamiques et enjeux d'une ville en mutation

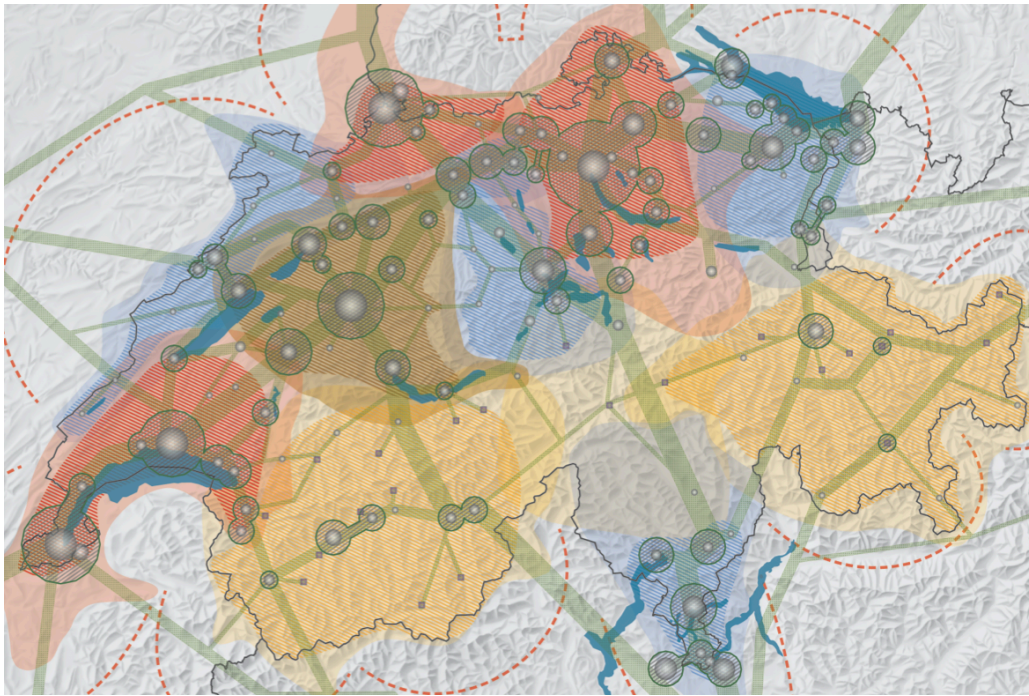
Pour permettre l'analyse des phénomènes de mutation du système urbain, il est nécessaire dans un premier temps de poser un diagnostic de la zone d'étude pour en extrapoler les bases du modèle de simulation. C'est dans un second temps, sur la base du diagnostic, qu'il est possible de reconnaître quels sont les enjeux qui en découlent. En d'autres termes, le diagnostic définit l'état initial du modèle de simulation et les enjeux permettent de poser les paramètres pour la mise en place des scénarios.

Ce chapitre contextualise le système urbain de la région lausannoise à plusieurs échelles (nationale et régionale). Ceci permet de comprendre la force des dynamiques en jeu dans le cadre de l'analyse spatiale des dynamiques urbaines (6.1.1). La position stratégique en termes d'attractivité territoriale de Lausanne au sein du système urbain régional et national de la Suisse, met la ville face à des enjeux importants, notamment les enjeux qui émanent des fortes dynamiques démographiques (6.1.2). Des dynamiques démographiques à l'origine d'autres enjeux tout aussi importants tels que les questions de mobilité (6.1.3) et de disponibilité en sol (6.1.4). Ce chapitre permet de mettre en lumière cette cascade d'enjeux auxquels une ville dynamique comme Lausanne doit faire face, tout en comprenant les facteurs.

6.1.1 Position de la ville de Lausanne dans le système urbain suisse

Le bassin lémanique dont Lausanne fait partie est, avec Bâle et Zurich, considéré comme l'une des trois aires métropolitaines de Suisse (*Fig. 6.1*). Le système urbain suisse est fortement structuré par les axes commerciaux qui se déploient du Sud au Nord et de Ouest en Est du pays. La ville de Lausanne, en tant que l'un des pôles de la métropole lémanique, se trouve en position stratégique par rapport aux trois aires métropolitaines qui forment le bassin lémanique. En effet, Lausanne jouit d'une position qui peut être qualifiée de carrefour stratégique, notamment par rapport à la Genève internationale, la Berne fédérale et le Valais.

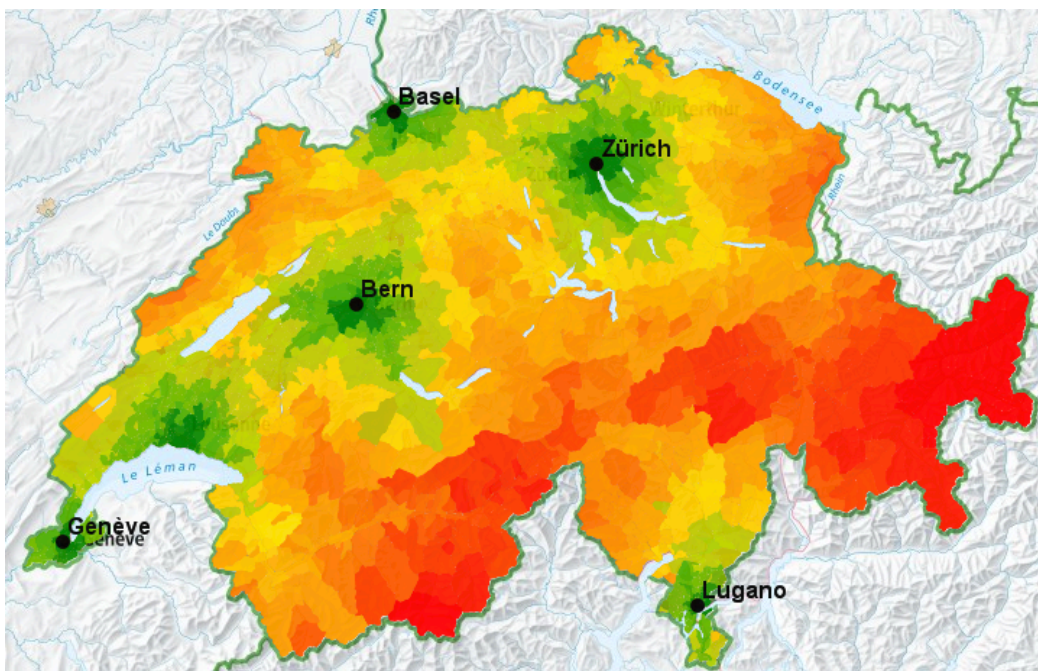
Figure 6.1 : Projet de territoire Suisse



(ARE, 2012)

Cet emplacement stratégique au sein du système urbain suisse fait de Lausanne une ville très accessible (Fig. 6.2) et en même temps très attractive d'un point de vue économique à un niveau national et régional.

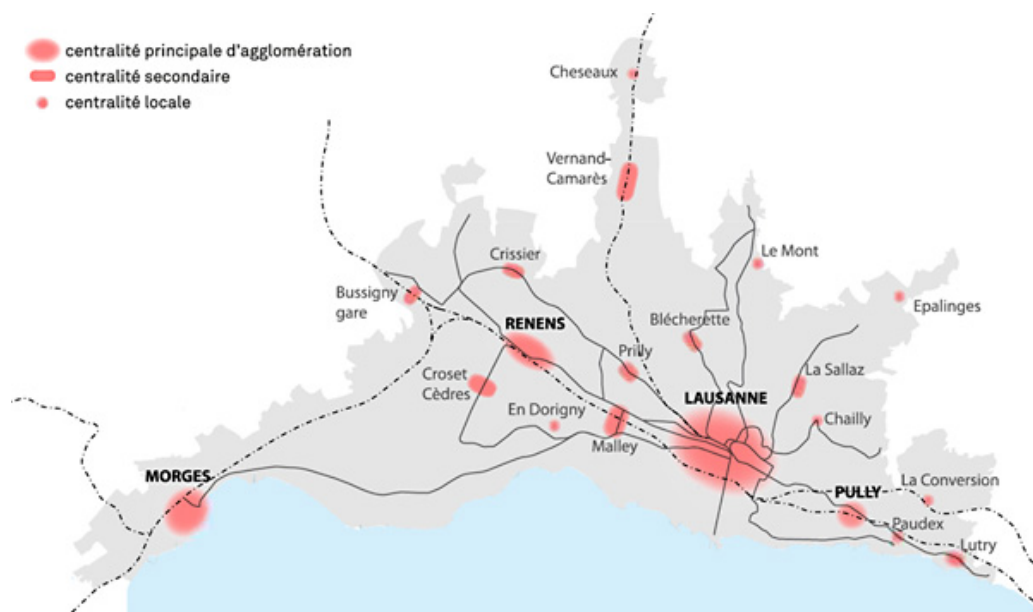
Figure 6.2 : Accessibilité de la Suisse : Temps de parcours en transport individuel



(map.geo.admin.ch, 2017)

A une échelle plus fine, si l'on regarde dans les détails du système urbain, l'agglomération lausannoise peut être considérée comme un centre urbain multipolaire, avec comme centre principal la ville de Lausanne et des pôles secondaires qui gravitent autour de Lausanne (Renens, Pully et Morges) (Fig. 6.3). A cette échelle, il est possible de remarquer les principales voies commerciales (transports publics et routes) qui contribuent à la structure de la ville. C'est en effet par une continuité quasi totale du bâti que se caractérise l'agglomération lausannoise. Cette considération s'inscrit totalement dans l'approche LUTI qui considère l'interaction entre occupation du sol et transport.

Figure 6.3 : Projet d'agglomération Lausanne-Morges



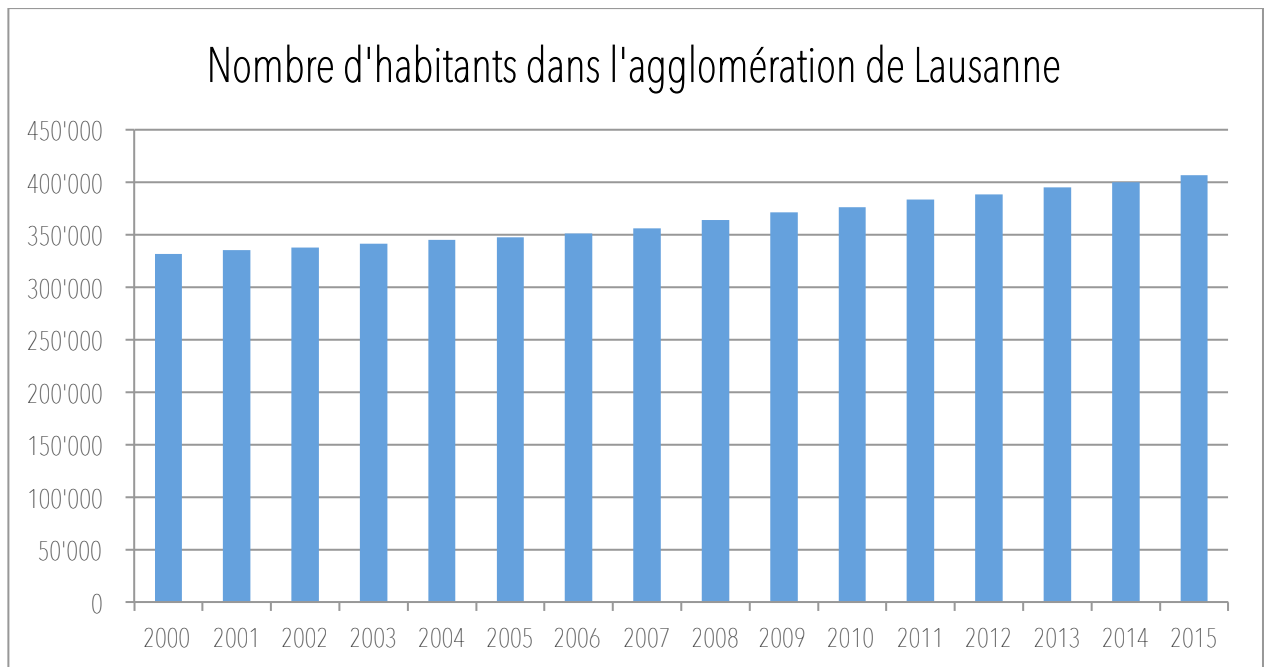
(PALM, 2016)

6.1.2 Les dynamiques de la ville de Lausanne et les enjeux démographiques

La ville de Lausanne et ses environs forment un pôle important en termes d'emplois et de population. Si l'on s'intéresse aux dynamiques démographiques et économiques de la ville, il est pertinent de se pencher sur les tendances qui la caractérisent, notamment les tendances démographiques qui expriment l'importante attractivité territoriale de l'aire urbaine de Lausanne. Si l'on considère l'ensemble de l'agglomération lausannoise et ce selon la définition de l'Office Fédérale de la Statistique (OFS), l'agglomération compte 406'522 habitants en 2015. Cela constitue le 89,6 % de la population totale du canton Vaud. Il est donc possible de remarquer que la population urbaine, selon la définition de l'OFS, constitue une part très importante de la population du canton, une population qui, en nombre absolu,

continue de s'accroître (Fig. 6.4). Cette augmentation de la population urbaine du canton s'accroît de 1.4 % en moyenne chaque année depuis 2000. La tendance de croissance se vérifie pour les emplois. Entre 2005 et 2012, environ 40'000 emplois ont été créés dans l'agglomération Lausanne-Morges (périmètre OFS), portant le total à près de 200'000 emplois en 2012 (PALM, 2016).

Figure 6.4 : Population de l'agglomération lausannoise selon définition OFS (2000 – 2015)



(Statistique Vaud, 2017)

Toutefois, la forte attractivité de la ville comporte un certain nombre d'enjeux tels que la mobilité (6.1.3) ou le logement (6.1.4) qui se traduisent d'une part en problèmes de trafic et de congestion des axes de transport et une pression sur le marché immobilier posant le problème de pénurie de logements ou des problèmes d'inaccessibilité financière à ceux-ci d'autre part (PALM, 2016).

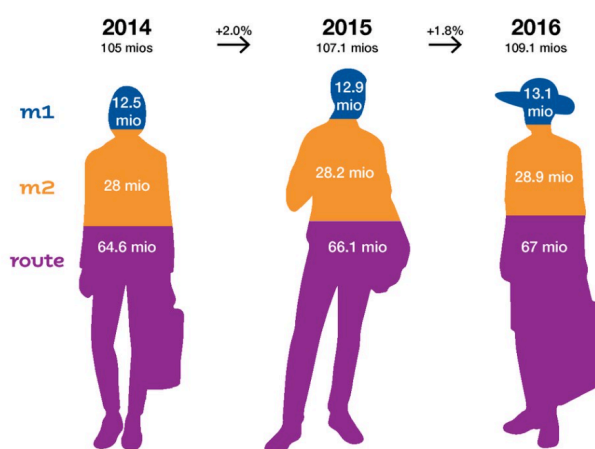
Ces enjeux constituent la base de la question de recherche de ce travail (6.2). Des enjeux pris en charge notamment par le projet d'agglomération Lausanne-Morges dont les promoteurs expliquent que : « Depuis 2007, le rythme de croissance des habitants a dépassé tous les pronostics. Cette prospérité, si elle est enviable sur le plan économique, ne présente pas que des avantages. En effet, le rythme de production de logements n'a pas suivi et le périmètre compact de l'agglomération Lausanne-Morges, de même que l'ensemble de l'Arc lémanique, souffre d'une pénurie et d'un manque de diversification de logements. » (PALM 2016 : 40).

Pour faire face à cela le PALM 2016 cherche à mettre en place des stratégies face à l'éventualité de recevoir au sein de l'agglomération plus de 80'000 nouveaux habitants et 50'000 nouveaux emplois d'ici 2030. Les stratégies touchent différents domaines en particulier la mobilité et l'environnement bâti, domaines qui s'inscrivent notamment dans l'approche LUTI (4.1) mais aussi dans le domaine de l'environnement et des paysages naturels.

6.2. Impacts des dynamiques démographiques sur le système de transport public lausannois

Plusieurs questions se posent sur les impacts d'un réseau de transport public urbain et en particulier concernant les transports publics de l'agglomération de Lausanne sur la distribution et l'organisation de la population. Selon les statistiques publiées par Statistique Vaud, entre 2000 et 2015 l'agglomération statistique lausannoise a connu une augmentation de plus de 74'000 habitants. Cela représente une croissance annuelle de presque 5'000 habitants (Statistique Vaud, 2017), donc 5'000 personnes de plus chaque année qui se déplacent. En effet, l'augmentation de la population implique aussi l'augmentation de la demande en transport. Chaque individu possède un potentiel de mobilité propre, une mobilité qui, si elle se réalise, se traduit en demande de transport (3.1.3). L'enjeu principal auquel il faut faire face dans le domaine des transports urbains est l'augmentation constante de la demande générale (PALM, 2016).

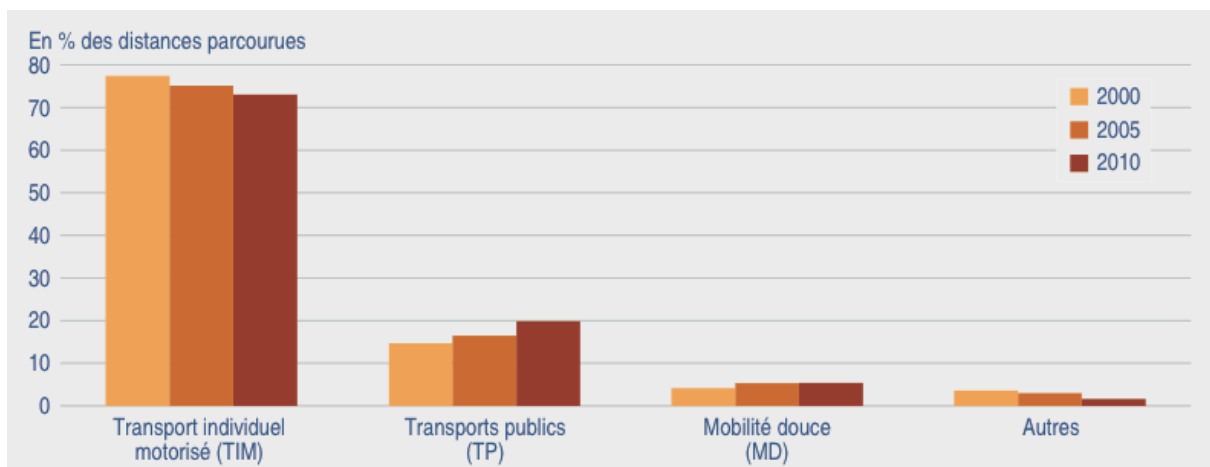
Figure 6.5 : Nombre et évolution des voyageurs sur le réseau TL (2014 – 2016)



(Transport Lausannois SA, 2017)

Tout d'abord, il est important de traiter la question de l'augmentation de la demande en transports publics dans l'agglomération lausannoise. Selon les sources fournies par l'entreprise qui exploite le réseau des transports publics de Lausanne (TL), entre 2010 et 2016 il est possible de constater une augmentation linéaire du nombre de passagers à bord des véhicules qui desservent l'agglomération de Lausanne (Fig. 6.5). Il est clair que si la tendance se confirme pour les années à venir avec une augmentation de + 2.8% chaque année sur l'ensemble du réseau cantonal de transports publics (Statistique Vaud, 2017), le réseau en place risque d'arriver rapidement à saturation. L'augmentation de la demande en transports publics n'est pas que liée aux dynamiques démographiques mais, aussi par un changement du comportement de mobilité des individus. On remarque une évolution de la répartition modale des déplacements (Fig. 6.6). Dans l'agglomération lausannoise, la part de déplacement en transports collectifs est en augmentation. Cela signifie que le choix modal des habitants pour effectuer leurs déplacements se porte de plus en plus sur les transports publics (Statistique Vaud, 2017). En d'autres termes, la part des déplacements selon le mode de transport concède de plus en plus de place aux transports en commun.

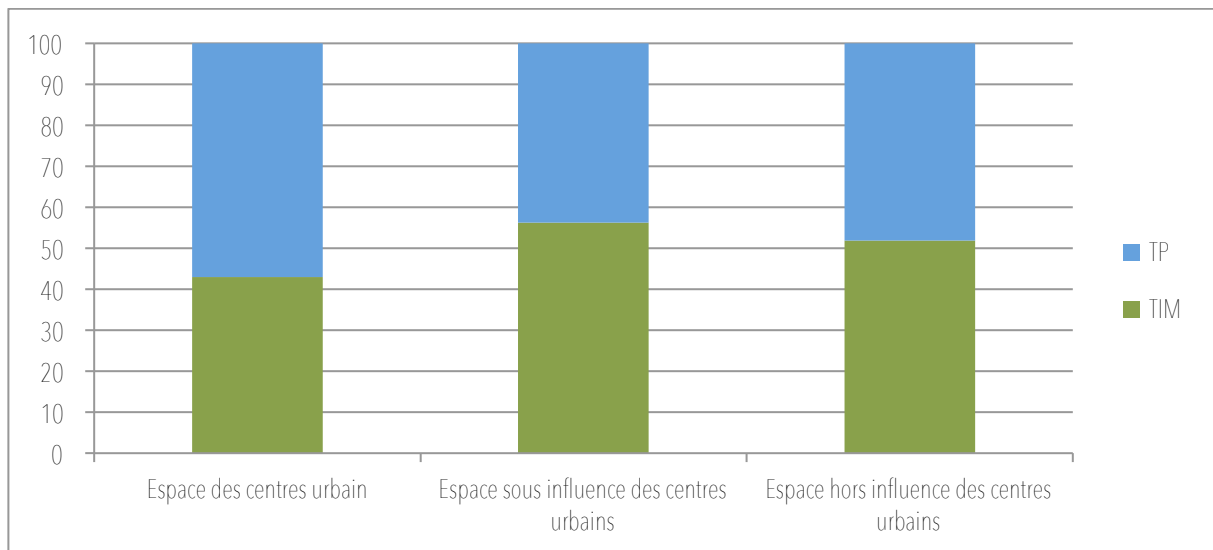
Figure 6.6 : Evolution de la répartition modale du transport de personnes VD (2000 – 2010)



(Statistique Vaud, 2017)

On peut également souligner que la part modale des déplacements effectués en transports publics est inégalement répartie spatialement. Cela signifie que le choix modal des habitants de la zone d'étude choisie n'est pas identique à tous. Il est possible de constater que le choix du mode de transport dans l'agglomération lausannoise suit une logique centre périphérie. Autrement dit, les habitants du centre-ville optent plus facilement en faveur des transports publics pour effectuer leurs déplacements et ce par rapport aux habitants hors influence des centres-villes (Fig. 6.7).

Figure 6.7 : Répartition modale des déplacements quotidiens en minutes VD (2015)



(Statistique Vaud, 2017)

Il est donc évident que le réseau de transport public de l'agglomération de Lausanne doit faire face à une augmentation de la demande en transport public en termes de capacité et de qualité. Cela signifie qu'il faut améliorer la performance et la qualité de l'offre de transports de différentes façons, soit améliorer l'accessibilité des transports en commun notamment pour les populations qui ont le moins d'accessibilité. Dans le cadre de ce travail deux stratégies ont été retenues :

- agir sur la vitesse commerciale des véhicules, donc une diminution des temps de parcours, grâce à des aménagements permettant une circulation plus rapide des véhicules (ex. bus à haut niveau de service BHNS) ;
- augmentation de la cadence horaire pour desservir un arrêt ; ce qui ne comporte pas une diminution des temps de parcours mais une meilleure prestation (passagers*Km) et une diminution des temps d'attente aux arrêts.

6.2.1 Impacts des dynamiques démographiques sur le marché foncier lausannois

L'important dynamisme démographique sur l'arc lémanique ajouté à la pénurie de logements et à une évidente spéculation immobilière, un manque de terrain à bâtir et des phénomènes de thésaurisation des terrains conduit à une pression immobilière très importante dans la région de Lausanne (Pattaroni *et* Marmy, 2016). L'attractivité de cette zone exerce une pression sur la valeur financière des terrains. Ceci se répercute alors sur le prix du foncier et de l'immobilier.

Face à ces constats s'imposent plusieurs enjeux à caractères sociaux tels que la question de l'accessibilité aux logements et la ségrégation résidentielle, ou à caractère plutôt urbanistique, comme les stratégies d'aménagement urbain. Ces dernières mettent en jeu des forces contrastantes, c'est le cas de l'étalement urbain et de la densification. Deux stratégies opposées pour faire face aux dynamiques démographiques mais qui posent des problèmes qui touchent des aspects délicats, tels que les modes de vies, la mobilité et la qualité des paysages. La solution et les stratégies de prise en charge de ce problème dépendent de la volonté politique d'aménagement du territoire. Opter pour une urbanisation horizontale impose la nécessité de donner accès à des zones de plus en plus éloignées du centre-ville, une plus large prise en charge de la mobilité et un processus de mitage du paysage au détriment des surfaces vertes. D'autre part, dans le cas du choix d'une urbanisation plus dense, cela impose la verticalité (Fig. 6.8), une prise en charge plus intense de la mobilité et un mode de vie plus urbain. Un mode de vie qui ne correspond pas forcément à la volonté de la population.

Figure 6.8 : Projet de la tour de Chavannes-près-Renens



(RTS, 2015)

Comme pour la mobilité, l'urbanisation constitue l'enjeu central du projet d'agglomération Lausanne-Morges. « *Pour une utilisation raisonnée du territoire, l'urbanisation dans le périmètre d'agglomération doit être plus concentrée. Elle doit se densifier dans les lieux stratégiquement déterminés pour éviter la dispersion d'habitations et garantir ainsi une*

accessibilité performante en transports publics » (PALM ; 2016). Le projet prône une densification des espaces déjà urbanisés en améliorant la qualité des espaces urbains existant.

Dans l'articulation complexe des acteurs du système urbain s'impose aussi le marché foncier. La valeur foncière (4.2.1) constitue un facteur prépondérant au choix de localisation des ménages. Lorsque la demande pour un terrain est élevée, la concurrence se fait plus rude et les prix augmentent (1.3). Les ménages n'ont pas tous le budget nécessaire pour accéder aux mêmes logements. Des loyers ou des prix trop élevés dans les villes attractives comme Lausanne, engendrent clairement des problèmes à caractères sociaux et économiques. D'autre part, la question s'impose sur la nécessité ou non de laisser le marché et les différents acteurs du marché foncier (mise à part l'action politique) d'imposer les règles. Pour cette raison, il demeure très compliqué de prévoir l'évolution du prix du foncier étant donné le nombre important de facteurs l'influençant.

L'agglomération de Lausanne doit faire face à une augmentation de la demande en sol qui impose des stratégies pouvant allier qualité de vie et exigences urbanistiques. De ce constat découle deux projections de l'évolution du système d'occupation du sol et qui sont en opposition. Celles-ci imposent d'agir sur les facteurs qui régissent ces deux processus urbains notamment sur les règles d'aménagement

- Favoriser une forte densification en permettant l'installation d'habitants dans les zones les plus attractives dans les limites du possible ;
- Ralentir le phénomène de densification.

En somme, ce sont deux visions opposées et radicales de l'aménagement des villes mais qui s'imposent désormais dans le débat des questions de gestion des dynamiques démographiques.

6.3. Questions de recherche, objectifs et hypothèses, quels scénarios pour la ville de Lausanne face aux enjeux démographiques?

Les enjeux démographiques, économiques et de mobilité de la ville de Lausanne sont complexes et très diversifiés. L'approche des modèles LUTI permet d'appréhender, dans la limite des hypothèses formulées, les défis futurs de cette ville. Le constat de l'augmentation croissante de la population et les défis qui en découlent, selon l'approche LUTI peuvent se

réduire à une bonne prise en charge des aspects touchant le système d'occupation du sol et du système de transport. Dans le premier cas, il s'agit de comprendre les facteurs d'attractivité territoriale qui orientent les choix résidentiels des individus alors que dans le second cas, il s'agit d'identifier les caractéristiques du système de transport qui permettent et qui influencent le choix résidentiel des individus.

Dans le cadre de la ville de Lausanne, il s'agit de cerner les caractéristiques du système de transport selon l'accessibilité, élément indispensable à la dynamique de développement territoriale et donc du système d'occupation du sol selon l'attractivité. En vue d'une modélisation du système urbain de la ville de Lausanne, il est nécessaire de poser les hypothèses de base (6.2.2) et les scénarios qui en découlent (6.2.3).

6.3.1 Objectifs de recherche

L'objectif de ce travail est celui de comprendre l'étalement urbain à la lumière des modèles d'interaction entre usage du sol et transport. Plus particulièrement, il s'agit de comprendre les choix de localisation des nouveaux habitants par rapport aux caractéristiques du territoire. Ces caractéristiques dépendent des transformations de l'accessibilité aux transports publics et en même temps des transformations des règles d'occupation du sol. Le thème du choix de localisation résidentielle nécessite la compréhension des facteurs qui déterminent ce choix.

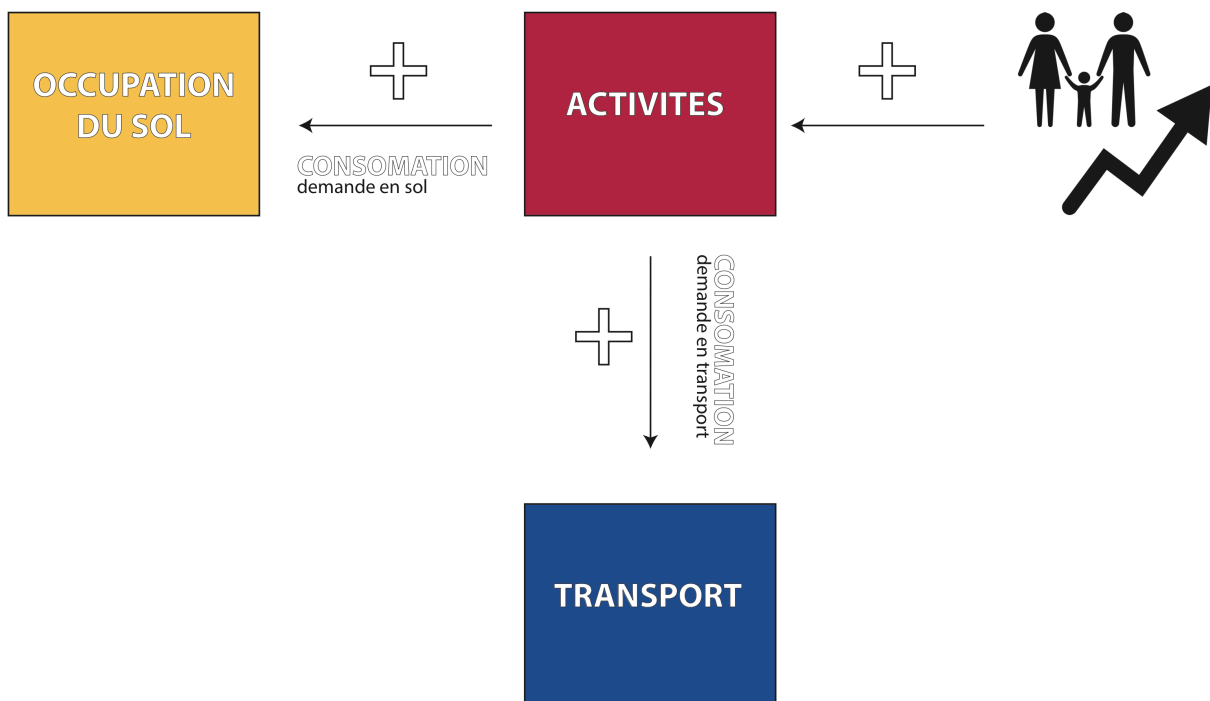
Dans la mesure où l'interaction entre transport et utilisation du sol est capable de rendre compte des dynamiques spatiales du système urbain, c'est en proposant des simulations de la ville de Lausanne que l'on compte mieux comprendre les interactions systémiques qui composent ces processus. Il s'agira de proposer des groupes de scénarios pour des futurs possibles liés aux transformations et aux mutations du système urbain régional et de la structure urbaine de la ville dans la région lausannoise.

Il s'agit avant tout d'un travail orienté vers l'analyse spatiale. En effet, le phénomène de localisation des personnes est un phénomène spatialisé. Pour permettre une bonne illustration du phénomène, l'analyse est accompagnée de cartes thématiques et de rendus permettant la visualisation spatialisée des résultats. L'un des objectifs de ce travail est aussi celui de créer un outil informatique de simulation simple et accessible qui permet l'étude des dynamiques urbaines.

6.3.2 Hypothèses prospectives pour les possibles futurs du système urbain de Lausanne

L'hypothèse de base de ce travail repose sur les enjeux démographiques auxquels la ville de Lausanne doit faire face. De cette problématique centrale découlent plusieurs enjeux cruciaux tels que les problématiques de la mobilité ou encore la problématique de l'occupation du sol. Pour cela, ce travail se base avant tout sur le postulat d'une augmentation significative de la population sur le territoire choisi pour l'étude. En d'autres termes, le système urbain modélisé dans l'approche LUTI est en quelque sorte perturbé par une augmentation du nombre d'individus qu'il faut satisfaire. Ceci engendre une augmentation de la demande en transport ainsi qu'une augmentation de la demande en sol. Par conséquent, les systèmes de transport et d'occupation du sol sont mis sous pression. (Fig. 6.9)

Figure 6.9 : Pression de l'accroissement de la population sur le système urbain



(X. Charles, 2017)

6.3.2.1 Hypothèse de recherche H1 : dynamiques démographiques

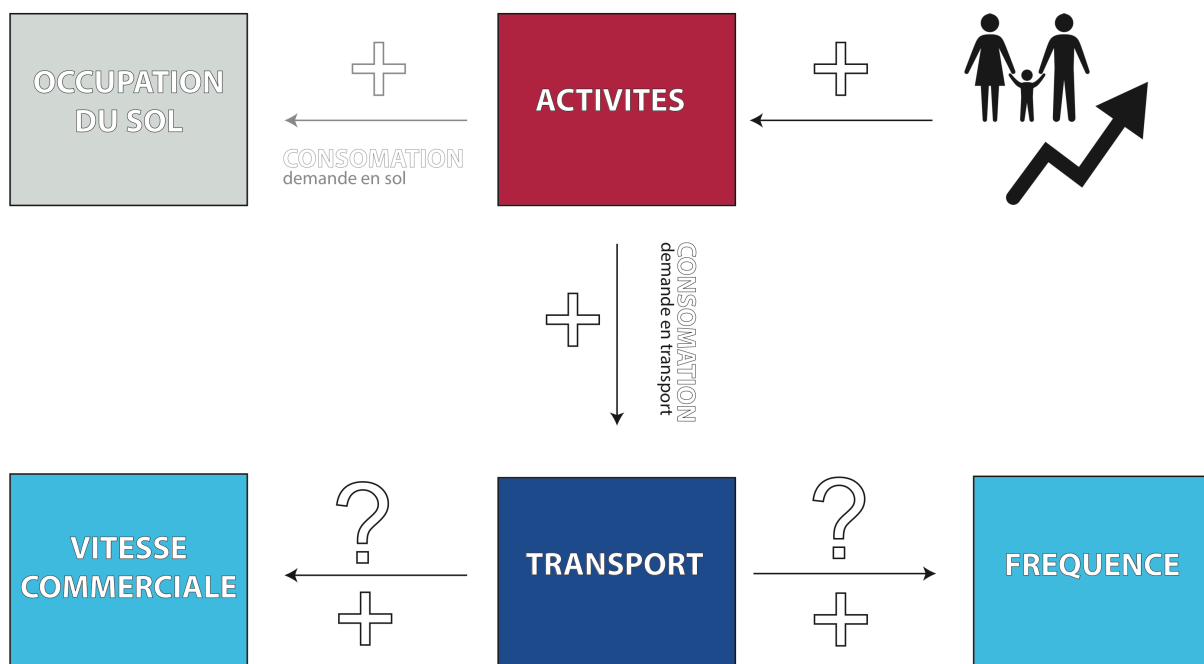
L'hypothèse centrale de ce travail repose sur le postulat d'un accroissement sensible de la population et des conséquences en matière de distribution spatiale selon les politiques de transport envisagées (6.1.2). Les dynamiques démographiques sont ainsi le moteur de la

boucle de rétroaction du modèle d'interaction LUTI. Etant donné les projections démographiques sujettes à de nombreux facteurs, il est important de prendre en considération plusieurs groupes. C'est sur la base d'études et de statistiques perspectives qu'il est nécessaire de définir l'amplitude de cette évolution (6.2.3.1). L'hypothèse H1 posée dans ce travail veut démontrer les changements de la structure spatiale du système urbain en lien avec l'amplitude de l'accroissement de la population sous certaines conditions de choix d'aménagement des transports.

6.3.2.2 Hypothèse de recherche H2 : dynamiques du système de transport public

La deuxième hypothèse repose sur le postulat d'une augmentation de la population exerçant une pression sur la demande de transport (6.1.3). L'augmentation de la demande en transport comporte une réaction de la part des acteurs de la mobilité pour non seulement répondre à la demande de transport mais aussi pour améliorer l'accessibilité aux transports publics. Il s'agit d'émettre une hypothèse sur les modalités et les stratégies utilisées pour répondre à une demande croissante en transports publics : en agissant d'une part sur les temps de parcours ou d'autre part sur la qualité de la desserte (Fig. 6.10). En d'autres termes, l'hypothèse pose la question d'une mutation potentielle de la structure spatiale du système urbain par rapport à différentes stratégies d'amélioration de l'accessibilité des transports publics.

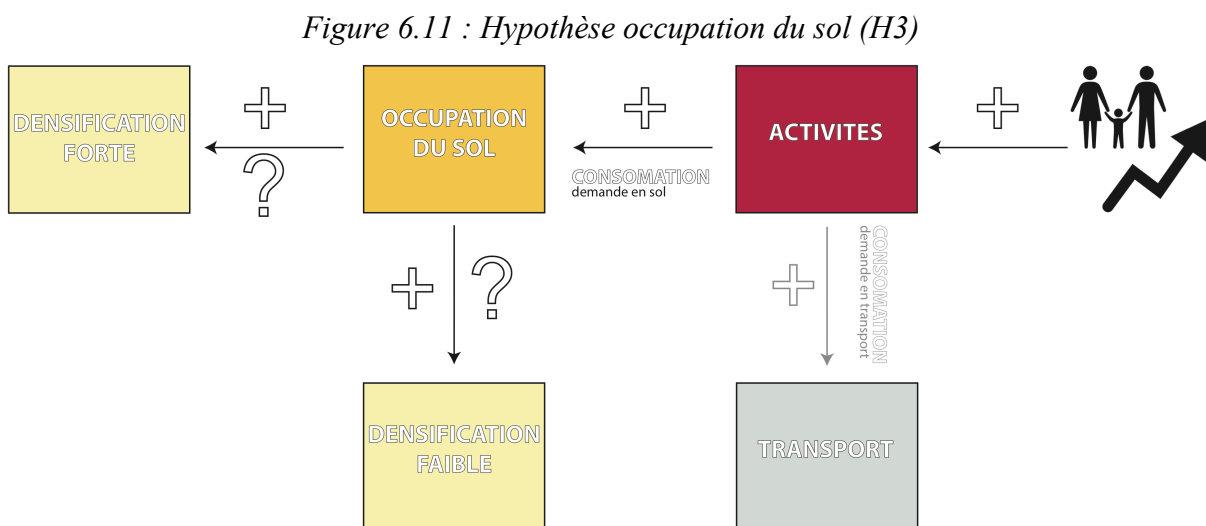
Figure 6.10 : Hypothèse transport (H2)



(X. Charles, 2017)

6.3.2.3 Hypothèse de recherche H3 : dynamique du système d'occupation du sol

La troisième hypothèse repose sur le postulat stipulant une augmentation de la demande en sol liée à l'accroissement de la population (6.1.4). Une augmentation de la demande pour une parcelle engendre une augmentation des prix du foncier. L'hypothèse considère différentes modalités et stratégies utilisées pour répondre à une demande croissante en sol. Ceci est possible en agissant sur les règles d'aménagement, en permettant par exemple une densification plus importante de la population. Ceci permettrait de répondre à la forte demande et de détendre le marché foncier grâce à l'ajout de surfaces habitables. En d'autres termes, l'hypothèse pose la question d'une mutation potentielle de la structure spatiale du système urbain par rapport à différentes stratégies de prise en charge de l'augmentation de la demande en sol en variant sur les modalités de densification (Fig. 6.11).



(X. Charles, 2017)

6.3.3 Scénarios pour une conceptualisation des futurs de la ville de Lausanne

L'objectif de ce chapitre est de prendre en considération les futurs possibles liés aux dynamiques urbaines de la ville de Lausanne et plus largement du Canton de Vaud. Le but étant d'en extraire les groupes de scénarios qui régissent les simulations sur la base des hypothèses stipulées précédemment. Ci-après, comme il a déjà été proposé tout au long de ce chapitre, seront abordées quelques perspectives futures de l'évolution démographique, en particulier de l'évolution de la population (6.2.3.1) pour permettre ensuite de mieux cerner les projections d'évolution du système de transport (6.2.3.2) et du système sol (6.2.3.3).

6.3.3.1 Scénarios démographiques

Pour évaluer des évolutions possibles du nombre d’habitants sur le territoire d’étude, les experts se basent sur les dynamiques démographiques en termes de migration et de solde naturel (Schumacher *et* Paillard, 2017).

Les projections statistiques cantonales proposent différents scénarios démographiques (bas, moyen et haut) et distinguent donc trois hypothèses d’évolution de la population sur la base du niveau du solde migratoire, du taux de fécondité et du taux de mortalité (SCRIS, 2011). La *Figure 6.12* présente le résultat des perspectives combinant les trois scénarios démographiques sur la base des variations des indicateurs proposés ici dessus. Selon les projections, le Canton devrait accueillir à l’horizon 2040, entre 155’000 et 280’00 nouveaux habitants.

Figure 6.12: Evolution et projections de la population du Canton de Vaud, 2000 – 2040

Vaud, comparaison entre les scénarios									
	obs					2000 à	2010 à	2020 à	2030 à
<i>au 31.12</i>	2000	2010	2020	2030	2040	2010	2020	2030	2040
	Population totale					Accroissement sur dix ans			
sc 1	616 000	708 200	805 600	900 800	987 900	+92 200	+97 400	+95 200	+87 100
sc 2	616 000	708 200	798 000	874 400	939 600	+92 200	+89 800	+76 400	+65 200
sc 3	616 000	708 200	772 600	822 700	862 700	+92 200	+64 400	+50 100	+40 000

(Statistique Vaud, 2011)

Dans le cadre de ce travail, les trois scénarios liés aux dynamiques d’évolution de la population conformes à celles proposées par Statistique Vaud ont été retenus:

- projection basse (1) ;
- projection moyenne (2) ;
- projection élevée (3).

Les chiffres utilisés dans le cadre de la modélisation sont adaptés par rapport à la région choisie pour les simulations (8.3). Une schématisation des trois groupes de scénarios démographiques est proposée dans la *Figure 6.13*.

Figure 6.13 : Tableau des scénarios démographiques

projection démographique basse	projection démographique moyenne	projection démographique élevée
1	2	3

(X. Charles, 2017)

6.3.3.2 Scénarios système de transport public

Pour fixer les scénarios inhérents à l'évolution du système de transport nous utiliserons les projets d'amélioration du réseau de transport public proposés par les autorités du Canton de Vaud et de la ville de Lausanne. La stratégie Léman 2030, le développement du RER vaudois et d'autres objectifs visant à augmenter la performance des transports publics misent sur deux stratégies complémentaires. D'un côté, ces projets visent à l'amélioration de la vitesse commerciale pour des temps de parcours plus courts et d'autre part à l'amélioration de la desserte aux arrêts en augmentant la cadence (6.1.3). Il en résulte qu'il est très difficile de prévoir l'évolution exacte du système de transport public au niveau régional et de la ville de Lausanne. C'est pour cela que ces deux scénarios ont été retenus sur la base des objectifs du Canton Horizon 2030 – 2040. Le premier scénario vise une diminution progressive des temps de parcours (*projection A*) et le deuxième scénario vise une augmentation progressive de la qualité de la desserte des arrêts (*projection B*) (Fig.6.14). Ces deux stratégies sont complémentaires mais peuvent avoir des répercussions complètement différentes sur la structure du système urbain. Les données utilisées pour les simulations sont proposées au chapitre 8.3.

Figure 6.14 : Tableau combiné des scénarios démographiques et transport

projection démographique basse		projection démographique moyenne		projection démographique élevée	
temps de parcours	qualité desserte	temps de parcours	qualité desserte	temps de parcours	qualité desserte
A1	B1	A2	B2	A3	C3

(X. Charles, 2017)

6.3.3.3 Scénarios d'occupation du sol

Sur la base des enjeux et des hypothèses émises sur les évolutions possibles du système d'occupation du sol deux scénarios possibles ont été retenus. D'un côté un scénario qui prône une faible densification (*projection C*) et de l'autre une forte densification (*projection D*). Pour poser les scénarios visant à reconstruire l'évolution du système d'occupation du sol, nous nous baserons sur les projets d'aménagement du territoire tel que le PALM 2016 cherchant à réguler l'étalement urbain et le mitage du paysage d'une part (6.1.5). Il est encore très difficile de postuler sur des possibles évolutions du système d'occupation du sol vu les nombreux facteurs et acteurs capables de l'influencer (les chiffres utilisés pour la modélisation sont présentés dans la troisième partie de ce travail (8.3)). La *Figure 6.15* propose une schématisation des scénarios liés au système d'occupation du sol.

Figure 6.15 : Tableau combiné des scénarios démographiques et d'occupation du sol

projection démographique basse		projection démographique moyenne		projection démographique élevée	
densification faible	densification élevée	densification faible	densification élevée	densification faible	densification élevée
C1	D1	C2	D2	C3	D3

(X. Charles, 2017)

6.3.3.4 Les scénarios retenus pour la simulation

De la combinaison des différents scénarios retenus pour chaque dynamique du territoire en accord avec l'approche des modèles LUTI résultent douze groupes de scénarios (*Fig. 6.16*).

Figure 6.16 : Tableau combiné des scénarios démographiques transport-sol

	projection démographique basse		projection démographique moyenne		projection démographique élevé	
	temps de parcours	qualité desserte	temps de parcours	qualité desserte	temps de parcours	qualité desserte
densification faible	A1	B1	A2	B2	A3	B3
densification élevé	C1	D1	C2	D2	C3	D3

(X. Charles, 2017)

Voici une description des groupes de scénarios retenus pour la simulation :

- **Le scénario A1** : Projection démographique basse, stratégie de transport basée sur l'amélioration des temps de parcours et une stratégie d'occupation du sol qui limite la densification ;
- **Le scénario B1** : Projection démographique basse, stratégie de transport basée sur l'amélioration de la qualité de la desserte aux arrêts et une stratégie d'occupation du sol qui limite la densification ;
- **Le scénarios C1** : Projection démographique basse, stratégie de transport basée sur l'amélioration des temps de parcours et une stratégie d'occupation du sol qui encourage la densification ;
- **Le scénarios D1** : Projection démographique basse, stratégie de transport basée sur l'amélioration de la qualité de la desserte aux arrêts et une stratégie d'occupation du sol qui encourage la densification ;
- **Le scénario A2** : Projection démographique moyenne, stratégie de transport basée sur l'amélioration des temps de parcours et une stratégie d'occupation du sol qui limite la densification ;
- **Le scénario B2** : Projection démographique moyenne, stratégie de transport basée sur l'amélioration de la qualité de la desserte aux arrêts et une stratégie d'occupation du sol qui limite la densification ;
- **Le scénarios C2** : Projection démographique moyenne, stratégie de transport basée sur l'amélioration des temps de parcours et une stratégie d'occupation du sol qui encourage la densification ;

- **Le scénarios D2** : Projection démographique moyenne, stratégie de transport basée sur l'amélioration de la qualité de la desserte aux arrêts et une stratégie d'occupation du sol qui encourage la densification ;
- **Le scénario A3** : Projection démographique élevée, stratégie de transport basée sur l'amélioration des temps de parcours et une stratégie d'occupation du sol qui limite la densification ;
- **Le scénario B3** : Projection démographique élevée, stratégie de transport basée sur l'amélioration de la qualité de la desserte aux arrêts et une stratégie d'occupation du sol qui limite la densification ;
- **Le scénarios C3** : Projection démographique élevée, stratégie de transport basée sur l'amélioration des temps de parcours et une stratégie d'occupation du sol qui encourage la densification ;
- **Le scénarios D3** : Projection démographique élevée, stratégie de transport basée sur l'amélioration de la qualité de la desserte aux arrêts et une stratégie d'occupation du sol qui encourage la densification.

7. Conception du modèle de simulation comme outil prospectif

Le modèle qui a été développé dans le cadre de ce travail permet la simulation des dynamiques spatiales engendrées par les processus d'évolution du système de transport public et du système d'occupation du sol. Ce modèle permet d'observer les effets systémiques à partir d'un cadre empirique qui est celui de la ville de Lausanne. Pour ce faire quatre étapes ont été mises en place :

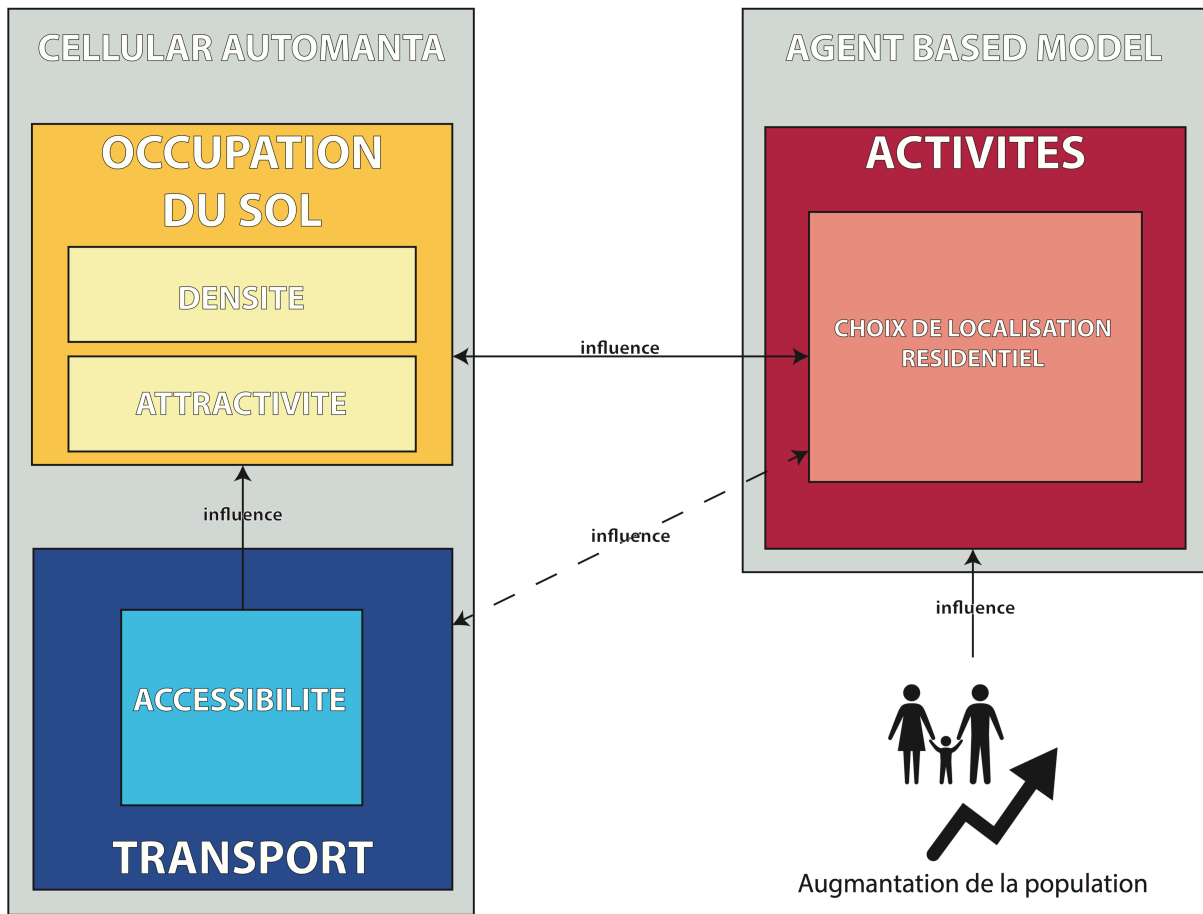
- déterminer un état initial du système urbain étudié et d'en définir les outils de mesure (5) ;
- déterminer des règles de simulation qui dérivent du cadre empirique (6.1) ;
- fixer une palette de scénarios permettant de simuler plusieurs projections en variant les règles et les paramètres du modèle (6.2) ;
- comparer les résultats des différentes simulations avec l'état initial et entre les différents scénarios (8.1).

Ce chapitre permet de préciser la structure du modèle de simulation, les règles et les paramètres d'interaction du modèle qui permet d'animer les simulations, les indicateurs utilisés et leur calibrage sont conformes aux scénarios fixés dans la partie précédente (7.1). Dans un second temps, ce chapitre exposera les indicateurs et leur distribution spatiale pour définir l'état initial des simulations (7.2).

7.1. Structure du modèle LUTI

Le modèle de simulation mobilisé dans ce travail de recherche met en relation un automate cellulaire (5.2.1) et un modèle multi-agents (5.2.2). D'une part l'automate cellulaire permet de décrire les différences spatiales des caractéristiques du territoire et de l'autre un modèle multi-agents qui permet de décrire les interactions entre agents mobiles (*Fig. 7.1*). L'intérêt de coupler ces deux types de modèles est de faire interagir les agents avec les cellules spatiales selon des règles précises. Cela permet de modéliser l'influence et l'interaction réciproque qu'entretiennent les individus avec le territoire. La première étape introduit la structure du modèle de simulation inspiré de l'approche LUTI et établit les règles (7.1.1), les indicateurs et les outils statistiques mis en avant pour décrire l'état initial de la Ville de Lausanne à travers des représentations cartographiques (7.1.2).

Figure 7.1 : Structure du modèle de simulation : couplage AC et ABM



(X. Charles, 2017)

Pour que le modèle puisse fonctionner il est indispensable de définir les caractéristiques de base des entités, les agents (7.1.1) et les cellules (7.1.2). C'est sur la base de statistiques de la ville de Lausanne et du Canton de Vaud que l'attribution des valeurs aux différentes entités a été effectuée.

7.1.1 Modèle multi-agents : caractéristiques des agents

Le modèle multi-agents permet de représenter les choix résidentiels des nouveaux habitants. Dans le cadre de ce travail il s'agit en effet de prendre en considération les individus. Chaque individu est confronté à un choix de localisation résidentielle qui est influencé par plusieurs facteurs : des facteurs d'attractivité et des facteurs de contrainte. Le but pour les habitants étant, dans une logique rationnelle de maximisation de l'utilité, de trouver le lieu de résidence le plus approprié et le plus attractif. Ce choix est influencé par l'attractivité et indirectement par son accessibilité qui est elle même un facteur caractérisant l'attractivité (8.2.3). En

revanche, la disponibilité en sol constitue un frein. Les nouveaux habitants sont en effet contraints d'adapter leur choix de résidence par rapport aux choix de résidence des autres. Une contrainte qui est déterminée par la demande en sol, représentée par la variable « *densité de la population* » dans le modèle. Les nouveaux habitants sont donc confrontés à un calcul d'optimisation du choix de localisation résidentielle par rapport à la disponibilité en sol et à leurs besoins en terme de qualité de vie. Un calcul qui doit être à chaque fois remis en cause car les caractéristiques du système d'occupation du sol et du système de transport évoluent. Si l'individu ne trouve pas de lieu de résidence, car celui-ci n'est pas assez attractif ou déjà complet, il est contraint de choisir un autre lieu ou de tout simplement d'abandonner la ville.

Pour des soucis de simplification du modèle, les agents ont les mêmes caractéristiques et agissent de la même manière. Aucune catégorisation des agents n'a été effectuée sur des critères de typologies d'individus, ni de revenus de ceux-ci. Ce sont les caractéristiques du territoire qui déterminent le choix de localisation des agents. Des considérations sur les catégories d'agents seront visibles et commentées dans les résultats (9).

7.1.2 Automate cellulaire : caractéristiques des cellules

L'espace global du modèle est une grille orthogonale constituée de cellules ou pixels qui représente une part de surface du territoire. L'espace étudié peut donc être considéré tel une carte pixélisée représentant la région urbaine de la ville de Lausanne. L'espace est découpé selon les limites administratives des quartiers définies par l'OFS (*Annexe 1.1*).

Les cellules du modèle peuvent être considérées comme des parcelles, des terrains ou des appartements capables d'accueillir les ménages.

Il est possible de considérer deux catégories de cellules ;

- les cellules sur lesquelles peuvent se localiser des agents ;
- les cellules vides qui représentent des espaces protégés ou inconstructibles (ex. eau, vignes, espaces naturels protégés).

Chaque cellule possède plusieurs caractéristiques et la caractéristique principale est celle d'accueillir les habitants. Cette mesure est déterminée par la densité de ménages (6.1.4). Chaque cellule possède des caractéristiques d'attractivité résidentielle et d'accessibilité aux

transports publics. Les valeurs varient selon le scénario fixé et selon les choix résidentiels des agents.

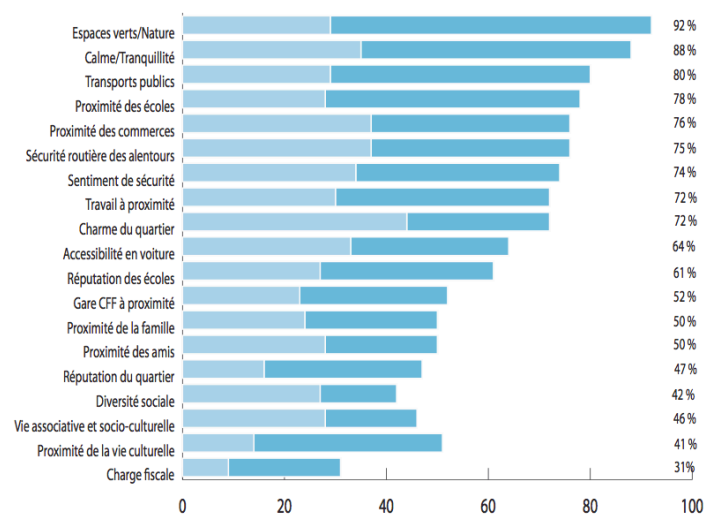
7.1.3 Règles d'interaction des modèles couplés

Les règles d'interaction qui régissent le modèle découlent des hypothèses fixées précédemment (6.2.2). Par rapports aux paramètres qui ont été fixés selon le groupe de scénarios de référence, le modèle évalue les conditions dans lesquelles l'agent se trouve. Une règle de satisfaction évalue si l'agent est satisfait de l'endroit où il se trouve par rapport à la caractéristique de la cellule. Si l'agent est satisfait de la parcelle choisie alors il n'en cherchera pas une nouvelle. L'interaction entre l'environnement et l'agent est dès lors établie. Si les caractéristiques de la parcelle ne conviennent plus à l'agent celui-ci devra se déplacer (7.1.1).

7.2. Indicateurs et variables du modèle de simulation transport-sol

Les indicateurs choisis pour fixer l'état initial des simulations se basent sur des statistiques qualitatives des critères de choix de localisation résidentielle des ménages. Il est clair qu'il n'existe pas de critères universels de qualité de vie, il existe autant de qualités de vie que de modes de vie (Thomas, 2014). C'est sur la base d'une enquête menée par l'EPFL que les critères d'attractivité des territoires ont été fixés (Fig. 7.2).

Figure 7.2 : Les critères de choix résidentiels des ménages



(Thomas, 2014)

Dans un souci de simplification de la méthode, quatre critères ont été retenus :

- Un critère qui tient compte de la volonté des ménages à avoir accès à une zone de loisir et à la qualité du paysage environnant ;
- Un critère lié à la mobilité en particulier à la proximité des transports publics ;
- Un troisième critère lié à la proximité du lieu de travail ;
- Un dernier critère lié à la proximité d'établissements de formation obligatoire (4.2.3).

Les critères ont été sélectionnés dans le but de recouvrir plusieurs aspects de la qualité de vie résidentielle (loisir, travail, formation et mobilité), mais aussi par rapport aux critères les plus sollicités par les ménages dans leur choix de localisation résidentielle (*Fig. 7.2*).

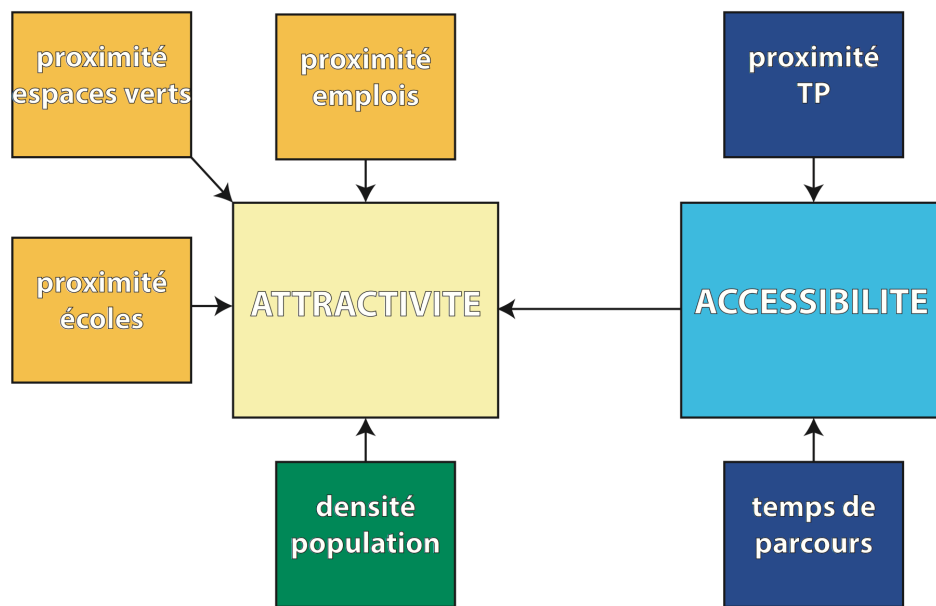
En voici la liste :

- La proximité des espaces verts. 92% des ménages sondés souhaitent vivre à proximité d'un espace vert ;
- L'accès à des transports publics de qualité en deuxième position avec (80%) ;
- La proximité à des établissements de scolarité obligatoire (78%) ;
- La proximité au poste de travail (72%).

Une variable de limitation des dynamiques démographiques est intégrée dans le modèle, cette variable permet de déterminer les règles de capacité d'accueil des cellules du modèle : la densité de la population.

Dans le cadre de la modélisation des dynamiques urbaines selon l'approche LUTI, les thèmes sélectionnés ont été répartis pour représenter l'attractivité territoriale qui constitue un aspect important du système d'occupation du sol (4.1). D'autre part, les aspects liés à la mobilité qui ont été utilisés pour modéliser le système de transport sont, dans le cadre de ce modèle, un facteur d'attractivité territoriale (*Fig. 7.3*). De ces quatre thèmes choisis découlent les indicateurs retenus pour la modélisation.

Figure 7.3 : Schéma des indicateurs retenus pour modéliser le système transport-sol



(X. Charles, 2017)

7.2.1 Les indicateurs de transport pour une modélisation de l'accessibilité du système urbain lausannois

La desserte en transports publics des surfaces urbanisées existantes et futures représente un aspect important de l'aménagement du territoire. L'accessibilité aux transports publics et la qualité de ses services constituent une part importante des enjeux liés aux dynamiques démographiques et urbaines de la ville de Lausanne (6.1.3), de même qu'elle représente un critère important dans le choix de localisation résidentielle des ménages (7.2). L'accessibilité est un aspect du territoire qui peut être mesuré de différentes façons. Pour ce faire deux indicateurs ont été choisis :

- La qualité de la desserte aux arrêts de transport public (7.2.1.1)
- Le temps de parcours nécessaire pour rejoindre le centre-ville (7.2.1.2)

La variable « accessibilité » est la résultante de la combinaison de ces deux indicateurs (8.2.2).

7.2.1.1 La qualité de la desserte aux arrêts TP

La mesure de la qualité de la desserte aux arrêts de l'ensemble du réseau de transport public peut être appréhendée à travers une classification des arrêts. Pour ce faire une catégorisation

de la qualité des arrêts s'impose afin de distinguer l'accessibilité d'une zone en termes de fréquence de passage, de capacité d'accueil des passagers, de l'importance de la position de l'arrêt au sein du réseau de transport. Cette méthode de classification des arrêts s'inspire du rapport de base de la Confédération (Abergg *et* Tschopp, 2010). Chaque arrêt a donc été classifié avec une valeur catégorielle allant de 1 à 5 : 1 pour représenter les arrêts de qualité supérieure et 5 les arrêts de qualité inférieure (Fig. 7.4).

Figure 7.4 Catégories d'arrêts en fonction du moyen de transport et de la qualité de la desserte

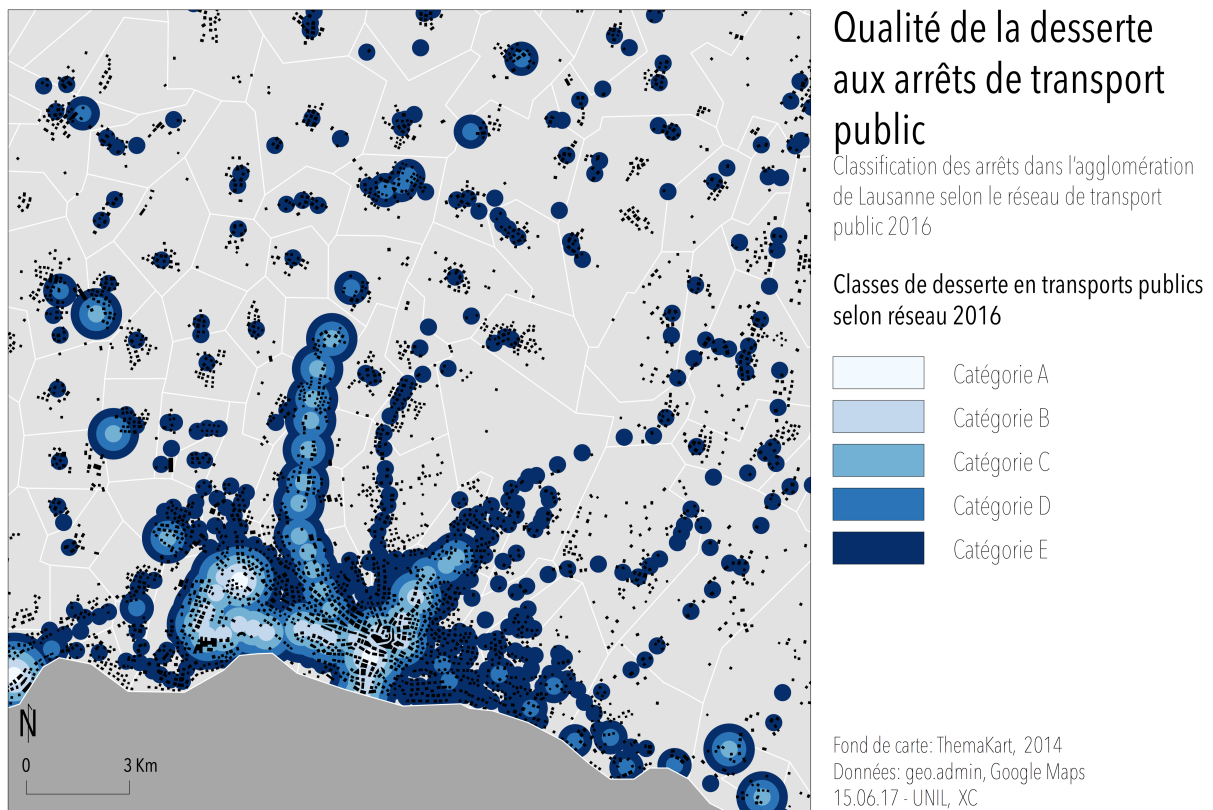
Cadence Par ligne dans la direction principale de tous les moyens de transport 6h00 – 22h00 19.06.2009	Moyen de transport			
	Groupe de qualité A		Groupe de qualité B	
	Nœuds ferroviaires*	Ligne ferroviaire**	Tram, trolleybus / autobus (lignes principales urbaines, bus régional)	Bus local, mini-bus local ***
< 5 min.	I	I	II	III
6 – 9 min.	I	II	III	IV
10 – 19 min.	II	III	IV	V
20 – 39 min.	III	IV	V	V
40 – 60 min.	IV	V	V	-

* Gare dotée d'au moins un arrêt Interregio
 ** Gare dotée d'arrêts de trains régionaux ou de RER
 *** Les lignes de bus dont le temps de parcours est inférieur à 20 minutes sont considérées comme « bus local, mini bus local ».

(ARE, 2010)

Pour cette catégorisation, un travail de récolte de données pour chaque arrêt du réseau de transport public de la zone d'étude a été nécessaire. Celui-ci comprend le réseau ferroviaire (CFF et LEB) et le réseau de bus (TL et MBC, Car Postal). Une représentation cartographique de l'indicateur de la qualité des arrêts est proposée dans la Figure 7.5. Pour chaque arrêt, une zone d'influence est définie selon la catégorie et définit un cercle d'influence (entre 250 et 1250 m selon la catégorie).

Figure 7.5 : Qualité de la desserte des arrêts de transport public de la région lausannoise



(X. Charles, 2017)

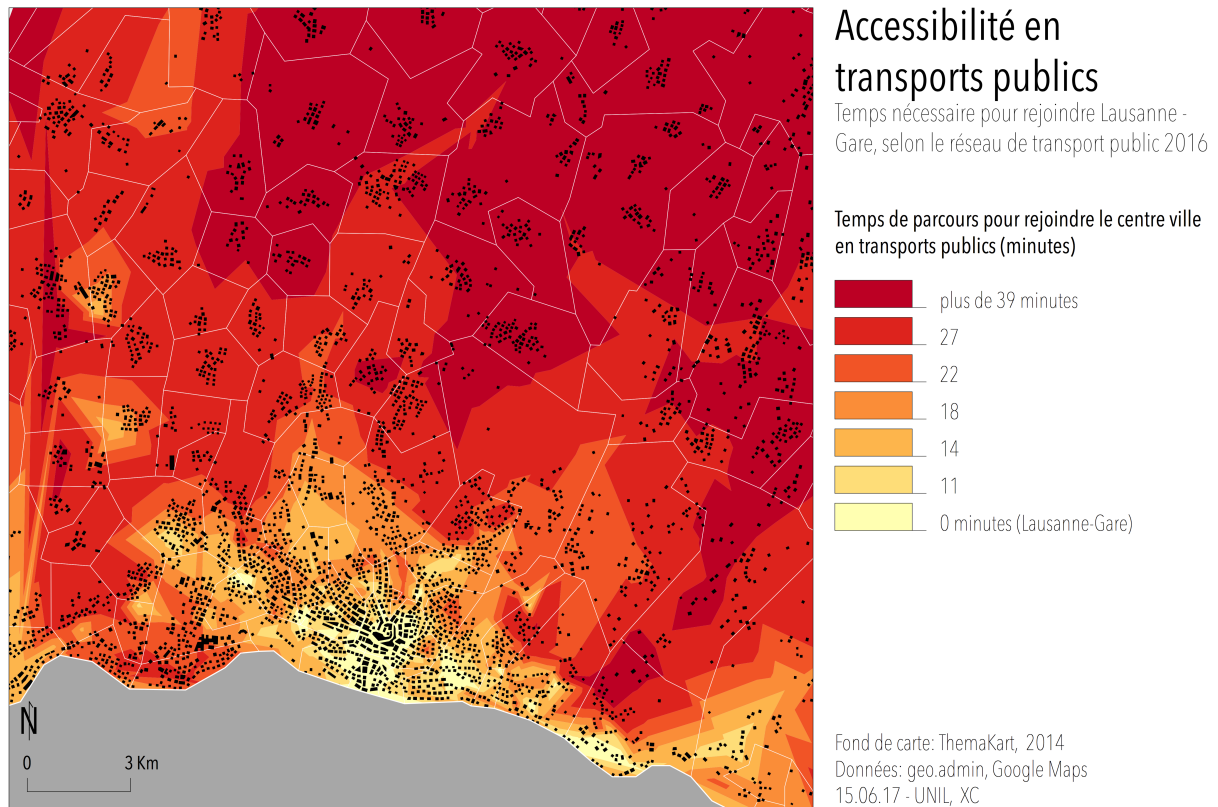
La catégorisation de la qualité de la desserte des arrêts des transports publics a été effectuée sur l'ensemble des arrêts de la région lausannoise. La *Figure 7.5* permet de reconnaître le pôle principal du réseau c'est-à-dire le centre-ville de Lausanne avec sa gare centrale. D'autres nœuds importants se démarquent : Morges et Renens. Il s'agit en effet des trois gares principales de la région qui constituent des nœuds parmi les plus importants du réseau national suisse. A une échelle plus fine, il est possible de distinguer la succession des arrêts des lignes du LEB qui se déploient vers le Nord, les lignes de métro (M1, M2) et, plus isolés, les arrêts CFF sur la ligne qui part vers Yverdon d'un côté et vers Vevey de l'autre. Les arrêts de plus petite catégorie mettent en évidence les lignes urbaines et régionales du réseau Car Postal et les lignes de bus des TL.

7.2.1.2 Le temps de parcours pour rejoindre le centre-ville en TP

Cet indicateur a été choisi conformément aux stratégies de développement du projet du PALM sur l'amélioration du temps de parcours sur l'ensemble des lignes ferroviaires et sur routes (ex. BHNS). L'indicateur indique pour chaque arrêt de transport public de la zone

d'étude le temps de déplacement pour rejoindre le centre-ville (plus précisément l'arrêt Lausanne – Gare). La *Figure 7.6* représente une interpolation des valeurs de chaque arrêt qui permettent d'estimer le temps de parcours sur l'ensemble du territoire.

Figure 7.6 : Accessibilité en temps de la ville de Lausanne en transport public



(X. Charles, 2017)

La répartition des temps de parcours pour rejoindre le centre-ville en transport public suit logiquement un gradient centre-périphérie autour de ce point. Il est tout de même intéressant de remarquer des déformations des isochrones qui suivent les principales lignes de transport. Sur ces lignes se distinguent de façon très claire les arrêts CFF sur la ligne entre Lausanne - Yverdon, Lausanne –Vevey et Lausanne – Palézieux. La vitesse commerciale des véhicules sur ces lignes permet en effet de rejoindre le centre-ville de Lausanne rapidement sur des plus grandes distances par rapport à une ligne régionale qui effectue plus d'arrêts. L'utilisation de la méthode d'interpolation présente tout de même des limites le but étant de représenter des données ponctuelles sur une surface. De ce fait, la représentation est biaisée car la méthode propose une interprétation des valeurs là où les données sont manquantes. Les raisons de ce biais sont la répartition non homogène des arrêts sur le territoire et de l'autre du manque de données pour les zones à limite de la zone d'étude. C'est le cas de la ville de Morges.

7.2.2 Les indicateurs d'occupation du sol pour une modélisation de l'attractivité du système urbain lausannois

Les disparités régionales dans l'accès de la population aux services représentent un aspect important de l'aménagement du territoire, un aspect capable d'influencer, en termes d'attractivité, le choix de localisation des individus. Une offre suffisante en biens et services d'usage quotidien, comme la mobilité (7.2.1), les écoles et les espaces verts jouent un rôle essentiel en terme de qualité de vie. L'enjeu réside dans la capacité à représenter et mesurer ces aspects et d'en extrapoler la mesure d'attractivité territoriale. Pour ce faire quatre indicateurs ont été choisis :

- L'accessibilité aux transports publics (7.2.1.3)
- La proximité aux espaces verts (7.2.2.1) ;
- La proximité aux établissements d'enseignement obligatoire (7.2.2.2) ;
- La répartition de la densité d'emplois (7.2.2.3) ;

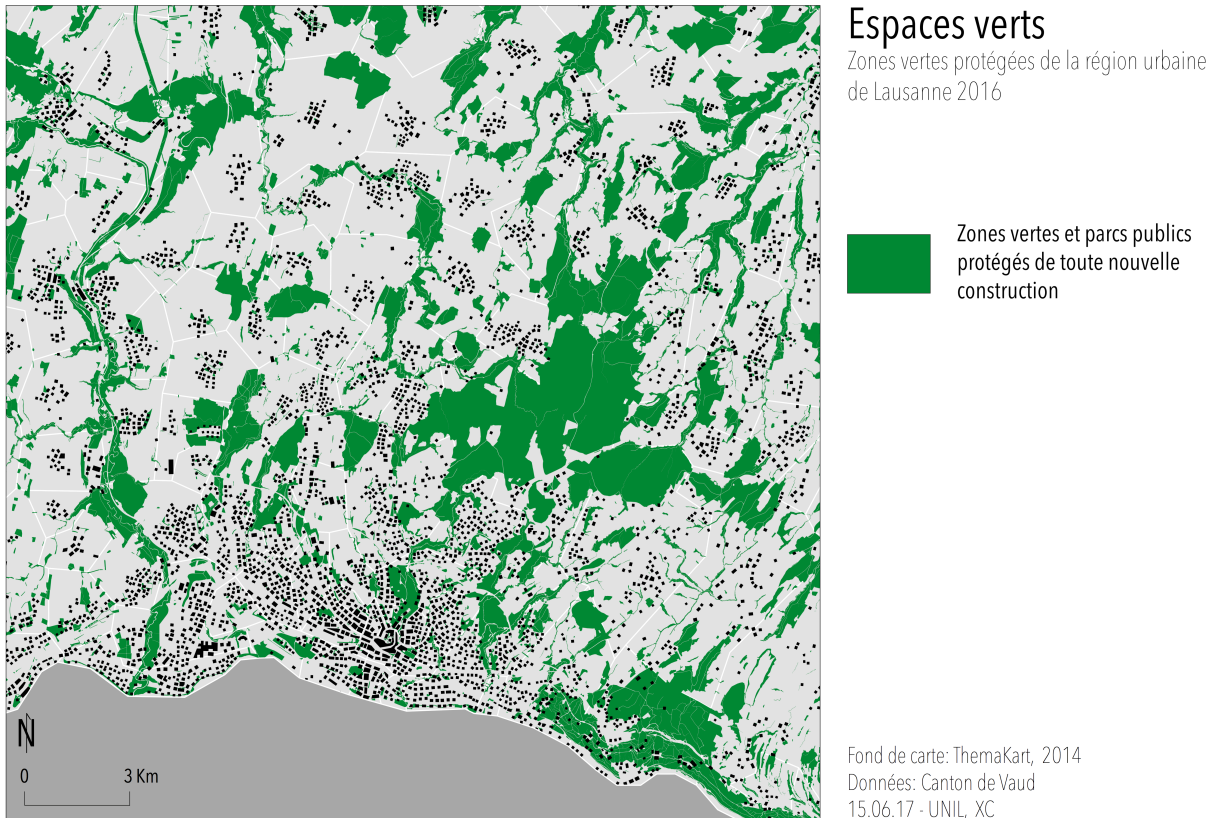
La variable « attractivité territoriale » est une résultante de la combinaison de ces indicateurs (8.2.3).

7.2.2.1 Les espaces verts

Cet indicateur est doublement important. Les zones vertes correspondent aux zones interdites de toutes nouvelles constructions mais constituent aussi un élément important d'attractivité territoriale. La végétation est en effet une réponse à une demande sociale des populations urbaines (Long *et* Tonini, 2012). La *Figure 7.8* montre la répartition spatiale de zones vertes protégées de la zone d'étude.

De cette carte résulte visible la répartition spatiale des zones vertes protégées de la zone d'étude. Sont comprises dans ces zones toutes les zones vertes interdites de construction. Sont reconnaissables les zones agricoles protégées la région du Lavaux à l'Est, la zone naturelle le long de la Venoge qui s'étend du Sud au Nord et le Bois du Jorat au centre de la zone qui constitue une zone forestière très étendue. La proximité à ces zones constitue un facteur d'attractivité résidentielle important (250 – 500 m).

Figure 7.8 : Espaces verts protégés de la région lausannoise

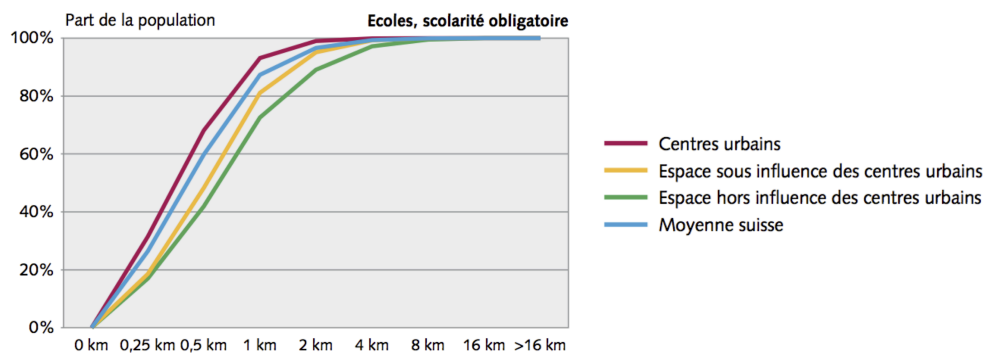


(X. Charles, 2017)

7.2.2.2 Les établissements d'enseignement obligatoire

La proximité aux établissements de formation obligatoire est un critère important dans le choix de localisation des ménages. Pour créer l'indicateur, il a été question de se baser sur les données de la Confédération pour comprendre quel est le rayon d'influence à prendre en considération autour d'un établissement.

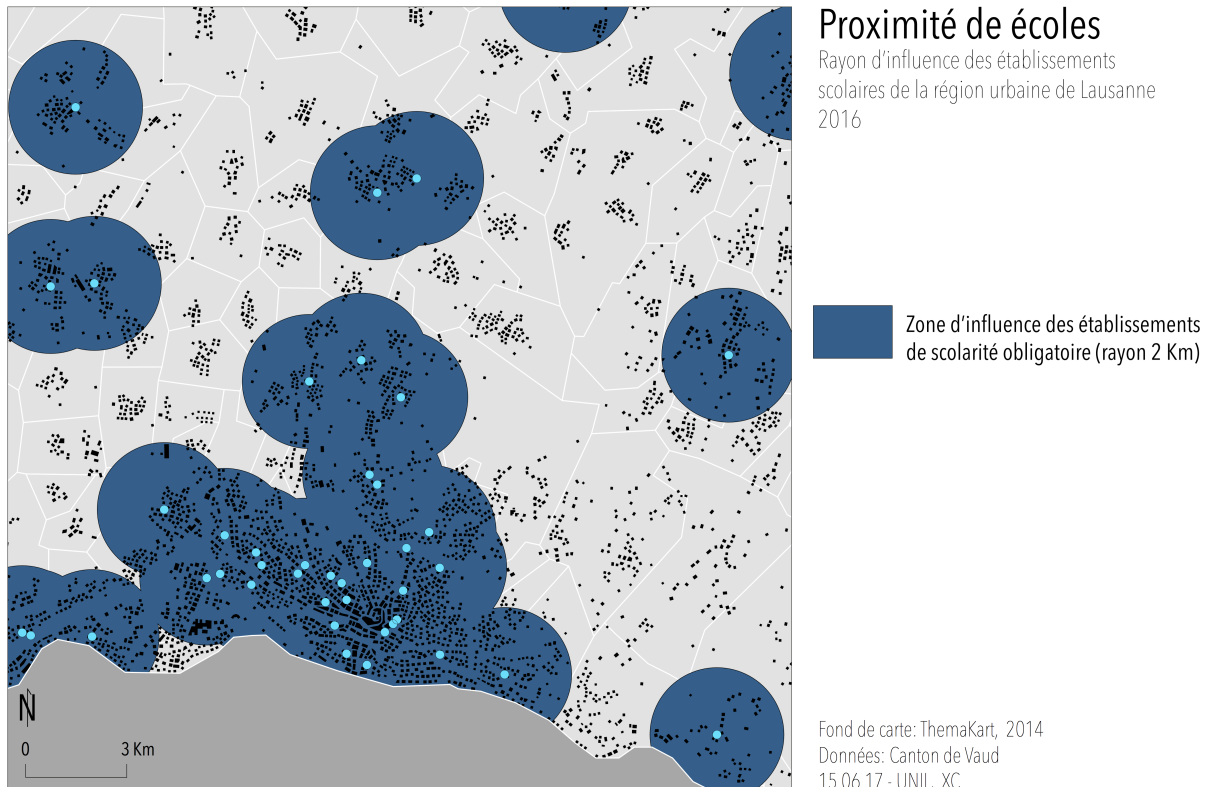
Figure 7.9 : Fréquence cumulée des distances d'accès aux écoles selon le type d'espaces



(OFS, 2011)

La Figure 7.9 montre la part de population en rapport avec la distance aux infrastructures scolaires. En accord avec le critère « proximité des écoles » souhaité par 78% des ménages, le rayon d'influence a été fixé à 2 km en accord avec la courbe « espace sous influence des centres urbains » représentée en jaune (Fig. 7.10).

Figure 7.10 : Zone d'influence des établissements scolaires



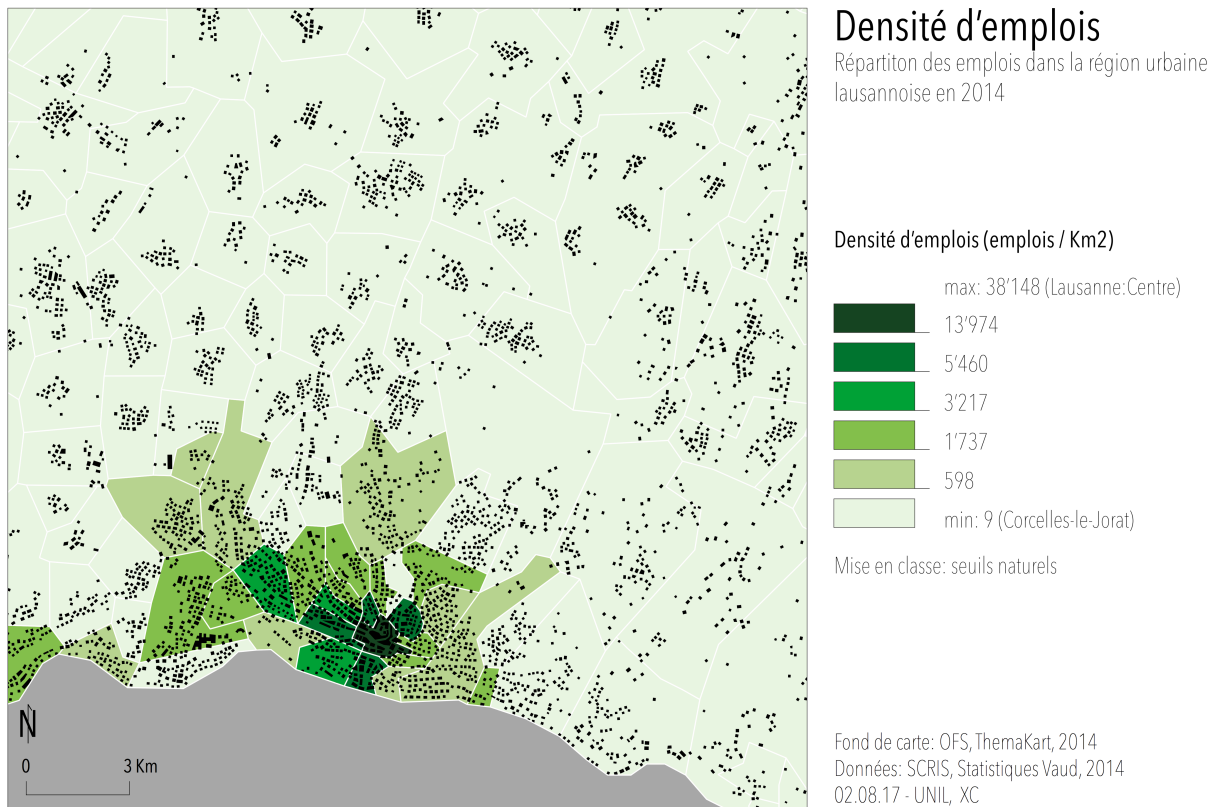
(X. Charles, 2017)

La répartition des établissements scolaires obligatoires suit de manière générale la répartition des éléments bâtis de la zone d'étude. On remarque une concentration des établissements scolaires là où la densité de bâti est la plus importante. Dans le Nord de la zone d'étude, les établissements se font plus rares mais avec une répartition plus homogène.

7.2.2.3 La densité d'emplois

La proximité au lieu de travail est un facteur d'attractivité en termes de choix de localisation résidentiel. L'indicateur le plus pertinent pour modéliser cet aspect est la répartition de la densité d'emplois sur le territoire (Fig. 7.11).

Figure 7.11 : Densité d'emplois



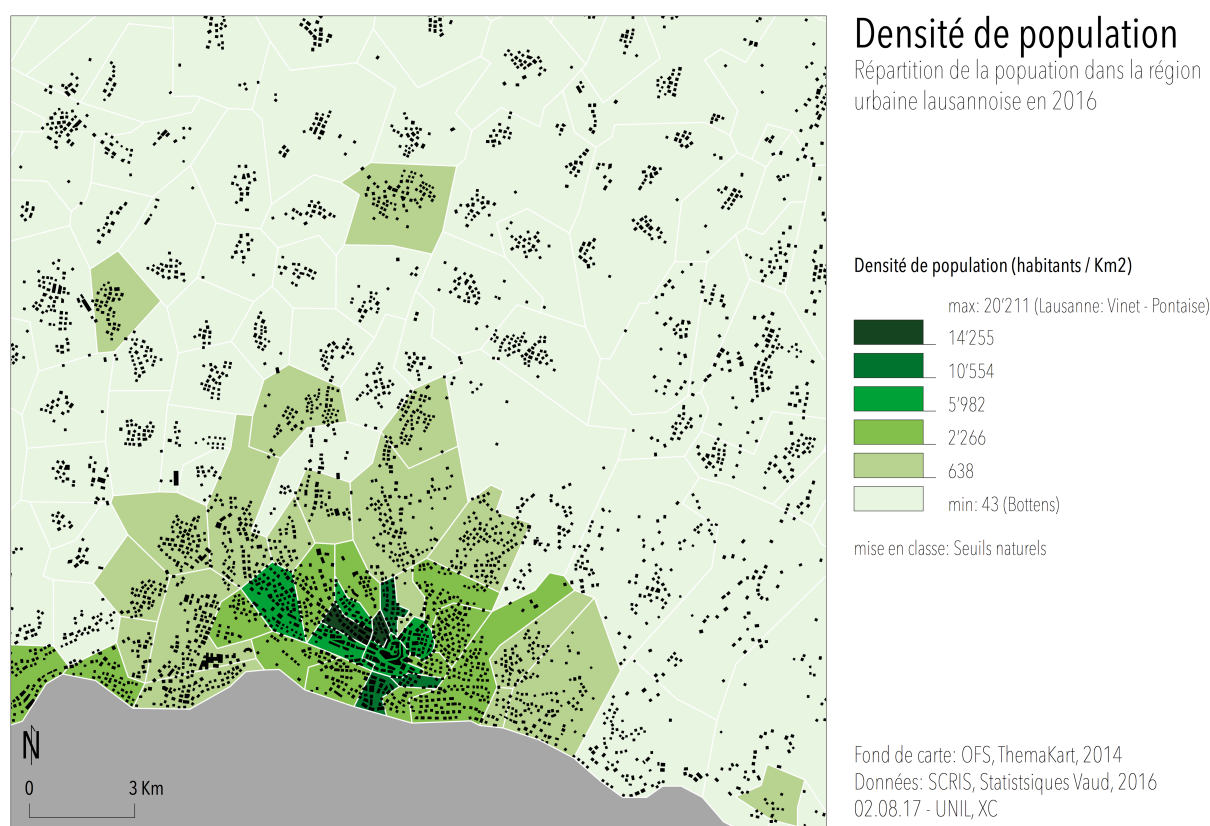
(X. Charles, 2017)

La répartition de la densité d'emplois sur le territoire étudié met en évidence les pôles urbains : un pôle urbain principal qui est celui de Lausanne et des pôles secondaires qui sont Morges, Renens et Crissier.

7.2.3 La densité de population

La variable densité de la population est la variable de contrôle par rapport aux dynamiques démographiques qui permet de décider de la capacité d'accueil des cellules. Pour fixer l'état initial du modèle, les données sont basées sur celles de l'année 2016 (Fig. 7.13).

Figure 7.13 : Densité de population



(X. Charles, 2017)

La répartition de la densité de population reflète de façon assez claire une logique centre – périphérie. Le centre-ville de la ville de Lausanne se distingue des quartiers alentours. Dans cette configuration ressortent tout de même des pôles de concentration de la population secondaires, c'est le cas pour les villes de Morges, Renens et Pully. D'autres zones excentrées suscitent une attention particulière, comme les communes de Chexbres, Penthalaz et Echallens. Il est important de préciser que les données subissent un biaisement issu du découpage en zones. En effet, un découpage par quartiers caractérise la commune de Lausanne, tandis qu'un découpage par communes définit le reste du territoire. Ceci provoque une disparité au niveau des surfaces des polygones qui permet d'avoir des valeurs plus précises dans les zones les plus denses, mais des valeurs majoritairement lissées dans les zones périphériques. Cette contrainte découle de la méthode de gestion des données statistiques par les différentes communes.

**Partie III: Modélisation du système urbain
lausannois et résultats**

8. Simulation

Sur la base des nombreux scénarios identifiés se pose maintenant la question de la méthode utilisée pour sélectionner les simulations les plus pertinentes du choix résidentiel des nouveaux habitants de la région lausannoise (8.1), mais aussi sur le calibrage du modèle pour fixer les valeurs des paramètres définissant l'état initial du système et l'amplitude des dynamiques (8.2).

8.1. Méthode d'exploration et évaluation des scénarios

Lors de la conceptualisation des scénarios, 12 groupes de scénarios ont été définis (6.2.3) :

- trois grands groupes de scénarios liés aux variations des perspectives démographiques du Canton Vaud (projection basse (*1*), moyenne (*2*), et élevée (*3*)) ;
- deux grands groupes de simulations proposant une variation de la politique de développement des transports qui tabulent sur une diminution des temps de parcours (scénarios *A et C*) et l'amélioration de la qualité de la desserte (scénarios *B et D*) ;
- deux grands groupes de scénarios visant à simuler l'impact des politiques de densification de la population faible (scénarios *A et B*) ou élevée (scénarios *C et D*).

La combinaison des différentes valeurs des paramètres choisis porte à une infinité de possibilités de simulations. Il s'agit donc de faire un choix sur l'élaboration des scénarios. Les stratégies possibles pour la sélection des simulations peuvent se situer dans une approche exploratoire ou normative.

Dans le cas d'une approche exploratoire, il s'agit de se pencher sur une approche inductive qui nécessite un test de toutes les combinaisons possibles et d'en sélectionner les plus pertinentes. Dans le cas d'une approche dite normative, il s'agit de se pencher sur une méthode plus déductive, c'est-à-dire de régler les paramètres *a priori* selon des réflexions en amont. De part le nombre élevé de scénarios potentiels produits par la première méthode (nombre de valeurs des paramètres * nombre de paramètres), c'est sur la base de la seconde méthode que les états initiaux du modèle ont été choisis et les paramètres fixés. Ainsi les valeurs des paramètres n'ont pas été fixées de façon aléatoire mais selon les statistiques et les projections analysées préalablement (6.1.2).

8.2. Méthode de calibrage du modèle et définition des indices d'accessibilité et d'attractivité

Un travail de calibrage des différentes variables est nécessaire pour pouvoir exprimer d'une part, les mesures d'accessibilité et d'autre part, les mesures d'attractivité. Ces deux paramètres constituent les variables centrales du modèle de simulation caractérisant le territoire. L'accessibilité et l'attractivité sont des concepts qui, si d'un point de vue qualitatif et théorique peuvent être facilement définis, s'avèrent difficiles à évaluer quantitativement. Ce chapitre expose la méthode utilisée pour gérer les informations géographiques utilisées pour créer la base du modèle de simulation (8.2.1) mais en particulier pour définir les paramètres d'accessibilité (8.2.2) et d'attractivité (8.2.3).

8.2.1 Classification et représentation des données géographiques

Afin de déterminer les indices d'accessibilité et d'attractivité, une première difficulté réside dans la mise en classes des variables. Il s'agit en effet de pouvoir attribuer une valeur numérique aux variables géographiques pour déduire de nouveaux indices. Pour ce faire une mise en classes par seuils naturels permet de différencier et de classer sur le plan statistique ce qui est similaire. Cette méthode a été utilisée dans la classification des variables continues tel que la densité de population, la densité d'emplois et les temps de parcours. Une deuxième méthode de mise en classes a été utilisée pour classer les variables catégorielles. C'est le cas des indicateurs liés à des caractéristiques naturelles comme le rayon d'influence des zones vertes et de caractère plutôt infrastructurels tel le rayon d'influence des écoles et de la qualité de la desserte des arrêts (7.2). Les différentes méthodes de mise en classes constituent une étape fondamentale dans la gestion, l'interprétation et la représentation des données mais constituent aussi une première phase de perte d'information géographique.

La deuxième difficulté réside dans la transposition des données géographiques vectorielles à un support raster. Une opération nécessaire dans le cadre de la réalisation d'un automate cellulaire.

Figure 8.1 : Passage d'une représentation vectorielle à une représentation raster

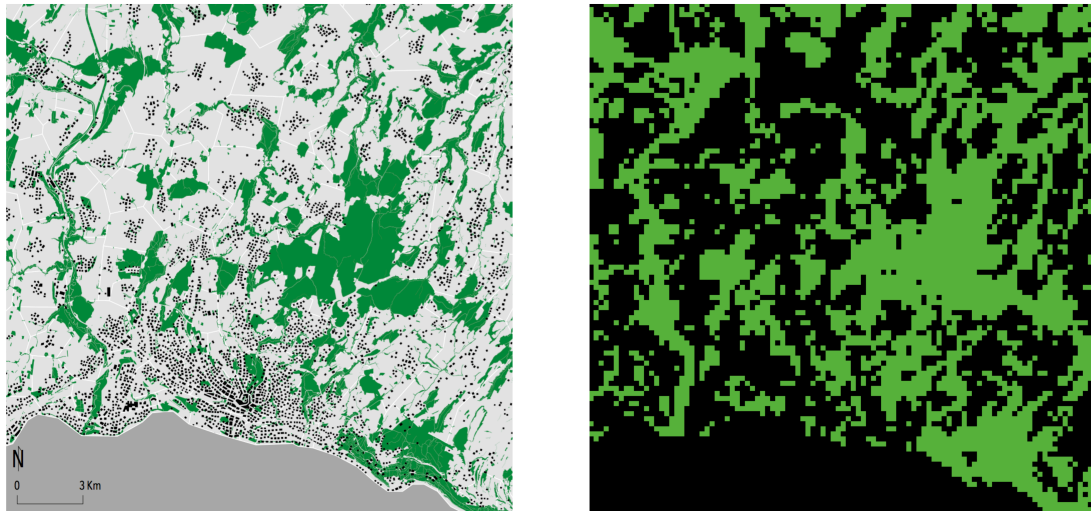


Image vectorielle

Image raster

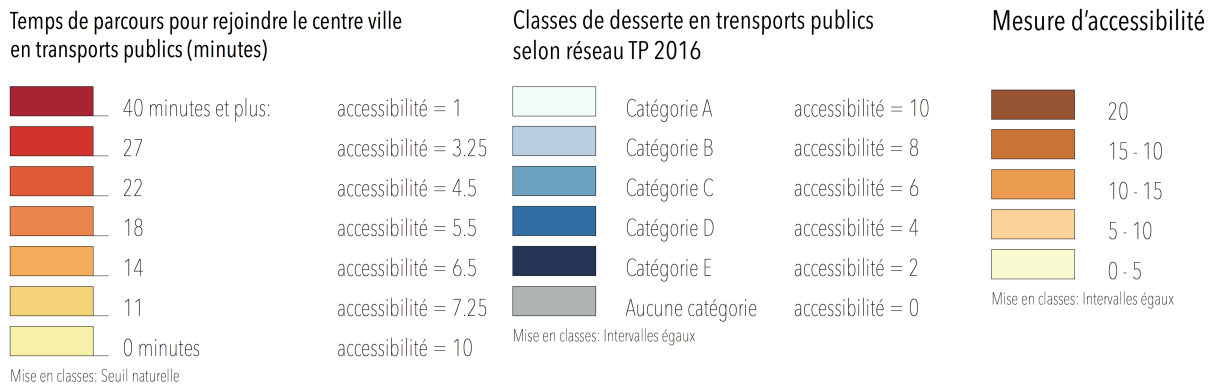
(X. Charles, 2017)

Il s'agit de donner une valeur à chaque cellule de la grille de pixels pour ensuite utiliser ces indices dans le modèle (Fig. 8.1). Cela a été implémenté pour les indices d'accessibilité et d'attractivité. Cette étape permet une classification spatiale des caractéristiques du territoire et en facilite l'analyse mais engendre aussi une perte d'information statistique puisque ces attributions se font selon des valeurs moyennes zonales, ce qui représente une des limites de la méthode.

8.2.2 L'indice d'accessibilité territoriale des transports publics

L'accessibilité est définie dans ce travail comme la résultante de la combinaison de deux indicateurs : la qualité de la desserte aux arrêts (7.2.1.1) et le temps de parcours pour rejoindre le centre-ville (7.2.1.2). Pour constituer l'indice d'accessibilité, une valeur numérique a été attribuée à chaque classe suivant une logique de normalisation des valeurs sur une échelle allant de 0 à 10. Cela a permis de donner une valeur d'accessibilité à chaque cellule pour les deux indicateurs et de pouvoir les additionner (Fig. 8.2).

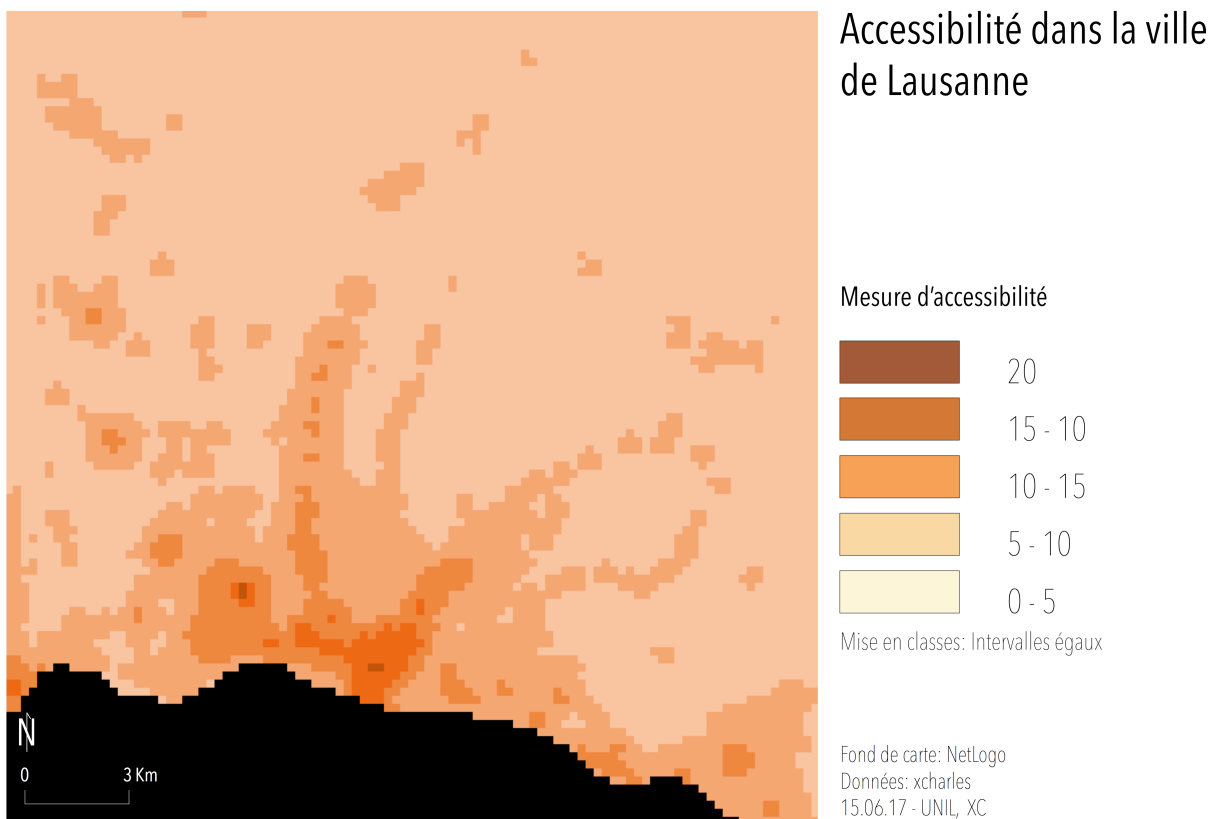
Figure 8.2 : Attribution des valeurs d'accessibilité



(X. Charles, 2017)

La définition quantitative de l'accessibilité a permis sa représentation cartographique (Fig. 8.3). Il s'agit d'une étape importante dans la constitution du modèle car cette représentation définit l'état initial de l'accessibilité pour un temps donné. Ce sont ces valeurs d'accessibilité qui évolueront dans le temps selon les scénarios sélectionnés.

Figure 8.3 : L'accessibilité en TP dans la région lausannoise

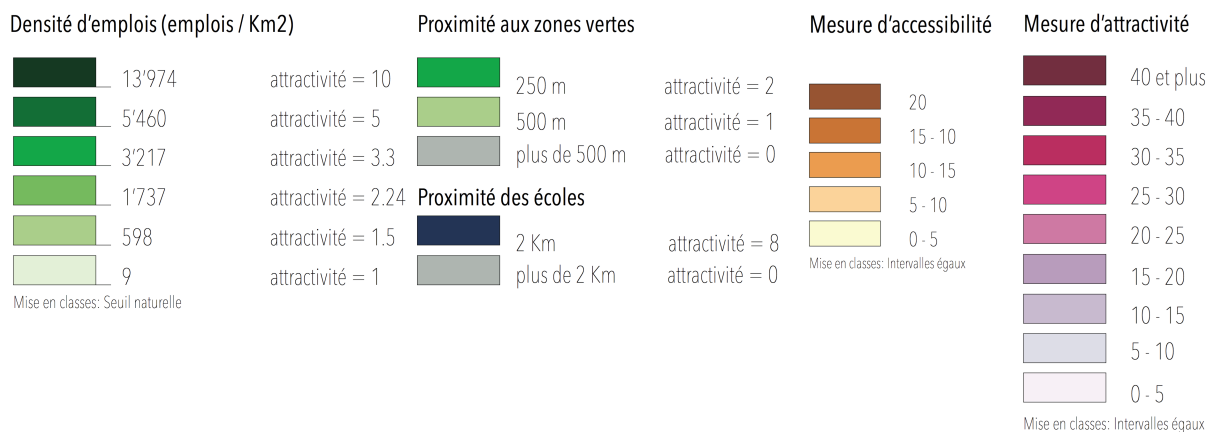


(X. Charles, 2017)

8.2.3 L'indice d'attractivité territoriale

L'attractivité est définie dans ce travail comme la résultante de la combinaison de quatre indicateurs : la proximité des zones vertes (7.2.2.1), la proximité aux écoles (7.2.2.2), la répartition de la densité d'emplois (7.2.2.3) et l'accessibilité (8.2.2). Pour constituer l'indice d'attractivité une valeur numérique a été attribuée à chaque classe selon une logique de normalisation des valeurs sur une échelle allant de 0 à 10, sauf pour l'accessibilité déjà définie précédemment. Cela a permis de donner une valeur d'attractivité à chaque cellule des indicateurs cités et de pouvoir les combiner à l'indice d'accessibilité (Fig. 8.4).

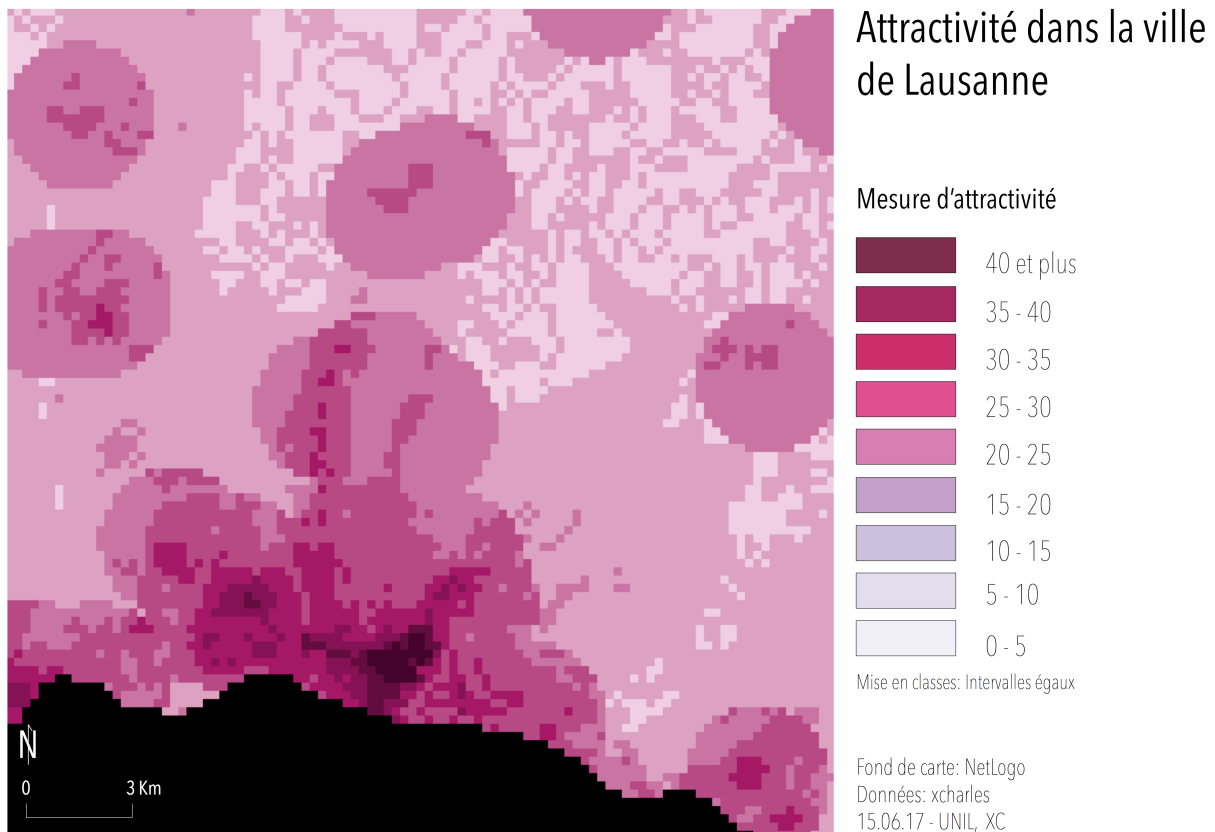
Figure 8.4 : Attribution des valeurs d'attractivité



(X. Charles, 2017)

La définition quantitative de l'attractivité en a permis sa représentation cartographique (Fig. 8.5). L'accessibilité étant une des composantes de l'attractivité, les valeurs d'attractivité évoluent selon le scénario sélectionné. Cela est déterminant puisque les agents ont pour but de maximiser leurs chances de se positionner sur la cellule la plus attractive, dans la mesure où les contraintes d'occupation du sol le leur permettent.

Figure 8.5 : Attractivité territoriale dans la région lausannoise



8.3. Paramétrage des variables des simulations

La définition des paramètres fixes (8.3.1) et des paramètres variables (8.3.2) définissent l'état initial et les changements d'état du modèle notamment sur les valeurs liées aux indicateurs définissant l'indice d'accessibilité. Dans un troisième temps seront définies les modalités d'analyse des résultats (8.3.3).

8.3.1 Les paramètres fixes du modèle

Les valeurs des paramètres qui ne varient pas dans le modèle sont :

- les valeurs liées à la répartition des zones vertes protégées et à leur rayon d'influence ;
- les valeurs liées au nombre et à la répartition d'écoles et de leur rayon d'influence ;
- les valeurs liées au nombre et à la répartition des arrêts de transport public ;
- les valeurs de la densité d'emplois ;

8.3.2 Les paramètres variables du modèle

Les paramètres variables du modèle définissent les différents scénarios retenus sur la base des hypothèses H1, H2 et H3 (6.2).

8.3.2.1 La variable « nouveaux habitants »

La variable « nouveaux habitants » est fixée au début de la simulation et reste fixe tout au long de la simulation. Le but étant d'analyser la répartition initiale et finale des agents. Les valeurs ont été définies sur la base des projections de Statistique Vaud pour la région étudiée (horizon 2030). Les trois scénarios liés aux dynamiques démographiques ont donc été testés sur trois valeurs d'augmentation de la population :

- 50'000 nouveaux habitants pour le groupe de scénarios 1 ;
- 75'000 nouveaux habitants pour le groupe de scénarios 2 ;
- 100'000 nouveaux habitants pour le groupe de scénarios 3.

8.3.2.2 La diminution des temps de parcours

L'amélioration des transports publics selon la stratégie horizon 2030 du Canton de Vaud se constitue par une baisse généralisée des temps de parcours sur certaines lignes (6.2.3.2). Cela se réalise grâce à une amélioration du matériel roulant et de l'aménagement d'infrastructures permettant l'augmentation progressive de la vitesse commerciale des véhicules voués aux transports de personnes (ex. Payerne – Lausanne de 56 à 48 min prévus en 2030). Les trois scénarios qui prévoient une politique de diminution des temps de parcours ont été testés sur une valeur unique : - 20% de réduction des temps de parcours (groupe de scénarios A et C). Cela signifie de prendre en considération que les endroits les plus éloignés profitent d'une diminution absolue des temps de parcours plus importante que les zones rapprochées du centre-ville.

8.3.2.3 L'amélioration de la qualité de la desserte aux arrêts

Les stratégies d'amélioration des transports publics selon la stratégie horizon 2030 misent sur une amélioration de la qualité de la desserte aux arrêts, notamment avec l'augmentation de la cadence de passages et l'augmentation de la capacité du matériel roulant. Cela est généralisé

sur l'ensemble des arrêts : les plus importants comme Lausanne, Renens ou Morges et les arrêts des réseaux de transport régional. Les six scénarios liés aux dynamiques d'amélioration de qualité des transports publics (groupe de scénarios B et D) ont été donc testés sur une valeur unique :

- Pas d'amélioration pour les arrêts de qualité A car les valeurs d'accessibilité sont déjà maximales;
- Promotion à catégorie A pour les arrêts de qualité B;
- Promotion à catégorie B pour les arrêts de qualité C;
- Promotion à catégorie C pour les arrêts de qualité D;
- Promotion à catégorie D pour les arrêts de qualité E;

8.3.2.4 La densité de population limite

La « densité limite » est fixée au début de la simulation et reste fixe tout au long de la simulation. Les valeurs pour les différents scénarios ont été fixées sur la base de la densité de la population de l'année 2016. Les deux scénarios liés aux contraintes en termes de densité de la population ont été fixés sur des valeurs proches de celles du quartier Sous-Gare-Ouchy (Lausanne) pour le scénario qui vise une forte densification et proche de celle de Préverenges pour une densification plus faible :

- Maximum 200 habitants / cellule; (groupe de scénarios A et B) ;
- Maximum 800 habitants / cellule (groupe de scénarios C et D).

8.3.3 Méthode d'analyse des résultats

Pour entreprendre une revue méthodique des résultats des différentes simulations, l'analyse des résultats sera effectuée principalement sur la comparaison entre l'état initial et l'état final des différentes simulations. Le but étant d'analyser le choix résidentiel des nouvelles personnes arrivant dans la région urbaine lausannoise, la comparaison se fera principalement sur l'indicateur de la densité de la population avant et après la simulation, tout en considérant les nouvelles valeurs d'accessibilité et d'attractivité. Pour ce faire il est important de maintenir la même mise en classes des valeurs des indices pour en faciliter la comparaison (8.2.1).

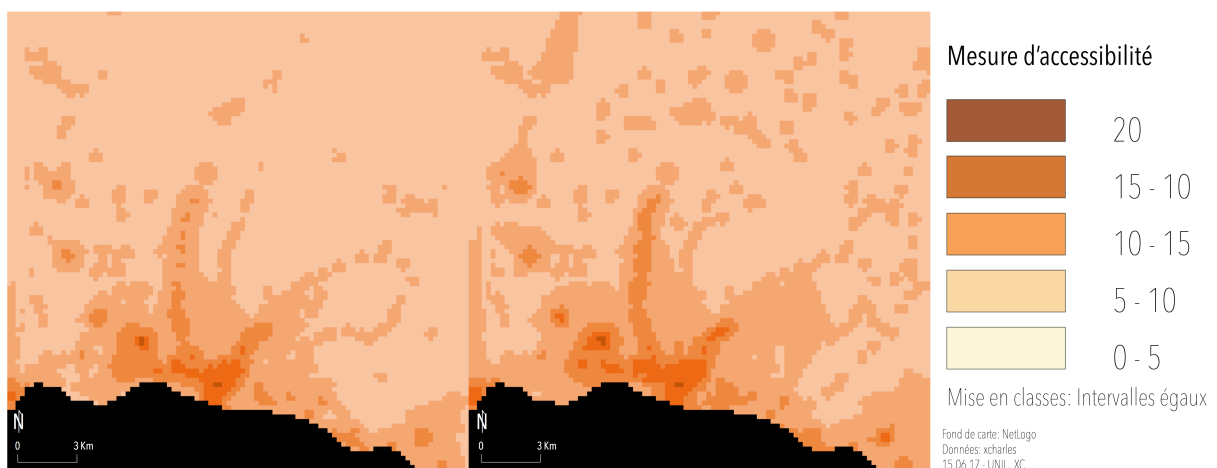
9. Résultats des 12 simulations

Dans ce chapitre sont exposés successivement les résultats des simulations qui découlent des différents scénarios retenus. Les résultats sont exposés par confrontation entre l'état initial du système urbain modélisé et l'état final de celui-ci. C'est sur support cartographique que sont observés les indices retenus pour l'interprétation des résultats : l'accessibilité, attractivité et la densité de population finale. Dans un souci de simplification de l'analyse des résultats, le chapitre est composé d'une analyse de l'évolution de l'accessibilité et de l'attractivité (9.1 et 9.2). Ces deux indices évoluent de façon égale pour la moitié des scénarios retenus. Les commentaires sur les 12 scénarios retenus se concentrent sur le choix de la localisation des individus et les structures urbaines qui en découlent. Pour ce faire l'analyse porte donc essentiellement sur les résultats de l'évolution de la densité de la population (9.3).

9.1. Evolution de l'accessibilité et de l'attractivité : scénarios A et C

Les groupes de scénarios A et C se basent sur une diminution progressive des temps de parcours de -20% sur l'ensemble du territoire. Les répercussions spatiales de cette diminution sur l'indice d'accessibilité concernent donc toute la région d'étude (*Fig. 9.1*).

Figure 9.1 : Evolution de l'accessibilité : scénarios A et C

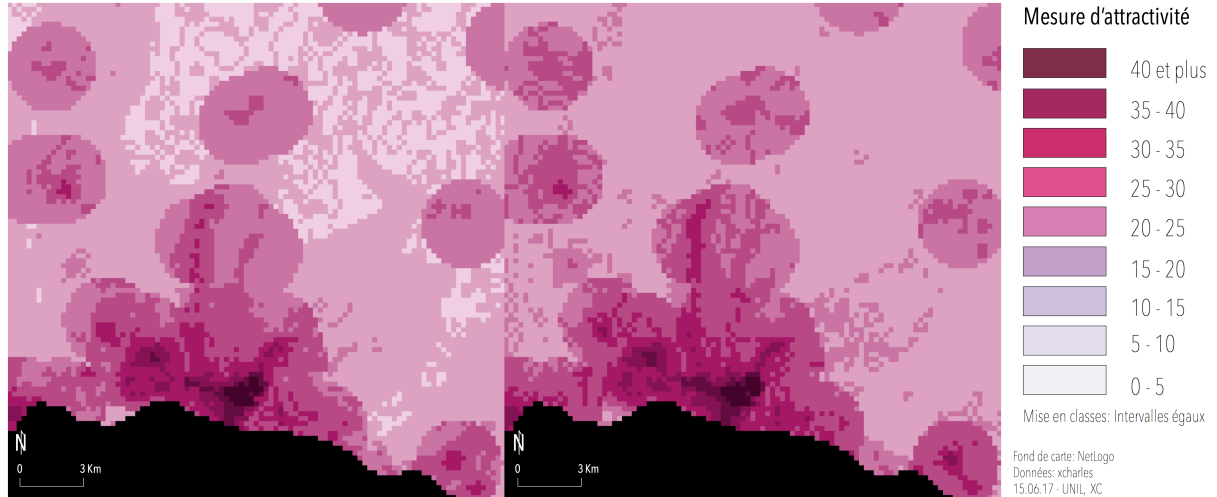


(X. Charles, 2017)

Selon les nouvelles valeurs d'accessibilité et la mise en classe de cet indicateur, certaines zones gagnent en accessibilité, notamment les zones proche des arrêts de transport public.

L'indice d'accessibilité gagne en importance en particulier dans les zones autour des nœuds centraux du réseau de transport suivant une logique en tache d'huile.

Figure 9.2 : Evolution de l'attractivité scénarios A et C



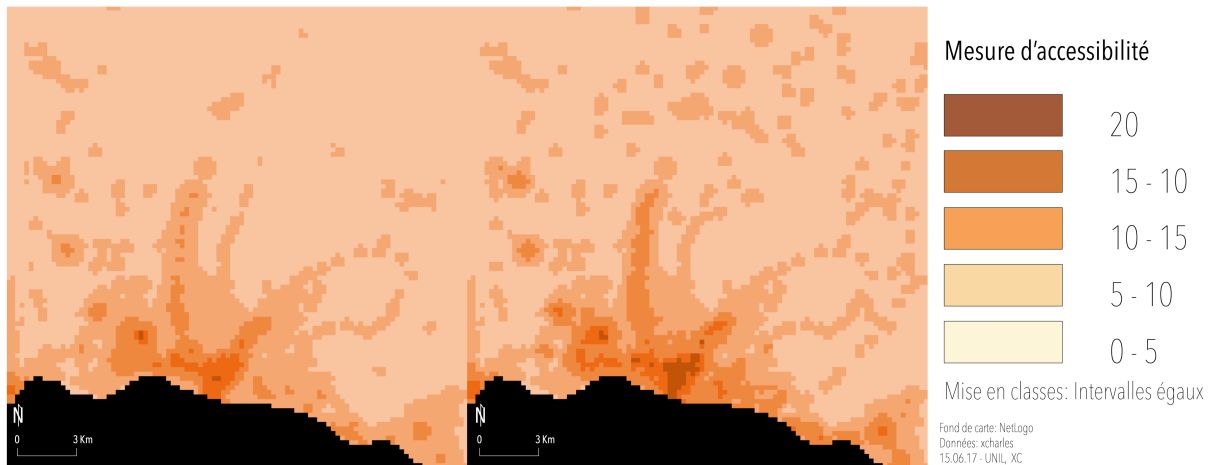
(X. Charles, 2017)

Les répercussions de la hausse de l'accessibilité peuvent se remarquer aussi dans la répartition spatiale de l'indice d'attractivité territoriale (Fig. 9.2). On remarque qu'une disparition de la classe d'attractivité la plus basse s'explique par une augmentation générale de l'accessibilité dans les zones périphériques. Un élargissement des zones classées d'attractivité moyenne est également visible en parallèle avec des zones qui ont gagné en accessibilité (Fig. 9.1). Les zones centrales n'ont subi aucun changement, car déjà très attractives.

9.2. Evolution de l'accessibilité et attractivité : scénarios B et D

Les groupes de scénarios B et D se basent sur une augmentation de la catégorie de la qualité de la desserte des arrêts de transport public. Les répercussions sur l'indice d'accessibilité sont donc ciblées autour des arrêts de transport en commun (Fig. 9.3).

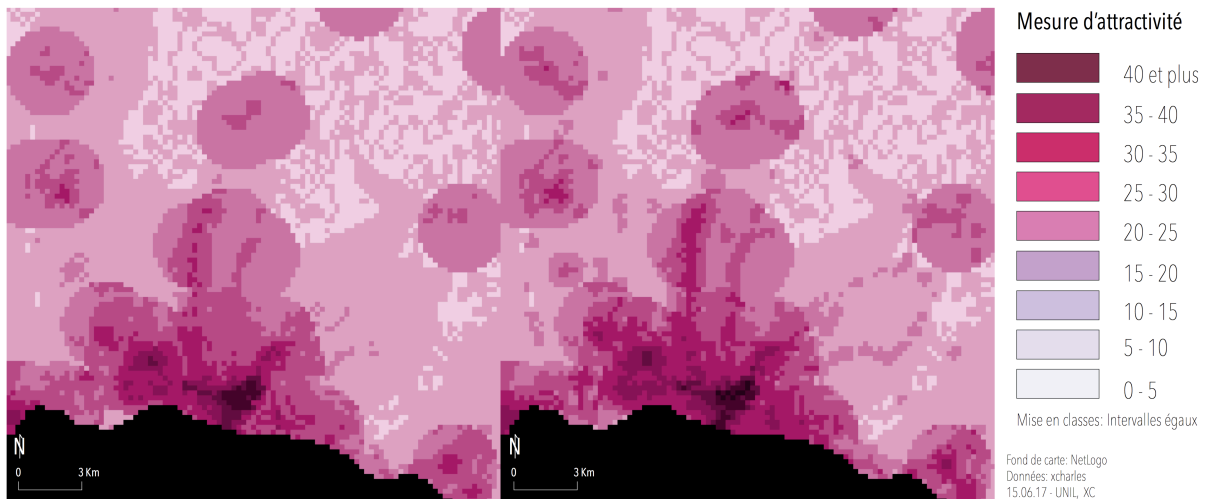
Figure 9.3 : Evolution de l'accessibilité scénarios B et D



(X. Charles, 2017)

Les zones périphériques ne sont donc pas concernées par une amélioration de l'accessibilité. L'indice d'accessibilité gagne en importance là où les nouveaux nœuds apparaissent sur la nouvelle carte d'attractivité, des nœuds qui suivent les lignes les plus importantes du réseau de transport public.

Figure 9.4 : Evolution de l'attractivité scénarios B et D



(X. Charles, 2017)

Dans ce contexte, les impacts de la hausse de l'indice d'accessibilité se remarquent moins facilement sur la représentation de l'attractivité. En revanche, on remarque un renforcement de l'attractivité des principaux nœuds du réseau de transport public, de même pour les nœuds secondaires du réseau (Fig. 9.4). Les zones centrales qui étaient déjà très attractives n'ont subi aucun changement.

De cette première analyse peuvent être émises des premières conclusions sur la probable répartition des nouveaux habitants sur le territoire de la zone d'étude. Les zones les plus attractives sont en effet les zones où les personnes iront s'installer. Dans les deux groupes de scénarios analysés, nous remarquons certaines similitudes, notamment en ce qui concerne le renforcement de l'attractivité au sein des pôles d'attractivité déjà existants et le renforcement de l'indice autour des zones centrales. On peut s'attendre à ce que les futures structures spatiales que le modèle est susceptible de fournir ne soient pas très différentes les unes par rapport aux autres dans la comparaison entre les groupes de scénarios A et C et B et D.

Les individus occupent donc les zones les plus attractives en premier pour aller ensuite occuper les zones restantes. Il faut tout de même retenir que les contraintes d'occupation du sol imposées par le modèle n'ont pas encore été prises en considération.

9.3. Intégration des contraintes d'occupation du sol

Il s'agit maintenant d'intégrer les contraintes territoriales et les facteurs démographiques au modèle de simulations pour finalement comprendre le choix de localisation des agents.

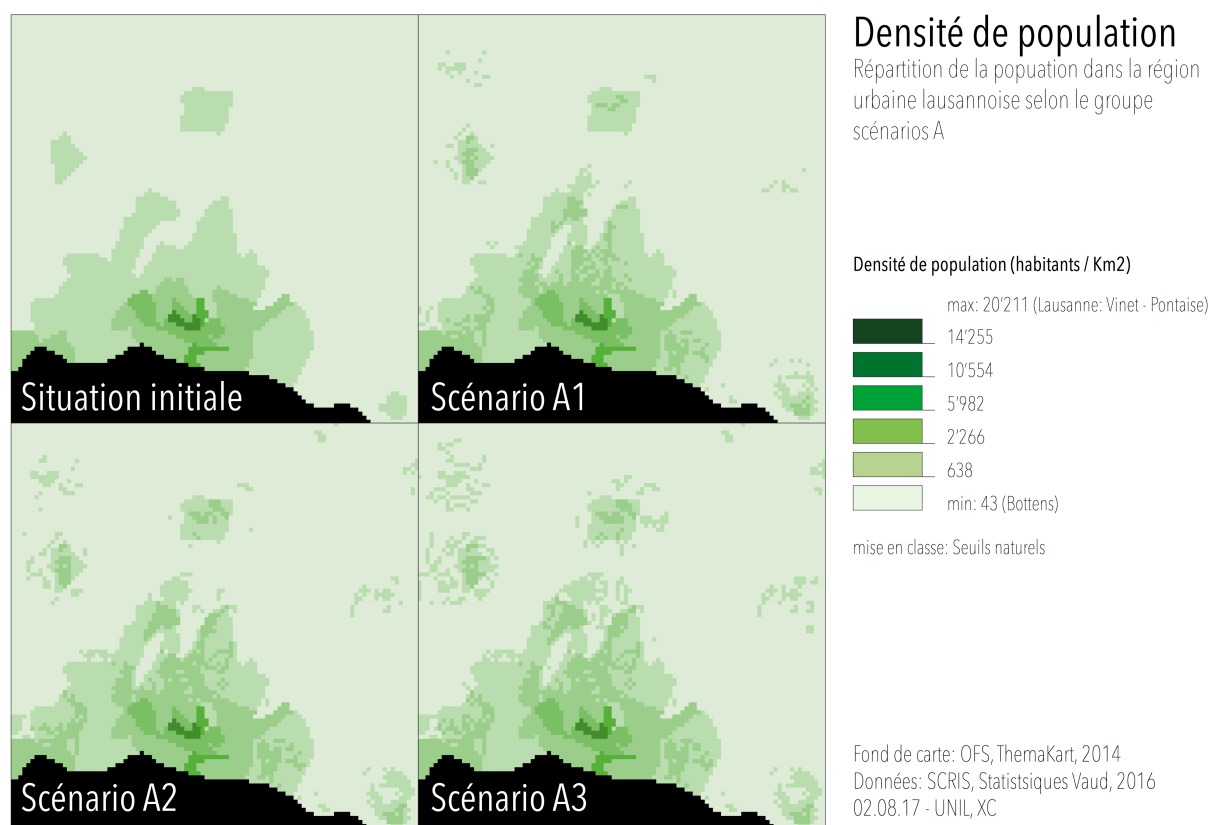
9.3.1 Scénarios A1, A2, A3

Le groupe de scénarios A1, A2, A3 permettent de déterminer quelles structures spatiales sont liées à une politique de transport visant à diminuer les temps de parcours sur le réseau de transport public et à une politique de faible densification de la population sur le territoire. Dans ce contexte on peut s'attendre à une structure de la ville étalée, en particulier sous l'effet d'une faible densification qui peut être contrôlée par la variabilité des projections démographiques.

Les paramètres qui permettent d'envisager la variabilité des résultats finaux sont les suivants :

- 50'000 nouveaux habitants pour le scénario A1 ;
- 75'000 nouveaux habitants pour le scénario A2 ;
- 100'000 nouveaux habitants pour le scénario A3 ;
- La densité maximale est fixée à 300 habitants / cellule ;
- La diminution des temps de parcours fixée à - 20% sur l'ensemble du territoire.

Figure 9.5 : Résultats des scénarios A1, A2, A3



(X. Charles, 2017)

Les résultats des simulations issus du groupe de scénarios A confirment l'idée que le choix de localisation résidentielle des nouveaux habitants se réalise en majorité à l'extérieur de la ville dense. Les trois simulations montrent des nouvelles poches de densification de population auparavant inexistantes (Fig. 9.5). La répartition de la nouvelle densité de population suit une configuration spatiale similaire dans les trois cas (A1, A2, A3). En revanche, cette répartition présente des différences par rapport à l'ampleur du phénomène d'augmentation de la population. Ceci se confirme par un étalement plus important du phénomène de densification de population avec le développement plus important et plus étendu de certaines zones.

Les trois scénarios présentent les similarités suivantes:

- Un renforcement de la densification des zones à proximité des pôles urbains importants, notamment Lausanne et Morges. Ces nouvelles poches de densification correspondent aux zones avec une densité initiale inférieure à 300 habitants/cellule et une attractivité importante. C'est le cas de Lutry, Echandens, Bussigny, Cugy Crissier, Cheseaux-sur-Lausanne et Etagnières. Ces communes profitent de la proximité avec l'agglomération de

Lausanne. Dans la même optique, les simulations mettent en évidence des communes telles que Lonay et Denges, qui se trouvent à proximité de Morges ;

- Dans un deuxième temps, nous remarquons une augmentation de la densité de la population au sein de pôles éloignés de la couronne urbaine de l'agglomération lausannoise. C'est le cas des communes de Chexbres, Echallens, Penthelaz et La Sarraz. Il est intéressant de remarquer qu'il s'agit en effet de communes présentant initialement une bonne attractivité mais une faible densité.

La comparaison des scénarios du groupe A permet d'identifier les différentes structures urbaines selon la variation des projections démographiques sous les mêmes contraintes. Le scénario A1 permet en effet de mettre en évidence les zones qui sont choisies en premier par les nouveaux habitants. Il s'agit des mêmes zones citées dans le paragraphe précédent. Les zones limitrophes à l'agglomération morphologique ne sont pas forcément privilégiées par les agents, les zones périphériques le sont aussi. Les zones périphériques sont choisies par les agents même si les cellules à proximité des pôles urbains sont encore libres. Cela est confirmé par la comparaison entre les résultats des simulations A1 et A3. Cela peut s'expliquer par l'influence de l'évolution des temps de parcours. En effet, les zones périphériques jouissent d'une diminution plus importante des temps de parcours. Ceci implique une augmentation de l'attractivité de ces zones plus importantes par rapport aux zones à proximité des centres urbains. De plus, les centres habités éloignés de l'agglomération de Lausanne jouissent d'autres atouts (écoles, emplois, qualité des arrêts) qui confèrent à ces zones une bonne attractivité.

De cette première série de résultats, il est possible d'identifier le fait que sous l'influence d'une politique de faible densification, une diminution des temps de parcours des transports publics et une augmentation sensible de la population, le modèle de la ville de Lausanne affiche une structure urbaine plutôt étalée. Cette structure se construit tout de même autour des centres urbains déjà existants avec un renforcement des pôles urbains secondaires et le long des principales lignes de transport.

L'impact de l'évolution des temps de parcours reste tout de même à vérifier avec les résultats des simulations modélisant une augmentation de la qualité de la desserte en transports publics.

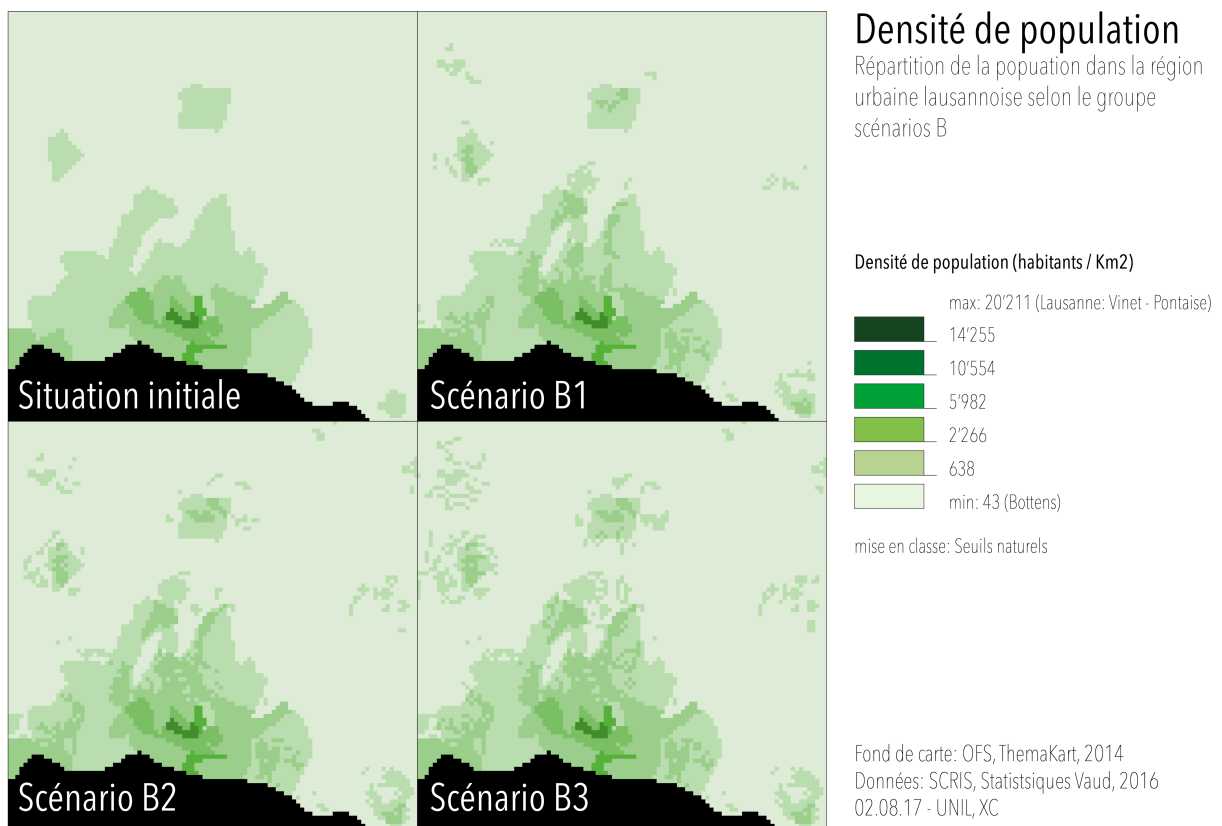
9.3.2 Scénarios B1, B2, B3

Les scénarios B1, B2, B3 permettent d'observer les liens entre le choix d'une politique de faible densification de la population et une politique visant à améliorer la qualité des services aux arrêts des transports publics. Comme pour les scénarios du groupe A, une faible densité signifie un potentiel développement horizontal de ville mais qui se concentre autour des nœuds principaux du réseau de transport et dans des zones encore peu habitées.

Les paramètres qui permettent d'envisager la variabilité des résultats finaux sont les suivants :

- 50'000 nouveaux habitants pour le scénario B1 ;
- 75'000 nouveaux habitants pour le scénario B2 ;
- 100'000 nouveaux habitants pour le scénario B3 ;
- La densité maximale est fixée à 300 habitants/cellule ;
- Augmentation de la qualité des arrêts de transports publics d'une catégorie.

Figure 9.6 : Résultats des scénarios B1, B2, B3



(X. Charles, 2017)

L'analyse des résultats issus des simulations du groupe de scénarios B (*Fig. 9.6*) peut se définir quasiment identique à l'analyse des résultats précédents (9.3.1). En concordance avec les résultats précédents ce sont les mêmes zones qui subissent une augmentation de la densité de population :

- les zones proches des centres urbains avec une densité inférieure à 300 habitants/cellule
- les zones proches de pôles d'habitants secondaires éloignées des centres urbains.

Cela s'explique par la forte concentration d'arrêts dans les deux zones citées ci-dessus. L'augmentation de la qualité des arrêts de transports publics est la plus importante dans ces zones, et de conséquence l'attractivité aussi. Cela peut donc être une explication au choix de localisation des agents.

Les résultats de cette série de scénarios mettent en évidence une possible évolution des structures urbaines de la ville de Lausanne très similaire à celle des résultats précédents.

Pour l'instant, nous pouvons conclure que sous l'influence d'une politique de faible densification, une augmentation de la qualité de la desserte aux arrêts et une augmentation sensible de la population, le modèle de la ville de Lausanne affiche un développement de la ville horizontal qui suit tout de même les formes urbaines préexistantes. En résumé, il est possible de remarquer une structure urbaine étalée avec un élargissement des frontières de l'agglomération morphologique de la ville et un développement urbain de pôles secondaires. On remarque aussi un développement tentaculaire qui suit les principales lignes de transport.

L'impact de l'évolution de la qualité des arrêts reste tout de même à vérifier, une comparaison entre les deux observations plus détaillées s'impose. L'analyse distincte de ces premiers résultats ne peut expliquer les similarités entre les résultats des groupes de scénarios A et B. Faut-il pencher pour un manque d'influence de l'évolution de l'attractivité sur le choix de localisation des agents ou faut-il plutôt expliquer que l'impact des deux politiques de transport sur l'occupation du sol sont les mêmes ? Les contraintes en termes d'occupation du sol imposent aux agents de s'installer dans des zones périphériques proches du centre-ville et dans des zones autant attractives mais éloignées de l'agglomération. Il reste donc difficile de répondre à ces questions.

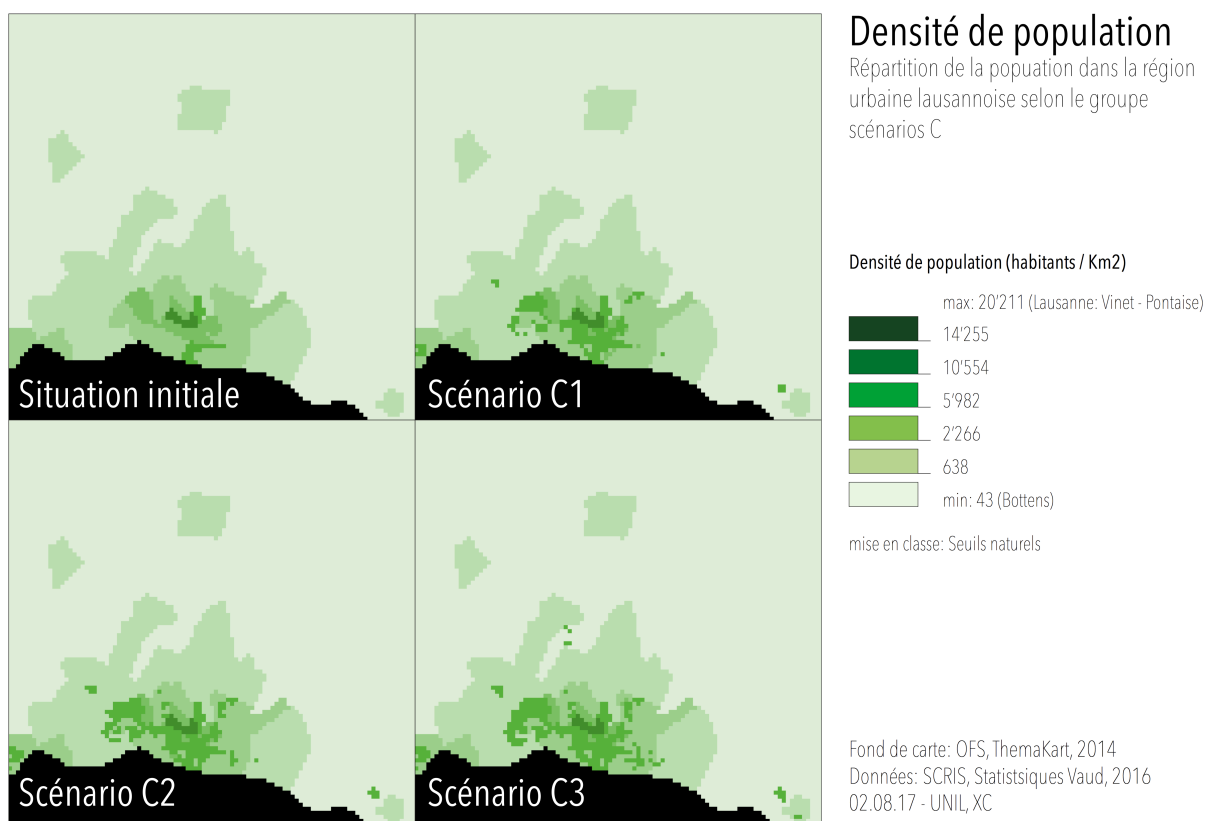
9.3.3 Scénarios C1, C2, C3

Les trois scénarios C1, C2, C3 permettent d'illustrer l'évolution des structures urbaines sous l'effet d'une politique de transport visant à diminuer les temps de parcours sur le réseau de transports publics comme pour le groupe de scénarios A. En revanche, ce groupe de scénarios vise à comprendre les effets d'une politique de forte densification de la population. Dans ce contexte, on peut s'attendre à une structure compacte de la ville et à une limitation du phénomène d'étalement urbain. Une considération qui peut tout de même être modulée selon la variabilité des projections démographiques.

Les paramètres qui permettent d'envisager la variabilité des résultats finaux sont les suivants :

- 50'000 nouveaux habitants pour le scénario C1 ;
- 75'000 nouveaux habitants pour le scénario C2 ;
- 100'000 nouveaux habitants pour le scénario C3 ;
- La densité maximale est fixée à 800 habitants/cellule ;
- La diminution des temps de parcours fixée à - 20% sur l'ensemble du territoire.

Figure 9.7 : Résultats des scénarios C1, C2, C3



(X. Charles, 2017)

Selon les observations (*Fig. 9.7*), le développement de la ville se fait à l'intérieur de l'agglomération morphologique. Contrairement aux résultats précédents (9.3.1 Et 9.3.2), les agents se sont disposés de façon très compacte, ceci est valable pour les trois scénarios (C1, C2, C3). La répartition de la nouvelle densité suit une structure similaire dans les trois configurations malgré quelques petites différences dues à la variation des projections démographiques.

Les trois scénarios présentent les similarités suivantes:

- On remarque un développement significatif du pôle urbain lausannois, tout comme les pôles secondaires qui constituent la grande agglomération. Une augmentation significative de la densité de la population concerne les zones de Morges, de l'Ouest lausannois (Renens, Chavannes-près-Renens, Ecublens et Bussigny), le centre-ville et les quartiers sous gare, mais aussi Puidoux et Chexbres. Ces nouvelles zones fortement densifiées correspondent aux zones avec une densité initiale élevée mais inférieure à 800 habitants/cellule et une attractivité très importante. Ces zones profitent d'une grande qualité de services.
- Dans un deuxième temps, il faut souligner une absence de développement de la ville à l'extérieur de l'agglomération. Le modèle suggère dans les trois configurations que tout nouvel agent ira choisir une zone à l'intérieur des limites de l'agglomération. On distingue tout de même le cas particulier de la commune de Puidoux qui subit une forte pression démographique sur une zone initialement très faiblement densifiée.

Des petites différences sont tout de même perceptibles entre les résultats des trois scénarios du groupe C. Ces détails mettent en évidence l'impact de la variabilité des projections démographiques sur la structure urbaine. Par rapport à la situation initiale, on remarque un élargissement des zones avec une densité élevée, ce sont en effet les mêmes zones qui sont urbanisées mais avec des différences par rapport à l'étendu du phénomène. La différence est minime car la capacité d'accueil des cellules est importante.

En ce qui concerne l'influence de l'évolution des temps de parcours, il est possible d'affirmer que l'influence est minime mais pas inexistante. Selon le modèle, l'augmentation de l'attractivité dans les zones périphériques ne suffit pas pour attirer de nouveaux habitants à l'extérieur de la ville compacte.

En résumé, de cette troisième série d'observations, il est possible d'identifier l'impact d'une politique de forte densification, d'une diminution des temps de parcours en transports publics. Cet impact sur la structure urbaine peut se définir comme étant limité dans la mesure où une augmentation jusqu'à 100'000 nouveaux habitants ne produirait pas un étalement forcé des frontières de la ville au dépend de zones encore non bâties.

L'impact de l'évolution des temps de parcours reste tout de même à vérifier avec les résultats des simulations modélisant une augmentation de la qualité de la desserte en transports publics sous les mêmes contraintes de densification.

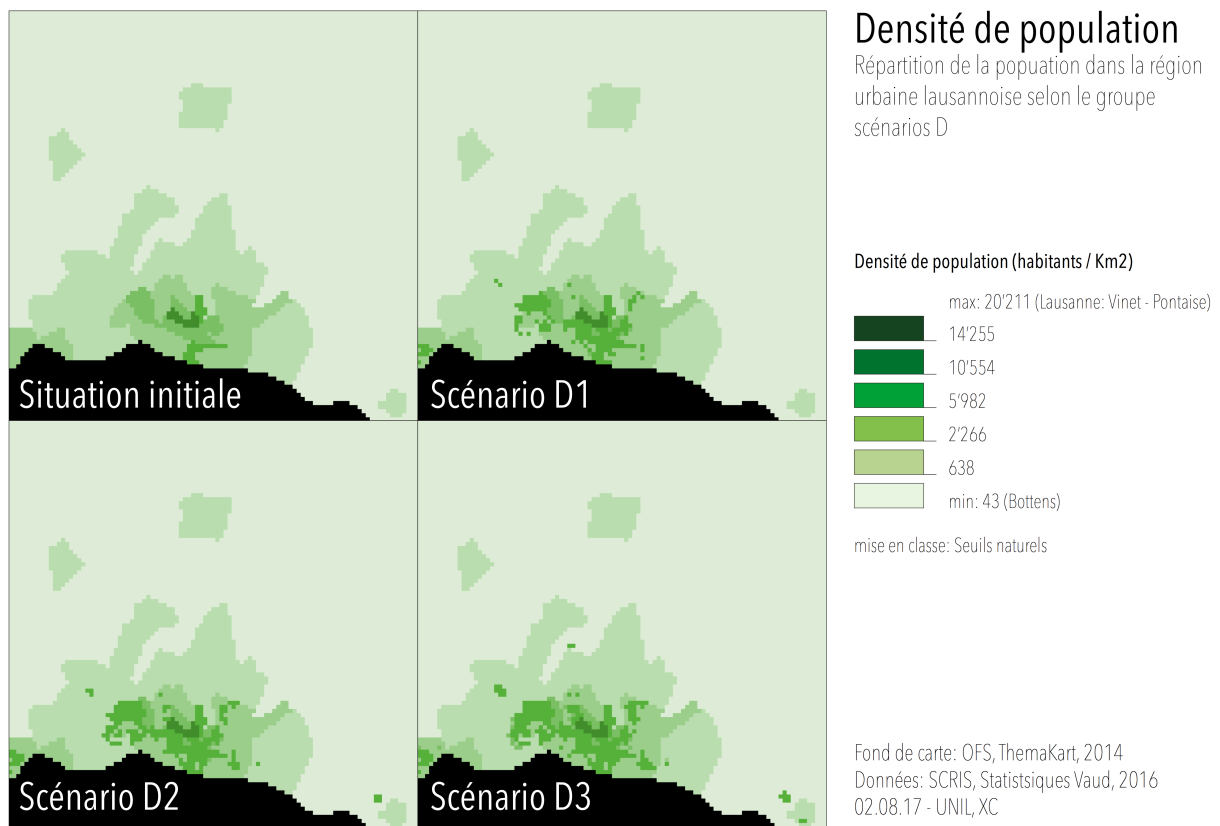
9.3.4 Scénarios D1, D2, D3

Le groupe de scénarios D1, D2, D3 permet d'analyser l'impact de l'adoption d'une politique de forte densification de la population avec une amélioration des capacités et des prestations aux arrêts du réseau de transports publics. Les structures spatiales auxquelles nous pouvons nous attendre sont similaires à celles du groupe B, c'est-à-dire une structure urbaine compacte qui vise à la verticalité et limite l'expansion de l'urbanisation tout en concentrant le développement autour des pôles attractifs de la région urbaine de Lausanne.

Les paramètres qui permettent d'envisager la variabilité des résultats finaux sont les suivants :

- 50'000 nouveaux habitants pour le scénario D1 ;
- 75'000 nouveaux habitants pour le scénario D2 ;
- 100'000 nouveaux habitants pour le scénario D3 ;
- La densité maximale est fixée à 800 habitants/cellule ;
- Augmentation de la qualité des arrêts de transports publics d'une catégorie.

Figure 9.8 : Résultats des scénarios D1, D2, D3



(X. Charles, 2017)

L'analyse des simulations du groupe de scénarios D (Fig. 9.8) présente des résultats quasiment identiques à ceux obtenus dans la série de scénarios précédents (9.3.3). En résumant les principales observations faites sur les trois résultats, deux considérations sont à retenir :

- Densification et un développement à l'intérieur de l'agglomération morphologique ;
- Choix de localisation des agents qui n'implique pas un phénomène d'étalement urbain.

L'influence de l'amélioration de qualité des arrêts dans cette configuration n'a aucun impact sur le choix de localisation car l'attractivité territoriale dans les zones périphériques n'est pas assez importante pour que les nouveaux agents choisissent de se localiser à l'extérieur de la ville. Comme pour le groupe de scénarios précédent (9.3.3), les résultats de la série de scénarios D montrent un développement futur de la ville plutôt vertical. En effet, une forte densification signifie une réflexion de l'habitat qui se déploie en hauteur. Cela est nécessaire dans la mesure où les zones occupées par les nouveaux habitants sont déjà fortement urbanisées et moyennement denses.

Les résultats obtenus lors de la comparaison entre les séries de scénarios C et D sont très similaires. Comme pour le cas de la comparaison entre les scénarios A et B, il s'agit ici de remettre en question l'influence de l'évolution de l'accessibilité, d'une part par la diminution des temps de parcours et de l'autre par l'augmentation de la qualité des arrêts de transports publics. De la même manière dans ces deux cas les contraintes en termes de densification (800 habitants/cellule) permettent aux agents d'accéder à des zones très attractives. Ces zones, déjà fortement densifiées sont aussi les plus attractives. De cette façon, avec la grande capacité d'accueil des cellules, les nouveaux habitants ne doivent pas s'excentrer pour trouver une zone qui leur conviennent. Il est complexe de savoir si l'impact des politiques de transport aurait pu porter à des résultats plus significatifs dans une configuration différente (varier le nombre de nouveaux habitants, ou varier la densité maximale). On remarque tout de même un fort développement de l'Ouest lausannois et des zones proches du centre. Ce sont en effet des zones à fort potentiel de développement et reconnues comme des pôles amenés à se développer en accord avec la vision multipolaire de l'agglomération de Lausanne (6.1.1).

9.4. Synthèse des scénarios

Une analyse descriptive détaillée a été effectuée sur les différents scénarios pour extraire les principaux effets des paramètres, leurs incidences sur les structures urbaines et l'impact de la variation des dynamiques territoriales.

Dans cette synthèse, un récapitulatif général des résultats et une comparaison des scénarios sont proposés. Cela permet de revenir sur les principaux effets de ces scénarios sur les futurs possibles de la ville de Lausanne. Pour ce faire, un résumé de l'influence des différentes politiques territoriales et des dynamiques démographiques est proposé.

Cette synthèse prévoit trois considérations générales sur les résultats obtenus:

- Les politiques de transport ont une influence limitée sur le choix de localisation résidentielle des individus. A cet égard, les stratégies mises en place, telles que modélisées dans ce travail, ne remplissent pas leurs rôles de facteurs structurants des formes urbaines ;
- Les différentes politiques d'occupation du sol, modélisées par une limite de densification de la population sur le territoire, ont un impact considérable sur l'évolution des formes urbaines. Il s'agit d'un outil puissant de régulation territoriale au sein du modèle utilisé ;

- La variation du nombre de nouveaux habitants est un facteur déterminant des structures urbaines et de leur ampleur. Ceci met un accent particulier sur la pertinence des projections démographiques.

On remarque une faible influence de l'évolution des paramètres liés à l'évolution des prestations de transports publics. Par conséquent, le choix de localisation résidentielle des individus sur le territoire est pratiquement externe aux conditions d'accessibilité. Ceci est sans doute lié aux limites imposées par la structure du modèle de simulation créées dans le cadre de cette recherche. En effet, une diminution de 20% des temps de parcours, même si réaliste, ne suffit pas à modifier de façon déterminante les facteurs de choix résidentiel. Au même titre, une augmentation de la qualité de la desserte des arrêts de transports publics d'une catégorie ne semble pas avoir d'impact suffisant sur les dynamiques de choix de localisation.

Le fait de fixer une limite de densification exerce un impact considérable sur le choix de localisation des agents sur le territoire. Ce facteur règle les contraintes du développement de la ville en termes morphologiques. Une limite de densification élevée permet un développement de la ville vers des structures urbaines compactes et permet donc de limiter le phénomène d'étalement urbain. Une limite de densification fixée à des valeurs basses contraint les habitants à s'installer en grande partie en dehors de l'agglomération, favorisant ainsi l'étalement urbain. Cet étalement n'est pas aléatoire mais il suit tout de même une certaine logique notamment liée aux structures déjà existantes de la ville.

La variation du nombre de nouveaux habitants à l'horizon 2030 est un facteur déterminant dans l'évolution des structures urbaines de la région d'étude. Cela s'observe par une variation de l'ampleur des phénomènes de transformations morphologiques de la ville mais néanmoins fortement liée au scénario imposé. En d'autres termes, la variabilité des perspectives démographiques n'est pas structurante des formes urbaines futures mais l'ordre de grandeur de l'augmentation de la population détermine l'ampleur du phénomène. Par exemple, dans un contexte de développement horizontal de la ville, selon le nombre de nouveaux habitants, les frontières externes des pôles en développement seront plus ou moins étendues.

Pour conclure cette synthèse, il est important de revenir sur la structure du modèle et en particulier sur l'évolution des valeurs des paramètres territoriaux à la base du modèle, c'est-à-

dire des valeurs d'accessibilité et d'attractivité. Ces deux variables résultent de nombreux facteurs, variables ou fixes, qu'il est important de considérer (8.3).

Conclusions

L'objectif de cette recherche est de comprendre le phénomène de l'étalement urbain à la lumière des modèles d'interactions entre usage du sol et transport dans la région urbaine de Lausanne. Les dynamiques d'occupation du sol et d'évolution des caractéristiques d'accessibilité en transports publics ont été intégrées à un modèle de simulation permettant d'élaborer des scénarios d'évolution potentiels des futures structures urbaines de la ville. Pour générer ces simulations selon une approche prospective, il a été question de s'appuyer sur des données analytiques et statistiques afin de rendre le modèle le plus plausible et réaliste possible. L'analyse statistique et spatiale de ces dynamiques se base sur l'approche des modèles LUTI couplant un système multi-agents et un cellulaire automate dans le but de modéliser et comprendre le choix de localisations résidentielles des nouveaux habitants.

La construction du modèle de simulations utilisé dans ce travail est un outil intéressant pour reproduire les dynamiques territoriales dans une approche systémique. En effet, le modèle permet de rendre compte des évolutions du système de transport et du système d'occupation du sol. Ainsi, il a été possible d'analyser les répercussions de la modification d'une variable sur l'ensemble du système modélisé, notamment sous l'influence de politiques territoriales telles que l'évolution de l'offre en transports publics et des stratégies d'occupations du sol.

Il s'agit maintenant de conclure cette analyse en vérifiant les hypothèses en accord avec la dite problématique de recherche. Dans un deuxième temps, il est nécessaire d'exposer les limites de la méthodologie, de la structure du modèle et des outils d'analyse utilisés lors de ce travail.

L'hypothèse centrale de ce travail (H1) reposait sur le postulat d'un accroissement sensible de la population et des conséquences de ce phénomène sur les structures spatiales de la ville (6.2.2.1). Cette hypothèse est vérifiée dans la mesure où une variation de l'accroissement de la population exerce une pression sur le système urbain qui se concrétise par une augmentation de la demande en sol. Sous la contrainte de ressources en sol limitées, il est nécessaire d'occuper de nouveaux espaces et, par conséquent, de développer la ville de façon horizontale ou verticale. Cela confirme l'hypothèse que la structure urbaine est influencée par une augmentation de la population. Il s'agit ici de comprendre comment la gérer.

C'est avec l'hypothèse H3 que prend forme la problématique des stratégies à adopter pour gérer le développement de la ville. Cette hypothèse pose donc la question d'une mutation potentielle de la structure spatiale du système urbain sous l'influence de différentes stratégies de densification de la population (6.2.2.3). Cette hypothèse est aussi vérifiée dans la mesure où la variation des contraintes liées à la densification de la population sur le territoire a un impact majeur sur la structure urbaine. Ce facteur est déterminant dans la régulation du développement de la ville. Un développement de la ville sous un régime de faible densification encourage le processus d'étalement urbain tandis qu'une limite de densification plus élevée encourage un développement de la ville sur la ville existante. Les formes urbaines, particulièrement visibles lors d'un développement horizontal de la ville, ne sont pas aléatoires mais fortement liées aux caractéristiques territoriales existantes telle que la répartition spatiale de l'accessibilité.

L'hypothèse H2 pose la question d'une mutation potentielle de la structure spatiale du système urbain par rapport à différentes stratégies d'amélioration de l'accessibilité des transports publics (6.2.2.2). En accord avec l'approche LUTI, le système de transport est un des facteurs structurants dans le développement de la ville. Cela n'est malheureusement pas complètement vérifié. Il est possible de mesurer l'impact des caractéristiques territoriales sur le développement de la ville notamment grâce à la composante « accessibilité ». En effet, le développement de la ville ne se fait pas de manière aléatoire mais suit une logique spatiale, notamment avec un développement le long des principales lignes de transport. Néanmoins le modèle ne permet pas de rendre compte des impacts de l'évolution de l'accessibilité sur le choix de localisation résidentielle. Les simulations mettant en œuvre des scénarios proposant les deux politiques de transport sous les mêmes conditions ne montrent pratiquement aucune différence. Cela laisse supposer une faiblesse dans la construction théorique et méthodologique du modèle. Il est aussi envisageable de remettre en question l'hypothèse de base.

Les choix méthodologiques qui ont permis la construction du modèle ont été nécessaires pour réaliser un outil d'évaluation fiable des évolutions des structures urbaines de la ville de Lausanne. En même temps, ces choix méthodologiques constituent les limites de l'analyse :

1. Les paramètres fixes du modèle (8.3.1) constituent une limite du modèle de simulation prospectif. Pour mesurer l'influence des paramètres variables du modèle, il est nécessaire de maintenir fixes les autres variables. Dans une approche systémique complexe d'explication des dynamiques urbaines, il est en effet difficile de distinguer l'impact isolé de chaque variable d'un sous-système sur le résultat final. Pour rendre l'analyse plus lisible et pour permettre une focalisation sur les aspects d'occupation du sol et de transport, seuls certains paramètres ont été sollicités et d'autres maintenus fixes. Par exemple, la densité d'emplois, en temps que facteur d'attractivité territoriale, reste fixe tout au long des simulations. Or, on peut supposer que la répartition et la quantité d'emplois au sein d'un espace urbain peut varier sous la contrainte de politiques territoriales ou sous l'effet des dynamiques économiques.

2. Le calibrage de l'évolution des paramètres variables du modèle (8.3.2) constitue une limite ultérieure du modèle. Il est en effet difficile de rejoindre le niveau de précision optimale pour modéliser les dynamiques urbaines. Dans le cas de la variable de densité de population limite, il est fondamental de comprendre que les politiques d'aménagement du territoire ne se limitent pas à fixer un seuil généralisé de densification. Cela nécessite de considérer les politiques d'aménagement du territoire comme complexes. Les contraintes liées au développement du territoire sont différentes selon les nécessités du lieu. Le modèle ne tient pas compte des différentes politiques d'aménagement prévues sur le territoire d'étude, qui est sujet à de nombreux plan d'affectation locale et au un plan directeur cantonal complexe.

3. L'analyse des résultats n'a pas permis de déterminer l'impact de l'évolution de l'accessibilité sur les formes urbaines. Par conséquent, il n'a pas été possible de déterminer laquelle de ces politiques de transport est la plus efficace et pertinente pour contrer le phénomène de l'étalement urbain. Il demeure néanmoins important de confirmer l'interaction des dynamiques du système de transport avec les transformations de la ville. Cela pose donc la question du calibrage des paramètres d'accessibilité du modèle. Pour accentuer l'impact des dynamiques d'évolution des prestations de transport sur les dynamiques urbaines, il serait intéressant d'augmenter l'influence de ces variations sur l'ensemble du modèle pour en déceler plus clairement les effets. Ceci n'a pas été le cas dans ce travail de part la volonté de respecter la pertinence des données récoltées.

Face à de nombreuses considérations liées à la performance du modèle se pose la question de la pertinence méthodologique du travail de recherche en particulier dans la phase de

réalisation du modèle informatique. Plusieurs opérations ont porté sur des choix méthodologiques qui ont eu des répercussions directes sur les résultats. Les processus de mise en classes, les opérations de rasterisation des couches géo-référencées, la création d'indicateurs catégoriels,... porte à une diminution drastique de la précision du modèle par rapport à la réalité. Si l'on considère aussi les nombreux scénarios non explorés cela peut conduire à une remise en question de la méthode mais aussi à une prise de conscience des innombrables futurs possibles de la ville de Lausanne. Les forces contrastantes entre l'envie de reproduire au plus proche les réalités urbaines et la nécessité de simplification pour analyser les dynamiques complexes de la ville témoignent de la complexité de la démarche scientifique. C'est dans cette complexité que réside tout l'intérêt scientifique des méthodes de modélisation et de simulations des phénomènes urbains. Un champ d'étude qui ouvre une infinité de possibilités.

Devant l'ampleur de la complexité des dynamiques urbaines et malgré les difficultés, il demeure certain que le modèle utilisé dans le cadre de ce travail a permis de répondre aux questions de recherches. La méthode et le modèle mis en place pour cette recherche reste un outil applicable à tout système urbain et pose les bases pour l'expérimentation des transformations des structures urbaines dans une vision prospective.

Références

- Aberegg, A. Tschopp, M. (2010). *Desserte et accessibilité en Suisse avec les transports publics et le trafic individuel motorisé : Rapport de base*. Office fédérale du développement territorial (ARE). Disponible sur : www.aren.ch
- Aveline, N. (2005). *Les marchés fonciers à l'épreuve de la mondialisation*. Lyon : Université d'urbanisme de Lyon.
- Bates, J. (2000). History of demand modeling. *Handbook of Transport Modeling* 1. Pages 11 – 33.
- Batty, M. (1997). Cellular Automata and Urban Form : a primer. *Journal of the American Planning Association*. Vol. 63 No. 2. Pages 266 – 274.
- Batty, M. (2005). *Cities and complexity : understanding cities with cellular automata, agent based models*. Cambridge : The MIT Press.
- Broadbent, T. A. (1973). *Activity Analysis of Spatial Allocation Models*. London : Center for Environmental Studies.
- Caruso, G. Cavaiès, J. Frankhauser, P. Peeters, D. Thomas, I. Vuidel, G. (2011). S-GHOST : Un modèle d'auto-organisation de l'étalement urbain et du réseau de transport. In *La modélisation urbanisation-transport*. Paris : Economica.
- Chowdhury, T. A. Scott, D. M. Kanaroglou, P. S. (2013). Urban form and commuting efficiency: A comparative analysis across time and space. *Urban Studies* No. 50. Pages 191 – 207.
- Combes, F. (septembre 2012). Diagnostic économique d'un réseau de transports en commun complexe sur une grande agglomération : le cas de l'agglomération francilienne. *RéférenceS*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Modelisation-urbaine-de-la.html>
- Delaloye, M. (1994). Preface. In G. Pini, C. Raffestin (Dir). *Les territoires de l'avenir: une invention des réseaux* (p.7). Sion : Institut universitaire Kurt Bösch (IUKB).
- Demande. (s.d.). Dans *Dictionnaire Larousse en ligne*. Repéré à <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/defense/22625>

- Deymier, G. Nicolas J. P. (2006). *Modèles d'interaction entre transport et urbanisme : état de l'art et choix du modèle pour le projet SIMBAD. Rapport intermédiaire n1*. Paris : Laboratoire d'Economie des Transports.
- Forrester, J. W. (1969). *Urban Dynamics*. Cambridge M.I.T. Press.
- Gallo, M., D'Acerno, L., Montella, B. (2010). « Model and Algorithms for solving the multimodal network design problem in regional context ». *Documents published for the 12th World Conference on Transport Research*. 16 pages.
- Geurs, K. T. Van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies : review and research directions. *Journal of Transport Geography*. Vol. 2, Pages 127 – 140.
- Gray, J. N., Pessel, D. (1972). A Critique of Forrester's Model of an Urban Area. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. 2. No. 2. Pages 139 – 144.
- Halbwachs, M. (1909). *Les expropriations et les prix des terrains à Paris (1860-1900)*. Paris : Société Nouvelle de Librairie.
- Hansen, W.G. (1959). How accessibility shapes land use. *Journal of American Institute of Planners*. Vol. 25. No.1. Pages 73 – 76.
- Herber, J. Stevens, B.H. (1960). A model for the distribution of residential activity in urban areas. *Journal of Regional Science*. Vol. 2. Pages 21 – 36.
- Kaufmann, V. (2000). *Mobilité quotidienne et dynamiques urbaines: la question du report modal*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- La Barra, T. (1989). *Integrated land use and transport modelling*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Lapparten, M. (2013). *Les modèles occupation du sol-transport comme outils d'évaluation*. Commissariat général à la stratégie et à la prospective. Tome 2.
- Leurent F. Chandakas E. (septembre 2012). Les modèles d'usage du sol et transport (MUST): où la géographie et l'économie se rejoignent. *Référence : Modélisation urbaine: de la représentation au projet*. Pages 156 – 173.
- Lipietz, A. (1974). *Le tribut foncier urbain*. Paris : Maspéro.
- Liu, Y. (2008). *Modelling Urban Development with Geographical Information Systems and Cellular Automata*. New York : CRC Press.

Long, N. Tonini, B. (septembre 2012). Les espaces verts urbains : étude exploratoire des pratiques et du ressenti des usagers. *Vertigo*. Vol. 12. No 2.

Lowry, I. S. (1964). *A Model of Metropolis*. Santa Monica, CA: Rand Corporation.

Lundqvist, L. (2003). Land-use and travel behavior. A survey of some analysis and policy perspectives. *European Journal of Transportation and Infrastructure Research*. Vol. 3. Pages 299 – 313.

Mackett, R. L. (1993). Structure of linkages between transport and land-use. *Transportation Research Part B : Methodological*. Vol. 27. No. 3. Pages 189 – 206.

Masson, S. (2000). *Les Interaction entre Système de Transport et Système de Localisation en Milieu Urbain et leur Modélisation* (thèse de doctorat). Université Lumière Lyon 2, Faculté des Sciences Économiques option Économie des Transports, France.

Massot, M. H. Orfeuil, J. P. (1995). La mobilité, une alternative à la densification du centre. Les relation domicile-travail. In *Les Annales de la recherche urbaine*, No. 67. Pages 23 – 31.

McNally, M. G. (2000). The activity approach. In *Handbook of Transport Modeling*, edited by D. A. Hensher, and K. J. Button. Oxford: Pergamon.

Menthonnex, J. (2011). *Perspectives de population 2010 – 2040. Ménages, Vaud et ses régions*. Statistique Vaud. Lausanne. Disponible sur : <http://www.scris.vd.ch>

Meurs, H., and R. Haaijer. (2001). Spatial structure and mobility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Vol. 6. Pages 429 – 446.

Mishra, S. Welch, T. F. Jha M.K. (avril 2012). Performance indicators for public transit connectivity in multi-modal transportation networks. *Transportation Research Part A*. Pages. 1066 - 1085.

Nazim, F. (2001). *Les automates cellulaires : vers une nouvelle épistémologie ?* Paris Sorbonne.

Ordonnance sur les règles de la circulation routière du 13 novembre 1962 (OCR), (art. 2, al. 2, LCR).

Pagliara, F., J. Preston, and H. J. Kim. (2010). The impact of transport policy on residentiallocation. In *Residential Location Choice Models and Applications*, edited by F. Pagliara, J. Preston, and D. Simmonds. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer.

- PALM (2016), *Plan d'agglomération Lausanne-Morge, Rapport 2016*. Disponible sur : <http://www.lausanne-morges.ch/>
- Pattaroni, L. Marmy, V. (2016). *Les coopératives de logements dans le Canton de Vaud*. Disponible sur : <http://www.vd.ch>
- Pichet, E. (2004). *David Ricardo, le premier théoricien de l'économie*. Paris: Les éditions du siècle.
- Pini, G. (2012, octobre). Géographie des transports I [notes de cours]. Lausanne: Université, Institut de géographie et durabilité.
- Pinjari, A. R., and C. R. Bhat. (2011). Activity-based travel demand analysis. *A Handbook of Transport Economics*. Vol. 10. Pages 213 – 248.
- Ravenstein, E. G. (1885). The laws of Migration. *Journal of the statistical Society of London*. Vol. 48. No. 2. Pages 167 – 235.
- Recker, W. W. (2001). A bridge between travel demand modeling and activity-based travel analysis. *Transportation Research Part B*. Vol. 35. Pages 481 – 506.
- Schumacher, R. Paillard, C. (2017). *Perspectives de ménages 2015 – 2040. Ménages privés*. Statistique Vaud. Lausanne. Disponible sur : <http://www.scris.vd.ch>
- Steppacher, N. (2014). *Les future possible de Lausanne : essais de simulation urbaine de ségrégations socio-spatiales*. Lausanne : Université de Lausanne.
- Thomas, M. P. (2014) *Urbanisme et modes de vie : enquête sur les choix résidentiels de familles*. EPFL.
- Tilahun, N., and D. Levinson. (2013). Selfishness and altruism in the distribution of travel time and income. *Transportation*. Vol. 40. Pages 1043 –1 061.
- Ville de Lausanne (2017). *Ville de Lausanne : portait statistique 2017*. Disponible sur : <http://www.lausanne.ch/lausanne-officielle/statistique/portrait-lausanne.html>
- Von Thünen, J. H. (1826) *Der Isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft un Nationalökonomie*. Hambourg. English translation by Wartenberg, C. M. (1966). London : Pergamon Press.
- Von Thünen, J. H. (1851). *Recherches sur l'influence que le prix des grains, la richesse du sol et les impôts exercent sur les systèmes de culture* (traduit de l'allemand par M. Jules Laverrière), Paris : Guillaumet et Cie.

- Waddell, P., C. Bhat, N. Eluru, L. Wang, and R. M. Pendyala. (2007). Modeling interdependence in household residence and workplace choices. *Transportation Research Record*. Pages 84 – 92.
- Wegener, M. (2004). Overview of land use transport models. *Transport Geography and Spatial Systems*. Vol. 5. Pages 127 – 146.
- Wingo, L. (1961). *Transportation and Urban land*. Baltimore: Johns Hopkins press.
- Wu, C. Murray, A.T. (2005). « Optimizing public transit quality and system access: the multiple-route, maximal covering/shortest-path problem ». *Environment and Planning B: Planning and Design*. Vol. 32. Pages 163 – 178.
- Yang, J. W., and J. Ferreira. (2008). Choices versus choice sets: A commuting spectrum method for representing job-housing possibilities. *Environment and Planning B-Planning and Design*. Vol. 35. Pages 364 – 378.

Table des illustrations

Figure 1.1 : Modèle de Von Thünen

Figure 1.2 : Modèle gravitaire classique : Analogie du modèle gravitaire universel de Newton

Figure 1.3 : Relation entre le degré d'interaction et la distance

Figure 2.1 : Représentation du modèle input – output

Figure 2.2 : Relation entre activités et occupation du sol

Figure 2.3 : Les relations dynamiques du système d'activité

Figure 3.1 : Relation entre transport et activités

Figure 3.2 : Le produit du système de transport

Figure 3.3 : Le système de transport

Figure 4.1 : Modèle simplifier de l'interaction entre transport et occupation du sol

Figure 4.2 : Boucle de rétroaction transport-urbanisme

Figure 5.1 : Classification des modèles LUTI

Figure 5.2 : Exemple de automate cellulaire

Figure 6.1 : Projet de territoire Suisse

Figure 6.2 : Accessibilité de la Suisse : Temps de parcours en TIM

Figure 6.3 : Projet d'agglomération Lausanne-Morges

Figure 6.4 : Population de l'agglomération lausannoise selon définition OFS (2000 – 2015)

Figure 6.5 : Nombre et évolution des voyageurs sur le réseau TL (2014 – 2016)

Figure 6.6 : Evolution de la répartition modal du transport de personnes VD (2000 – 2010)

Figure 6.7 : Répartition modale des déplacements quotidiens en minutes VD (2015)

Figure 6.8 : Projet de la tour de Chavannes-près-Renens

Figure 6.9 : Pression de l'accroissement de la population sur le système urbain

Figure 6.10 : Hypothèse transport (H2)

Figure 6.11 : Hypothèse occupation du sol (H3)

Figure 6.12: Evolution et projections de la population du Canton de Vaud, 2000 – 2040

Figure 6.13 : Tableau des scénarios démographiques

Figure 6.14 : Tableau combiné des scénarios démographiques et transport

Figure 6.15 : Tableau combiné des scénarios démographiques et occupation du sol

Figure 6.16 : Tableau combiné des scénarios démographiques transport-sol

Figure 7.1 : Structure du modèle de simulation : couplage AC et ABM

Figure 7.2 : Les critères de choix résidentiels des ménages

Figure 7.3 : Schéma des indicateurs retenus pour modéliser le système transport-sol

Figure 7.4 Catégories d'arrêts en fonction du moyen de transport et de la qualité de la desserte

Figure 7.5 : Qualité de la desserte des arrêts du réseau de transport public de la région lausannoise

Figure 7.6 : Accessibilité en temps de la ville de Lausanne en transport public

Figure 7.7 : L'accessibilité – Capture d'écran du modèle sur NetLogo

Figure 7.8 : Espaces verts protégées de la région lausannoise

Figure 7.9 : Fréquence cumulée des distance d'accès pour un choix de services selon type d'espaces, en 2011

Figure 7.10 : Zone d'influence des établissements scolaires

Figure 7.11 : Densité d'emplois

Figure 7.12 : L'attractivité territoriale – Capture d'écran du modèle sur NetLogo

Figure 7.13 : Densité de population

Figure 8.1 : Passage d'une représentation vectoriel à une représentation raster

Figure 8.2 : Attribution des valeurs d'accessibilité

Figure 8.3 : L'accessibilité en TP dans la région lausannoise

Figure 8.4 : Attribution des valeurs d'attractivité

Figure 8.5 : Attractivité territoriale dans la région lausannoise

Figure 9.1 : Evolution de l'accessibilité : scénarios A et C

Figure 9.2 : Evolution de l'attractivité scénarios A et C

Figure 9.3 : Evolution de l'accessibilité scénarios B et D

Figure 9.4 : Evolution de l'attractivité scénarios B et D

Figure 9.5 : Résultats des scénarios A1, A2, A3

Figure 9.6 : Résultats des scénarios B1, B2, B3

Figure 9.7 : Résultats des scénarios C1, C2, C3

Figure 9.8 : Résultats des scénarios D1, D2, D3

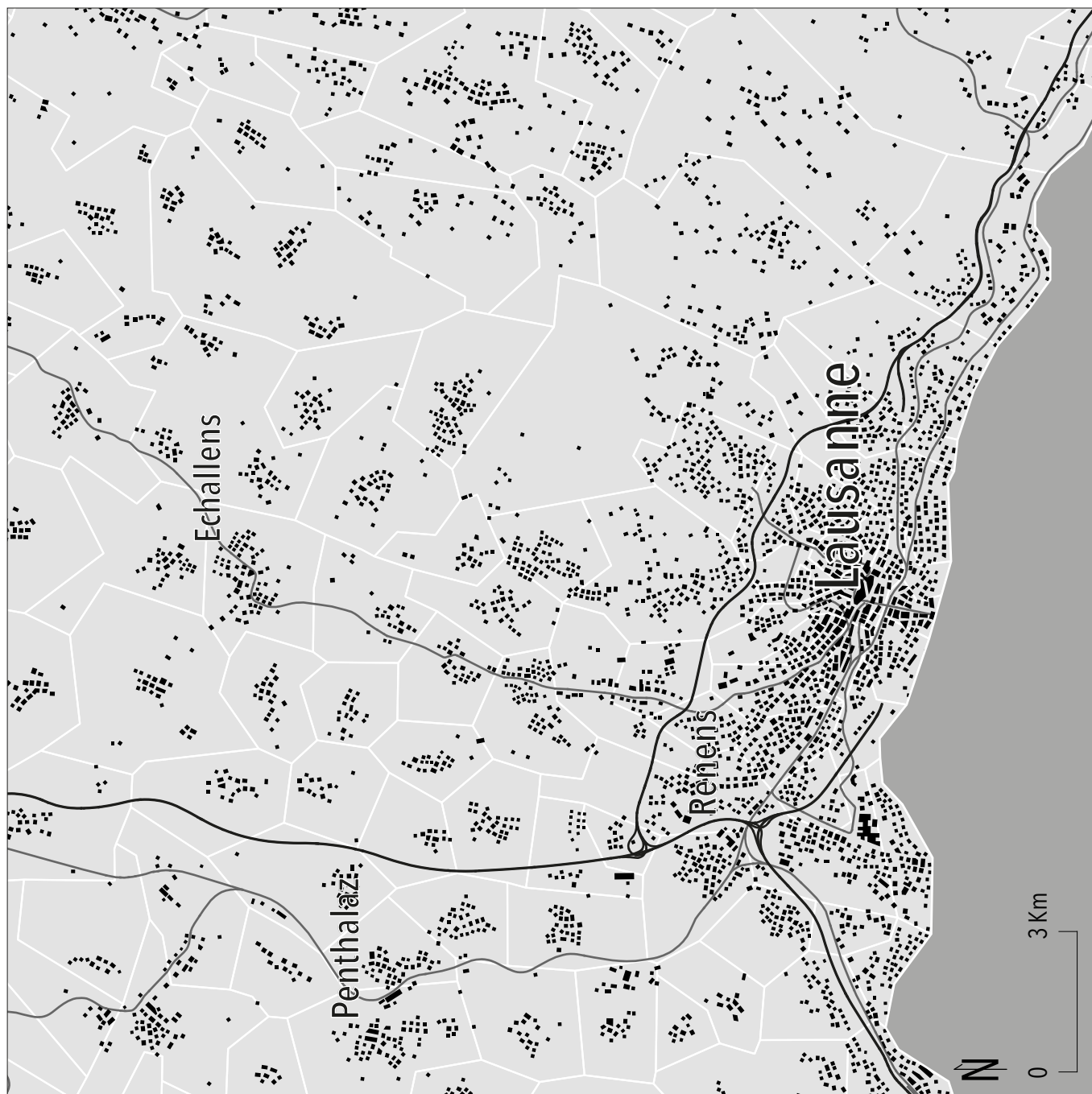
Annexe 1.1. Carte de référence

Carte de Référence

La zone d'étude comprend 115 entités
97 communes + 18 quartiers statistiques de
la ville de Lausanne.

Liste des communes

Aclens	Echandens	Pailly
Arnex-sur-Orbe	Echichens	Paudex
Assens	Eclépens	Penthalaz
Bavois	Ecublens	Penthéréaz
Belmont-sur-Lausanne	Epalinges	Poliez-Pittet
Bercher	Essertes	Pompaples
Bettens	Etagnières	Préverenges
Bioley-Orjulaz	Ferreyres	Prilly
Bofflens	Fey	Puidoux
Bottens	Forel (Lavaux)	Pully
Boullens	Froideville	Renens
Bourg-en-Lavaux	Gollion	Rivaz
Bourmens	Goumoëns	Romanel-sur-Lausanne
Boussens	Hermenches	Romanel-sur-Morges
Bremblens	Jorat-Menthue	Ropraz
Bretigny-sur-Morrens	Jorat-Méziery	Rossegges
Bussigny	La Sarraz	Rueyres
Bussy-sur-Moudon	Lausanne	Saint-Barthélemy
Chavannes-près-Renens	Le Mont-sur-Lausanne	Saint-Sulpice
Chavornay	Lomay	Savigny
Cheseaux-sur-Lausanne	Lussey-Villars	Senarclens
Chevilly	Lutry	Sevion
Chebrex	Mex	Saint-Saphorin (Lavaux)
Corcelles-le-Jorat	Montanaire	Sullens
Cossonay	Montilliez	Syens
Crisser	Montpreveyres	Villars-le-Terroir
Croy	Morges	Villars-Sainte-Croix
Cugy	Morrens	Vuarrens
Dailens	Moudon	Vuchrens
Denges	Orny	Vufflens-la-Ville
Dizy	Oron	Vulliens
Echallens	Oulens-sur-Echallens	Vullierens



Fond de carte: Themakart, OIS, 2014
15.06.17 - UNIL, IGD - XC

Annexe 1.2. Données statistiques

Commune	Population	Emplois	Surface	Densité Population (Km2)	Densité Emplois (Km2)	Population (cellule)	Emplois (cellule)
Aclens	521	1547	4.05	128.64	381.98	8.04	23.87
Arnex-sur-Orbe	632	165	7.2	87.78	22.92	5.49	1.43
Assens	1060	335	5.08	208.66	65.94	13.04	4.12
Bavois	939	193	8.81	106.58	21.91	6.66	1.37
Beaulieu-Grey-Boisy	6182	1843	0.64	9659.38	2879.69	603.71	179.98
Belmont-sur-Lausanne	3564	576	3.04	1172.37	189.47	73.27	11.84
Bercher	1157	323	4.5	257.11	71.78	16.07	4.49
Bettens	584	97	3.64	160.44	26.65	10.03	1.67
Bioley-Orjulaz	483	521	3.15	153.33	165.4	9.58	10.34
Bofflens	188	65	4.42	42.53	14.71	2.66	0.92
Borde-Bellevaux	10121	2284	0.71	14254.93	3216.9	890.93	201.06
Bossons-Blécherette	7476	3308	1.71	4371.93	1934.5	273.25	120.91
Bottens	1240	264	7.32	169.4	36.07	10.59	2.25
Boulens	368	70	4.03	91.32	17.37	5.71	1.09
Bourg-en-Lavaux	5296	2049	10.18	520.24	201.28	32.52	12.58
Bournens	370	60	3.39	109.14	17.7	6.82	1.11
Boussens	980	163	2.96	331.08	55.07	20.69	3.44
Bremblens	516	384	2.93	176.11	131.06	11.01	8.19
Bretigny-sur-Morrens	817	138	2.75	297.09	50.18	18.57	3.14
Bussigny	8227	6831	4.84	1699.79	1411.36	106.24	88.21
Bussy-sur-Moudon	208	25	2.72	76.47	9.19	4.78	0.57
Centre	12770	46159	1.21	10553.72	38147.93	659.61	2384.25
Chailly-Rovéaz	9440	2489	1.8	5244.44	1382.78	327.78	86.42
Chavannes-près-Renens	7543	3558	1.78	4237.64	1998.88	264.85	124.93
Chavornay	4817	1644	20.75	232.14	79.23	14.51	4.95
Cheseaux-sur-Lausanne	4347	2252	4.63	938.88	486.39	58.68	30.4
Chevilly	299	121	3.62	82.6	33.43	5.16	2.09
Chexbres	2235	843	1.9	1176.32	443.68	73.52	27.73
Corcelles-le-Jorat	425	72	8.21	51.77	8.77	3.24	0.55
Cossonay	3632	1361	8.41	431.87	161.83	26.99	10.11
Crissier	7636	8515	6.18	1235.6	1377.83	77.22	86.11
Croy	344	94	3.36	102.38	27.98	6.4	1.75
Cugy	2739	935	3.55	771.55	263.38	48.22	16.46
Daillens	958	1167	6.24	153.53	187.02	9.6	11.69
Denges	1624	921	1.54	1054.55	598.05	65.91	37.38
Dizy	222	60	3.15	70.48	19.05	4.41	1.19
Echallens	5677	2394	6.57	864.08	364.38	54.01	22.77
Echandens	2731	1307	3.3	827.58	396.06	51.72	24.75
Echichens	2639	770	13.01	202.84	59.19	12.68	3.7

Commune	Population	Emplois	Surface	Densité Population (Km2)	Densité Emplois (Km2)	Population (cellule)	Emplois (cellule)
Eclépens	1043	1405	5.88	177.38	238.95	11.09	14.93
Ecublens	12340	15012	5.79	2131.26	2592.75	133.2	162.05
Epalinges	9297	2593	4.74	1961.39	547.05	122.59	34.19
Essertes	335	69	1.87	179.14	36.9	11.2	2.31
Etagnières	1118	533	3.82	292.67	139.53	18.29	8.72
Ferreyres	316	44	3.53	89.52	12.46	5.6	0.78
Fey	696	154	7.45	93.42	20.67	5.84	1.29
Florimont-Chissiez	5793	1360	0.45	12873.33	3022.22	804.58	188.89
Forel (Lavaux)	2066	760	18.31	112.83	41.51	7.05	2.59
Froideville	2459	241	6.41	383.62	37.6	23.98	2.35
Gollion	902	204	5.54	162.82	36.82	10.18	2.3
Goumoëns	1051	279	11.48	91.55	24.3	5.72	1.52
Hermenches	379	60	4.82	78.63	12.45	4.91	0.78
Jorat-Menthue	1545	364	17.4	88.79	20.92	5.55	1.31
Jorat-Mézières	2814	780	11.79	238.68	66.16	14.92	4.14
Jouxens-Mézery	1448	142	1.73	836.99	82.08	52.31	5.13
La Sarraz	2567	534	7.83	327.84	68.2	20.49	4.26
Le Mont-sur-Lausanne	7881	8110	9.2	856.63	881.52	53.54	55.1
Lonay	2530	1644	3.54	714.69	464.41	44.67	29.03
Lussey-Villars	462	43	3.38	136.69	12.72	8.54	0.8
Lutry	9888	2800	8.12	1217.73	344.83	76.11	21.55
Maupas-Valency	13934	3312	0.72	19352.78	4600	1209.55	287.5
Mex	710	1776	3.14	226.11	565.61	14.13	35.35
Montanaire	2500	697	33.59	74.43	20.75	4.65	1.3
Montchoisi	3650	1154	0.76	4802.63	1518.42	300.16	94.9
Montilliez	1698	258	11.95	142.09	21.59	8.88	1.35
Montoie-Bourdonnette	7611	3456	1.99	3824.62	1736.68	239.04	108.54
Montpreveyres	621	97	4.21	147.51	23.04	9.22	1.44
Montriond-Cour	8400	7186	1.75	4800	4106.29	300	256.64
Morges	15819	10684	4.04	3915.59	2644.55	244.72	165.28
Morrens	1074	162	3.95	271.9	41.01	16.99	2.56
Moudon	6003	2731	17.25	348	158.32	21.75	9.9
Mousquines-Bellevue	2585	1469	0.56	4616.07	2623.21	288.5	163.95
Orny	371	102	5.63	65.9	18.12	4.12	1.13
Oron	5397	2174	24.76	217.97	87.8	13.62	5.49
Oulens-sous-Echallens	560	146	5.73	97.73	25.48	6.11	1.59
Pailly	534	103	5.44	98.16	18.93	6.14	1.18
Paudex	1473	1423	0.65	2266.15	2189.23	141.63	136.83
Penthalaz	3252	1186	3.59	905.85	330.36	56.62	20.65

Commune	Population	Emplois	Surface	Densité Population (Km2)	Densité Emplois (Km2)	Population (cellule)	Emplois (cellule)
Penthaz	1703	614	3.42	497.95	179.53	31.12	11.22
Penthéréaz	411	105	5.7	72.11	18.42	4.51	1.15
Poliez-Pittet	844	204	4.75	177.68	42.95	11.11	2.68
Pompaples	859	569	4.45	193.03	127.87	12.06	7.99
Préverenges	5276	1461	1.77	2980.79	825.42	186.3	51.59
Prilly	11871	5765	2.31	5138.96	2495.67	321.19	155.98
Puidoux	2874	1718	24.27	118.42	70.79	7.4	4.42
Pully	17979	6066	5.91	3042.13	1026.4	190.13	64.15
Renens	20323	13105	2.4	8467.92	5460.42	529.25	341.28
Rivaz	357	132	0.56	637.5	235.71	39.84	14.73
Romanel-sur-Lausanne	3352	1453	2.71	1236.9	536.16	77.31	33.51
Romanel-sur-Morges	477	386	1.7	280.59	227.06	17.54	14.19
Ropraz	438	91	3.72	117.74	24.46	7.36	1.53
Rossenges	60	13	0.71	84.51	18.31	5.28	1.14
Rueyres	271	92	1.62	167.28	56.79	10.46	3.55
Saint-Barthélemy	777	366	4.04	192.33	90.59	12.02	5.66
Saint-Sulpice	4148	1205	2.58	1607.75	467.05	100.48	29.19
Sallaz-Vennes-Séchaud	14296	7261	2.39	5981.59	3038.08	373.85	189.88
Sauvabelin	1007	458	0.96	1048.96	477.08	65.56	29.82
Savigny	3276	1516	15.58	210.27	97.3	13.14	6.08
Sébeillon-Malley	11269	9320	1.11	10152.25	8396.4	634.52	524.78
Senarclens	459	122	4.86	94.44	25.1	5.9	1.57
Servion	1918	511	6.05	317.02	84.46	19.81	5.28
Sous-Gare-Ouchy	10944	8771	0.86	12725.58	10198.84	795.35	637.43
St-Saphorin (Lavaux)	398	68	1.51	263.58	45.03	16.47	2.81
Sullens	978	122	4.23	231.21	28.84	14.45	1.8
Syens	145	32	2.79	51.97	11.47	3.25	0.72
Vallon-Béthusy	6374	11878	0.85	7498.82	13974.12	468.68	873.38
Villars-le-Terroir	1066	143	7.31	145.83	19.56	9.11	1.22
Villars-Sainte-Croix	841	1022	1.43	588.11	714.69	36.76	44.67
Vinet-Pontaise	7478	2618	0.37	20210.81	7075.68	1263.18	442.23
Vuarrens	993	151	8.35	118.92	18.08	7.43	1.13
Vucherens	557	183	2.81	198.22	65.12	12.39	4.07
Vufflens-la-Ville	1252	210	4.74	264.14	44.3	16.51	2.77
Vullyens	466	89	6.37	73.16	13.97	4.57	0.87
Vullierens	461	120	7.29	63.24	16.46	3.95	1.03
Zones foraines	3989	3268	23.82	167.46	137.2	10.47	8.57

Annexe 2.1. Fiche technique d'utilisation du modèle NetLogo

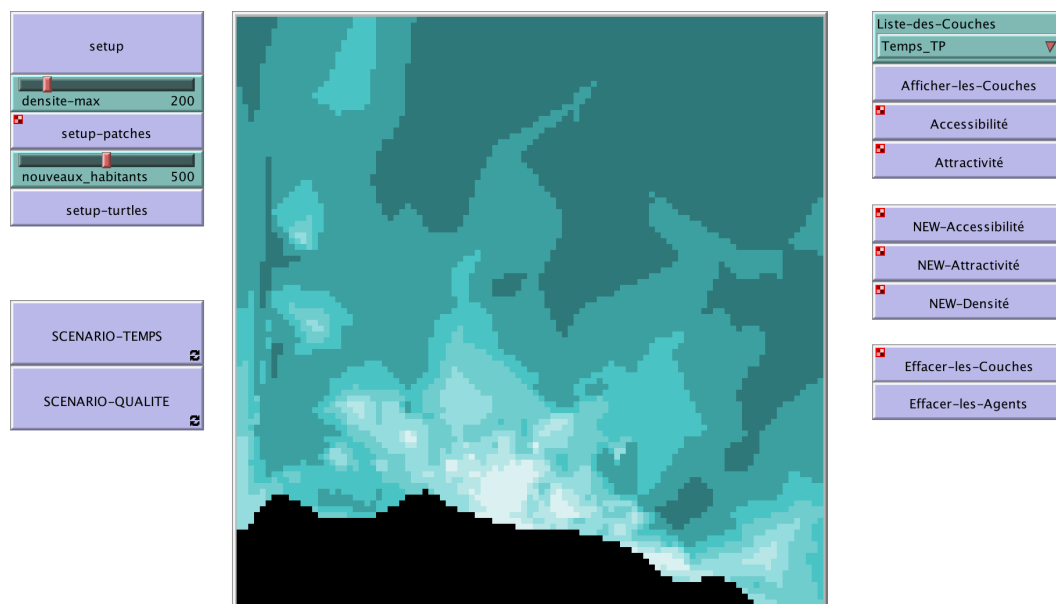
Modèle LUTI de simulations du choix résidentiel, créée par X. Charles, 9 Août 2017.

Objectif: ABM qui modélise le choix de localisation des nouveaux habitants dans un environnement urbain, par rapport à l'utilisation du sol et du transport public. Le choix résidentiel est contraint par une limite de densification mais encouragé par l'attractivité en évolution modélisée par un AC.

Fichiers .shp nécessaires: "data/LIMITES.shp", "data/LAC.shp", "data/VERTS.shp", "data/POPJOBS.shp", "data/ECOLEES.shp", "data/TIME.shp", "data/QUALITE.shp".

Le modèle a été créé avec le logiciel NetLogo 6.0.1

Figure 10.1 Capture d'écran de l'interface du logiciel NetLogo



(X. Charles, 2017)

L'interface est divisée en deux parties distinctes :

- la partie de gauche permet le paramétrage du modèle ;
- la partie de droite permet la gestion de la visualisation des couches.

Dans un premier temps, il est nécessaire de choisir les valeurs des paramètres « densité-max » et « nouveaux_habitants » dans la partie droite du modèle. Une fois ces valeurs choisies, il faut initialiser le modèle. L'utilisateur doit presser, dans l'ordre sur les boutons : « setup », « setup-patches » et « setup-turtles ».

Les variables du modèle sont les suivantes :

- densité-max : (0 – 1200 habitants/cellule) ;
- nouveaux_habitants : (0 – 1000 agents). Chaque agent correspond à 100 habitants.

Il est possible de visualiser les couches utilisées pour la modélisation en choisissant dans le menu déroulant « Liste-des-Couches » et ensuite visualiser les couches avec la touche « Afficher-les-Couches » sur la gauche de l'interface. Séparément, il est aussi possible de visualiser l'accessibilité et l'attractivité calculées par le modèle après l'initialisation.

Pour mettre en route les simulations, l'utilisateur peut choisir entre deux scénarios « SCENARIO-TEMP » ou « SCENARIO-QUALITE » sur la droite de l'interface. Les simulations s'arrêtent automatiquement après 150 itérations (ticks).

L'utilisateur peut ensuite visualiser dans l'interface les représentations spatiales de l'accessibilité, de l'attractivité et de la densité. (NEW-accessibilité, NEW-attractivité et NEW-densité)

Deux dernières touches permettent d'effacer les éléments visibles sur l'écran :

- Effacer-les-Couches pour enlever l'information des cellules ;
- Effacer-les-Agent pour enlever les agents.

Pour commencer une nouvelle simulation, il est nécessaire de réinitialiser totalement le modèle avec « setup », « setup-patches » et « setup-turtles ».

Annexe 2.2. Code NetLogo du modèle de simulation

```
;; Modèle LUTI de simulation du choix résidentielle, Créé par Xavier Charles, 9 Août 2017.
;; Objectif: ABM qui modélise le choix de localisation des nouveaux habitants dans un environnement
urbain, par rapport à l'utilisation du sol, le transport public. Le choix résidentielle est contraint
par une limite de densification mais encouragé par l'attractivité.
;; Fichiers .shp nécessaires: "data/LIMITES.shp", "data/LAC.shp", "data/VERTS.shp", "data/
POPJOBS.shp", "data/ ECOLES.shp", "data/TIME.shp", "data/QUALITE.shp".

extensions [ gis ]

;; définition des bases de données

globals [ lim-dataset lac-dataset nat-dataset popjob-dataset ecoles-dataset verts-dataset time-dataset
quality-dataset ]

;; Définition des variables des cellules

patches-own [ lac nat job_dens prox_ecoles prox_verts occupation_sol temps prox_tp accessibilite
attractivite new-accessibilite temps-accessibilite tp-accessibilite new-attractivite pop_dens densite-
limite new-densite final-densite ]

;; Récupération des shapefiles et attribution des bases de données

to setup
  clear-all
  set lim-dataset gis:load-dataset "data/LIMITES.shp"
  gis:set-world-envelope gis:envelope-of lim-dataset
  set lac-dataset gis:load-dataset "data/LAC.shp"
  set nat-dataset gis:load-dataset "data/VERTS.shp"
  set popjob-dataset gis:load-dataset "data/POPJOBS.shp"
  set ecoles-dataset gis:load-dataset "data/ECOLES.shp"
  set time-dataset gis:load-dataset "data/TIME.shp"
  set quality-dataset gis:load-dataset "data/QUALITE.shp"

  ;; Attribution des variables issus des shapefiles à chaque base de données

  gis:apply-coverage lac-dataset "LAC" lac
  ask patches [if isNaN lac [set lac 0]]
  gis:apply-coverage nat-dataset "GEOMETRIE" nat
  ask patches [if isNaN nat [set nat 0]]
  gis:apply-coverage popjob-dataset "POP_PIXEL" pop_dens
  ask patches [if isNaN pop_dens [set pop_dens 0]]
  gis:apply-coverage popjob-dataset "JOB_PIXEL" job_dens
  gis:apply-coverage ecoles-dataset "ECOLE" prox_ecoles
  gis:apply-coverage time-dataset "TEMPO" temps
  gis:apply-coverage quality-dataset "CATEGORIE" prox_tp
  reset-ticks
end

;; Définition des calculs pour de nouvelles variables à attribuer aux cellules: (accessibilite,
attractivite, deniste-limite). Plus bas dans de code

to setup-patches
  ifelse isNaN lac [set lac 0]
  []
  ifelse isNaN nat [set nat 0]
  []
  ifelse isNaN pop_dens [set pop_dens 0]
  []
  calculate-accessibilite
  calculate-occupation-sol
  calculate-attractivite
  calculate-densite-limite
end

;; Paramétrage des agents lors de leur création: lieu et nombre selon variable "nouveaux_habitants"
réglable dans l'interface

to setup-turtles
  clear-turtles
  create-turtles nouveaux_habitants
  ask turtles [move-to patch -5 -27 ]
  ask turtles [set color white]
  reset-ticks
end

;; Définition et attribution des noms pour l'affichage des couches

to Afficher-les-Couches
  ifelse (Liste-des-Couches = "Lac") [couche-lac]
  [ifelse (Liste-des-Couches = "Zones_Vertes") [couche-nat]
  [ifelse (Liste-des-Couches = "Densité_Population") [couche-pop_dens]
  [ifelse (Liste-des-Couches = "Densité_Emplois") [couche-job_dens]
```



```
    ifelse (new-densite <= densite-limite) [stop]
      [place-libre]
    ]
  tick
end

;; Fin de la boucle pour le SCENARIO-QUALITE

;; Définition de l'action place-libre soumis a conditions

to place-libre
  let nouvelle-place patches with [new-densite <= densite-limite - 100 and lac <= 0 and nat <= 0]
  move-to max-one-of nouvelle-place [new-attractivite]
end

to-report isNaN [x]
  report not ( x > 0 or x < 0 or x = 0 )
end
```