

**Rapport relatif à la thèse de Maxime Colomb, intitulée « Simulation de formes réalistes de développement résidentiel, de l'échelle du bâtiment à celle de l'ensemble d'une région urbaine ».**

Jacques Teller, Université de Liège.

La thèse de Maxime Colomb porte sur la simulation de l'urbanisation à différentes échelles spatiales, depuis celle de l'agglomération urbaine jusqu'à celle du bâtiment. Elle se base sur un couplage entre deux modèles existants, le modèle MUP-City et le modèle SimPLU3D. MUPCity propose une modélisation de la croissance urbaine à l'échelle des agglomérations, sur base d'une approche fractale. SimPLU3D génère des formes urbaines conformes aux règles d'urbanisme en vigueur au sein d'un parcellaire existant. Entre ces deux modèles, le doctorant propose et développe un modèle intermédiaire, ArtiScales, qui développe les trames parcellaires existantes par jeux de division et de recomposition. Le modèle couplé est appliqué à l'agglomération urbaine du Grand Besançon.

La première originalité de la thèse tient dans l'étude de sensibilité des différents paramètres des modèles considérés. Cette étude de sensibilité est principalement menée pour les modèles MupCity et Artiscale ainsi que leur couplage. Il en ressort que la sensibilité intrinsèque des modèles est très conséquente et que leur couplage tend à renforcer la variabilité des solutions projetées.

La deuxième originalité de la thèse tient dans le développement du modèle ArtiScale d'évolution parcellaire. Le modèle proposé se distingue des approches courantes en la matière par la prise en considération du parcellaire existant. Il se centre sur une des composantes de la forme urbaine, la trame cadastrale, qui on le sait joue un rôle fondamental dans l'organisation du bâti. Le modèle ArtiScale permet de rapidement tester différents scénarios d'évolution du bâti, allant de l'extension sur site vierge à la seule densification sur les parcelles existantes.

La thèse se compose de 265 pages, hors annexe et bibliographie. Elle est très agréable à lire malgré le caractère touffu et systématique des analyses de sensibilité. Chaque chapitre fait l'objet d'un résumé opérationnel qui permet de relier les résultats partiels aux objectifs du travail. La recherche est très rigoureuse et bien menée. Les choix opérés sont bien argumentés et la conclusion propose une synthèse efficace et correcte de l'ensemble des résultats obtenus. Ces résultats constituent indéniablement une contribution significative à l'état des connaissances actuelles en matière de simulation urbaine.

L'introduction générale positionne les objectifs de la thèse par rapport aux ambitions actuelles en matière de lutte contre l'étalement urbain. Elle propose ensuite un état de l'art des modèles de simulation actuels. Cet état des connaissances est assez succinct. Ceci s'explique partiellement par le fait que la thèse est basée sur l'exploitation de deux modèles pré-existants, MupCity et SimPLU3D. Pour ce qui est d'ArtiScale, la modélisation de l'évolution des trames parcellaire est étudiée depuis le début des années 1990. On n'en trouve que peu de trace dans l'état de l'art, alors que ce modèle est une des principales contributions de la thèse. Une mise en perspective synthétique des choix opérés à travers la sélection des deux modèles pré-existants ainsi que dans le cadre d'ArtiScale aurait été bénéfique pour le reste du travail. Ce manque de mise en perspective théorique dans l'introduction se ressent dans la discussion et la conclusion de la thèse. Nous reviendrons sur ce point dans nos remarques générales.

La partie 1 présente les différents composants du modèle couplé, depuis le modèle territorial (MupCity) jusqu'au modèle de génération de formes urbaines (SimPlu3D) en passant par le modèle Artiscala développé par l'auteur.

Le chapitre 1 rappelle brièvement les principes de la règle fractale d'urbanisation ainsi que les principales variables prise en compte pour l'évaluation de l'intérêt à l'urbanisation des cellules. Le choix d'exclure les cellules ayant une valeur d'intérêt strictement égale à 0 est discutable. Différents seuils auraient pu être testés à cet égard. Le fait de prendre la valeur 0 comme seule valeur d'exclusion explique peut être la très grande différence entre les deux méthodes d'agrégation, car l'agrégation de Yager a par nature tendance à produire beaucoup plus de valeurs nulles que l'agrégation de moyennes pondérées.

Le chapitre 2 propose une analyse de sensibilité du modèle MupCity. Cette analyse menée de manière très systématique et rigoureuse constitue sans nul doute un apport significatif à l'état des connaissances, tant par ses résultats que par le plan d'expérience adopté. Ce dernier pourra être exploité dans d'autres travaux relatifs à la simulation des dynamiques territoriales. L'auteur met très clairement en évidence la grande variabilité des résultats en fonction de différents paramètres du modèle. Deux types de paramètres sont utilement distingués, les paramètres techniques et les paramètres scénaristiques. Différentes métriques pour l'analyse de la variabilité des modèles sont proposées et testées, dont le taux de répliquabilité des cellules.

Il ressort de cette analyse que les paramètres scénaristiques permettent de modéliser des trajectoires d'évolution très contrastées, à la différence de modèles de simulation plus « linéaires » (comme les modèles urbains basés sur des régressions logistiques). Cette grande variabilité constitue une véritable valeur ajoutée en terme de débat public. Elle permet de visualiser plusieurs futurs possibles pour le territoire et d'évaluer les coûts et bénéfices de ces différentes alternatives. Il serait utile de raccrocher ces scénarios à des orientations en matière territoriale, telles que le transit-oriented development, le modèle de la ville compacte ou des courtes distances. Plus fondamentalement, on aurait apprécié à ce stade une réflexion sur les facteurs d'incertitude dans le domaine du développement territorial (mécanismes de rétention foncière, logiques de marché, dynamiques politiques etc.). La variabilité des résultats du modèle aurait alors pu être envisagée comme une modalité de représentation de cette incertitude, non seulement dans sa composante résiduelle, mais également dans sa composante sectorielle. Nous avons ainsi mis en évidence, dans le cadre de recherches relatives à l'expansion urbaine, que l'introduction d'une part de stochasticité dans les modèles à automates cellulaires tendait à améliorer la précision des modèles plutôt qu'à la réduire (Mustafa et. al., 2018).

Les paramètres techniques ont une influence considérable sur les résultats du modèle. On a toutefois le sentiment que cette variabilité ne change pas profondément la nature du développement territorial envisagé par les variables scénaristiques. Il aurait été utile à cet égard de disposer d'une mesure de la distance entre différents résultats de calcul qui ne soit pas seulement basée sur le nombre, la répliquabilité ou la superficie de cellules urbanisées, mais sur leur organisation spatiale. La seule métrique de l'organisation spatiale des cellules urbanisées proposée dans la thèse est la dimension fractale. L'usage de métriques issues de l'écologie du paysage aurait été intéressante à cet égard. Une mesure du ROC entre différents scénarios, distinguant les near-miss des far-miss (par

analyse sur base de logique floue ou à travers une méthode multi-échelle telle que proposée par Ponthius), aurait été une solution complémentaire très utile à cet effet.

Dans le même esprit, la répliquabilité des cellules est toujours étudiée à une échelle très locale (d'une cellule de 20m qui plus est). Une approche multi-échelle ou sur base de logique floue permettrait de distinguer des différences structurelles de différences ponctuelles entre différents jeux de résultats.

Le chapitre 3 présente le modèle SimPLU3D. S'agissant d'un modèle existant, la présentation des options de modélisation est très succincte. Le choix qui est fait de traiter les composantes bâties de manière indépendante de la trame parcellaire aurait mérité une discussion approfondie. N'aurait-il pas été judicieux de proposer une intégration plus fine d'ArtiScale dans SimPLU3D de manière à optimiser de manière conjointe le découpage de la trame parcellaire et les types de bâtiments proposés, comme cela se passe au quotidien dans l'aménagement ?

Le chapitre 4 s'attache au modèle ArtiScale, développé au cours de la thèse. Le modèle supporte à la fois des divisions parcellaires et des opérations de recomposition à plus grande échelle. L'intérêt du modèle est de partir d'une trame parcellaire existante et de la transformer par opérations de subdivisions/regroupement. La démarche se distingue en cela des modèles de génération de formes urbaines synthétiques qui abordent les différentes composantes de la forme urbaine de manière intégrée (en particulier le tracé de la trame viaire, parcellaire et bâtie), mais qui ignorent les contraintes du parcellaire existant. Un des intérêts du modèle est de générer des morceaux de voirie et de valider la possibilité de desservir les nouvelles parcelles par de nouvelles voiries. Les trames parcellaires ainsi générées apparaissent assez convaincantes par rapport aux différents modes d'urbanisation.

Le chapitre 5 présente la zone d'étude et les résultats de simulation pour quatre scénarios. Il apparaît que les différents modèles proposés sont très en retrait des demandes de création de logement proposées à l'échelle de l'ensemble de l'agglomération. C'est particulièrement le cas pour certains scénarios et dans certaines municipalités. Ceci s'explique partiellement par les difficultés que le modèle rencontre pour identifier des cellules/parcelles à urbaniser au sein des espaces bâtis. Il ressort de l'analyse des patterns d'urbanisation que le modèle a tendance à privilégier une urbanisation en bordure de zones urbanisées existantes (figures 5.26). Il aurait été intéressant de forcer le paramétrage du modèle de manière à privilégier des opérations groupées telles que celles qui apparaissent dans la zone B de la figure 5.27 au détriment de l'urbanisation diffuse telle que celle qui apparaît dans la zone A ainsi que dans d'autres simulations.

Le chapitre 6 propose un bilan général de la recherche et ouvre des perspectives en matière de développements futurs.

### **Remarques et questions générales**

1) Une première question est **liée au caractère « réaliste »** des simulations proposées dans le cadre de la thèse. L'auteur ne définit pas clairement ce qu'il entend par « réaliste ». On comprend à travers l'introduction que ce réalisme est largement borné par les documents normatifs d'urbanisme (p. 35). On sait toutefois qu'il peut y avoir un écart notable entre la

norme et la réalité terrain en matière de développement urbain. On voit d'ailleurs par la suite qu'une des hypothèse adoptée dans MUPCity consiste en l'urbanisation de zones aujourd'hui non urbanisables.

La nature du modèle proposé (normatif, prédictif, descriptif) aurait gagné à être discutée plus en profondeur, au regard de la distinction entre prédiction et prospective en sciences humaines et aux différentes formes de prospective (forecasting versus backcasting). Ceci aurait permis de mieux apprécier les choix opérés par la suite. Plutôt que « réaliste », nous avons le sentiment que ce qui est proposé par l'auteur relève plutôt d'un modèle expérimental dans la mesure où ce qui est proposé est une méthode d'analyse des effets possibles d'une série d'alternatives en matière de régulation urbaine.

*Dans cet esprit, quelles sont aux yeux de l'auteur les normes et règles qui sont intangibles et quelles sont celles qui doivent être considérées comme variables ? Comme méritant une étude de leur incidence sur le développement urbain ? Est-il envisageable d'utiliser le modèle pour mesurer la force relative de différentes règles ? Par exemple, les contraintes de recul produisent-elles plus ou moins d'effet sur la densification urbaine que les règles relatives aux hauteurs maximales ?*

2) Le choix d'un modèle expérimental amène l'auteur à se centrer sur les règles existantes et leurs effets. Le modèle proposé n'est ni calibré, ni validé en fonction des évolutions récentes. C'est le cas d'un certain nombre de modèles de simulation urbaine. On regrettera néanmoins que l'auteur fournisse peu d'information sur les consommations foncières passées, la taille des parcelles urbanisées, la densité des cellules (20 \* 20 m) urbanisées, le nombre et la localisation d'opérations de division et de densification parcellaire observée au cours des dernières années etc.

Ces informations, plus descriptives et rétrospectives, auraient permis d'apprécier la distance entre les scénarios proposés et un éventuel scénario tendanciel basé sur une prolongation des modes d'urbanisation existants. Ceci nous ramène à la question du caractère « réaliste » du modèle. Si l'on se rapport à la distinctions entre approches KIDS et KISS proposée en page 255, ce qui arrive très tard dans la thèse, on a le sentiment que le modèle proposé n'est, en fin de compte, ni simple, ni descriptif.

*Quelles seraient les modalités de calibration/validation du modèle proposé ? Serait-il efficace de calibrer/valider les trois sous-modèles séparément ou devraient-ils être calibrés/validés ensemble ? Sur base de quelles données, quelles procédures, quelles séries temporelles ? Est-il envisageable de simplifier le modèle ArtiScale pour n'en retenir que les paramètres principaux dans la logique KISS ? Serait il par exemple possible de s'affranchir de la création de voirie et considérer qu'une part des parcelles doit être affectée à de la voirie, sur base d'un raisonnement similaire à ce qui est fait pour le stationnement ?*

3) La comparaison des méthodes d'agrégation permet de distinguer deux formes d'urbanisation : une urbanisation fortement contrainte par des critères d'accessibilité (méthode de Yager) et une urbanisation plus extensive (méthode pondérée). Si nous voyons bien l'intérêt de comparer ces deux approches au moment de la génération des scénarios, il nous paraît discutable d'utiliser deux métriques distinctes pour comparer leurs performances relatives en terme de niveau d'intérêt des cellules sélectionnées.

Le choix opéré pénalise très fortement les simulations réalisées sur base de la méthode de Yager (valeurs beaucoup plus faibles en raison de la méthode d'agrégation) et ne permettent pas vraiment de comparer les résultats de différents scénarios.

*N'aurait-il pas été judicieux d'utiliser une méthode d'agrégation commune pour mesurer la « valeur » des cellules dans différents scénarios ? Ceci supposerait de distinguer la méthode d'agrégation utilisée pour générer les résultats de celle utilisée pour comparer les résultats de différents jeux de simulations. Par ailleurs, ne serait-il pas pertinent de proposer une méthode d'agrégation spatiale permettant de comparer, entre différentes variantes du modèle, le niveau d'intérêt de plusieurs cellules urbanisées de manière combinée à l'échelle d'un découpage supérieur de la grille fractale, d'une municipalité etc. ? Quelle méthode d'agrégation proposer à cet effet ?*

4) Le choix opéré dans l'algorithme ArtiScale et son couplage avec SimPLU3D de générer et d'occuper des parcelles non connectées à la voirie nous paraît discutable. En particulier, on peut s'étonner du choix opéré d'urbaniser des cellules en coeur de maille, entièrement entourées de parcelles construites et sans accès voiries. Si cette possibilité apparaît de fait ouverte par certains règlement, nous doutons de sa généralisation à de grands nombres de parcelles tel que proposé dans le cadre du modèle.

Par ailleurs, le choix opéré d'urbaniser des cellules en deuxième ou troisième rang sans nous paraît contradictoire avec l'objectif du modèle de niveau supérieur, à savoir de préserver un contact avec des espaces non urbanisés. Pour rappel, le modèle fractal de MupCity privilégie explicitement une urbanisation qui préserve le contact entre bâti et non bâti (page 47) et ce modèle se propage depuis les décompositions principales jusqu'au maillage de 20m sur 20m, soit une taille de cellule inférieure à la plupart des parcelles bâties.

*Comment se décline la logique fractale adoptée au niveau territorial vers le niveau de la parcelle et du bâtiment ? La logique fractale étant par nature multi-échelle, ne doit-on pas considérer qu'elle doit imprégner les trois sous-modèles ? L'urbanisation de parcelles non connectées à la voirie n'est-il pas un peu rapidement généralisé à l'échelle de grands territoires ?*

5) L'ensemble du modèle est basé sur des règles de nature prescriptive. Nous entendons par là des règles qui contraignent l'espace de solution par des limites explicites portant sur le caractère constructible ou non constructible de certaines cellules, les reculs à respecter, les hauteurs maximales etc. L'urbanisme a tendance à s'orienter aujourd'hui vers une définition plus performantielle de la régulation, à travers des niveaux de densité à atteindre, des objectifs en matière de réduction de lutte contre l'artificialisation des sols, des contraintes en terme de respect de l'intimité ou d'accès aux espaces ouverts et aux aménités pour les logements etc. Ces règles performantielles s'appliquent à différentes échelles urbaines et la conformité de chacune d'elles avec les niveaux inférieurs/supérieurs n'est pas simple à valider.

*Le modèle proposé permet-il de s'orienter vers une formulation de la régulation urbaine plus performantielle que prescriptive ? De quelle manière ? Une approche plus descriptive de l'urbanisation, à travers notamment les niveaux de densité observés dans différentes cellules ne faciliterait-elle pas le basculement vers une approche performantielle ? Le système proposé permet-il de formuler des objectifs performantiels, au niveau municipal*

*ou de l'agglomération, sur base de résultats basés sur des règles prescriptive à travers une exploitation empirique des modèles ?*

Ces remarques et questions doivent être considérées comme autant de pistes d'approfondissement de la thèse, dans le cadre de travaux ultérieurs. Ceci n'élève en rien notre appréciation de la grande qualité scientifique de la thèse sa contribution à l'état des connaissances actuelles.

Il nous apparaît que le travail sur la variabilité des résultats de modélisation constitue une contribution théorique très significative de la thèse. Au vu des résultats du travail, on doit conclure que l'ensemble des modèles d'urbanisation devraient faire systématiquement d'une telle étude de sensibilité, ce qui n'est pas encore le cas à l'heure actuelle. Ces études de sensibilité devraient prendre systématiquement en considération des paramètres techniques à côté des variables scénaristiques. Il s'agit d'une autre conclusion importante du travail. Le travail propose par ailleurs une série d'indicateurs efficaces pour mesurer la sensibilité des modèles, comme la répliquabilité des cellules ou le coefficient de variation des résultats du modèle. Ces indicateurs devraient être repris et complétés dans le cadre de recherches ultérieures.

D'un point de vue opérationnel, la thèse est d'un grand intérêt dans la mesure où elle permet de tester la compatibilité et la conformité de différents systèmes de régulation, à différentes échelles. Elle permet de mettre en évidence la variabilité des solutions envisageables pour l'urbanisation d'un territoire donné, sur base d'un corpus commun de règle. Il serait intéressant d'exploiter les résultats de la thèse dans le cadre d'ateliers scénarios associants décideurs et experts. La grande variabilité des solutions envisagées par le modèle permettrait de mesurer les effets de différents niveaux de règles et de leurs interactions à différentes échelles du territoire. Ceci nécessiterait sans doute une réflexion sur les modalités de visualisation, de consultation et d'annotation des résultats par différents utilisateurs. Ces modalités devraient être adaptées à de gros volumes de données.

Nous considérons, sur base de ces éléments, que la thèse de Maxime Colomb est de très grande qualité et nous recommandons dès lors qu'elle fasse l'objet d'une soutenance publique.

Liège, le 29 août 2019,

Jacques Teller,  
Professeur ordinaire,  
Directeur du LEMA.