UTILISATION DES DONNÉES DÉMOGRAPHIQUES ET DES TYPES DE BÂTIMENTS POUR UNE MEILLEURE SIMULATION DE L'ÉTALEMENT URBAIN

par Rani el Meouche, Mojtaba Eslahi

Institut de Recherche en Constructibilité (IRC),
ESTP Paris, 28 Avenue du Président Wilson, 94230 Cachan, France,
meslahi@estp-paris.eu, relmeouche@estp-paris.eu

et Anne Ruas

LISIS/ COSYS, Université Gustave Eiffel,
5 Boulevard Descartes, 77420 Champs-sur-Marne, France,
anne.ruas@univ-eiffel.fr.fr

Cet article est la traduction du papier présenté à la conférence ICC 2019 à Tokyo, enrichi de quelques éléments explicatifs.

De nombreuses études utilisant différentes approches de modélisation et outils de simulation ont été réalisées dans le domaine de la croissance urbaine. Une multitude de modèles, avec des caractéristiques communes ou spécifiques, ont été développés pour étudier l'occupation du sol et l'aménagement des territoires. Cependant, aujourd'hui, la plupart des techniques de croissance urbaine utilisent uniquement les données géographiques historiques telles que les cartes urbaines, routières et des masques de zones non constructibles pour simuler les cartes urbaines prospectives. Dans cet article, en intégrant les types de bâtiments et les données démographiques comme facteurs d'évolution du tissu urbain, nous définissons différents scénarios de simulation de croissance urbaine. Chaque simulation correspond à des politiques plus ou moins restrictives de l'espace, compte tenu de ce que ces territoires peuvent accueillir comme types de bâtiments et comme population globale. Parmi les techniques de modélisation de la croissance urbaine, les modèles dynamiques basés sur les automates cellulaires sont les plus courants pour leurs applications en milieu urbain. Les automates cellulaires peuvent être intégrés aux Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour avoir un modèle à haute résolution spatiale avec une efficacité de calcul. Le modèle SLEUTH est l'un des modèles d'automates cellulaires qui permet de simuler l'expansion urbaine tout en s'adaptant à la morphologie urbaine. En utilisant le modèle SLEUTH, cet article propose différentes simulations qui correspondent à différentes priorités et contraintes foncières. Nous avons utilisé les données topographiques, démographiques et les types de bâtiments afin d'améliorer le réalisme de chaque simulation et leur adéquation avec le monde réel. Les résultats permettent d'avoir différentes images de la ville de demain pour mieux réfléchir aux politiques urbaines.

***Mots-clés** : Etalement urbain, simulation, modèle SLEUTH basé sur des scénarios, tissu urbain et Systèmes d'Information Géographique (SIG), 3D*

La taille des villes a augmenté partout dans le monde. Le processus, appelé urbanisation, est principalement dû à la croissance démographique, à l'exode rural vers les villes et à l'évolution des modes de vie. Les perspectives du département des affaires économiques et sociales (DAES) des Nations Unies montrent qu'en 2017, 55% de la population mondiale vivait dans des zones urbaines et que dans les décennies à venir, la croissance démographique mondiale et l'urbanisation se poursuivront dans les zones urbaines. De plus, ces projections montrent que l'urbanisation et la croissance démographique entraîneront une augmentation de l'urbanisation à plus de 66% en 2050 (voir figure 1). L'étalement urbain et la croissance urbaine sont directement liés. Les villes s'agrandissent principalement en s'étendant autour de leurs périphéries. Cependant, toutes les villes ne croissent pas spatialement de la même manière et différents facteurs ont un impact sur la croissance urbaine, notamment des facteurs économiques, environnementaux et sociaux. La figure 2 illustre cinq modèles différents qui pourraient être considérés comme les modèles d'étalement urbain (Galster *et al.*, 2001).

L'urbanisation induit souvent des changements irréversibles et dégrade la biodiversité, les écosystèmes

et modifie le climat urbain (Desrousseaux *et al.*, 2019). Elle transforme également les paysages et réduit les espaces agricoles et naturels. Le suivi et le contrôle des territoires artificiels représentent un enjeu important pour les collectivités face à des objectifs transversaux de développement durable et une exigence sociétale pressante en matière environnementale. Par conséquent, la planification et la gestion urbaines durables nécessitent des modèles fiables de simulation du changement d'occupation du sol, qui peuvent être utilisés pour améliorer les prises de décision.

De nombreuses études et recherches récentes, utilisant différentes approches de modélisation et outils de simulation de complexité variable, ont été menées dans le domaine de la croissance urbaine et des changements d'occupation du sol. Certaines étudient le comportement linéaire et non linéaire des systèmes urbains. Les recherches montrent que la croissance urbaine est un système dynamique de nature complexe et non linéaire. De toutes les approches existantes, les modélisations d'automates cellulaires (Clarke *et al.*, 1996; Clarke *et al.*, 2001), les modélisations basées sur les agents (Robinson *et al.*, 2012 ; Arsanjani *et al.*, 2013), les modélisations spatio-statistiques, les modélisations de réseaux de neurones artificiels (Pijanowski *et al.*, 2009 ; Mohammady *et al.*, 2014) et les modélisations fractales (Herold *et al.*, 2002; Triantakonstantis, 2012) sont les modèles les plus utilisés au cours des deux dernières décennies.

Parmi tous les modèles dynamiques spatialement explicites, ceux basés sur des automates cellulaires sont les plus courants pour leurs applications en milieu urbain. Les automates cellulaires peuvent être intégrés au SIG permettant d'obtenir un modèle à haute résolution spatiale avec une bonne efficacité de calcul. Les modèles d'automates cellulaires sont utilisés pour simuler la croissance urbaine, l'étalement et les changements d'utilisation du sol (Al-shalabi *et al.*, 2013 ; Deng *et al.*, 2014 ; Nourqolipour *et al.*, 2014), projeter des scénarios futurs de paysage urbain (Maeda *et al.*, 2011 ; Yin *et al.*, 2011) et étudier la sécurité écologique urbaine (Gong *et al.*, 2009 ; Mao *et al.*, 2013).

Cependant, dans la plupart des modèles d'étalement urbain, on note l'absence de prise en compte de données décrivant la diversité des tissus urbains ou les critères démographiques, qui sont pourtant des éléments clés de différenciation de l'étalement urbain. Cela rend difficile l'utilisation des résultats pour prendre une décision de planification ou de gestion urbaines. La méthode proposée dans cet article tente d'apporter des résultats de simulation de croissance urbaine plus fiables en intégrant davantage de données topographiques et démographiques. En matière de simulation notre objectif est de proposer un ensemble de simulations différentes qui correspondent à différentes priorités et contraintes foncières et d'utiliser des données facilement accessibles (telles que les données topographiques, démographiques et les types de bâtiments) pour améliorer le réalisme de chaque simulation et leur adéquation avec le monde réel. Dans la section suivante, nous présentons la zone d'étude. Le processus et la méthodologie sont définis dans la section 3. Dans la section 4, les simulations de croissance urbaine basées sur des scénarios sont décrites et les différents scénarios de tissu urbain sont présentés et discutés.

Zone d'étude : Toulouse Métropole

En 1950, environ 45% des Français vivaient en milieu rural et 55% en ville. La population urbaine en France est passée à plus de 75% en 2014 et il est prévu une croissance à plus de 85% pour 2050 (Nations Unies, 2014).

Même si la *méthode* que nous utilisons est générique et peut être appliquée à différentes villes, nous l'avons testée sur une métropole, sur une petite ville et un village afin d'étudier sa capacité à traiter des étendues différentes. La zone d'étude de cette recherche est la zone de Toulouse métropole, quatrième commune la plus peuplée de France. Toulouse est la capitale du département français de la Haute-Garonne, et de la région Occitanie, située dans le sud-ouest de la France (43° 36′ 16 ″N ; 1° 26′ 38 ″E). La zone d'étude que nous considérons a une superficie de 6375 km^2 et elle est plus grande que la ville de Toulouse et intègre certaines parties de cinq autres départements connexes (voir figure 3).

Notre zone d'étude compte 342 communes. De 1990 à 2006, la population a grandi au rythme de 14 000 nouveaux arrivants par an. Cette croissance démographique a entraîné une augmentation de la zone d'urbanisation d'environ 1 300 ha par an sur la même période. Le taux de croissance démographique entre 2006 et 2011 était de plus de 1,34% par an. Ce taux de croissance est le taux de croissance le plus élevé de toutes les agglomérations françaises comptant un demi-million d'habitants ou plus; cependant, il est légèrement inférieur au taux de croissance enregistré entre les recensements de 1999 et 2006. En 2014, la population de la région métropolitaine était supérieure à 1,33 million d'habitants.

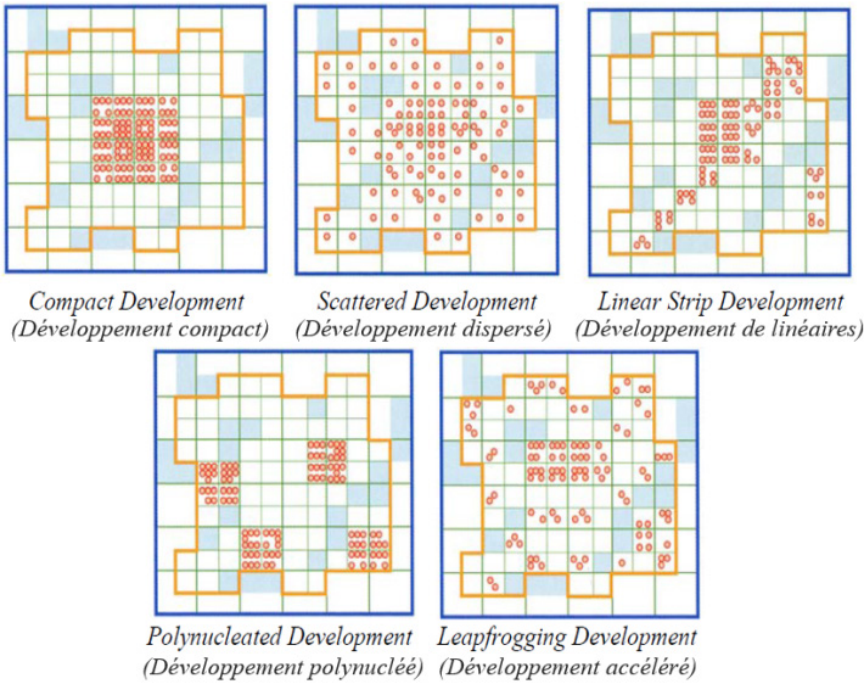

Figure 1 : Quantités et proportions de la population mondiale urbaine et rurale, 1950 à 2050 (Nations Unies, 2014)

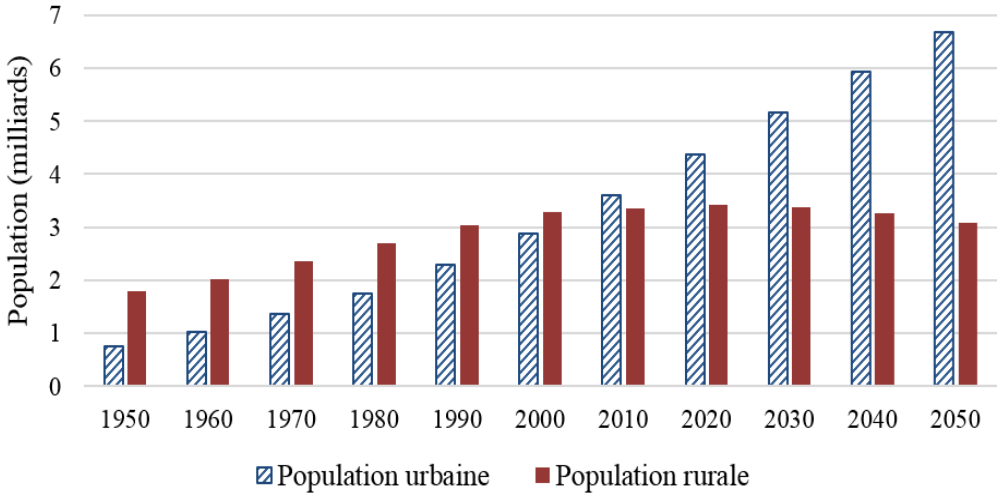

Figure 2 : Modèles physiques définissant l'étalement urbain; (Galster et al., 2001)

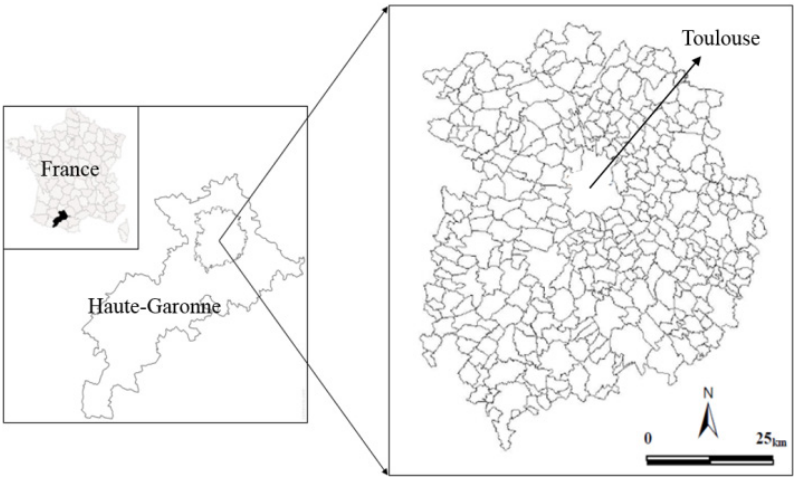

Figure 3 : Emplacement et étendue de la zone urbaine de Toulouse

Processus et Méthodologie

Presque toutes les techniques d'étalement urbain utilisent les données géographiques historiques telles que les cartes urbaines, routières et des zones non constructibles (sous la forme de carte d'exclusion où la ville ne peut pas s'étendre) pour simuler les cartes prospectives. Les modèles peuvent produire des résultats différents en faisant varier les coefficients de croissance. Dans notre méthode, nous ajoutons deux autres données (types de bâtiments et population) et définissons différents scénarios pour avoir différentes images de la ville de demain, en différenciant les possibilités d'expansion sur différents types de sol.

Dans cette recherche, nous utilisons la technique de croissance urbaine SLEUTH (Slope, Land cover, Exclusion, Urban, Transportation, Hillshade) pour simuler différents scénarios de 2017 à 2050. Chaque scénario est composé de 33 cycles de croissance, un cycle par an.

Dans la plupart des cas, les principaux facteurs de croissance urbaine sont la croissance démographique et le mode de vie, ce qui entraîne une augmentation de la surface résidentielle par personne. Cependant, les simulations classiques sont basées sur les données historiques et ne prennent pas en compte les données démographiques et les types de bâtiments. Ainsi, les résultats obtenus sont questionnables car ils ne prennent pas explicitement en compte ces variables.

Afin d'intégrer la démographie et le mode de vie, nous avons classé les bâtiments en six catégories résidentielles différentes en tenant compte de la hauteur des bâtiments. A surface égale, plus le bâtiment simulé est haut, plus il pourra loger de personnes. Pour ce faire, nous avons utilisé des données démographiques et topographiques réelles pour étudier sur la zone d'étude la relation moyenne entre type de bâtiment et nombre de personnes logées. Puis, les nouvelles zones urbaines simulées sont classées en fonction des classes de bâtiments définies et un modèle d'utilisation des sols est généré.

Ensuite, la population de la zone d'étude est estimée pour chaque temporalité. Selon la croissance démographique attendue et les types de bâtiments, certains scénarios fictifs de tissu urbain (scénarios primaires) sont définis et comparés pour mieux comprendre l'occupation du sol et le nombre de personnes qui peuvent être logées dans le nouvel espace urbain simulé. Sur cette base, les nouveaux scénarios de tissu urbain appelés *scénarios finaux de tissu urbain* sont définis pour enrichir les simulations. La modélisation de simulation et les résultats sont discutés en détail dans la section suivante. La figure 4 illustre la procédure proposée pour la méthode, en soulignant les avancées par rapport aux méthodes classiques.

Mise en Œuvre du Modèle

Le modèle de simulation et des paramètres

Le modèle utilisé est le modèle SLEUTH-3r, basé sur la version basique de SLEUTH (Clarke *et al.*, 2007; projet Gigalopolis, 2018 ; Jantz *et al.*, 2010). Les cartes de pente, d'occupation du sol, des zones d'exclusion, des surfaces urbanisées, du réseau routier et de la pente sont utilisées comme données d'entrée pour la simulation de la croissance urbaine. La simulation est basée sur les quatre règles de croissance suivantes : l'expansion spontanée, la création de nouveaux centres ou foyers urbains, l'expansion en continuité de l'urbain existant et l'expansion le long des routes. Dans le modèle SLEUTH, cinq coefficients (dispersion, breed, spread, pente et attirance à la route) jouent sur la façon dont les règles de croissance sont appliquées. Ces coefficients sont calculés par un processus de calibration à partir des cartes historiques. Dans cet article, nous ne rentrerons pas dans le détail de la description du modèle SLEUTH et de ses paramètres, le but est d'utiliser les données démographiques pour améliorer l'interprétation des simulations (voir Clarke (2018) pour le paramétrage)

La base de données géospatiales utilisée est composée des cartes de 2000, 2008, 2012 et 2017. Les cartes de pente et celles d'ombrage sont dérivées du Modèle Numérique de Terrain (MNT) du RGE de l'IGN avec une résolution spatiale de 5 m. Les zones urbaines, les zones d'exclusion et les cartes de transport sont générées automatiquement depuis la BD TOPO et la BD ORTHO de l'IGN. La carte urbaine est classée en deux classes : zones urbaines et non urbaines. La population et le recensement sur la zone étudiée sont issus des données de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE) de 2011.

Dans la section suivante, les différents scénarios prospectifs de la croissance urbaine sont définis. Chaque scénario a besoin de cartes d'entrée spécifiques au format raster. La figure 5 illustre les cartes d'entrée SLEUTH de base. Toutes ces cartes ont une résolution de 1658 * 1422 pixels avec une taille de cellule de 52 * 52 mètres (~ 2700 m^2). La carte des zones exclues est souvent différente pour chaque simulation.

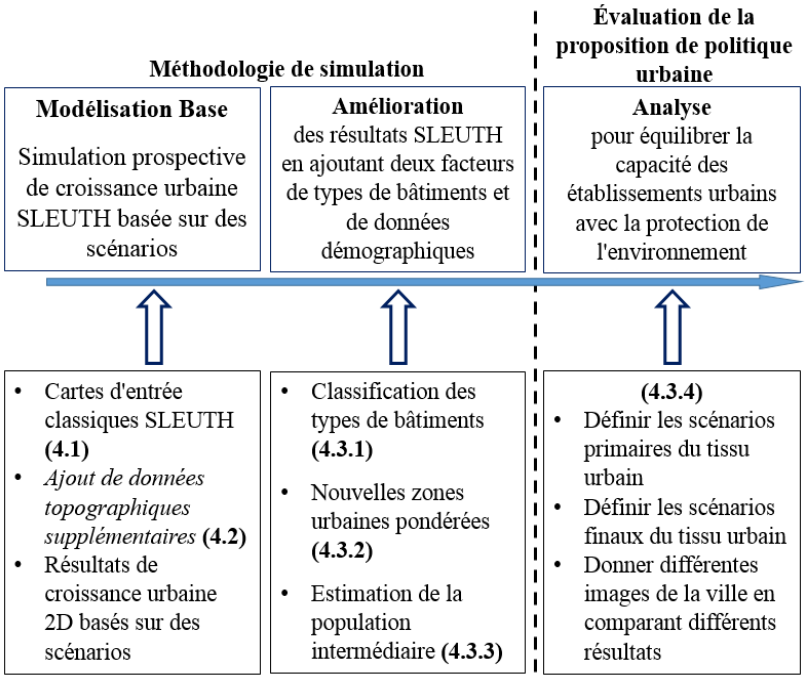

Figure 4 : La procédure de la méthode proposée

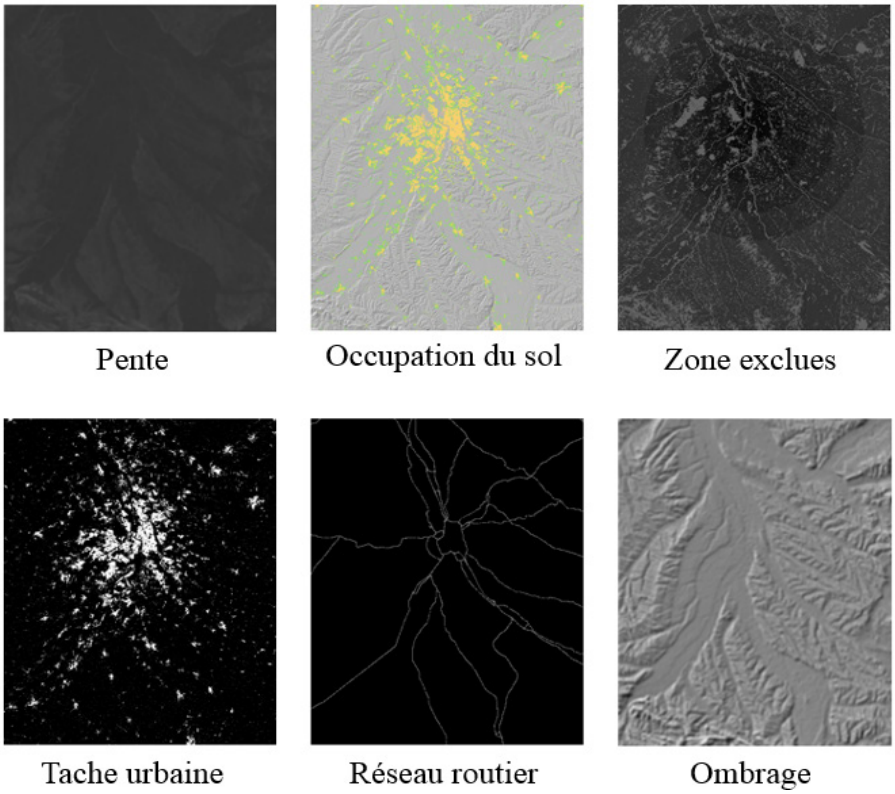

Figure 5 : Les six cartes d'entrée de SLEUTH

Utilisation de données topographiques pour améliorer la simulation de l'étalement urbain : modèle SLEUTH basé sur des scénarios

Dans nos recherches, différents scénarios sont définis afin d'analyser la protection de l'environnement et d'améliorer les résultats de la simulation de l'étalement urbain. Chaque scénario correspond à différentes priorités explicites et possibilités ou interdictions de s'étendre sur tel type d'espace. Aucun des résultats ne se produira dans le monde réel, mais les simulations sont utiles pour les prises de décision.

Scénarios de simulation

Le modèle SLEUTH a la possibilité de générer différents scénarios d'occupation du sol en fonction des cartes d'entrée dans SLEUTH. Dans un modèle SLEUTH, les cartes d'exclusion et d'inclusion sont essentielles. Les cartes d'exclusion *définissent les endroits où la ville n'a pas le droit de s'étendre*, tels que les parcs nationaux ou régionaux, et les cartes d'inclusion décrivent les lieux ou objets qui attirent l'urbanisation, par exemple le long des routes. Les cartes d'exclusion et d'inclusion (ou d'attraction) sont générées à l'aide de données topographiques. Les zones exclues sont entièrement protégées de la croissance urbaine (valeur = 100). D'autres zones (représentées par des pixels) ont des valeurs différentes pour restreindre ou attirer l'étalement urbain. La valeur de 50 indique un poids neutre pour le développement. Entre 50 et 99, il s'agit d'une exclusion relative tandis que moins de 50 signifie qu'il y a une attraction. Ces cartes permettent de déterminer différents scénarios de protection de l'environnement (voir tableau 1).

Dans le tableau 1 la ville ne peut pas s'étendre sur les pixels de valeur 100. Il s'agit des bâtiments, des zones d'activités (les lieux administratifs, culturels et de loisirs, industriels ou commerciaux, de l'éducation, de la gestion de l'eau, de la santé, des sports) et des transports. Les scénarios sont différents par leur prise en compte du niveau de protection de l'environnement. Par exemple dans le premier scénario (niveau 0) la protection environnementale est limitée aux parcs naturels. Les scénarios 1, 2, 3 et 4 protègent de façon progressive les espaces naturels, mais aucun les espaces agricoles. Dans le scénario 3, l'expansion ne peut se faire que sur les terrains naturels non verts ou sur les terres agricoles.

Deux scénarios (niveau 1) ont les mêmes protections environnementales mais se différencient par des zones d'attraction : Le scénario de croissance intelligente intègre des zones d'attraction (Jantz *et al.*, 2010). Dans ce scénario, nous imaginons qu'un centre-ville est plus attractif pour les habitants que la périphérie. Nous avons ainsi défini quatre zones concentriques avec des taux d'attraction différents, qui tentent d'attirer vers le centre de la ville et de limiter l'expansion en périphérie. Les surfaces d'eau et les gares sont également considérées comme des zones d'attraction pour l'habitation. Pour ce scénario, une couche est définie comme des zones d'attraction concentriques. Cette couche a quatre zones concentriques avec un rayon de 7,5, 15, 22,5 et 30 km du centre de la ville avec les valeurs correspondantes d'attraction respective de 10, 20, 30 et 40 (sur une échelle de 0 à 100, comme décrit ci-dessus). Les autres ont une valeur de 50. Les plans d'eau et les gares augmentent encore ces attractions - sur une distance de 350 m (7 pixels) dans les valeurs concentriques pour obtenir les valeurs respectivement de 5, 15, 25, 35, 45. Ce scénario permet de traduire une attraction plus forte vers le centre-ville et vers les gares et points d'eau.

Résultats et évaluations de simulation SLEUTH

Le modèle SLEUTH comprend trois processus de calibration, de prévision et d'auto-modification. Dans le processus de calibration, une valeur est initialisée pour la première simulation de chaque coefficient. Pour trouver les valeurs de coefficients les plus adaptées, le processus de calibration de SLEUTH effectue le nombre d'itérations à travers les données historiques en utilisant la méthode de la force brute. Ces valeurs sont ensuite utilisées dans le processus de prévision de la simulation. Le tableau 2 illustre les valeurs des coefficients les mieux ajustés pour notre zone d'étude. Les paramètres varient de 0 à 100, 0 signifie l'absence de comportement et 100 un comportement non restreint. Par exemple un *Breed* de 1 signifie que les nouveaux pixels restent isolés alors que 100 signifie qu'ils forment tous un cluster (Clarke 2018).

Dans le processus de prévision, le modèle est d'abord exécuté avec la carte urbaine d'entrée de l'an 2000 pour obtenir la carte urbaine prospective pour 2017. Dans ce cas, il est possible d'évaluer la précision du modèle avec différents scénarios par rapport à la carte urbaine réelle de 2017. Le seuil de pente de construction de 15% est considéré comme une pente critique.

Une recherche par force brute est utilisée pour énumérer systématiquement tous les pixels urbains pour vérifier la qualité de l'ajustement des projections de croissance urbaine. L'algorithme compare le changement observé et le changement simulé. La précision globale est calculée pour mesurer la proportion globale des pixels qui changent

correctement par rapport au nombre total de cellules. Le tableau 3 illustre les résultats des cartes urbaines simulées pour 2017 et les compare à la carte urbaine réelle de 2000 et 2017. Comme indiqué, cinq résultats différents sont obtenus en raison des différents scénarios. La comparaison des résultats de simulation de tous les scénarios indique que les zones urbaines simulées sont réduites dans les zones plus protégées. Les évaluations démontrent que le scénario de croissance intelligente niveau 1 a une meilleure qualité d'ajustement mais le scénario niveau 2 obtient le meilleur taux de croissance comparé à la carte réelle urbaine 2017. Ce sont donc les scénarios de niveaux 1 et 2 qui ressemblent le plus à ce qui s'est passé entre les années 2000 et 2017. Le scénario croissance intelligente niveau 1 traduit bien l'attraction vers les centres et points d'intérêt.

Ensuite, nous avons appliqué la simulation de prévision de la croissance urbaine pour 2050. Le modèle est exécuté avec la vraie carte urbaine d'entrée de 2017 (pas la simulée) pour obtenir la carte urbaine prospective pour 2050 par différents scénarios. Le tableau 4 présente les résultats de la croissance urbaine prospective simulée pour 2050.

Malgré les résultats illustrés dans les tableaux 3 et 4, la croissance future sera certainement différente en raison de la croissance démographique, de l'urbanisme, des prix des terrains et d'autres facteurs. Même si ces simulations sont intéressantes, elles sont sous-définies et restent abstraites car il existe de nombreuses façons de remplir les nouvelles zones urbaines produites par le modèle de simulation. Afin de pouvoir comprendre et mieux utiliser ces simulations, nous proposons d'utiliser la croissance démographique et les types de bâtiments pour améliorer les résultats.

Amélioration des résultats de simulation en utilisant le tissu urbain et la démographie

La forme et la configuration d'une ville sont liées à sa géographie, son histoire et son environnement naturel. L'expansion urbaine est la conséquence de l'augmentation de la population et de l'évolution des modes de vie. Dans ce qui suit, nous prenons en compte le type de bâtiments (appelé le tissu urbain) et le nombre de population qui pourrait occuper les zones urbaines simulées pour chaque scénario. Ainsi nous nous posons la question du nombre d'habitants qui pourrait être logé dans l'espace simulé en fonction des types de bâtiment construit que nous comparons aux projections d'évolution démographique dans la zone de Toulouse.

Dans nos recherches, nous présentons une nouvelle méthode de simulation pour l'aménagement du territoire. Cette méthode peut être appliquée à différentes zones d'étude. Ayant la zone urbaine existante et la zone de croissance, nous proposons de créer de nouveaux modèles de construction. Pour créer ces modèles de bâtiments (4.3.2), nous devons d'abord utiliser une classification des types de bâtiment (4.3.1).

Classification des types de bâtiments

Pour classer les types de bâtiments, nous utilisons une classification très simple du département de la planification et de l'environnement du gouvernement NSW d'Australie (gouvernement NSW, Australie, 2017) qui a défini et classé différents types de bâtiments d'une ville en fonction de leur hauteur, ce qui est pratique puisque à défaut du nombre d'étages, nous disposons facilement en France de la hauteur de tous les bâtiments grâce à la BDTopo de l'IGN. Nous nous inspirons donc de cette classification pour différencier les bâtiments de Toulouse métropole. Ces types de bâtiments sont utilisés comme classifications d'éléments de notre zone d'étude pour créer les modèles d'occupation du sol.

Selon cette classification, les *habitations individuelles* sont des bâtiments de 1 à 2 étages (h = 3 m ~ 5 m). Les *logements de faible hauteur* contiennent des maisons de ville, des logements en terrasse et de petits immeubles résidentiels de 2 à 4 étages et d'une hauteur de 6 à 12 mètres. Les *logements en hauteur* sont généralement des bâtiments de 3 à 5 étages (h = 14 m ~ 17 m). Les *immeubles de hauteur moyenne* sont les bâtiments de 5 à 7 étages avec une hauteur de 18 m ~ 25 m et les *immeubles de taille moyenne / élevée* contiennent les bâtiments de 8 à 9 étages avec une hauteur de 26 m ~ 29 m. Les *immeubles de grande hauteur* se composent de trois catégories, les 9 à 12 étages, 13 à 18 étages et 19 à 25 étages.

Pour classer les éléments structurels de notre zone d'étude, les informations des deux couches de bâtiments indifférenciés et industriels de la BDTopo de l'IGN sont utilisées. Dans les bâtiments indifférenciés, pour chaque type d'objets urbains, les nombres et la hauteur des bâtiments sont extraits et une hauteur moyenne pour chaque type est calculée. Les bâtiments industriels sont classés en bâtiments commerciaux, bâtiments industriels, bâtiments agricoles, serres et silos. Pour chaque classe, une valeur moyenne de hauteur est calculée. Les serres et les silos sont ignorés des domaines industriels de classification en raison de leurs faibles effets sur l'urbanisme.

Scénarios	Bâtiment et zones remarquables	Zone d'activité	Surface de l'eau	Parcs naturels	Forêts et bois	Forêts ouvertes et espaces verts
Scénario niveau 0	100	100	100	100	50	50
Scénario niveau 1	100	100	100	100	100	50
Scénario niveau 2	100	100	100	100	100	75
Scénario niveau 3	100	100	100	100	100	100
Scénario de croissance intelligente niveau 1	100	100	100	100	100	50

Tableau 1 : Scénarios de simulation SLEUTH et valeurs de pixels de chaque carte d'entrée exclue / incluse

Valeurs de coefficient					
Scénarios	Dispersion	Breed	Spread	Pente	Gravité de la route
Scénario niveau 0	100	25	25	75	100
Scénario niveau 1	100	1	25	25	50
Scénario niveau 2	100	1	25	25	100
Scénario niveau 3	100	1	25	25	1
Scénario de croissance intelligente niveau 1	100	1	25	100	1

Tableau 2 : Valeurs des coefficients de meilleur ajustement résultant du processus de calibration de SLEUTH-3r

Résultats - 2017						
Scénarios	Zone urbaine existante en 2000 (pixels)	Augmentation de la zone urbaine (pixels)	Taux de croissance urbaine (%)	Augmentation de la zone urbaine (ha)	Zone urbaine totale (ha)	Qualité de l'ajustement de la croissance (%)
Scénario niveau 0	127881	43918	25,56	11858	46386	81,48
Scénario niveau 1	127881	43689	25,46	11796	46324	82,19
Scénario niveau 2	127881	43521	25,39	11751	46279	82,28
Scénario niveau 3	127881	43179	25,24	11658	46186	82,3
Scénario de croissance intelligente niveau 1	127881	47940	27,27	12944	47472	83,3
Zone urbaine existante en 2017	171432	43551	25,40	11759	46287	100

Tableau 3 : Résultats de la croissance urbaine obtenus par différents scénarios et comparaison des résultats avec la carte réelle de 2017, Toulouse.

Résultats - 2050				
Scénarios	Zone urbaine existante en 2017 (pixels)	Taux de croissance urbaine (%)	Augmentation de la zone urbaine (ha)	Zone urbaine totale (ha)
Scénario niveau 0	171432	37,89	28238	74525
Scénario niveau 1	171432	36,97	27150	73436
Scénario niveau 2	171432	36,49	26600	72886
Scénario niveau 3	171432	36,35	26432	72719
Scénario de croissance intelligente niveau 1	171432	37,04	27236	73523

Tableau 4 : Résultats simulés de la croissance urbaine obtenus par différents scénarios pour 2050, Toulouse.

Calcul des probabilités des hauteurs des bâtiments sur les nouveaux pixels urbanisés par simulation

Pour classer les éléments de la structure urbaine, il est nécessaire de trouver la valeur de la hauteur moyenne des bâtiments pour les parcelles urbaines simulées en présentant un modèle d'utilisation du sol.

Les précédents modèles d'occupation des sols, par ex. le modèle de zone concentrique (RE Park *et al.*, 1920), le modèle en secteurs (H. Hoyt, 1939) et le modèle à noyaux multiples (CD Harris et EL Ullman, 1945) ont été développés pour les villes industrielles principalement aux États-Unis. Ce sont des modèles prédéfinis, qui doivent être créés manuellement pour chaque zone d'étude.

Ici nous utilisons les classifications des bâtiments discutées dans la section précédente afin de créer un modèle d'occupation des sols adapté à la zone de travail. Les différentes classes urbaines de 2017 classées par hauteur de bâtiment sont collectées et une matrice multicouche est constituée où chaque couche correspond à un type de bâtiment avec une hauteur spécifique.

En utilisant les résultats obtenus en section 4.2.2, la différence entre la croissance urbaine simulée et la carte urbaine réelle de 2017 donnera les zones de croissance. Ces dernières sont représentées par les nouveaux pixels créés au cours du processus de simulation. Ces pixels ne contiennent pas de valeur de hauteur et doivent donc être classés. Pour les classer, nous cherchons le type de bâtiment probable dans chaque nouveau pixel. Dans le modèle proposé, le type de bâtiment est considéré en fonction de la ressemblance aux voisins. Par conséquent, il est nécessaire de calculer la probabilité de chaque valeur de la hauteur pour chaque pixel, en tenant compte des valeurs voisines. La première étape pour calculer la probabilité est de vérifier la première boucle de voisins autour d'un nouveau pixel urbain dans la matrice créée. Si tous les pixels sont nuls dans la première boucle de voisins, on va chercher des bâtiments dans les voisinages suivants (2ème, 3ème proximité). Puis on calcule la probabilité de chaque valeur pour chaque pixel comme indiqué dans l'équation 1:

$$H(n) = \left(\frac{\sum_{i=1}^{8} V}{8N} + \frac{\sum_{j=1}^{16} V}{16N} + \frac{\sum_{k=1}^{24} V}{24N} \right), \text{ Pour } n = 1, \ldots, N;$$

$$H' = \frac{H(n)}{\sum_{n=1}^{N} H(n)}$$

Dans cette équation, H′ est la probabilité qu'une valeur de hauteur soit donnée à un nouveau pixel urbanisé. H est la valeur locale du pourcentage ; V est le nombre de pixels qui ont une valeur non nulle de la hauteur dans chaque couche. N est le nombre de couches choisies et i, j et k sont respectivement le nombre de première, deuxième et troisième boucles voisines. En utilisant l'équation 1, les probabilités de hauteur de construction pour chaque pixel sont calculées. Plus tard, avec la démographie, le nombre de personnes en pixels correspondants sera calculé.

Démographie et gestion de la population

Comme exposé précédemment, nous proposons de compléter les résultats de la simulation SLEUTH par des critères de densité de population. Ayant les classes de construction, la croissance urbaine simulée et la population moyenne, dans cette section, nous évaluons le cycle de croissance approprié pour loger les quantités de populations estimées dans les années à venir en utilisant les pixels dédiés à l'expansion simulée.

Pour interpoler la population, nous estimons d'abord le taux de population annuel composé à l'aide de l'équation 2 (Jantz *et al.*, 2014).

$$G_{,t_y,t_{y'}} = \left(\frac{P_{r,t_{y'}}}{P_{r,t_y}}\right)^{\left(\frac{1}{t_{y'}-t_y}\right)} - 1$$

Où, G est le taux de croissance démographique annuel composé pour la zone d'étude. P est la population successive estimée et t_y et $t_{y'}$ sont les intervalles d'année. Dans cette zone, le taux de croissance moyen estimé en 1999 et 2011 est d'environ 1,34% par an. Ce taux de croissance est pris en compte dans les prochaines étapes.

Par la suite, ayant le nombre de personnes et le taux de population annuel composé, nous estimons la population intermédiaire pour les années à venir comme suit :

$$P'_{,t_x} = P_{r,t_y}\left(1 + G_{r,t_y,t_{y'}}\right)^{(t_x - t_y)}$$

Dans l'équation ci-dessus, P′ est une estimation de population intermédiaire pour la zone d'étude. P est la valeur de population successive. G est le taux de croissance démographique annuel composé calculé précédemment. Les intervalles d'année sont indiqués par t_y, $t_{y'}$ et t_x est l'année cible.

Mise en œuvre, résultats et discussion

Le taux de croissance démographique annuel est calculé pour la croissance urbaine simulée de 2050 en 33 cycles de croissance à partir de 2017. Ce taux estimé donne une augmentation de 55% de la population, compte tenu de la population réelle de 1,35 million d'habitants pour 2017.

Pour pouvoir faire des comparaisons, nous définissons quatre scénarios de tissu urbain différents. Ces scénarios primaires sont fictifs et ne correspondent pas à la réalité mais ils permettent de mieux comprendre comment ces terres pourraient être utilisées et combien d'habitants pourraient vivre dans ces nouvelles zones. Etant en périphérie, les types de logements privilégiés sont l'habitat individuel et les immeubles de hauteur moyenne. Les scénarios changent dans la proportion de l'espace utilisé pour chaque type d'habitat. Les quatre scénarios sont les suivants :

1) *Étalement urbain* maximum : tous les nouveaux quartiers urbains sont remplis de logements individuels.
2) Urbain moyen dense : 50% des espaces sont utilisés par des habitations individuelles et 50% par des immeubles de hauteur moyenne.
3) Urbain moyen / très dense : 30% de logements individuels et 70% des immeubles de hauteur moyenne.
4) Urbain très dense : 100% d'immeubles de hauteur moyenne.

Pour chaque scénario, nous estimons le nombre de personnes pouvant être logées dans les espaces simulés. Pour chaque pixel, le nombre d'habitants est estimé à partir de la classification des bâtiments du schéma d'occupation des sols urbains et de la carte de population issue de l'INSEE. Le tableau 5 illustre la comparaison de tous ces scénarios. Le scenario « étalement urbain maximal » ne permet pas d'accueillir la croissance prévue en 33 cycles, tandis que dans le scénario d'« urbain très dense », beaucoup plus de personnes peuvent être logées et donc moins dispersées. Cependant, aucun de ces scénarios ne donne le taux de croissance démographique estimé à 55% pour 33 cycles de croissance simulée.

Par conséquent, nous avons essayé de déterminer combien de cycles de croissance (donc quel étalement) correspondraient le mieux *à l'augmentation de la population prévue (55%) pour chaque type d'habitat.* Ces nouveaux scénarios sont appelés *scénarios finaux de tissu urbain*. Comme le montre le tableau 6, les 13e, 18e et 23e cycles de croissance donnent les meilleurs résultats pour les scénarios de tissu urbain à densité moyenne, moyenne / très dense et très dense respectivement avec une croissance démographique d'environ 55%. Ce qui veut dire par exemple pour le scénario de tissu très dense, qu'il peut loger les 55% d'augmentation de la population en 13 cycles de simulation, c'est-à-dire qu'il utilisera un espace bien plus faible (celui qu'on obtient au bout de 13 cycles) pour loger la quantité de population estimée en 2050. Pour trouver le tissu urbain qui semble correspondre à la tendance actuelle, nous avons défini un autre scénario de tissu urbain appelé *scénario de faible densité* pour le 33e cycle de croissance. Dans ce scénario, 35% des nouvelles zones urbaines simulées sont considérées comme des habitations individuelles, 40% comme des immeubles de faible hauteur et 25% comme des immeubles de moyenne hauteur. Ces pourcentages de classe de construction sont de façon logique, plus proches du tissu urbain existant de l'agglomération toulousaine. Après, l'analyse se porte sur les types de protection des espaces tels que présentés en section précédente (tableau 4). Dans tous les scénarios représentés dans le tableau 6, les scénarios de croissance urbaine intégrant une protection de l'environnement de niveau 2 et 3 ont la meilleure qualité d'ajustement. Le scenario de croissance intelligente niveau 1 présente un *étalement* plus orienté vers les zones attractives.

La figure 6 illustre l'utilisation des terres urbaines simulée par cycle de croissance pour chacun des scénarios de croissance urbaine prospective. La figure 6 montre la possibilité de protection des terres en jouant sur la densité du nouvel habitat construit en périphérie des villes, en représentant les quantités croissantes de la ville dense à la ville étendue pour le même taux de croissance démographique. Ainsi en conservant une croissance démographique de 55%, l'occupation des terres varie de 100 km^2 à 280 km^2 ce qui illustre la perte des ressources naturelles, agricoles et environnementales en cas de choix d'un habitat purement individuel. Ainsi la modification des scénarios du tissu urbain qui a un impact très fort sur la limitation de l'étalement urbain est une réponse à la préservation des espaces agricoles et naturels.

Conclusion

Pour une ville de la taille de Toulouse, le phénomène d'étalement urbain est un grand défi pour les autorités, les urbanistes, les écologistes et les agriculteurs. Cet article présente un moyen d'estimer l'évolution de l'étalement urbain en intégrant l'évolution démographique et les types de tissus construits. Les données spatiales prospectives, les tissus urbains

Augmentation de la population par scénario de tissu urbain en 2050	Scénario l'étalement urbain		Scénario de moyen dense		Scénario moyen / très dense		Scénario très dense	
	100% logements individuels		50% logements individuels & 50% logements de moyenne hauteur		30% logements individuels & 70% logements de moyenne hauteur		100% logements de moyenne hauteur	
Croissance urbaine protection de l'environnement niveau 0	296 328	22%	1 185 312	88%	1 540 906	114%	2 074 296	154%
Croissance urbaine protection de l'environnement niveau 1	279 036	21%	1 116 144	83%	1 450 987	107%	1 953 252	145%
Croissance urbaine protection de l'environnement niveau 2	273 351	20%	1 093 404	81%	1 421 425	105%	1 913 457	142%
Croissance urbaine protection de l'environnement niveau 3	269 130	20%	1 076 520	80%	1 399 476	104%	1 883 910	140%
Croissance urbaine intelligente protection de l'environnement niveau 1	288 423	21%	1 153 692	85%	1 499 800	111%	2 018 961	150%

Tableau 5 : Comparaison de la croissance démographique de quatre différents scénarios de tissu urbain primaire

Augmentation de la population par scénario de tissu urbain en 2050	Scénario l'étalement urbain		Scénario de faible densité		Scénario de moyen dense		Scénario moyen / très dense		Scénario très dense	
	100% logements individuels		35% logements individuels, 40% logements de faible hauteur & 25% logements de moyenne hauteur		50% logements individuels & 50% logements de moyenne hauteur		30% logements individuels & 70% logements de moyenne hauteur		100% logements de moyenne hauteur	
	33 cycle de croissance		33 cycle de croissance		23 cycle de croissance		18 cycle de croissance		13 cycle de croissance	
Croissance urbaine protection de l'environnement niveau 0	296328	22%	819 841	61%	804 480	60%	804 648	60%	768 831	57%
Croissance urbaine protection de l'environnement niveau 1	279036	21%	772 000	57%	769 140	57%	775 429	57%	743 190	55%
Croissance urbaine protection de l'environnement niveau 2	273351	20%	756 271	56%	752 748	56%	761 389	56%	735 210	54%
Croissance urbaine protection de l'environnement niveau 3	269130	20%	744 593	55%	744 660	55%	754 042	56%	724 731	54%
Croissance urbaine intelligente protection de l'environnement niveau 1	288423	21%	797 970	59%	804 252	60%	815 786	60%	795 690	59%

Tableau 6 : Comparaison des scénarios du tissu urbain en fonction du cycle de croissance pour avoir un taux de croissance démographique similaire. La colonne grise représente l'augmentation de la population du scénario de tissu urbain à faible densité au cours d'un cycle de 33 croissances qui est plus proche du tissu urbain existant.

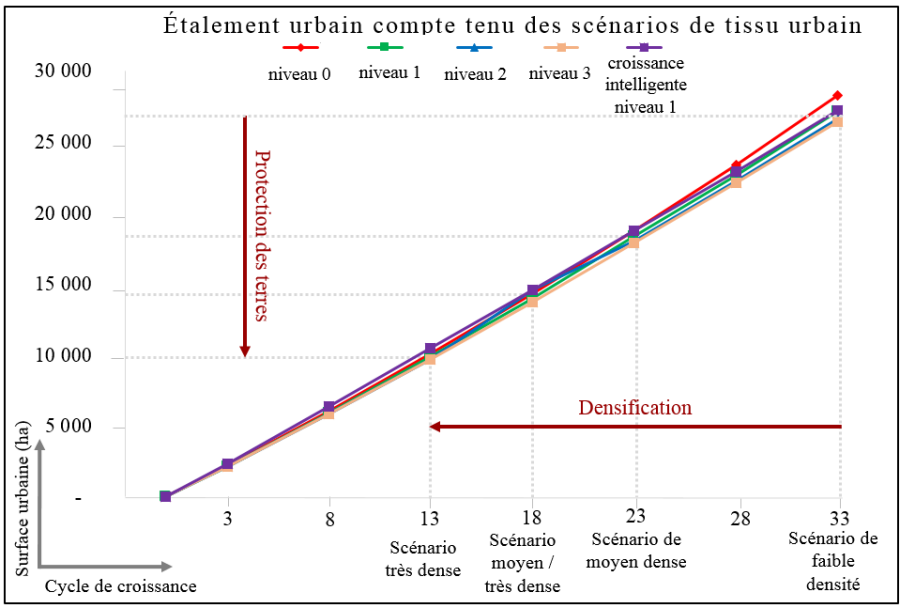

Figure 6 : Étalement urbain par les scénarios du tissu urbain pour localiser une croissance démographique urbaine de 55%

et la démographie sont intégrés pour améliorer les scénarios d'étalement urbain et pour obtenir des résultats de simulation de croissance urbaine plus riches pour des analyses prospectives. Nous avons proposé un ensemble de différentes simulations liées aux différentes priorités et contraintes foncières. Ensuite, nous avons comparé la croissance urbaine en se basant sur des villes plus ou moins denses tout en gardant le même taux de croissance de la population. En utilisant des données facilement accessibles telles que les données topographiques, les bâtiments et la démographie, nous avons amélioré le réalisme de chaque simulation et leur adéquation avec le monde réel afin d'aider aux prises de décision en matière de politique de l'habitat dans les métropoles et leurs périphéries.

Bibliographie

Al-shalabi, M., Billa, L., Pradhan, *et al.* (2013). "Modelling urban growth evolution and land-use changes using GIS based cellular automata and SLEUTH models: the case of Sana'a metropolitan city Yemen". *Environ Earth Sci*, 70(1):425–437

Arsanjani, J. J., Helbich, M., Noronha Vaz, E. (2013). "Spatiotemporal simulation of urban growth patterns using agent-based modeling: The case of Tehran", *Cities* 32 (2013) 33–42.

Clarke, K. C., Gazulis, N., Dietzel, C.K., Goldstein, N.C. (2007). A decade of SLEUTHing: "Lessons learned from applications of a cellular automaton land use change model. Chapter 16" dans Fisher, P. (ed) *Classics from IJGIS. Twenty Years of the International Journal of Geographical Information Systems and Science*. Boca Raton, FL, Taylor and Francis, CRC,. pp. 413–425.

Clarke, K. C., Hoppen, S., Gaydos, L. (1996). "Methods and techniques for rigorous calibration of a cellular automation model of urban growth." In: *Proceedings of the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modelling, Santa Fe, New Mexico*, January 21–25, 1996.

Clarke, K. C., Parks, B. O., Crane, M. P., and Parks, B. E. (2001). *Geographic Information Systems and Environmental Modeling* (1st ed.), Prentice Hall.

Clarke, K. C. (2018) "Land Use change modeling with Sleuth : improving calibration with a Genetic Algorithm" In : *Geomatic Approaches for Modelling Land Change Scenarios. Lecture Notes in Geoinformation and cartography*, ISBN 978-3-319-60800-6 pp. 139-162

Construction elements classification (Sydenham to Banks town Urban Renewal Corridor, Draft Urban Renewal Corridor Strategy, Department of Planning and Environment - NSW Government, Sydney, Australia. (2017).

Deng, Z., Zhang, X., Li, D. Pan, G. (2014). "Simulation of land use/land cover change and its effects on the hydrological characteristics of the upper reaches of the Hanjiang Basin." *Environ Earth Sci*.

Desrousseaux M., B. Schmitt, P. Billet, *et al.* (2019), "Artificialised Land and Land Take: What Policies Will Limit Its Expansion and/or Reduce Its Impacts? " *International Yearbook of Soil Law and Policy*, Vol. 3 pp149-166

Galster, G., Hanson, R., Ratcliffe, M. R., *et al.*. (2001). "Wrestling Sprawl to the Ground: Defining and Measuring an Elusive Concept", *Housing Policy Debate*, 12, 681-717.

Gong, J.Z., Liu, Y.S., Xia, B.C. and Zhao, G.W. (2009). "Urban ecological security assessment and forecasting, based on a cellular automata model: a case study of Guangzhou China". *Ecol Model*, 220(24):3612–3620

Harris, C.D. and Ullman, E.L. (1945). "Building the Future City." *Annals of the American Academy of Political and Social Science* Vol. 242, pp. 7-17.

Herold M., Scepan J. and Clarke K. C. (2002). "The Use of Re-mote Sensing and Landscape Metrics to Describe Structures and Changes in Urban Land Uses", *Environment and Planning A*, Vol. 34, No. 8, 2002, pp. 1443-1458.

Homer Hoyt. (1939). *The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities* Washington, Federal Housing Administration.

Jantz, C.A., Drzyzga, S., Maret, M. (2014). "Calibrating and validating a simulation model to identify drivers of urban land cover change in the baltimore, md metropolitan region". *Land* 2014, 3, 1158-1179; doi: 10.3390/land3031158

Jantz, C.a., Goetz, S. J., Donato, D. (2010). "Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model". *Computers, Environment and Urban Systems* 34 (2010) 1–16

Maeda, E.E., Almeida, C.M., Ximenes, A.C., *et al.* (2011). "Dynamic modeling of forest conversion: simulation of past and future scenarios of rural activities expansion in the fringes of the Xingu National Park, Brazilian Amazon". *Int J Appl Earth Obs*, 13:435–446

Mao, X., Meng, J. and Xiang, Y. (2013). "Cellular automata-based model for developing land use ecological security patterns in semi-arid areas: a case study of Ordos, Inner Mongolia China". *Environ Earth Sci*, 70(1):269–279

Mohammady, S., Delavar, M. R., Pahlavani, P. (2014). "Urban growth modeling using an artificial neural network, a case study of Sanandaj city, Iran," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, The 1st ISPRS International Conference on Geospatial Information Research, Tehran, Iran*.

Nourqolipour, R., Shariff, A., Balasundram, S.K., *et al.* (2014). "A GIS-based model to analyze the spatial and temporal development of oil palm land use in Kuala Langat district". *Environ Earth Sci, Malaysia*.

Park, R. E., Burgess, E. W., & McKenzie, R. D. (1925). *The city. Chicago, Illinois*: The University of Chicago Press.

Pijanowski, B.C, Tayyebi, A., M. R., Delavar, and M. J, Yazdanpanah. (2009). "Urban Expansion Simulation Using Geospatial Information System and Artificial Neural Networks", *Int. J. Environ., Res.*, 3(4):493-502.

Project Gigalopolis. (2018). http://www.ncgia.ucsb.edu/

Robinson, D. T., Murray-Rust, D., Rieser, V., *et al.* (2012). "Modelling the impacts of land system dynamics on human well-being: Using an agent-based approach to cope with data limitations in Koper, Slovenia". *Computers, Environment and Urban Systems,* 36(2), 164–176.

Triantakonstantis D. P. (2012). "Urban Growth Prediction Modelling Using Fractals and Theory of Chaos", *Open Journal of Civil Engineering*, 2, 81-86

United Nations, World urbanization prospects: Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2014). https://archive.is/wOOs1

Yin, J., Yin, Z., Hu, X., *et al*. (2011). "Multiple scenario analyses forecasting the confounding impacts of sea level rise and tides from storm induced coastal flooding in the city of Shanghai China". *Environ Earth Sci*, 63(2):407–414