
Apports des méthodes d'exploration et de distribution appliquées à la simulation des droits à bâtir

Mickaël Brasebin¹, Paul Chapron^{1,2}, Guillaume Chérel²,
Mathieu Leclaire^{2,3}, Imran Lokhat¹, Julien Perret¹,
Romain Reuillon^{2,3}

1. Université Paris-Est, IGN ENSG, LASTIG COGIT, 73 av. de Paris,
94160 Saint-Mandé, France
prenom.nom@ign.fr

2. Institut des Systèmes Complexes Paris Ile-de-France, CNRS, UPS 3611,
113 rue Nationale, 75013 Paris, France
prenom.nom@iscpif.fr

3. Géographie-cités, CNRS, Paris 1 panthéon Sorbone, Paris 7 Paris Diderot,
UMR 8504, 13 rue du Four, 75006 Paris, France
prenom.nom@parisgeo.cnrs.fr

RÉSUMÉ. Cet article présente l'utilisation de méthodes de distribution des calculs de simulation et d'exploration de modèles de simulation de la plateforme OpenMOLE appliquées à un modèle de simulation de droits à bâtir : SimPLU3D. SimPLU3D simule la construction et le placement de formes bâties à l'échelle de la parcelle en respectant les règles contenues dans un Plan Local d'Urbanisme. La plateforme d'exploration de modèles OpenMOLE a été mobilisée pour deux expérimentations : la distribution du calcul des formes bâties par îlot morphologique à l'échelle de tout un département, et l'exploration de la diversité des formes bâties qu'autorise un PLU pour un îlot urbain d'une vingtaine de parcelles, au moyen de la méthode PSE (Pattern Space Exploration). La mobilisation d'infrastructures de calcul distribué et la parallélisation du calcul coordonnée par OpenMOLE a permis d'obtenir ces résultats en un temps raisonnable. Les premiers résultats présentés sont encourageants et ouvrent des perspectives d'expérimentation opérationnelle à destination d'utilisateurs (aménageurs, élus, etc.).

ABSTRACT. This article exposes the use of distribution and exploration of a simulation model of the OpenMOLE platform on a model of Right to Build assessment: SimPLU3D. SimPLU3D simulates the construction and the positioning of building shapes at the scale of a parcel, abiding by the rules of a Local Urban Planning Schema (french morphological urban regulation PLU). OpenMOLE has been used to conduct two experiments: the distribution of the building shapes computation by morphological

urban islands at the scale of a county and the exploration of the diversity of the possible building shapes at the scale of an urban island, using the Pattern Space Exploration (PSE) method. Using distributed computing services and computation parallelization handled by OpenMOLE, the results have been obtained in a reasonable time. First results are promising and lead to further operational experimentations by end-users.

MOTS-CLÉS : simulation urbaine, exploration de modèle, calculs distribués, constructibilité

KEYWORDS: urban simulation, model exploration, distributed calculation, constructibility

1. Introduction

Dans le domaine de l'aide à l'aménagement urbain, les évolutions scientifiques et technologiques ont permis le développement d'outils de simulation qui modélisent l'influence de phénomènes urbains sur l'évolution de la ville (étalement urbain, déplacements, etc.). Avec la maturation de ces outils, la question de leur usage se pose dans le cadre d'études prospectives pour appuyer les décisions de politiques publiques afin d'évaluer l'influence de différents scénarios envisagés, voire d'en découvrir de nouveaux. Une utilisation éclairée de ces outils nécessite de bien connaître leurs hypothèses de fonctionnement (sensibilité aux paramètres et conditions initiales notamment) et de maîtriser la variabilité des résultats due aux tirages aléatoires utilisés pour représenter des phénomènes incertains (Deffuant *et al.*, 2003; Amblard *et al.*, 2007). Cela requiert d'effectuer de nombreuses simulations d'un même modèle, en répliquant ses exécutions et en faisant varier ses paramètres.

La plateforme OpenMOLE répond à ces enjeux par la distribution de simulations sur des environnements de calcul distribué et par des méthodes innovantes d'exploration de modèles. Cela permet le passage à grande échelle de l'exécution d'un modèle et de donner à voir la variété des scénarios qu'il peut produire.

Dans cet article, nous nous proposons d'appliquer ces méthodes au modèle SimPLU3D qui permet de simuler la constructibilité d'une parcelle à partir de règles issues de Plans Locaux d'Urbanisme (PLU). Nous abordons deux cas d'utilisation et les applications qui en découlent : il s'agit d'une part d'évaluer la constructibilité de la Région Île de France sur la base du PLU existant, en simulant la constructibilité de chacune des parcelles qui la constituent, et d'autre part d'étudier l'influence des paramètres des règles du PLU sur la constructibilité d'un îlot urbain de Strasbourg, en explorant la diversité morphologique des enveloppes constructibles possibles. L'intérêt pour les acteurs de l'aménagement du territoire est double : il permet de clarifier l'effet des réglementations nombreuses et complexes sur la constructibilité du territoire par l'exemple, et de mieux comprendre l'étendue des possibles.

Dans une première partie, l'outil d'exploration de modèles OpenMOLE (section 2) et le modèle SimPLU3D (section 3) sont introduits. Puis, deux applications découlant des méthodes d'OpenMOLE avec le modèle SimPLU3D sont présentées. Elles consistent à distribuer les simulations pour produire une base de constructibilité à grande échelle (section 4) et à étudier la diversité des formes qu'il est possible de produire dans un îlot (section 5). Enfin, un retour d'expérience (section 6) sur l'apport d'OpenMOLE dans ce contexte mettra en valeur l'intérêt d'appliquer ces méthodes et d'autres perspectives de recherche.

2. OpenMOLE : une plate-forme pour l'exploration de modèles

2.1. Exploration d'espaces de paramètres de modèles et OpenMOLE

Un modèle comme SimPLU3D peut être vu comme une fonction (figure 1) dont les arguments représentent les paramètres du modèle (comme les paramètres des formes générées et les valeurs des règles du PLU) et la valeur représente la sortie du modèle (la constructibilité simulée). Il peut s'agir d'un seul nombre ou de données plus complexes comme un vecteur, un graphe, des images... Pour un même modèle, les sorties envisagées diffèrent selon l'étude que l'on souhaite réaliser. Par exemple, lors de la simulation de la constructibilité d'une parcelle, il peut être pertinent de considérer le coefficient d'occupation du sol de cette parcelle, la distribution statistique de ces coefficients à l'échelle d'un quartier ou encore la répartition spatiale des volumes.

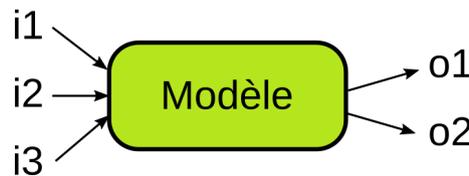


Figure 1. Schéma représentant la notion de modèle. Les valeurs des sorties $o1$ et $o2$ dépendent du modèle et des valeurs des entrées $i1$, $i2$ et $i3$.

Quand un modèle est développé dans un contexte scientifique ou technique, dans une perspective d'explication, de génération de scénarios, ou d'aide à la décision, les expériences de simulation de ce modèle permettent de répondre à plusieurs questions.

Une de ces questions consiste à trouver les valeurs de paramètres qui génèrent une sortie souhaitée : il s'agit d'un problème d'optimisation. Une autre est de déterminer les paramètres ou entrées qui affectent le plus la sortie du modèle : il s'agit d'une analyse de sensibilité. Enfin, on peut vouloir connaître toutes les sorties que le modèle est capable de générer : le champ de ses possibles.

Répondre à ces questions nécessite d'exécuter le modèle de nombreuses fois pour récolter les valeurs de sortie pour différentes valeurs de paramètres.

Souvent, le nombre de paramètres et le nombre de valeurs qu'ils peuvent prendre est trop grand pour obtenir les résultats en un temps raisonnable.

Il faut donc recourir à des stratégies d'exploration de l'espace de paramètres (dans le cas d'OpenMOLE et pour un problème d'optimisation, il s'agit de méta-heuristiques issus de la robotique évolutionnaire (Deb *et al.*, 2002)) pour réduire le nombre de combinaisons de paramètres à évaluer par simulation.

En général, plus on effectue de simulations, plus on peut espérer des résultats précis ou intéressants. Il devient alors crucial d'utiliser des ressources de calcul distribué pour effectuer les simulations en parallèle et réduire le temps d'obtention de ces résultats.

La plateforme OpenMOLE (Reuillon *et al.*, 2013 ; 2015)¹ est développée pour répondre à ces besoins. Elle fournit différentes méthodes d'exploration d'espaces de paramètres et elle facilite le déploiement de ces simulations sur des environnements de calcul distribué, par exemple sur les différents processeurs d'une seule machine, sur un cluster ou une grille de calcul.

2.2. Présentation de la méthode PSE

Parmi les méthodes d'exploration disponibles dans OpenMOLE, la méthode PSE (Chérel *et al.*, 2015) est utilisée dans cette étude. Son objectif est de découvrir les différentes sorties qu'un modèle peut produire. Il s'agit d'un algorithme évolutionnaire.

Un ensemble de jeux de valeurs (paramétrages) est échantillonné dans l'espace de paramètres. Ces paramétrages sont évalués par la simulation du modèle, qui produit une valeur de sortie pour chacun de ces paramétrages. Une mesure de rareté des valeurs de sortie est définie, par exemple en comptant leurs occurrences Annexe B.

Sur la base de cette mesure de rareté, les paramétrages des simulations dont les sorties sont les plus rares sont sélectionnés, recombinaison et mutés, afin de générer de nouveaux jeux de valeurs.

L'idée est qu'en sélectionnant les paramétrages qui produisent des sorties rares, les chances de produire de nouveaux paramétrages qui vont donner des valeurs de sorties que l'on a jamais observées auparavant augmentent.

Il n'y a pas de critère d'arrêt naturel car il est en général impossible de savoir si on a découvert toutes les sorties possibles.

On peut donc choisir de mettre un terme à l'exploration lorsqu'on ne fait plus de nouvelles découvertes ou que les ressources en calcul dont on dispose sont épuisées. La figure 2 (publiée dans (Chérel *et al.*, 2015)) illustre une itération du processus de sélection et de génération de nouvelles valeurs de paramètres.

PSE se distingue des techniques d'optimisation évolutionnaires classiques qui échantillonnent l'espace des paramètres à la recherche d'individus produisant les meilleures solutions possibles selon certains critères que l'utilisateur fournit (la "fitness"). Elle produira non pas un groupe d'individus qui mini-

1. <https://www.openmole.org/>

misent ou maximisent ces critères, mais une population d'individus les plus différents possibles selon ces critères.

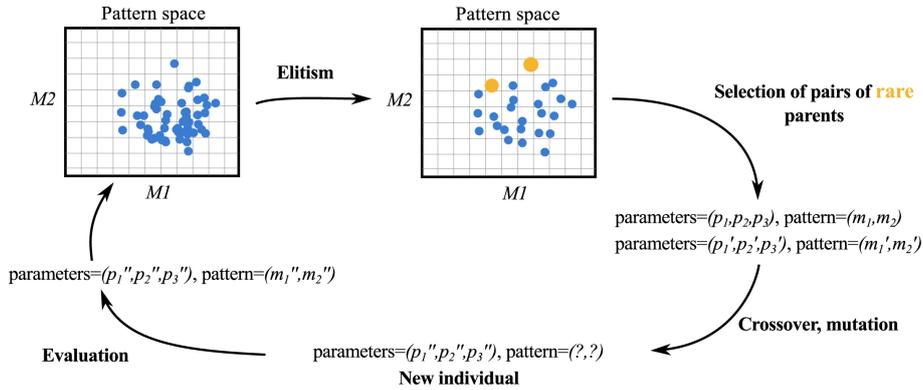


Figure 2. Illustration de la boucle itérative de la méthode PSE pour un modèle à 3 paramètres et 2 variables de sortie M1 et M2. Dans la figure, pattern est synonyme de sortie. L'espace des sorties est discrétisé selon chaque axe, ce qui est représenté par le quadrillage sur la figure. Les sorties rares sont celles qui tombent dans une case où il y a peu de points (pour plus de détails voir annexe 2).

3. SimPLU3D

3.1. Introduction au PLU

Le Plan Local d'Urbanisme (PLU) est un document d'aménagement opérationnel élaboré par l'administration locale (Commune ou EPCI). Il contient un volet réglementaire textuel qui régle le droit à bâtir notamment à travers un ensemble de contraintes morphologiques tri-dimensionnelles. Ce règlement est régi par le Code National de l'Urbanisme qui définit l'intitulé et la portée des 14 articles qui le composent. Ainsi, pour tous les règlements, l'article 10 aura pour objet de limiter la hauteur maximale des constructions. Ces articles s'appliquent sur des zones décrites dans un plan de zonage : il s'agit d'une partition du territoire conçue en fonction d'une typologie des espaces (zone urbaine, zone à urbaniser, zone naturelle, etc.). Si l'intitulé des articles est standardisé, le contenu est laissé à la libre appréciation de l'administration locale qui peut déterminer comment appliquer chacun de ces articles. Dans le cadre de ce travail, nous utiliserons des contraintes retrouvées les plus fréquemment dans les règlements, mais les approches présentées peuvent être adaptées pour prendre en compte de nouvelles règles.

3.2. La présentation du modèle

SimPLU3D² est un outil Open-Source permettant de simuler la constructibilité à l'échelle de la parcelle à travers la génération de formes bâties en exploitant les contraintes issues des règlements des PLU (figure 3).

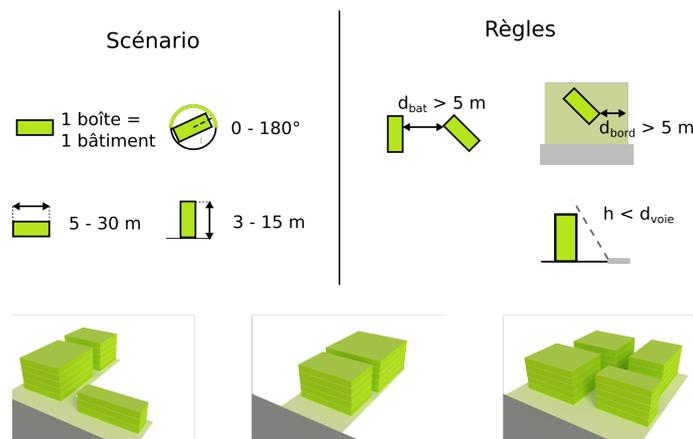


Figure 3. Exemple de simulation utilisant SimPLU3D sur différentes parcelles

La méthode de génération des formes bâties s'appuie sur un algorithme d'optimisation (recuit simulé trans-dimensionnel (Brédif, Tournaire, 2012)) qui vise à optimiser une fonction d'utilité qui représente la stratégie d'un agent constructeur soumis aux contraintes du règlement. Les formes sont composées d'objets géométriques paramétriques³ dont le nombre et les dimensions sont déterminés par l'algorithme.

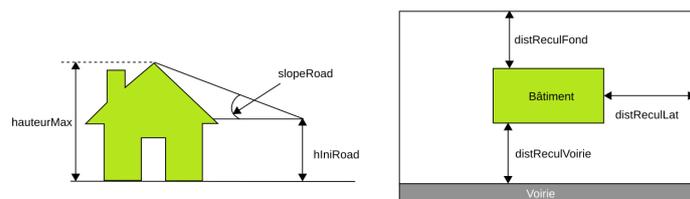


Figure 4. Paramètres du PLU définissant les contraintes géométriques.

La vérification des règles s'appuie sur un environnement géographique, instancié à partir de données géographiques 3D, qui comporte un ensemble de propriétés nécessaires pour exprimer et pour vérifier les règles⁴. Dans le cadre

2. Site Internet de SimPLU3D : <https://github.com/IGNF/simplu3D>

3. Par exemple, des boîtes.

4. Par exemple, connaître le type des limites séparatives pour appliquer des reculs différenciés en fonction de ces types.

de cet article, les contraintes utilisées sont résumées dans la figure 4. La méthode et son implémentation sont décrites de manière plus détaillée dans (Brasebin, 2014) et le modèle de règles a été publié dans (Brasebin, Perret *et al.*, 2016).

D'autres travaux existants proposent de retranscrire de manière géométrique les contraintes réglementaires de documents locaux d'urbanisme que ce soit à travers la production d'enveloppes constructibles (El Makchouni, 1987; Murata, 2004), de l'exploration d'un ensemble pré-défini de bâtiments paramétriques respectant les règles (Coors *et al.*, 2009), la génération de bâtiments (Turkienicz *et al.*, 2008; Parish, Müller, 2001) ou d'extensions bâties (Laurini, Vico, 1999).

Parmi ces approches, l'intérêt de SimPLU est de proposer directement des formes bâties qui pourraient être construites et de s'appuyer sur un modèle générique de règles (présenté dans (Brasebin, Perret *et al.*, 2016)) qui permet d'adapter l'approche à un grand nombre de configurations réglementaires.

De plus, comme le système de génération de formes bâties de SimPLU3D, basé sur une méthode d'optimisation, nécessite peu de connaissances a priori, il s'adapte en théorie mieux à l'ensemble des configurations parcellaires possibles que les approches procédurales (comme décrit dans (Parish, Müller, 2001)) qui nécessitent une description a priori du processus de génération des formes bâties.

3.3. La paramétrisation du modèle

Les entrées de SimPLU3D se composent de :

- **la parcelle** considérée au sein de l'environnement géographique ;
- **les paramètres de forme** qui décrivent les dimensions des objets paramétriques et les contraintes inhérentes à ces objets pour constituer la forme finale (interdire des intersections entre objets, imposer des contraintes architecturales, etc.). Dans cet article, les formes proposées sont composées de boîtes ;
- **des règles du PLU** que les formes bâties doivent respecter ;
- **la fonction d'utilité** qui permet de comparer deux formes pendant le processus d'optimisation afin de déterminer la meilleure. La fonction utilisée dans cet article est le volume bâti afin de traduire le comportement d'un agent qui veut maximiser le bénéfice de ses droits à bâtir ;
- **les paramètres internes de l'algorithme d'optimisation** qui influencent la convergence de l'algorithme.

En sortie, nous obtenons la forme bâtie sur laquelle des indicateurs pourraient être calculés (notamment les mesures utilisées dans PSE pour déterminer la rareté de la forme) et la valeur de la fonction d'utilité.

4. Distribution de simulations de SimPLU3D avec OpenMOLE

4.1. Le contexte

L'IAU-IdF (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la région Île-de-France) est mandaté par l'Observatoire Régional Foncier d'Île-de-France⁵ d'effectuer le suivi des prix fonciers à l'échelle de la région. Dans ce cadre, un des indicateurs étudié permettant de comprendre l'évolution du prix du foncier est la constructibilité parcellaire (ORF, 2015). L'évaluation systématique de cette constructibilité nécessite la prise en compte des réglementations locales du PLU. Auparavant, une estimation relativement simple était produite en utilisant le coefficient d'occupation des sols⁶, mais l'application de la loi ALLUR a interdit l'utilisation de cette règle dans les PLU actuels ou nouveaux. Il est désormais nécessaire de prendre en compte l'influence des règles morphologiques pour déterminer un tel potentiel (ORF, 2016).

L'évaluation de la constructibilité est intéressante dans ce contexte lorsqu'elle est comparée avec le bâti déjà existant. Cette démarche a pour but de détecter des zones susceptibles d'évoluer, pour lesquelles le potentiel constructible est beaucoup plus élevé que ce qui est déjà bâti et qui pourraient intéresser des promoteurs immobiliers. L'objectif n'est pas de simuler les évolutions urbaines, mais d'évaluer un potentiel constructible statique⁷. L'exploitation de SimPLU3D est une piste prometteuse pour effectuer cette évaluation. Comme il s'agit d'évaluer la constructibilité sur un ensemble très important de parcelles ($\simeq 1\,400\,000$ parcelles des agglomération d'IdF), la distribution des calculs avec OpenMOLE s'avère nécessaire.

4.2. La présentation de l'expérimentation

4.2.1. Le choix des paramètres

Une hypothèse fondamentale de cette simulation est que les résultats ne sont pertinents que si les formes bâties produites sont morphologiquement plausibles. Les paramètres utilisés pour décrire la forme (figure 5) se décomposent en paramètres portant sur les boîtes composant la forme et en contraintes portant sur la forme elle-même. Pour la seconde catégorie de paramètres, deux contraintes sont considérées pour simuler l'accès à la lumière, une contrainte de largeur (pour faciliter l'accès à la lumière au centre du bâtiment) et une

5. Site Internet de l'Observatoire Foncier d'Île-de-France : www.orf.asso.fr

6. Ce coefficient indique pour 1 mètre carré de parcelle combien de mètres carrés de surface de plancher il est possible de construire

7. On ne simule pas le fait qu'une parcelle soit bâtie ou non, mais simplement ce que l'on est en capacité de bâtir dessus au regard de la réglementation.

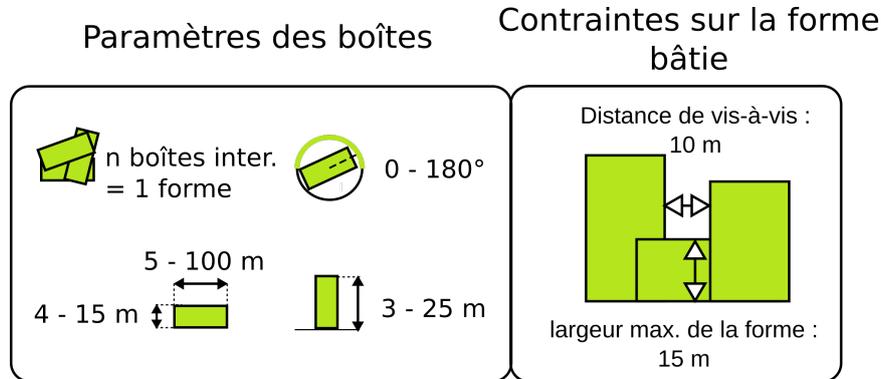


Figure 5. Paramètres de forme utilisés pour décrire la forme bâtie générée.

contrainte de vis-à-vis (pour éviter que la forme bâtie ne fasse de l'ombre à elle-même⁸).

Le choix des paramètres des formes bâties de SimPLU3D a été effectué en discussion avec les urbanistes de l'IAU-IdF, sur la base de comparatifs entre les simulations et des études capacitaires réalisées manuellement par des architectes. L'idée est de vérifier que le simulateur produise des volumétries similaires à ce qu'un architecte est capable de produire.

4.2.2. Les données en entrée

Deux bases de données sont principalement utilisées dans cette expérimentation : le PCI Vecteur⁹ pour décrire l'ensemble des parcelles et la base de données CartoPLU+ produite par l'IAU-IdF qui décrit les plans de zonage et la réglementation qui s'applique à chacune des zones. La réglementation de l'ensemble des PLU des agglomérations d'Île de France a été saisie et mise en base de données. Cette base de données est issue de la vectorisation des plans de zonage et de l'analyse des règlements des PLU des agglomérations franciliennes. Pour chaque zone, une ou deux bandes de constructibilité sont définies par rapport à une distance à la voirie. Chaque bande de constructibilité se voit affecter un ensemble de contraintes à partir des articles 5 à 13 qui contraignent la morphologie des bâtiments. Ainsi, il est possible pour chaque parcelle d'associer le règlement qui s'y applique par une simple jointure spatiale et d'effectuer à l'aide de SimPLU3D des simulations qui prennent en compte ces règles.

8. Dans le cas d'un bâtiment non convexe (e.g. en U ou en L), il est possible qu'une pièce se retrouve dans l'ombre du bâtiment auquel elle appartient.

9. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/cadastre-issu-du-pci-vecteur-30383191/>

4.2.3. L'intégration à OpenMOLE

La distribution des calculs s'effectue à travers le parcours de l'ensemble des parcelles. Afin de répartir les calculs sur un ensemble de nœuds, les parcelles ont été réparties par îlot morphologique. Cette unité de surface est la plus petite importable dans SimPLU3D car une étape d'intégration nécessite de connaître les objets voisins de chacune des limites séparatives (voirie ou autre parcelle). Pour effectuer la distribution, il a suffi de créer un dossier par îlot morphologique et définir un workflow qui simule les formes bâties de toutes les parcelles d'un îlot. OpenMOLE a ensuite distribué les calculs en envoyant chaque dossier correspondant à un îlot sur un nœud calcul.

4.3. Résultats et perspectives

Actuellement, seule une production de test a été effectuée sur le département de Seine-et-Marne. Le temps de calcul est estimé à 4.4 ans sur une seule machine, mais grâce à la distribution les résultats ont été obtenus en seulement 5 jours avec l'organisation vo.complex-system.eu de la grille européenne EGI¹⁰.



Figure 6. Résultats de simulation sur un ensemble de parcelles de l'Île-de-France.

10. egi.eu

Cela représente 205 628 îlots morphologiques et 117 072 formes bâties produites. La figure 6 présente des résultats de simulation sur un extrait de la zone. Elle montre les différentes parcelles sur lesquelles les simulations ont été effectuées et celles sur lesquelles le calcul n'a pu être exécuté pour différentes raisons (absence de règles, erreurs informatiques, parcelles trop contraintes, etc.).

Cette base de données de formes bâties aura vocation à être déposée en Open-Data. Cette expérimentation pourrait être reproduite en prenant en compte le bâti existant et en intégrant non seulement de nouvelles constructions, mais également les propositions d'extensions de bâtis existants, permettant ainsi une réflexion sur les possibilités de densification des espaces urbains. Une autre évolution envisageable serait d'automatiser la calibration des paramètres du modèle et des contraintes appliquées aux formes bâties à partir d'études capacitaires ou de tissus bâtis existants, à plus large échelle que la comparaison capacitaire effectuée avec les études des urbanistes de l'IAU-IdF.

5. Expérimentation PSE

5.1. *Le contexte*

Dans un contexte d'élaboration ou de modification d'un PLU, il est nécessaire d'étudier l'influence des règles d'urbanisme sur un territoire afin de déterminer l'ensemble de paramètres qui correspond le mieux aux évolutions souhaitées de ce territoire. Dès lors, on peut se représenter cette tâche comme l'exploration des paramètres de ces règles.

En pratique, la combinatoire de l'espace des paramètres des règles du PLU est trop élevée pour la simuler exhaustivement : la discrétisation des domaines des sept paramètres de SimPLU3D (présentée figure 4) en une dizaine de valeurs chacun représente près de 22 millions de jeux de règles à simuler. À l'échelle d'un îlot urbain, la constructibilité, le temps de calcul reste prohibitif.

Ainsi, nous allons appliquer la méthode PSE à SimPLU3D, dont les paramètres seront ceux des règles du PLU, et les mesures, des mesures pertinentes pour caractériser la morphologie d'un ensemble de parcelles.

5.2. *La présentation de l'expérimentation*

5.2.1. *Les mesures (Pattern space)*

Pour mesurer l'espace de sortie, différents indicateurs concernant la morphologie des bâtiments existants sont envisageables. Ces indicateurs doivent permettre de discriminer des configurations ayant des caractéristiques thématiques (c'est à dire dans ce cas, ayant trait à l'aménagement urbain) différentes. Différents indicateurs caractérisant la morphologie des formes bâties existent

(Le Néchet, 2015) et peuvent permettre dans le cadre de cette démarche d'évaluer la qualité environnementale des configurations (Adolphe, 2001), de déterminer la ressemblance avec d'autres tissus urbains (Lindenthal, 2017) ou de mettre en valeur des patterns spatiaux (Zhang *et al.*, 2013).

Comme les mesures doivent être valables pour des configurations spatiales changeantes au niveau des formes bâties, nous avons sélectionné des mesures évaluables à l'échelle d'un îlot de parcelles et applicables quel que soit l'îlot. Nous avons choisi des mesures génériques (pas de mesure faisant intervenir un point particulier de l'îlot, comme la visibilité ou l'ouverture de ciel (Johnson, Watson, 1984)) qui fassent sens pour un îlot urbain d'une vingtaine de parcelles.

Ainsi, nous avons retenu quatre mesures afin de caractériser la morphologie des formes bâties :

- L'inégalité des volumes des bâtiments (indice de Gini (Tsai, 2005), calculé sur la distribution du volume des bâtiments de chaque parcelle), dont les valeurs varient entre 0 (volumes homogènes) et 1 (volumes disparates);
- L'auto-corrélation spatiale des volumes bâtis (indice de Moran (Tsai, 2005) de la répartition des volumes de bâtiments par parcelle) qui quantifie la corrélation des volumes des bâtiments voisins;
- La densité de plancher (surface cumulée des étages des bâtiments rapportée à la surface de la parcelle);
- Le coefficient d'occupation des sols (ratio entre la surface construite de l'îlot et la surface de l'îlot).

Les deux premières se focalisent sur les caractéristiques de la distribution du volume bâti, en elle-même (Gini) et dans l'îlot (Moran), tandis que les dernières donnent des indications sur l'occupation du sol.

5.2.2. Les paramètres

Les paramètres des règles du PLU que l'on peut faire varier dans SimPLU3D sont résumés dans la figure 4 :

- `distReculVoirie` est la distance minimale en mètres entre la face avant d'un bâtiment et le bord de la parcelle du côté de la voirie;
- `distReculFond` est la distance minimale en mètres entre la face arrière d'un bâtiment et le fond de la parcelle;
- `distReculLat` est la distance minimale en mètres entre le bâtiment et les limites latérales de la parcelle;
- `hIniRoad` est la hauteur maximale en mètres de la façade d'un bâtiment;
- `hauteurMax` est la hauteur maximale (au faite du toit) en mètres du bâtiment;
- `slopeRoad` est la valeur maximale de l'angle de prospect. Il s'agit de l'angle entre la droite parallèle au sol à une hauteur de `hIniRoad` et la droite

passant par le faite du toit et coupant la première droite;

- `maximalCES` est la densité bâtie surfacique maximale calculée à la parcelle.

Les domaines de variations des paramètres et des mesures sont résumés dans le tableau 2.

Tableau 1.

| espace de paramètres P | | espace de mesure M | |
|--------------------------|-------------|----------------------|------------------------|
| distReculVoirie | [0.0; 10.0] | gini | [0.0; 1.0] $q = 0.1$ |
| distReculFond | [0.0; 10.0] | morán | [-0.2; 0.5] $q = 0.01$ |
| distReculLat | [0.0; 5.0] | densité | [1.0; 8.0] $q = 0.2$ |
| maximalCES | [0.3; 1.0] | coverageRatio | [0.0; 1.0] $q = 0.1$ |
| hIniRoad | [0.0; 15.0] | | |
| slopeRoad | [0.5; 3.0] | | |
| hauteurMax | [6.0; 24.0] | | |

Tableau 2. Valeurs des domaines des espaces E et S et valeur des quanta q de discrétisation

5.2.3. Intégration à OpenMOLE

Les domaines de variation des mesures ont été définis et discrétisés empiriquement, sur la base d'explorations préalables, de façon à avoir un bon compromis entre précision et temps de calcul. Par exemple, si l'indice de Moran peut théoriquement varier entre -1 et 1, la taille de l'îlot sur lequel nous avons lancé l'exploration PSE ne permet pas d'excéder en pratique les valeurs -0.2 et 0.5. De même, la mesure de densité de plancher, au vu de la taille des parcelles, n'a pas besoin d'être discrétisée au delà du dixième pour discriminer des situations qualitativement différentes.

5.3. Résultats et perspectives

L'expérimentation a mobilisé 4000 nœuds de la grille de calcul EGI¹¹ pendant une quinzaine de jours, pour produire 3655 formes bâties sur un îlot du quartier de Neudorf, à Strasbourg. Cet îlot comporte 18 parcelles. Les résultats de PSE se présentent sous la forme d'un tableau, où chaque ligne correspond à une simulation de SimPLU3D sur l'îlot.

Ces résultats sont visualisés dans une interface graphique (annexe 1) qui présente l'ensemble des formes bâties découvertes par PSE. Une démonstration de l'application se trouve à l'adresse <https://simplu.openmole.org>. Des curseurs permettent à l'utilisateur de définir des intervalles de valeurs pour chacun des paramètres du PLU, pour n'afficher que les formes dont les paramètres appartiennent à cet intervalle, pour chaque paramètre. L'interface et des résultats pour des valeurs extrêmes de mesures sont présentés en annexe Annexe A.

11. Site internet de la grille de calcul EGI : egi.eu

Cette visualisation permet de jouer avec le PLU et d’observer l’effet de la modification d’une règle sur les formes constructibles : il permet ainsi d’explorer les scénarios de constructions de l’îlot. Afin d’arriver à proposer un outil fonctionnel, il serait nécessaire de rejouer les simulations avec des valeurs de règles et des mesures utiles par rapport à un contexte d’expérimentation. L’interface proposée actuellement est une preuve de concept et il serait nécessaire de travailler sur la géovisualisation des résultats, afin de rendre compréhensible les formes bâties, et les interactions, comme par exemple, mettre en avant les différences de formes entre deux scénarios visualisés, afin d’obtenir une maquette opérationnelle. Sur ce sujet, de premiers éléments de proposition sont envisagés dans (Brasebin, Christophe *et al.*, 2016).

6. Discussion

L’intégration dans OpenMOLE nous a permis d’accéder facilement à un ensemble d’outils très utiles pour explorer les capacités du modèle SimPLU3D. Cette intégration a été grandement simplifiée du fait que l’implémentation du modèle expose les paramètres et les rend facilement modifiables. Ainsi, ces facilités sont très encourageantes pour systématiser l’application de ces méthodes d’exploration. Le code et la documentation des expérimentations présentées sont disponibles sur Internet (<https://github.com/IGNF/simplu3D-openmole>).

Tout d’abord, l’application de la méthode PSE a permis de comprendre l’expressivité réelle du modèle et de ses limites. En étudiant les variations des paramètres des règles, il est possible d’observer les formes que SimPLU3D est capable de produire. Cela permet de donner une intuition sur les différents types de tissu urbains que l’on est capable d’atteindre avec ce modèle. Il est ainsi envisageable de modifier les paramètres et contraintes internes à la génération de formes si les résultats produits ne sont pas pertinents ou si l’on atteint pas certains types de formes urbaines. De la même manière, il est envisageable d’explorer de la même manière que les règles d’urbanisme ces paramètres de génération de formes pour explorer de manière plus systématique en appliquant la méthode PSE.

L’utilisation de PSE pose la question des mesures pertinentes pour évaluer la diversité des formes bâties. Si dans cet article, quatre mesures sont envisagées, il est possible d’appliquer la méthode avec n’importe quelle mesure numérique s’appuyant sur la morphologie de tissus urbains. L’application de la méthode offre un outil de réflexion pour déterminer la capacité de ces mesures pour qualifier positivement ou négativement la qualité d’un espace urbain.

À un niveau applicatif, l’application de la méthode PSE pourrait être un outil pertinent pour l’aide à la décision et à la conception de documents d’aménagement. En permettant l’exploration de formes diverses, il offre la possibilité à un concepteur de choisir entre les différentes évolutions possibles d’un territoire. Une option dans ce cadre pourrait être d’utiliser les indicateurs évoqués

dans l'article pour ressembler aux caractéristiques de tissus urbains existants ayant des qualités intéressantes ou pour assurer une continuité morphologique urbaine. Comme la conception en planification urbaine est un processus itératif prenant en compte les enjeux des territoires et les points de vue des acteurs, l'utilisation de ces outils d'exploration offre la possibilité de tester différentes mesures pour qualifier les espaces et permettre de choisir un meilleur compromis. L'utilisation de mesures numériques est par ailleurs l'occasion d'explicitier les indicateurs qui décrivent ce qu'est un quartier souhaitable ou non-souhaitable. Par exemple, la notion d'harmonie architecturale est fréquemment retrouvée dans les documents d'aménagement, mais il est difficile de l'explicitier. En explorant différentes mesures de la ville, il pourrait être possible de déterminer celles qui permettent effectivement de produire des formes harmonieuses.

L'évaluation systématisée des politiques publiques pourraient être un levier intéressant pour comprendre l'influence de la modification d'une loi sur un territoire. Ces dernières années, plusieurs lois ont modifié l'application du PLU sans avoir été évaluées. On peut se demander, par exemple, comment la loi ALLUR qui a supprimé l'article 14 du PLU modifie la constructibilité ou quelle est l'influence de la loi ¹² qui a autorisé la majoration de 20% des règles du PLU.

Un résultat non-envisagé était la possibilité d'utiliser OpenMOLE comme une bibliothèque de distribution des calculs. La distribution a été ici facilitée par le fait qu'il est simplement possible de rendre les simulations indépendantes les unes des autres. Le fait de simuler sur une zone aussi grande que l'ensemble des parcelles des agglomérations de Seine-et-Marne a permis de confronter le simulateur à des configurations plus complexes que celles envisagées dans la phase de calibration. Un certain nombre d'erreurs ont été rencontrées, principalement dues à des erreurs dans la bibliothèque de calcul géométrique. Ainsi, ces traitements ont été rendus plus robustes en vue des expérimentations finales.

Au final, l'application d'OpenMOLE à SimPLU3D a tenu ses promesses. Les expérimentations ont permis de montrer que la méthode fonctionne et qu'il est désormais envisageable de réaliser des expérimentations avec des utilisateurs autour de l'exploration du modèle (laboratoire virtuel). Dans le future, les évolutions d'OpenMOLE laissent envisager d'autres utilisations possibles. Tout d'abord, l'ajout de nouvelles méthodes qui recherchent des antécédents d'un pattern souhaitable ou non-souhaitable (un pattern souhaitable étant défini préalablement) permettront de déterminer les gammes de paramètres de SimPLU3D qui génèrent différents types de tissus bâtis exemples et d'apporter des éléments de réflexion sur la morphogenèse urbaine.

12. Loi n° 2012-955 du 6 août 2012

7. Conclusion

L'exploration d'un modèle par calcul intensif via une plateforme comme OpenMOLE permet d'étendre significativement la portée de ses résultats pour un coût de mise en place minime.

La première retombée concerne l'échelle des résultats produits : SimPLU3D, initialement conçu pour simuler la constructibilité d'une parcelle, a été mobilisé pour simuler la constructibilité d'un département (et bientôt d'une région). Le résultat produit est bien plus précis que l'estimation initiale basée sur le coefficient d'occupation du sol, rendu caduque par la nouvelle réglementation. La seconde retombée concerne la mise à disposition à l'utilisateur de la diversité des scénarios que peut produire SimPLU3D, ce qui lui permet d'une part de les comparer les uns par rapport aux autres et d'autre part d'observer l'effet d'un changement de réglementation sur ces scénarios.

D'un point de vue scientifique et expérimental, le passage à l'échelle et l'exploration du potentiel d'un modèle de simulation révèle ses limites et son potentiel d'une façon inédite : l'exécution à grande échelle révèle des comportements que l'expérimentation habituelle ne permet pas d'entrevoir (cas particuliers, cas limites) et amène à se poser de nouvelles questions théoriques et thématiques pour raffiner le modèle.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'évaluation statique du potentiel constructible. À l'avenir, nous utiliserons les méthodes proposées dans le cadre de simulations multi-échelles intégrant le PLU et le SCOT (Colomb *et al.*, 2017). Cela permettra d'étudier l'influence mutuelle des deux niveaux de réglementation sur l'étalement urbain.

8. Remerciements

Nous tenons à remercier l'IAU-IdF pour la mise à disposition de sa base de données CartoPLU+ et de son expertise en urbanisme. Nous remercions l'organisation virtuelle "vo.complex-systems.eu" de la grille EGI ainsi que l'initiative de grille nationale (NGI) France Grilles. Enfin, nous remercions les relecteurs pour leurs critiques constructives.

Bibliographie

- Adolphe L. (2001). A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 28, n° 2, p. 183–200.
- Amblard F., Bommel P., Rouchier J. (2007, septembre). Assessment and Validation of Multi-agent Models. In D. Phan, F. Amblard (Eds.), *Multi-Agent Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*, p. 93–114. Bardwell Press.

- Brasebin M. (2014). *Les données géographiques 3D pour simuler l'impact de la réglementation urbaine sur la morphologie du bâti*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.
- Brasebin M., Christophe S., Jacquino F., Vinesse A., Mahon H. (2016, oct). 3D Geovisualization & stylization to manage comprehensive and participative Local Urban Plans. In *11th 3D Geoinfo Conference*, p. 83–91. ISPRS.
- Brasebin M., Perret J., Mustière S., Weber C. (2016). A generic model to exploit urban regulation knowledge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 5, n° 2, p. 14.
- Brédif M., Tournaire O. (2012, août). libjmc: An open-source generic C++ library for stochastic optimization. In *The XXII Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, p. 259-264. ISPRS.
- Chérel G., Reuillon R., Cottineau C. (2015). Beyond corroboration: strengthening model validation by looking for unexpected patterns. *PloS one*, p. 20.
- Colomb M., Brasebin M., Perret J., Tannier C. (2017). Couplage de deux modèles de simulation (mup-city et simplu) pour évaluer l'articulation entre différentes échelles de documents d'urbanisme. In *13e rencontres de théo quant*, p. 5. Université de Besançon.
- Coors V., Hünlich K., On G. (2009). Constraint-based Generation and Visualization of 3D City Models. In J. Lee, S. Zlatanova (Eds.), *3D Geo-Information Sciences*, p. 365–378. Springer Berlin Heidelberg.
- Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. (2002, avril). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *Trans. Evol. Comp*, vol. 6, n° 2, p. 182–197.
- Deffuant G., Amblard F., Duboz R., Ramat E. (2003). Une démarche expérimentale pour la simulation individus-centrée. In *10èmes journées de rochebrune : Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, épistémologie de la simulation*, p. 45–64.
- El Makchouni M. (1987). Un système graphique intelligent d'aide à la conception des plans d'occupation des sols : Sygripos. In *12th urban data management symposium*, p. 204–218.
- Johnson G. T., Watson I. D. (1984, 1^{er} février). The Determination of View-Factors in Urban Canyons. *J. Climate Appl. Meteor.*, vol. 23, n° 2, p. 329–335.
- Laurini R., Vico F. (1999, octobre). 3d symbolic visual simulation of building rule effects in urban master plans. In R. Shibasaki, Z. Shi (Eds.), *The second international workshop on urban 3d/multi-media mapping (um3'99)*, p. 33–40.
- Le Néchet F. (2015, février). De la forme urbaine à la structure métropolitaine : une typologie de la configuration interne des densités pour les principales métropoles européennes de l'Audit Urbain. *Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography*.
- Lindenthal T. (2017). Beauty in the eye of the home-owner: Aesthetic zoning and residential property values. *Real Estate Economics*.
- Murata M. (2004). 3D-GIS Application for Urban Planning based on 3D City Model. In *24th annual esri international user conference*, p. 9–13.

- ORF. (2015, octobre). *Note de conjoncture - les marchés fonciers franciliens*. Rapport technique n° 7. Observatoire régional du foncier.
- ORF. (2016, avril). *Produire 1 million de logements en 15 ans : Quel potentiel foncier ?*. Rapport technique. Observatoire régional du foncier.
- Parish Y. I. H., Müller P. (2001). Procedural modeling of cities. In *Proceedings of the 28th annual conference on computer graphics and interactive techniques*, p. 301–308. New York, NY, USA, ACM.
- Reuillon R., Leclaire M., Passerat-Palmbach J. (2015). Model exploration using openmole a workflow engine for large scale distributed design of experiments and parameter tuning. *CoRR*.
- Reuillon R., Leclaire M., Rey-Coyrehourcq S. (2013). Openmole, a workflow engine specifically tailored for the distributed exploration of simulation models. *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, n° 8, p. 1981 - 1990.
- Tsai Y.-H. (2005). Quantifying urban form: compactness versus' sprawl'. *Urban studies*, vol. 42, n° 1, p. 141–161.
- Turkienicz B., Gonçalves B. B., Grazziotin P. (2008, jan). Cityzoom : A visualization tool for the assessment of planning regulations. *International Journal of Architectural Computing*, vol. 6, n° 1, p. 79–95.
- Zhang X., Ai T., Stoter J., Kraak M.-J., Molenaar M. (2013). Building pattern recognition in topographic data: examples on collinear and curvilinear alignments. *GeoInformatica*, vol. 17, n° 1, p. 1–33.

Annexe A. Annexe 1 : Interface de visualisation des résultats

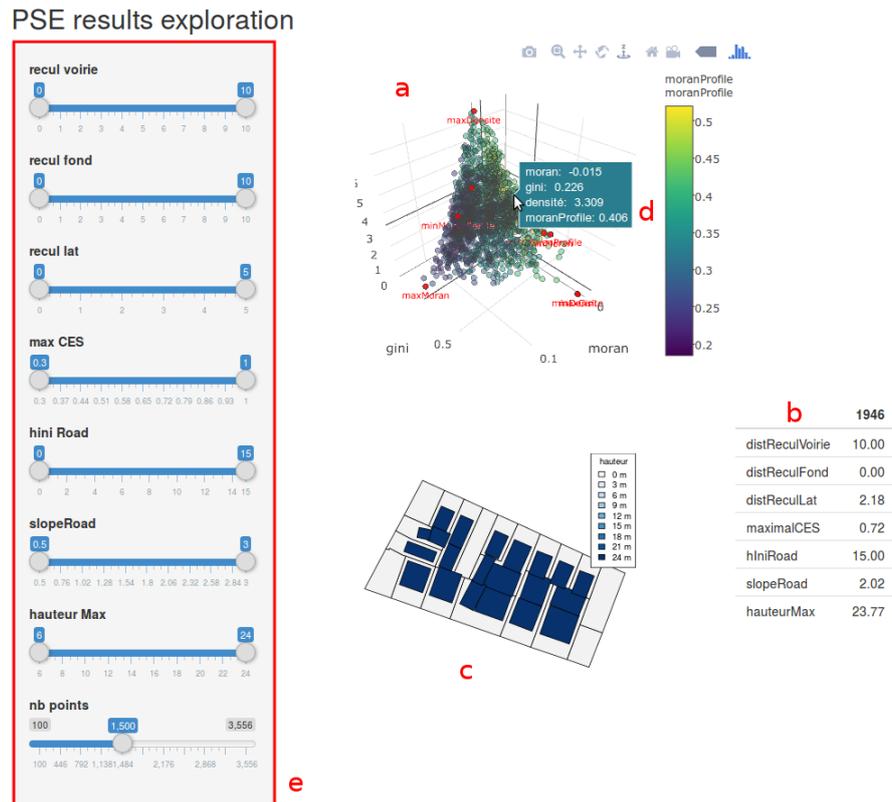


Figure 7. Interface de visualisation des résultats de PSE.

L'interface de visualisation des résultats de PSE permet d'explorer les configurations découvertes par PSE, d'afficher des informations relatives à une configuration particulière, et de filtrer les résultats selon les valeurs des paramètres du PLU.

Le nuage de points en 3D (**a**) est une visualisation des configurations bâties découvertes par PSE dans l'espace formé par les trois premières mesures de l'expérimentation (Indice de Gini, de Moran et densité de plancher).

Lors du survol d'un point de ce nuage avec la souris, les paramètres du PLU de la configuration correspondante sont affichés dans le panneau (**b**). Une infobulle (**d**) rappelle la valeur de chacune des mesures pour cette configuration survolée.

Une vue de la configuration bâtie est dessinée dans la zone (c). Les bâtiments sont colorés en nuances de bleu, d'autant plus foncées que les bâtiments sont hauts.

Le panneau latéral (d) comporte des curseurs à deux valeurs permettant de filtrer le nuage de points pour ne conserver les configurations bâties dont les paramètres appartiennent à l'intervalle défini par ces deux curseurs, et ceci pour chaque paramètre. Le dernier curseur simple permet de réduire le nombre de points affichés pour gagner en visibilité.

Les figures ci-dessous présentent deux configurations notables en ce qu'elles maximisent des indicateurs de sortie :

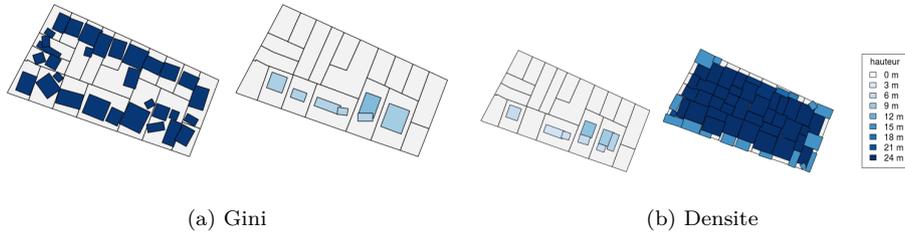


Figure 8. Quelques configurations morphologiques particulières. De gauche à droite : indice de Gini minimal et maximal (a) et densité de plancher minimale et maximale (b)

Annexe B. Annexe 2 : Explication de la boucle itérative de PSE.

Soit un modèle de simulation noté \mathcal{M} à trois paramètres réels $p_1 \in P_1$, $p_2 \in P_2$ et $p_3 \in P_3$.

On considère que le modèle de simulation produit une sortie $s \in S$ pour tout paramétrage p :

$$\forall p = (p_1, p_2, p_3) \exists s \in S \text{ t.q. } \mathcal{M}(p) = s$$

Soient M_1 et M_2 deux mesures à valeurs réelles dans un intervalle des sorties d'un modèle de simulation, telles qu'elles soient définies pour toute sortie s du modèle. Les mesures constituent les dimensions de l'espace des motifs (Pattern Space) que PSE explore, elles ont vocation à qualifier, ordonner et discriminer les solutions que le modèle peut produire et ce, dans les termes de la thématique du modèle (dans notre cas aménageurs urbains).

Dans la mesure du possible, il convient aussi de choisir des mesures autant décorréelées que possible les unes des autres, de façon à ce que chacune concerne un aspect différent de la sortie. L'espace $M = \{M_1, M_2\}$ est discrétisé, et il est

possible de déterminer, pour toute sortie s du modèle, l'unique combinaison de valeurs (m_1, m_2) qui caractérise s .

On réalise une première série de simulations en échantillonnant l'espace de paramètres $P = P_1 \times P_2 \times P_3$.

L'étape d'élitisme de PSE consiste à projeter les sorties des simulations dans l'espace M discrétisé, et à maintenir à jour une matrice appelée "hitmap", notée H dont le terme H_{m_1, m_2} . Il s'agit du nombre de sorties qui prennent les valeurs de mesure (m_1, m_2) . Chacune des "cases" H_{m_1, m_2} de l'espace M discrétisé contient potentiellement plusieurs individus, et la valeur de la case est mise à jour par le nombre d'individus. A la fin de cette étape, un seul de ces individus, tiré aléatoirement dans la population qui occupe la case H_{m_1, m_2} est conservé.

L'étape de sélection consiste à ne retenir que les deux individus p et p' les plus *rare*s dans M : c'est à dire dont le nombre stocké dans la hitmap est minimal et non nul. La fonction d'élitisme assure que pour chaque combinaison (m_1, m_2) , il n'y ait qu'un seul individu correspondant.

Ces individus sont ensuite croisés et mutés pour constituer un nouvel individu p'' dont le génotype (valeurs des paramètres p''_1, p''_2, p''_3) sera partiellement issu de celui de ses parents.

Enfin, l'étape d'évaluation consiste à effectuer une simulation paramétrée par ce nouvel individu : $\mathcal{M}(p'')$ et à projeter la sortie s'' dans M . La répétition de ces étapes produit, au bout de suffisamment d'itérations (quelques centaines de milliers), une population d'individus dont les patterns couvrent "au mieux" l'espace de mesures M .

En pratique, pour chaque mesure à explorer, il est nécessaire de définir les bornes à l'intérieur desquelles on désire considérer les sorties du modèle, ainsi qu'un pas de discrétisation¹³. Les dimensions de P i.e. les domaines de variations des paramètres du modèle doivent également être fixées. PSE se charge ensuite de sélectionner les éléments de $p \in P$ tels que les configurations correspondantes couvrent le mieux possible l'espace M ainsi discrétisé.

La méthode PSE est justement conçue pour réaliser cette exploration. L'application de la méthode PSE revient donc à explorer de façon astucieuse l'espace de sortie d'un modèle selon certaines mesures et produit la liste des motifs que celui-ci est susceptible de produire.

13. Pour des raisons de taille mémoire, il faut se limiter à trois ou quatre mesures distinctes.