



HAL
open science

Simulation d'un processus de densification du tissu urbain à base d'agents

Florence Curie, Annabelle Mas, Julien Perret, Anne Puissant, Anne Ruas

► **To cite this version:**

Florence Curie, Annabelle Mas, Julien Perret, Anne Puissant, Anne Ruas. Simulation d'un processus de densification du tissu urbain à base d'agents. *Revue Internationale de Géomatique*, 2011, 21 (4), pp.489-511. 10.3166/riig.15.489-511 . hal-03766252

HAL Id: hal-03766252

<https://hal.science/hal-03766252v1>

Submitted on 5 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Simulation d'un processus de densification du tissu urbain à base d'agents

Florence Curie* — Annabelle Mas** — Julien Perret*** — Anne Puissant**** — Anne Ruas****

* UMR ISTO, Université de Tours

Parc de Grandmont, 37200 Tours, {prenom.nom}@univ-tours.fr

** Laboratoire CEDETE, Université d'Orléans

10 rue de tours, BP 46527, 45065 Orléans cedex 2, {prenom.nom}@univ-orleans.fr

*** Laboratoire COGIT, IGN

73 avenue de Paris, 94160 Saint Mandé, {prenom.nom}@ign.fr

**** Laboratoire Image, Ville, Environnement, Université de Strasbourg

3 rue de l'Argonne, 67000 Strasbourg, {prenom.nom}@live-cnrs.unistra.fr

RÉSUMÉ. L'approche présentée dans cet article utilise un système multi-agent pour modéliser du point de vue morphologique les propriétés auto-organisatrices des systèmes complexes urbains et vise à fournir un outil permettant d'étudier la croissance urbaine. Le système multi-agent proposé comporte une hiérarchie d'agents topographiques (e.g. les bâtiments, les routes, les cours d'eau, les îlots, la ville) qui peuvent être construits, modifiés, fusionnés, découpés, restructurés et détruits au cours du temps. Le comportement de chaque agent est contrôlé par un ensemble de règles d'évolution, de contraintes et d'actions associées. La question particulière traitée dans cet article concerne les méthodes de densification qui permettent la création de nouveaux agents tout en respectant une organisation spatiale et un certain processus de construction.

ABSTRACT. The approach presented in this paper uses a multi-agent system to model the self-organising properties of urban systems from a morphological point of view and aims at providing a tool to study urban growth. The proposed multi-agent system is a hierarchy of topographic agents (e.g. buildings, roads, rivers or urban blocks) that are built, modified, merged, split, restructured and destroyed over time. Each agent's behaviour is controlled by a set of evolution rules, constraints and associated actions. This paper deals especially with populating functions which allow the creation of new agents while respecting a certain spatial organisation and a certain construction process.

MOTS-CLÉS : tissu urbain, simulation urbaine, systèmes multi-agents, croissance urbaine, densification

KEYWORDS: urban fabric, urban simulation, multi-agent systems, urban growth, densification

1. Introduction

La simulation des dynamiques urbaines est un domaine de recherche très actif. Parmi les approches existantes, l'approche morphologique présente l'intérêt de limiter le nombre de variables manipulées et de simplifier la mise en place et la maintenance de bases de données historiques permettant l'étude de telles dynamiques puisque les informations morphologiques sont plus facilement mesurables que les informations socio-démographiques (Batty *et al.*, 1986). De nombreuses méthodes existent pour représenter et étudier les dynamiques spatiales. (Rodier *et al.*, 2007 ; Lefebvre *et al.*, 2008) proposent notamment un modèle pour étudier les dynamiques urbaines dans la longue durée.

En termes de simulation, les automates cellulaires ont été très utilisés pour la simulation urbaine et ont permis la simulation de nombreux phénomènes complexes tels que la croissance et la ségrégation (Couclelis, 1997 ; White *et al.*, 1997 ; Batty *et al.*, 2004 ; Batty, 2008 ; Werner, 2009). Néanmoins, comme le font remarquer de nombreux auteurs, les automates cellulaires supposent une certaine homogénéité de l'espace et du voisinage des cellules de l'automate. Ainsi, plusieurs modèles ont été proposés afin d'intégrer l'influence du réseau urbain et de contraintes spatiales sur l'accessibilité des cellules de tels automates (Batty *et al.*, 1997). D'autres auteurs ont par ailleurs proposé d'étendre le formalisme en y intégrant la notion de graphe (O'Sullivan, 2000 ; O'Sullivan, 2001 ; Badariotti *et al.*, 2007) qui permet de mieux prendre en compte les voisinages des objets géographiques et les irrégularités de la structure urbaine. Les systèmes multi-agents (Ferber, 1999) ont été utilisés à de nombreuses échelles dans la simulation urbaine. Le formalisme agent est en effet particulièrement adapté lorsqu'il s'agit de modéliser un grand nombre d'entités en interaction entre elles et avec leur environnement. À l'échelle individuelle, les systèmes multi-agents sont par exemple utilisés pour modéliser le choix de localisation d'agents ménages (Arentze *et al.*, 2003). À l'échelle de l'agglomération, ils permettent de modéliser les rapports entre mobilités locales et la transformation des espaces dans les aires urbaines (Raux *et al.*, 2006 ; Raux *et al.*, 2010). Ils sont aussi utilisés pour simuler l'évolution de systèmes de villes (Sanders *et al.*, 2007).

Le projet GeOpenSim vise au développement d'une plate-forme Open Source pour l'analyse et la simulation des dynamiques urbaines à l'aide de bases de données topographiques historiques (Perret *et al.*, 2009). Ces dernières sont construites à l'aide de bases de données topographiques récentes ainsi que de photographies aériennes et/ou de cartes historiques (Mas *et al.*, 2010). Ces bases de données sont analysées afin d'identifier des règles d'évolution morphologiques à différents niveaux mésogéographiques (*e.g.* la ville ou l'îlot), ainsi que des statistiques sur des objets spécifiques comme les bâtiments. Chaque simulation peut ainsi être paramétrée à l'aide de règles d'évolution provenant de l'analyse automatique des données historiques, mais aussi de règles énoncées par des experts. Ces règles sont en principe similaires aux règles de transition des automates cellulaires et peuvent prendre en compte le voisinage des agents ainsi que leurs différents attributs (pour les îlots : la densité, le type d'îlot, la localisation de l'îlot par rapport à la ville). Ces règles peuvent par ailleurs changer

en fonction de la période à laquelle l'évolution simulée a lieu, permettant ainsi d'implémenter des évolutions spécifiques à une période donnée. Ces évolutions peuvent différer en vitesse (la croissance d'une ville n'est pas un processus régulier) et en nature.

En plus de ces règles d'évolution, la simulation requiert d'autres règles, les méthodes de densification, plus spécifiques et locales, afin de densifier la ville avec de nouveaux éléments micro (bâtiments, routes) tout en respectant certaines contraintes quant à l'organisation spatiale souhaitée. Ces différents éléments micro correspondent à des agents dont les règles et les contraintes sont définies par les méthodes de densification. À ces règles et contraintes sont associées des actions qui permettent de modéliser les différentes stratégies que les agents peuvent utiliser pendant leur évolution. La notion de densification utilisée ici désigne le processus de remplissage de l'espace, en particulier des îlots, par des objets géographiques tels que les bâtiments ou les routes. Une méthode de densification spécifie ainsi la façon dont ce processus de remplissage se déroule. De telles méthodes peuvent, par exemple, spécifier la façon dont les îlots se densifient en reproduisant leur structure interne, en se restructurant ou en diversifiant leur structure (Curie *et al.*, 2010 ; Perret *et al.*, 2010a ; Perret *et al.*, 2010b). L'article détaille certaines méthodes de densification d'îlots utilisées dans GeOpenSim et le paramétrage de telles méthodes.

Les deux premières sections de l'article présentent les mécanismes de densification urbaine développés dans le cadre du projet GeOpenSim à travers les règles d'évolution et les méthodes de densification. Les sections 4, 5 et 6 présentent les méthodes de densification élémentaires proposées pour les zones industrielles, l'habitat collectif et l'habitat individuel ainsi que les résultats de simulation obtenus sur chacun de ces types de zone. Une méthode de densification mixte correspondant à la combinaison de méthodes de densification élémentaire est détaillée dans la section 7. Les différentes méthodes présentées sont ensuite appliquées à l'échelle d'une zone d'étude dans la section 8. Enfin, la section 9 conclut cet article, discute les résultats et présente les perspectives ouvertes par ces travaux.

2. Règles d'évolution

Le système de densification urbaine proposé dans cet article est à base d'agents topographiques hiérarchisés. Ces agents allant des objets micro (les routes et les bâtiments) aux objets meso (les îlots, les quartiers et les villes) peuvent être construits, modifiés, fusionnés, découpés, restructurés et détruits au cours du temps. La dynamique globale du système est contrôlée par les règles d'évolution qui sont définies soit par des experts géographes soit par analyse des statistiques acquises sur une zone donnée. Bien que ces règles concernent toutes les échelles mésogéographiques, de la ville à l'îlot, cet article ne traite que des règles d'évolution au niveau des îlots.

Les règles spécifiques à l'îlot fixent l'état objectif auquel doit tendre l'îlot au cours de la simulation à travers deux principales caractéristiques : la densité objec-

tif et le type objectif (zone pavillonnaire, zone d'habitat collectif...). Dans le cadre du projet GeOpenSim, une classification spécifique adaptée à l'étude des îlots urbains a été développée par des experts géographes en s'appuyant sur l'analyse des villes de Strasbourg et d'Orléans. Un algorithme d'apprentissage supervisé développé sur des critères purement morphologiques permet de classer automatiquement les îlots dans l'une des 9 classes de tissus urbains de cette classification (Puissant *et al.*, 2010). Le tableau 2 présente ces différentes classes de tissus urbains auquel fait référence le type objectif.

Les règles d'évolution fixent la densité objectif et le type objectif en tenant compte à la fois des caractéristiques initiales propres de l'îlot (type, densité, distance au centre de la ville) ainsi que du voisinage de l'îlot (type et densité des îlots voisins). À titre d'exemple, une règle d'évolution très simple consisterait à attribuer la densité médiane des îlots voisins à chaque îlot lorsque celle-ci est supérieure à sa densité initiale.

3. Méthodes de densification

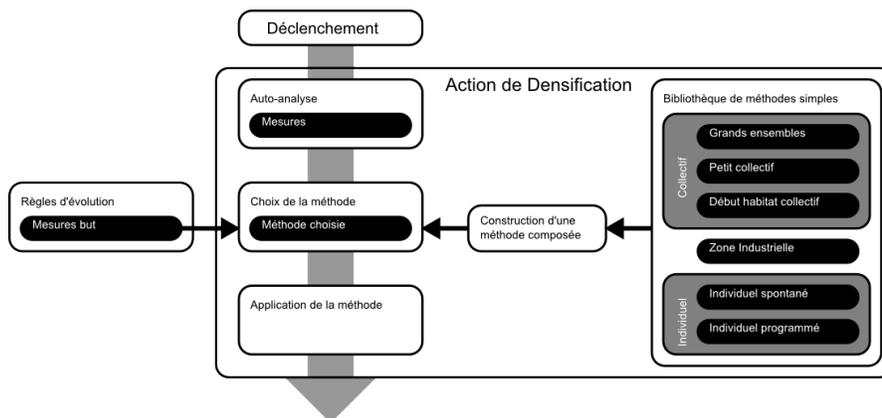


FIGURE 1. *Choix d'une méthode de densification*

Les méthodes de densification définissent précisément les processus dont la dynamique est contrôlée par les règles d'évolution. Elles guident la création de nouveaux objets géographiques et sont paramétrées afin de simuler les spécificités de l'évolution d'un élément mésogéographique particulier. Un îlot peut, par exemple, se densifier ou se restructurer. Le processus s'effectue en trois étapes. Dans un premier temps, l'agent (ici l'îlot) analyse son état à l'aide d'un ensemble de mesures (densité, type de zone). Dans un second temps, il compare ses mesures avec les mesures but fixées par les règles d'évolution et construit, en choisissant parmi la liste des méthodes élémentaires disponibles dans la bibliothèque, celle qui est la plus appropriée (*cf.* figure 1). Dans un troisième et dernier temps, l'agent applique la méthode choisie. Nous présentons ci-dessous les mesures utilisées pour les méthodes de densification, le fonctionnement du modèle agent et les difficultés rencontrées.

3.1. Mesures sélectionnées a priori

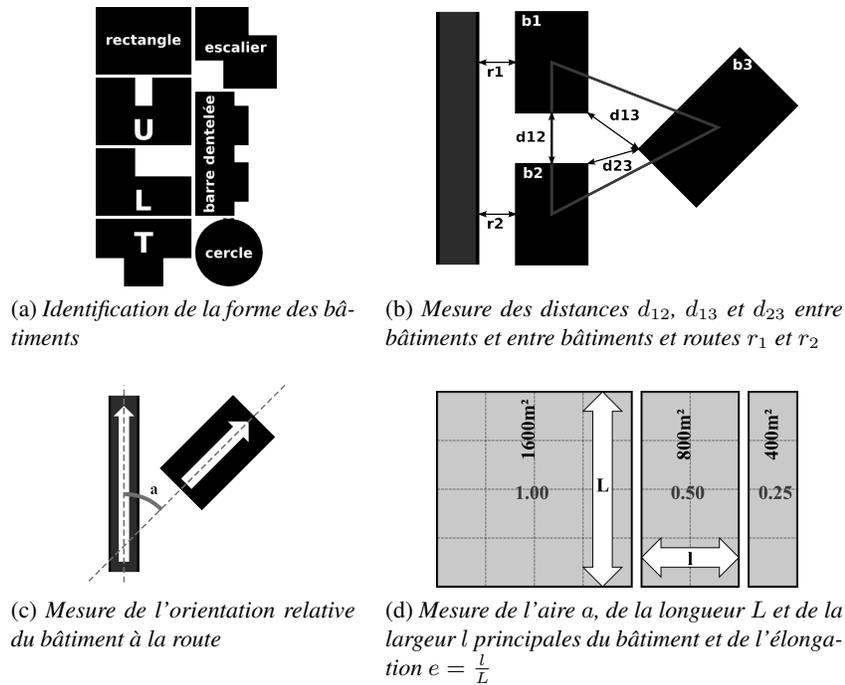


FIGURE 2. Mesures sélectionnées

Afin de définir des méthodes de densification génériques pour la construction de bâtiments au sein d'un îlot urbain, un ensemble de mesures morphologiques sur l'îlot et les bâtiments a été défini (cf. figure 2). Ces mesures concernent d'une part l'ensemble des paramètres nécessaires à créer la géométrie des bâtiments parmi lesquels on peut citer la forme (rectangulaire, en L, en U, en T, en forme d'escalier), la taille (aire, longueur et largeur) et l'élongation, et d'autre part des paramètres de positionnement du bâtiment au sein de l'îlot. Il s'agit ainsi, pour ces dernières mesures, de savoir où et comment placer le nouveau bâtiment dans l'îlot. Les mesures retenues concernent l'orientation du bâtiment par rapport à la route (la plus proche, celle qui donne accès au bâtiment), la distance du bâtiment à cette route, mais aussi la distance entre ce bâtiment et les autres bâtiments proches de l'îlot (les voisins).

3.2. Fonctionnement du modèle agent lors de la densification

Les méthodes de densification fixent pour chaque bâtiment un certain nombre de contraintes correspondant à chacune des mesures définies précédemment. Lors de la

création d'un nouveau bâtiment, l'agent correspondant à ce nouveau bâtiment commence par calculer l'état de satisfaction de ses contraintes imposées par les paramètres de la méthode de densification. La satisfaction globale de l'agent correspond à la moyenne des satisfactions de ses contraintes. Si l'état initial de l'agent bâtiment n'est pas parfait, une liste d'action pouvant potentiellement améliorer son état est déterminée. Cette liste est fonction des contraintes insatisfaites de l'agent et de leur degré d'insatisfaction. Chaque action consiste à déclencher un algorithme de transformation géométrique sur l'agent afin de faire évoluer certaines de ces caractéristiques morphologiques.

À titre d'exemple, un bâtiment ne se trouvant pas à la bonne distance de la route (contrainte fixée par la méthode de densification) n'aura pas un état de satisfaction parfait. De ce fait, il choisira dans la liste des actions un comportement de déplacement par rapport à la route et se l'appliquera afin de tenter d'améliorer son état de satisfaction.

Suite à l'application de cette transformation, l'agent bâtiment réévalue son état et s'il est meilleur que son état précédent, le garde et tente à nouveau de se transformer pour progresser vers un état toujours plus satisfait. Sinon, l'agent retourne dans son état précédent et essaie une autre action de la liste. L'agent bâtiment essaie ainsi de s'appliquer successivement différentes transformations pour atteindre le meilleur état de satisfaction possible. Ces essais sont effectués jusqu'à ce que l'agent bâtiment atteigne un état parfait ou que toutes les actions possibles aient été essayées.

3.3. Difficultés rencontrées

La détermination des méthodes de densification telles qu'elles sont implémentées dans le système nécessite de décrire l'organisation spatiale des objets à l'échelle de l'îlot urbain. Cette échelle d'analyse est assez inhabituelle pour un géographe. Si le commentaire de carte est un exercice largement pratiqué par le géographe (Tiffou, 2000), l'analyse qui en est traditionnellement faite ne correspond pas au niveau d'analyse qui est requis par le système. À la lecture d'une carte topographique (Costa *et al.*, 2008), un géographe est capable de retracer l'histoire de la ville (Wackermann, 2000). Mais à l'échelle de l'îlot, déterminer comment s'est structuré cet îlot est une toute autre problématique. Le niveau d'analyse requis ici correspond à l'analyse morphologique décrite par (Panerai *et al.*, 2001) et (Arnaud, 2008) entre géographie et architecture : « Il s'agit tout d'abord de reconnaître des différences dans l'organisation matérielle de l'espace ou bien dans la manière dont il est occupé, sur la base de représentations cartographiques. [...] Autrement dit, l'analyse découpe l'espace considéré en parties qui présentent des similitudes internes ou qui se distinguent de leurs environs. Derrière ce découpage, on fait l'hypothèse générale que chaque partie correspond à un mode spécifique de production.[...] L'analyse morphologique traite de l'organisation matérielle, celle d'un réseau de rues par exemple ou bien celle du mode de distribution des constructions sur une parcelle » (Arnaud, 2008). Dans le projet GeOpenSim, l'analyse morphologique est réalisée sur les seuls critères topographiques issus de cartes et bases de données topographiques et ne considère

que les formes des objets topographiques. L'objectif final est de concevoir un outil de simulation de l'îlot urbain basé sur des règles de densification suffisamment précises pour créer des routes et placer des bâtiments dont l'agencement fera émerger des structures connues de villes industrialisées sans pour autant se soucier de la position et de la taille exactes des bâtiments.

La détermination des méthodes de densification est basée sur une analyse visuelle réalisée par des experts géographes. Cet article présente le raisonnement mis en place permettant de déduire les paramètres caractéristiques pour construire des méthodes de densification. Le passage de l'analyse géographique aux méthodes de densification fixant les règles de structuration à l'échelle de l'îlot urbain est loin d'être immédiat et nécessite de nombreux ajustements. Des règles qualitatives, *a priori* évidentes pour le géographe, ne sont, en effet, pas forcément simples à transcrire en règles quantitatives utilisables pour la simulation. Les objets rencontrés dans la réalité présentent une grande diversité qu'il est très difficile de formaliser (sous formes de paramètres numériques) et de ce fait, il est très difficile de décrire complètement (dans toute sa complexité) un objet géographique à l'aide de mesures (ou paramètres) de sorte qu'il soit possible de construire un objet semblable lors d'une simulation.

Dans le cadre de cette étude, trois types de densification élémentaires ont été identifiés et caractérisés : (1) zone à caractère industriel ou commercial, (2) habitat collectif et (3) habitat individuel. À partir de ces trois types de densification de base, des densifications mixtes ont ensuite été dérivées par combinaison. Pour chacun des types étudiés, les experts ont identifiés des zones types sur les agglomérations d'Orléans et de Strasbourg (les deux zones tests du projet GeOpenSim). Une caractérisation période par période de chaque zone a été réalisée afin d'obtenir une description des changements récurrents intervenus pour chaque période. Les périodes sont définies entre chaque date ou document de référence. Pour les deux zones d'intérêt (Orléans et Strasbourg), les dates de références sont respectivement 1956/1957, 1976/1978, 1989, 1999 pour les cartes papier au 1/25000 (Orléans) ou les photographies aériennes (Strasbourg), et 2002/2007 pour la BD TOPO®. La comparaison entre zones des changements récurrents nous permet d'établir des comportements types (comportements proches ou identiques) qui sont transcrits en méthodes de densification dans le système.

4. Zones industrielles

4.1. Analyse géographique du processus de densification des zones industrielles

Les zones industrielles sont généralement issues de programmes d'aménagement qui déterminent précisément la localisation et l'emprise de ces zones. Les zones industrielles sont morphologiquement très différentes du reste de la ville. La concentration de bâtiments de très grande taille et de formes compactes et variées dans des secteurs bien déterminés de la ville (proche des voies ferrées, des échangeurs, et en périphérie) sont les critères spécifiques de ces zones.

L'analyse visuelle du processus de densification des zones industrielles a permis de dégager un comportement assez typique de remplissage (*cf.* figure 3) en trois phases : (1) initialisation : création des premiers bâtiments aux extrémités de la zone avec un accès direct au réseau de communication existant (10 % de la zone est exploitée) (2) complément : construction des bâtiments et réseaux complémentaires (environ 60 % de la zone est occupée) (3) finalisation : dernières constructions de bâtiments qui permettent d'atteindre la saturation estimée de la zone. Ces trois phases correspondent aux états d'avancement des zones industrielles, qui semblent naturellement liés à la position des zones industrielles dans l'agglomération. Les plus anciennes se situent naturellement au centre et sont saturées (phase 3 atteinte) alors que, parmi les plus récentes, développées en périphérie, certaines permettent encore une densification (phase 2 ou 3 en cours). Pour les plus anciennes, on note parfois une phase de restructuration interne alors que la saturation a déjà été atteinte.

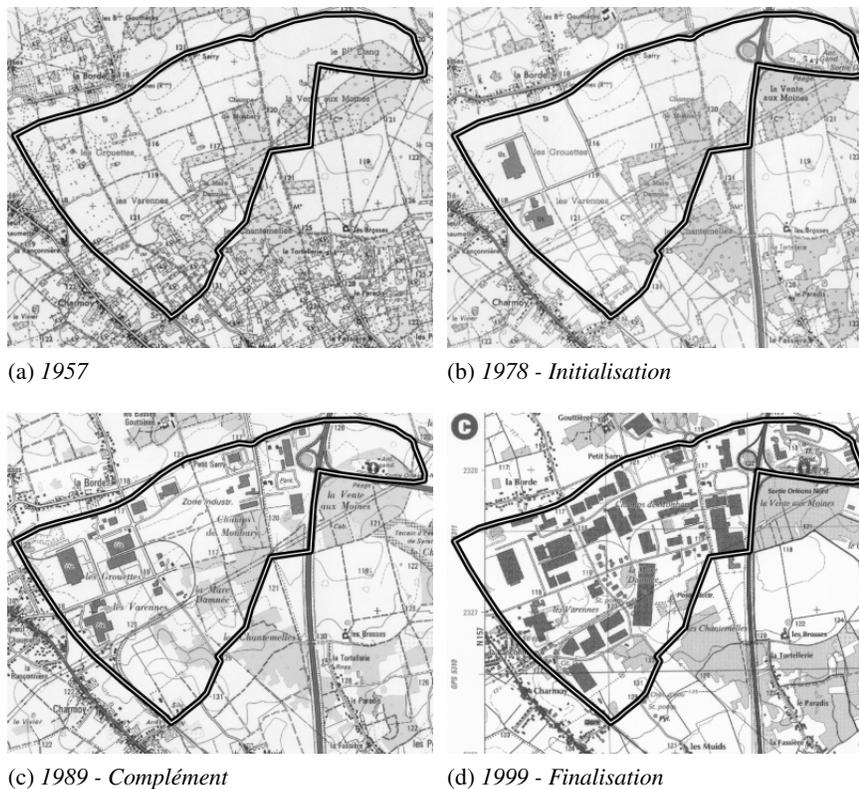


FIGURE 3. Exemple d'évolution de zones industrielles - Orléans

4.2. Ajustement des mesures aux critères géographiques

L'analyse effectuée permet ainsi de mettre en évidence trois grandes phases de remplissage des zones industrielles. Ces trois phases (initialisation, complément et finalisation) sont fortement dépendantes de l'espace encore disponible dans l'îlot pour la construction de nouveaux bâtiments. Ainsi logiquement, la taille des bâtiments va décroître de la phase d'initialisation à la phase de finalisation, l'espace constructible se réduisant progressivement au fur et à mesure du remplissage de l'îlot.

Afin de reproduire cette densification des zones industrielles, plusieurs stratégies peuvent être envisagées. La première consiste à créer une méthode de densification pour chacune des phases de remplissage identifiées. Cette stratégie présente l'inconvénient de nécessiter énormément de seuils, notamment concernant la taille des bâtiments qui est un paramètre susceptible de varier d'une zone industrielle à l'autre (en fonction de la place disponible). Une autre stratégie, celle qui a été adoptée ici, consiste à ne créer qu'une seule méthode de densification et à choisir la taille du bâtiment à construire en fonction de l'espace libre dans l'îlot. Le choix de la taille du bâtiment se fait par tirage aléatoire entre un minimum (de 200 m^2) et un maximum dépendant de l'espace disponible pour construire le bâtiment. Les principaux critères de cette méthode de densification dérivée de l'analyse géographique des zones industrielles sont présentés dans le tableau 1.

4.3. Résultats de simulation

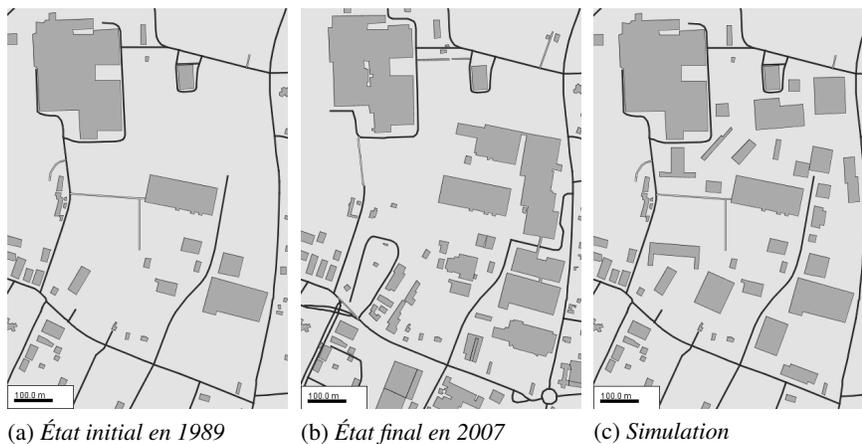


FIGURE 4. Simulation avec la méthode de densification de zone industrielle

Le résultat obtenu pour la densification d'une zone industrielle *via* la méthode de densification définie précédemment (*cf.* figure 4c) peut être comparé à la réalité (*cf.* figure 4b). La distribution des tailles de bâtiments ainsi que le positionnement des bâtiments (par rapport à la route et les uns par rapport aux autres) correspondent en

effet assez bien aux observations. Cependant, plusieurs améliorations peuvent être apportées afin d'améliorer le réalisme de la densification d'une telle zone :

- la forme des bâtiments de ces zones industrielles est extrêmement complexe et variée dans la réalité. Les bâtiments présentent souvent de petits décrochements non reproduits dans cette simulation mais qui pourraient faire l'objet de futurs développements ;

- l'orientation des bâtiments peut également être améliorée. Par défaut, les bâtiments sont positionnés parallèlement à la route la plus proche. Ce positionnement n'est pas forcément adapté au niveau des virages ;

- enfin, l'observation de différentes zones industrielles semble montrer qu'il existe une organisation de l'hétérogénéité de la taille des bâtiments présents. Les petits bâtiments semblent se concentrer sur certaines parties de l'îlot. Si cette analyse se vérifie, la taille du nouveau bâtiment créé devra prendre en compte les caractéristiques de ses plus proches voisins afin de leur ressembler.

5. Habitat collectif

5.1. Analyse géographique du processus de densification des zones d'habitat collectif

Trois grands types d'habitat collectif qui correspondent à une évolution chronologique ont été identifiés : les débuts de l'habitat collectif avec les « barres » des années 1950-1960, les « grands ensembles » des années 1970 et le « petit collectif » qui fait office de compromis depuis le début des années 1980.

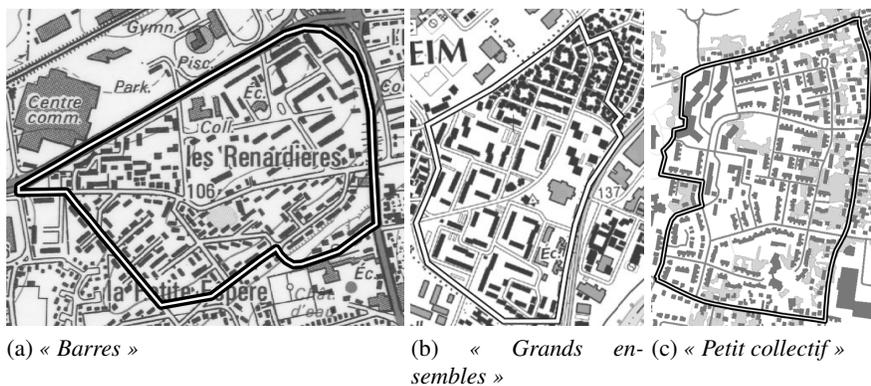


FIGURE 5. Différentes zones d'habitat collectif

« Les barres » correspondent aux premiers immeubles en forme de parallépipèdes étroits et allongés au sol, constitués d'appartements traversants (Gauthiez, 2003). De 300 à 900 m², de forme rectangulaire, l'élongation est évaluée à 0,1 – 0,3,

la largeur des murs est stable, autour de 10 *m*. Ces petites barres se situent à 10 – 15 *m* de la route (afin de limiter les raccords aux divers réseaux), parallèle, en épis ou perpendiculaire à la route et parallèles entre elles avec des décalages. On peut ainsi obtenir des formes de râteau ou d'arêtes de poisson (*cf.* figure 5a). Ce type d'habitat correspond aux premières formes d'habitat collectif, il doit donc être simulé pour des dates antérieures à 1960.

« **Les grands ensembles** » correspondent à de grandes opérations immobilières qui se caractérisent (Lacoste, 1963) par le nombre de logements qu'ils rassemblent (> 1000 logements) en réponse à la crise du logement des années 1960-1970. Cet aménagement urbain comporte le plus souvent plusieurs bâtiments en forme de barres ou de tours (au volume allongé vers le haut) construits suivant une architecture et un plan de masse constituant une unité de conception (Gauthiez, 2003). Sur les zones de ce type, les tours font 300 à 400 *m*², elle sont parfois doubles (jumelées par l'angle) plutôt groupées en milieu d'îlot (grappe de tours disposée en quinconce par exemple (Allain, 2004)). Les immeubles de formes carrées et rectangulaires peuvent atteindre 800 à 1000 *m*² voire 2000 *m*², ils sont parallèles ou perpendiculaires les uns aux autres et forment par association des géométries de type U, L ou S (*cf.* figure 5b).

« **Le petit collectif** » apparaît ensuite dans les années 1980 et continue de se développer à l'heure actuelle. Il s'agit des nouvelles formes d'habitat collectif en réaction au « drame » des grands ensembles. Cet aménagement propose des bâtiments où la verticalité n'est plus de rigueur (3 à 4 étages maximums) avec une emprise au sol plus faible. Il présente 95 % de formes très découpées, dentelées (avancées de garage) de 300 à 1000 *m*², parallèles à la route. Des structures complémentaires (hors habitat) sont parfois associées, il s'agit de formes complexes originales, très imposantes (800 à 1200 *m*²) (*cf.* figure 5c).

5.2. Ajustement des mesures aux critères géographiques

Une méthode de densification a été créée pour chacun des types d'habitat collectif déterminés lors de l'analyse géographique (*cf.* tableau 1). Différentes adaptations ont été nécessaires afin de reproduire au mieux ces zones d'habitat collectif. La principale adaptation concerne sans doute l'épaisseur des bâtiments. Lors de la sélection des paramètres *a priori* nécessaires à la création de nouveaux bâtiments dans un îlot urbain, nous sélectionnons la forme, l'aire et l'élongation. Les premiers tests montrent que ces 3 paramètres, qui nous paraissent suffisants pour contraindre la forme de nouveaux bâtiments, ne permettent pas de respecter certaines contraintes architecturales. Les barres d'habitat collectif des années 1950 et 1960 sont constituées, la plupart du temps, d'appartements traversants. L'épaisseur de ces bâtiments est donc souvent d'environ 10 *m*, ce que les seuls paramètres d'aire et d'élongation ne suffisent pas à fixer avec précision. L'épaisseur du bâtiment est donc ajoutée comme nouveau paramètre nécessaire à la création d'un bâtiment. Une nouvelle forme de bâtiment est également créée pour le petit collectif. Cette forme de barre dentelée assez typique permet d'améliorer le réalisme de notre méthode.

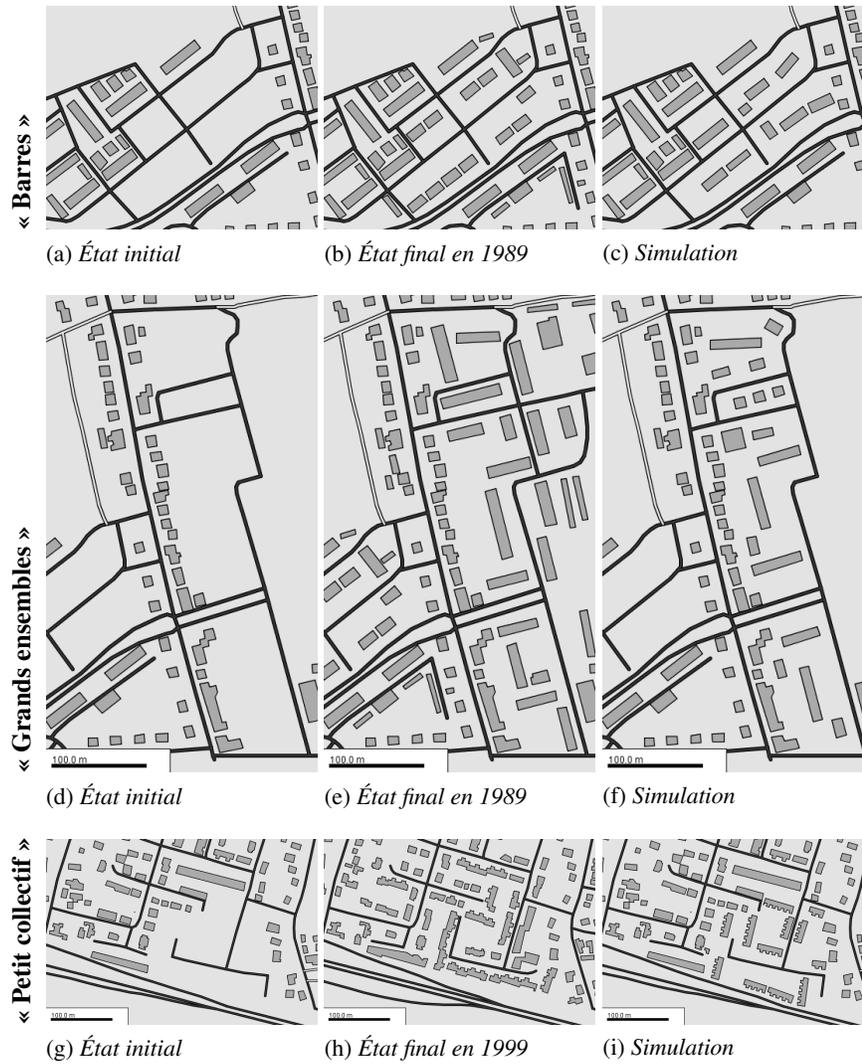


FIGURE 6. Simulation avec les méthodes de densification d'habitat collectif

Nom de la méthode	« Zone industrielle »	Habitat Collectif			Habitat Individuel	
		« Barre »	« Grand ensemble »	« Petit collectif »	« Individuel spon-tané »	« Individuel pla-nifié »
Période	1950-actuel	1945-1960	1960-1980	1980-actuel	1945-actuel	1945-actuel
Distance à la route - distribution - min à max	normale 10 à 20 m	normale 5 à 15 m	normale 5 à 15 m	normale 4 à 10 m	aléatoire 4 à 15 m	normale 8 à 12 m
Distance interbâtiment - distribution - min à max	normale 20 à 40 m	normale 0 à 10 m	normale 5 à 15 m	normale 0 à 10 m	aléatoire 2 à 15 m	normale 8 à 12 m
Orientation du bât. - / à la route - / aux bâtiments	non renseigné non renseigné	parallèle parallèle	parallèle parallèle	parallèle parallèle	parallèle non renseigné	parallèle non renseigné
Type de bâtiment 1 : - forme - aire - distribution - min à max - élongation - épaisseur - fréquence	rectangle, L, U, T, escalier aléatoire 200 à 10000 m ² non renseigné non renseigné 100 %	rectangle normale 300 à 700 m ² non renseigné 10 m 100 %	carré normale 250 à 450 m ² non renseigné non renseigné 10 m 15 %	barre dentelée normale 200 à 1000 m ² non renseigné 10 m 95 %	rectangle aléatoire 60 à 300 m ² 0, 6 à 1 non renseigné 80 %	rectangle normale 100 à 180 m ² 0, 6 à 1 non renseigné 80 %
Type de bâtiment 2 : - forme - aire - distribution - min à max - élongation - épaisseur - fréquence			rectangle, L normale 600 à 1400 m ² non renseigné 10 m 85 %	escalier normale 1500 à 2500 m ² 0, 6 non renseigné 5 %	L, T aléatoire 60 à 300 m ² 0, 6 à 1 non renseigné 20 %	L, T normale 100 à 180 m ² 0, 6 à 1 non renseigné 20 %

TABLEAU 1. Principales caractéristiques des méthodes de densification

5.3. Résultats de simulation

Les deux premières méthodes de densification d'habitat collectif correspondant aux « barres » et aux « grands ensembles » ont été appliquées sur une zone test de Strasbourg. Les simulations (*cf.* figures 6c et 6f) montrent des résultats satisfaisants concernant la forme et le positionnement des bâtiments simulés. Comme pour les zones industrielles, l'orientation des bâtiments peut être améliorée. Les arrangements de bâtiments en forme d'épis, de râteau ou d'arêtes de poisson pourront également être intégrés afin d'améliorer le réalisme de ce type de densification. La troisième méthode correspondant au « petit collectif » est, quant à elle, appliquée sur une zone d'Orléans (*cf.* figure 6i). Le travail réalisé sur la forme des bâtiments pour ce type de densification doit encore être poursuivi, les caractéristiques de forme et de position doivent être affinées afin d'orienter vers la route les avancées correspondant aux garages.

6. Habitat individuel

6.1. Analyse géographique du processus de densification de zone d'habitat individuel

Contrairement à l'habitat collectif, il est difficile d'associer des formes spécifiques d'habitat individuel à une époque. L'étude des cartes et des données topographiques permettent de différencier deux grands types d'habitat individuel (pavillonnaire), hormis l'habitat individuel hérité (présent sur les cartes avant 1957). Il s'agit de l'habitat individuel « spontané » et de l'habitat individuel « planifié ».

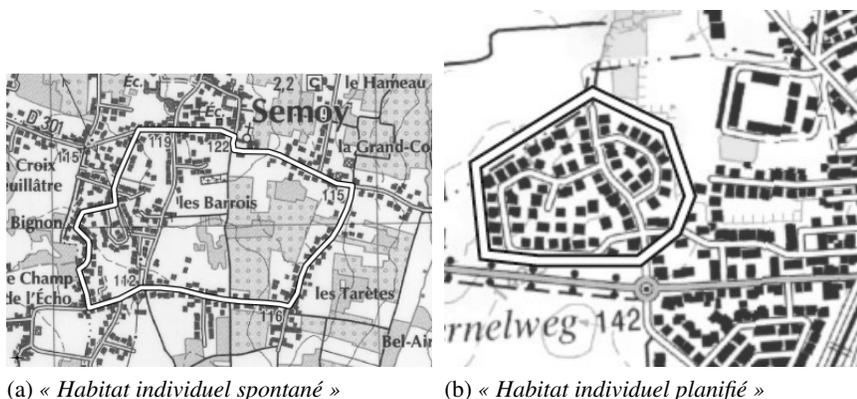


FIGURE 7. Zones d'habitat individuel

« L'habitat individuel spontané » correspond à des habitations construites, en complément de l'habitat hérité dans les espaces interstitiels, en priorité le long des axes de communication existants. Ce type d'habitat dit « spontané » n'est pas exempt de règles mais il répond à une logique de continuité linéaire du bâti (*cf.* figure 7a).

« **L’habitat individuel planifié** » correspond à des bâtiments construits selon un plan d’aménagement issu du (re)découpage des îlots et de la construction de dessertes sans issue. Ce type d’habitat génère un tissu très différencié. Les nouveaux îlots créés pour cet habitat peuvent former soit des boucles à l’intérieur d’îlots plus grands permettant de relier des routes existantes, soit des lobes (ou nodules) à l’extérieur, en bout de réseau existant (*cf.* figure 7b). Le découpage est optimisé pour placer et desservir le maximum de bâtiments pavillonnaires. Les pavillons sont principalement de forme carrée à rectangulaire, parallèle à la route.

Sur la forme, la distance à la route et l’orientation des bâtiments, la très grande régularité observée dans le cadre de l’habitat planifié ne se vérifie pas toujours pour l’habitat spontané. En termes de dynamique, les densifications s’effectuent à partir des zones construites vers les zones peu ou pas construites (avancée du front) de manière à créer des zones bâties compactes ou établir des liaisons entre zones bâties antérieures (2 centres-bourg qui s’agglutinent). On peut noter également une multiplication de l’habitat individuel planifié à partir des années 1980.

6.2. Ajustement des mesures aux critères géographiques

Ce type de densification n’a pas nécessité d’ajustements particuliers probablement car il présente une plus grande homogénéité à la fois dans la forme et la taille des bâtiments qui le compose, lui conférant une plus grande simplicité de mise en œuvre. Les paramètres utilisés pour les méthodes de densification de type habitat individuel sont listés dans le tableau 1.

6.3. Résultats de simulation

Les résultats produits par la simulation de la densification de zones d’habitat individuel sont satisfaisants, notamment pour l’« habitat individuel planifié ». Néanmoins, certaines propriétés des tissus urbains simulés sont à améliorer. En effet, malgré la ressemblance entre les figures 8b et 8c, on remarque l’absence d’alignements au centre de l’îlot entre les bâtiments. Ces alignements, produits à la fois par le parcellaire et les règles d’urbanisme, pourraient être obtenus lors de la simulation en ajoutant des contraintes spécifiques.

7. Zone mixte

7.1. Analyse géographique du processus de densification

Compte tenu de la diversité du tissu en zone urbaine, la simulation de la mixité semble indispensable. Cette mixité est associée aux évolutions techniques, aux méthodes de construction, aux besoins et aux volontés politiques.

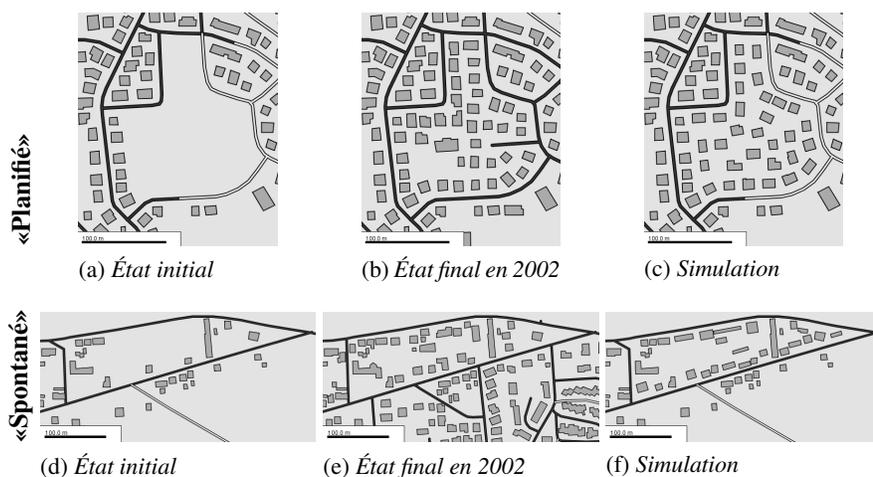


FIGURE 8. Simulation d'une densification avec les méthodes de densification « individuel planifié » et « individuel spontané »

À l'échelle de l'îlot urbain, la mixité est omniprésente. Qu'il s'agisse de la mixité fonctionnelle (activité / habitat) ou mixité de genre (collectif / individuel), elle relève d'un phénomène chronologique : les différents types/genres ont des temporalités différentes. En effet, si la mixité constitue souvent un objectif à atteindre, les étapes de construction de cette mixité sont quant à elles bien souvent dissociées : Une zone d'habitat peut avoir été initiée avec de l'habitat collectif puis complétée dans une seconde période par de l'habitat individuel constituant ainsi une zone d'habitat mixte dont les genres ne sont pas concomitants.

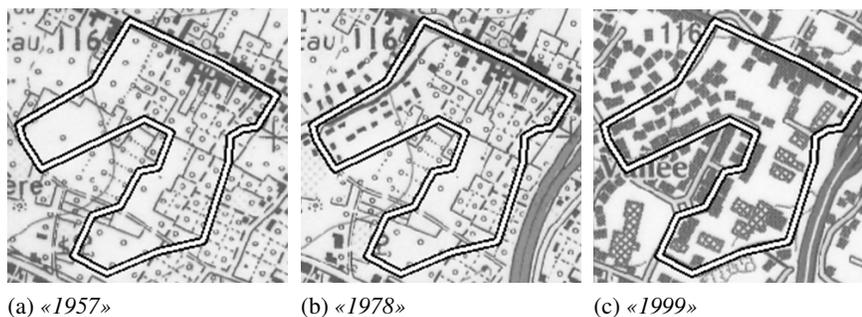


FIGURE 9. Zones mixtes

La figure 9 illustre une mixité en trois étapes : (1) en 1957, la zone d'étude repose sur de l'habitat linéaire hérité des faubourgs de la ville, (2) en 1978, de l'habitat individuel spontané vient s'implanter le long de nouveaux axes de communications sur

deux rangées et (3) en 1999, on constate que la zone ne continue pas à se densifier avec de l'habitat comme on aurait pu s'y attendre. Des emprises spécialisées viennent compléter l'urbanisation de cette zone, la proximité de la voie rapide et son accessibilité lui attribuant un nouvel intérêt économique. On peut ainsi qualifier cet îlot de tissu mixte, intégrant habitat et activités.

L'analyse effectuée sur les îlots mixtes permet de dégager trois aspects importants :

- la mixité peut intervenir à deux niveaux : 1) un niveau fonctionnel : des fonctionnalités différentes liées aux types décrits précédemment : habitat individuel / habitat collectif / emprises spécifiques 2) un niveau plus fin intégrant les différentes formes possibles au sein d'un même type fonctionnel (pour l'habitat individuel, mixer les implantations spontanées et programmées);

- la mixité peut intervenir à des temporalités différentes : 1) en un seul temps (deux types différents s'implantent en même temps dans des proportions variables) 2) ou en plusieurs temps (un type différent à chaque temps);

- la mixité ne concerne pas la localisation : La répartition spatiale des bâtiments de types différents au sein des îlots mixtes n'est pas homogène mais très sectorisée (regroupés par types au sein des îlots).

7.2. Ajustement des mesures aux critères géographiques

Au cours de la simulation, le principe de temporalité vu précédemment peut être intégré par une gestion : 1) en un seul temps – phase où le système va choisir de réaliser aléatoirement un bâtiment correspondant à un type ou l'autre ou, 2) en plusieurs temps – phases où tous les bâtiments construits au cours d'une phase seront du même type. L'analyse géographique du processus de densification mixte permet de mettre en évidence que dans la grande majorité des cas il existe une sectorisation des bâtiments dans l'îlot liée à différentes phases de développement. Ce type de développement correspondrait davantage à une simulation en deux phases. Afin de reproduire au mieux ce phénomène, différents tests sont effectués dissociant ou non des phases de développement.

7.3. Résultats

Les simulations de densification mixte sont réalisées sur une mixité fonctionnelle entre habitat collectif (méthode de densification « Barres ») et habitat individuel (méthode densification « Individuel planifié ») selon deux modes différents : une phase (*cf.* figure 10b) ou 2 phases (*cf.* figure 10c). Les résultats obtenus sont très différents. Comme on pouvait s'y attendre, la simulation en deux phases reproduit beaucoup mieux la sectorisation des bâtiments dans l'îlot et même si le résultat n'est pas tout à fait identique à l'état réel de 1989 (*cf.* figure 10a), sa répartition est meilleure.

Si la simulation en une seule phase présente un moindre intérêt pour la simulation des tissus mixtes anciens, elle pourrait être favorisée dans le cadre de simulations récentes ou futures car elle correspond davantage aux volontés politiques actuelles.

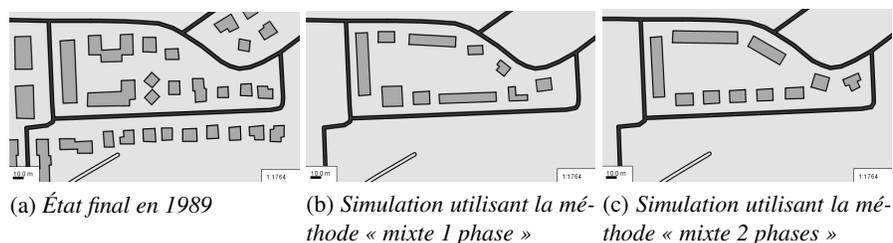


FIGURE 10. Simulation d'une densification avec les méthodes de densification « mixte 1 phase » et « mixte 2 phases »

8. Application des méthodes de densification

Lors de la simulation, des règles d'évolution fixent pour chaque îlot un état objectif à atteindre composé d'une densité objective et d'un type objectif (figure 1). En fonction du type objectif, qui n'est pas nécessairement le même que le type initial, le modèle va devoir sélectionner parmi les méthodes de densification présentées précédemment, celle permettant d'atteindre l'objectif fixé. Dans la plupart des cas, plusieurs méthodes de densification peuvent être appliquées indifféremment. Un îlot de type pavillonnaire avec une densité initiale de 0.1 peut se voir, par exemple, attribuer un type objectif habitat mixte avec une densité objective de 0.3. Dans ce cas, au moins deux solutions sont possibles : 1 - utiliser une méthode de densification d'habitat collectif permettant de compléter l'état initial avec des bâtiments collectifs afin d'aboutir à l'état objectif fixé ou 2 - utiliser une méthode mixte créant à la fois des maisons individuelles et des bâtiments collectifs sans se soucier de l'état initial de l'îlot. Le choix de la méthode de densification à appliquer dépend du type objectif ainsi que de la date qui se révèle fondamentale notamment dans le choix du type de densification collectif à appliquer. Le lien entre le type objectif et les méthodes de densification à appliquer a été formalisé par les experts (tableau 2). On notera l'absence de méthodes dédiées à la création de centre-ville (déjà dense) et du faible nombre de méthodes concernant les emprises spécialisées bâties (seules les zones industrielles sont pour l'instant simulables). Quant aux emprises spécialisées peu ou pas bâties, elles ne nécessitent pas, par définition de méthodes de densification de bâti.

L'affectation des méthodes de densification à appliquer lors de la simulation nécessite encore d'être améliorée puisque l'état initial n'est pas intégré dans le choix de la méthode de densification, il n'est pas possible pour l'instant de passer d'un type pavillonnaire à un type d'habitat mixte en appliquant simplement une méthode de densification de type collectif (le système ne peut pas déduire ce qu'il manque pour

changer de type). Dans ce cas de figure, une méthode mixte sera nécessairement appliquée.



FIGURE 11. *Carte des méthodes de densification sélectionnée*

Comme pour la définition des méthodes de densification, le lien entre les types objectifs et les méthodes de densification est paramétrable par un utilisateur de manière à pouvoir s'adapter aux spécificités d'une zone particulière ou afin de tester des hypothèses de travail. D'autres types de densification et d'autres liens pourront donc venir enrichir les types définis ici et permettront dans le futur des simulations plus réalistes et plus complexes. La figure 11 présente un exemple de répartition des principales méthodes de densification choisies sur une zone. La taille des cercles est proportionnelle à la taille de l'îlot et non pas au nombre de bâtiments présents dans l'îlot. Cette représentation, bien que simplifiée, fait apparaître l'importance de l'intégration de la mixité dans le système, de nombreux cercles montrant deux types associés notamment industriel et individuel. Notons que cette évaluation de la mixité est sous-estimée, puisqu'elle ne prend pas en compte la mixité à l'intérieur d'un type fonctionnel (*i.e.* les différentes méthodes de collectif et d'individuel).

Classe de tissu urbain	Méthodes de densification
1. Habitat continu dense de type centre ville ou centre bourg	
2. Habitat discontinu de type pavillonnaire ou individuel	« Individuel spontané » ou « Individuel planifié »
3. Habitat discontinu de type collectif ou grand ensemble	« Barre » ou « Grand ensemble » ou « Petit collectif »
4. Habitat discontinu mixte : <i>Mélange des classes 2 (pavillonnaire) et 3 (grand ensemble)</i>	x % (« Individuel spontané » ou « Individuel planifié ») + $(100 - x)$ % (« Barre » ou « Grand ensemble » ou « Petit collectif »)
5. Tissu urbain discontinu mixte : <i>Mélange de classes d'habitat (classe 1, 2, 3) et de la classe 6 (emprises spécialisées bâties)</i>	x % (« Individuel spontané » ou « Individuel planifié » ou « Barre » ou « Grand ensemble » ou « Petit collectif ») + $(100 - x)$ % (« Zones industrielles »)
6. Emprises spécialisées bâties : <i>Emprises militaires, zones industrielles, commerciales, emprises scolaires et universitaires, emprises hospitalières, emprises publiques ou patrimoniales</i>	« Zones industrielles »
7. Emprises spécialisées peu ou pas bâties : <i>Emprises liées à l'activité d'extraction - carrières, surfaces associées aux réseaux : gare de triage, échangeur, emprises aériennes, ferroviaires et portuaires, équipements sportifs et de loisirs, espaces en mutation ou libres de construction (sols nus, artificiels ou végétalisés)</i>	

TABEAU 2. Liste des classes d'îlots urbains et méthodes de densification associées

9. Conclusion et perspectives

Dans cet article, une formalisation des processus de densification d'îlots est proposée pour simuler la densification des tissus urbains. Cette formalisation s'appuie sur l'analyse visuelle de cartes topographiques et de photographies aériennes entre 1950 et 2010. Les processus identifiés sont implémentés sur la plate-forme GeOpenSim dans des méthodes de densification. Ces dernières sont testées dans le cadre de la simulation d'une densification urbaine sur différentes zones d'Orléans et de Strasbourg à l'aide d'un système multi-agent.

Dans un premier temps, des méthodes de densification élémentaires (zones industrielles, habitat collectif et individuel) sont développées et testées. Comme le montrent les résultats de simulation présentés, les méthodes de densification proposées produisent de très bons résultats, notamment pour l'habitat individuel et collectif (barres et grands ensembles). Lors du travail de formalisation et d'évaluation des résultats, une différence importante est identifiée entre les mesures (quantitatives) *a priori* importantes pour la création et le positionnement des bâtiments (par le simulateur) et les connaissances géographiques (qualitatives) des experts. D'une part, certaines mesures se sont avérées difficiles à utiliser (l'élongation par exemple) et d'autre part, certaines mesures se sont révélées importantes pour le réalisme des résultats de simulation et ont été ajoutées (l'épaisseur par exemple). Ainsi d'autres mesures peuvent être ajoutées afin d'améliorer encore les résultats. Citons, par exemple, la ressemblance entre bâtiments voisins et l'accessibilité au réseau de transport.

Dans un second temps, les méthodes élémentaires développées sont combinées pour produire des méthodes de densification mixte par association de types différents (ex : îlot qui se densifie à 60 % d'individuel et à 40 % de collectif). Des résultats plus réalistes concernant la densification mixte sont obtenus en dissociant dans le temps les différentes phases de densification, ce qui permet une sectorisation à l'intérieur de chaque îlot des différents types. Enfin, l'application des méthodes sur une zone donnée en lien avec la classification développée dans le projet GeOpenSim, permet de souligner l'importance des densifications mixtes dans la simulation et l'absence ou le faible nombre de méthodes de densification spécialisées pour certains type (centre-ville / centre-bourg et emprises spécialisées bâties). L'intégration de types complémentaires pourra donc être prochainement envisagée.

L'ajout de bâtiments par les méthodes de densification nécessite en parallèle le développement d'un réseau de routes. Des méthodes permettant la construction de nouvelles routes seront prochainement intégrées à la plate-forme. Le caractère générique des règles de densification proposées (sur la base de Strasbourg et Orléans) devrait permettre de les utiliser sur d'autres villes. Cependant des adaptations locales seront probablement nécessaires, notamment lors de la simulation sur des tissus urbains non français. Ces adaptations seront facilitées par l'interactivité de la plate-forme qui permet de paramétrer facilement de nouvelles méthodes de densification.

Comme nous l'avons vu dans cet article, la principale difficulté dans la construction de méthodes de densification consiste à formaliser les différents processus de

densification en jeu. Une fois ces processus formalisés, ils peuvent être intégrés dans la simulation, évalués et améliorés. Les principaux paramètres des différents processus identifiés, il devient ensuite possible d'utiliser la simulation pour calibrer au mieux les paramètres des méthodes de densification à l'aide des données historiques.

10. Bibliographie

- Allain R., *Morphologie urbaine - Géographie, aménagement et architecture de la ville*, Armand Colin, 2004.
- Arentze T., Timmermans H., « Modeling agglomeration forces in urban dynamics : a multi-agent system approach », *Proceedings of the 8th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban management*, Sendai, Japon, 2003.
- Arnaud J.-L., *Analyse spatiale, cartographie et histoire urbaine*, Parenthèses, 2008.
- Badariotti A., Banos A., Moreno D., « Conception d'un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine : le modèle Remus », *Cybergeo, Sélection des meilleurs articles de SAGEO 2006*, 2007.
- Batty M., « Cities as complex systems : scaling, interactions, networks, dynamics and urban morphologies », *Working paper. CASA Working Papers (131)*, Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL), London, UK, 2008.
- Batty M., Barros J., Alves S., « Cities : continuity, transformation and emergence », *Working paper. CASA Working Papers (72)*, Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL), London, UK, 2004.
- Batty M., Longley P., « The fractal simulation of urban structure », *Environment and Planning A*, vol. 18, p. 1143-1179, 1986.
- Batty M., Xie Y., « Possible urban automata », *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol. 2, p. 175-192, 1997.
- Costa L., Robert S., *Guide de lecture des cartes anciennes*, Errance, 2008.
- Couclelis H., « From cellular automata to urban models : new principles for model development and implementation », *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol. 2, p. 165-174, 1997.
- Curie F., Perret J., Ruas A., « Simulation of urban blocks densification », *13th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, May, 2010.
- Ferber J., *Multi-Agent Systems : An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*, Addison-Wesley Professional, February, 1999.
- Gauthiez B., *Espace urbain : vocabulaire et morphologie*, Editions du patrimoine, 2003.
- Lacoste Y., « Un problème complexe et débattu : les grands ensembles », *Bulletin de l'association des géographes français*, 1963.
- Lefebvre B., Rodier X., Saligny L., « Understanding urban fabric with the OH_FET model based on social use, space and time », *Archeologia e Calcolatori*, vol. 19, p. 195-214, 2008.
- Mas A., Perret J., Puissant A., Skupinski G., Raymonti A., Weber C., « Méthodes de constitution de bases de données historiques pour le suivi des tissus urbains », *Géomatique expert*, vol. 75, p. 46-52, 2010.

- O'Sullivan D., Graph-based cellular automata models of urban spatial processes, PhD thesis, University College London, London, 2000.
- O'Sullivan D., « Exploring spatial process dynamics using irregular cellular automaton models », *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol. 28, p. 687-705, 2001.
- Panerai P., Castex J., Depaule J., *Formes urbaines : de l'îlot à la barre*, Parenthèses, 2001.
- Perret J., Boffet Mas A., Ruas A., « Understanding Urban Dynamics : the use of vector topographic databases and the creation of spatio-temporal databases », 24th *International Cartography Conference (ICC'09)*, November, 2009.
- Perret J., Curie F., Gaffuri J., Ruas A., « A Multi-Agent System for the simulation of urban dynamics », 10th *European Conference on Complex Systems (ECCS'10)*, Lisbon, Portugal, september, 2010a.
- Perret J., Curie F., Gaffuri J., Ruas A., « Un système multi-agents pour la simulation des dynamiques urbaines », *actes des 18èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA'10)*, october, 2010b.
- Puissant A., Lachiche N., Skupinski G., Braud A., Perret J., « Classification des tissus urbains à partir de données vectorielles - application à Strasbourg », *Colloque International de Géomatique et d'Analyse spatiale (SAGEO'10)*, Toulouse, France, november, 2010.
- Raux C., Jensen P., Edwards M., Marchal F., Mc Breen J., Interactions Localisations Transport. Projet ILOT – Phase I. Rapport final pour la DRAST, Technical report, Laboratoire d'économie des transports - LET - CNRS : UMR5593 - Université Lumière - Lyon II - Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat - Laboratoire de Physique de la Matière Condensée et Nanostructures - LPMCN - CNRS : UMR5586 - Université Claude Bernard - Lyon I - Laboratoire de Physique de l'ENS Lyon - Phys-ENS - CNRS : UMR5672 - École Normale Supérieure de Lyon, 2006. Collectivités auteurs : DRAST ; PREDIT III 2002-2006, Groupe opérationnel n°1 Mobilité, territoires et développement durable (lettre de commande n°05MT5027).114 p. Rapport de recherche.
- Raux C., Jensen P., Edwards M., Marchal F., Mc Breen J., Interactions Localisations Transport. Projet ILOT – Phase II. Rapport final pour la DRI, Technical report, Laboratoire d'Économie des Transports, Lyon, 2010.
- Rodier X., Saligny L., « Modélisation des objets urbains pour l'étude des dynamiques urbaines dans la longue durée », in M. Batton-Hubert, T. Joliveau, S. Lardon (eds), *SAGEO 2007, Rencontres internationales Géomatique et territoire*, 2007.
- Sanders L., Favaro J.-M., Mathian H., Pumain D., Glisse B., « Artificial intelligence and collective agents : the EUROSIM model », *Cybergeo : Revue européenne de géographie*, 2007.
- Tiffou J., *Commenter la carte topographique aux examens et concours*, Armand Colin, 2000.
- Wackermann G., *Géographie urbaine*, Ellipses, 2000.
- Werner P., « Application of Cellular Automata and Map Algebra in Studies of Land Use Changes. The Neighborhood Coefficients Method », *Geoinformatica Polonica*, 2009.
- White R., Engelen G., « Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modeling », *Environment and Planning B : Planning and Design*, vol. 2, p. 235-246, 1997.