

MUP-City version 1.2.2
Descriptif de l'application pour la simulation de
scénarios fractals et non fractals de
développement résidentiel

Cécile Tannier UMR Chrono-Environnement
Gilles Vuidel UMR ThéMA

CNRS - Université Bourgogne Franche-Comté

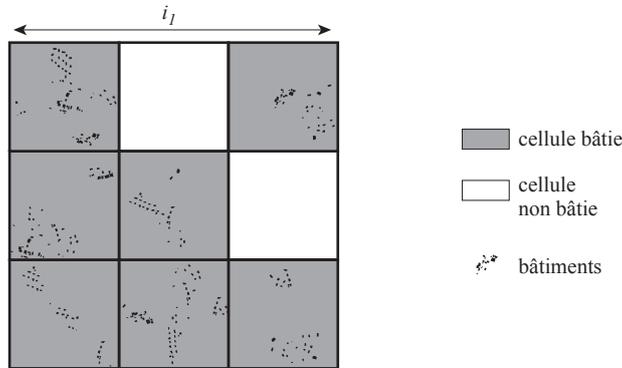
February 27, 2018

MUP-City permet d'identifier les développements résidentiels potentiels dans les villes européennes de 100 000 à 1 000 000 d'habitants environ, partant d'un tissu urbain existant.

La localisation des lieux (i.e. cellules) intéressantes à urbaniser est déterminée par un principe fractal d'urbanisation, sur la base d'une décomposition multi-échelle du tissu bâti existant (Figure 1), auquel l'utilisateur peut ajouter au maximum neuf règles additionnelles d'aménagement :

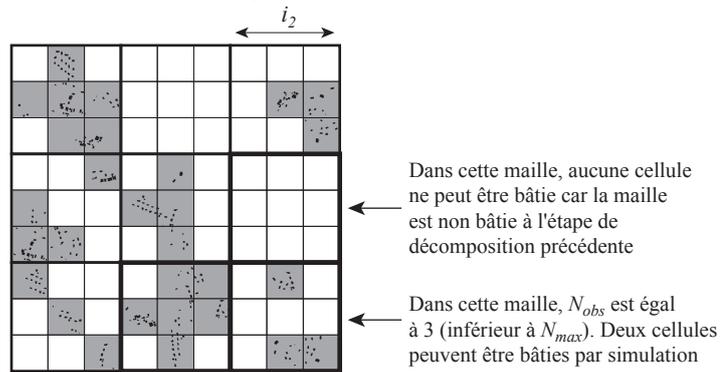
- 1) préservation du contact entre bâti et non bâti tout en minimisant la fragmentation des espaces non bâtis (règle morphologique)
- 2) proximité au réseau routier existant
- 3) bonne accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne
- 4) bonne accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire
- 5) bonne accessibilité aux commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare
- 6) bonne accessibilité au réseau de transport en commun
- 7) bonne accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation potentielle quotidienne
- 8) bonne accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation potentielle hebdomadaire
- 9) bonne accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation potentielle mensuelle ou plus rare

Décomposition spatiale : première étape
1 maille carrée de taille i_1



Dans cette maille, N_{obs} est égal à 7 (plus élevé que N_{max}).
Aucune cellule non bâtie ne peut être bâtie par simulation

Décomposition spatiale : deuxième étape
9 mailles carrées de taille $i_2 = 1/3 i_1$



Dans cette maille, aucune cellule ne peut être bâtie car la maille est non bâtie à l'étape de décomposition précédente

Dans cette maille, N_{obs} est égal à 3 (inférieur à N_{max}). Deux cellules peuvent être bâties par simulation

Dans cette maille, N_{obs} est égal à 6 (plus élevé que N_{max}).
Aucune cellule non bâtie ne peut être bâtie par simulation

Figure 1: Exemple de l'application de la règle fractale d'urbanisation pour $N_{max} = 5$

La première version 0.8 de MUP-City est décrite dans les articles suivants :

- Tannier C., Vuidel G., Houot H., Frankhauser P. (2012) Spatial accessibility to amenities in fractal and non fractal urban patterns, *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 39, n°5, pp. 801-819.
- Tannier C., Foltête J-C., Girardet X. (2012), Assessing the capacity of different urban forms to preserve the connectivity of ecological habitats, *Landscape and Urban Planning*, vol. 105, n°1-2, pp. 128-139.
- Frankhauser P., Tannier C., Vuidel G., Houot H. (2010), Une approche multi-échelle pour le développement résidentiel des nouveaux espaces urbains, in J.-P. Antoni (Ed) *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques*

de transport, *Economica*, Coll. Méthodes et approches, pp. 306-332.

- Tannier C., Vuidel G., Frankhauser P., Houot H. (2010), Simulation fractale d'urbanisation - MUP-city, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles, *Revue internationale de géomatique*, vol. 20, n°3, pp. 303-329.

La version 1.1 de MUP-City a été utilisée dans deux thèses de doctorat :

- Frémond M. (2015), *Une approche normative de l'aménagement au Luxembourg - Evaluation par la simulation*, Thèse de doctorat en géographie et aménagement, Université de Franche-Comté. Recherche financée par le Fonds National de la Recherche du Luxembourg.
- Bourgeois M. (2015), *Impact écologique de l'urbanisation - Modélisations urbaines et paysagères*, Thèse de doctorat en géographie et aménagement, Université de Franche-Comté. Recherche financée par la Région Franche-Comté et le Fonds Européen de Développement Régional (projet ODIT, Maison des Sciences de l'Homme et de l'Environnement CN Ledoux, Besançon).

La présente version de MUP-City est utilisée dans la thèse de doctorat de M. Colomb, *Régulation du développement résidentiel de l'échelle parcellaire à l'échelle métropolitaine : gestion des interrelations entre échelles via le couplage des applications MUP-City et SimPLU*. Thèse en cours de réalisation au laboratoire COGIT de l'IGN, sous la co-direction de J. Perret (IGN-COGIT) et C. Tannier (CNRS-Chrono-Environnement) et l'encadrement de M. Brasebin (IGN-COGIT).

La conception et le développement de l'application MUP-City ont reçu le soutien financier du Commissariat général au développement durable (CGDD) du Ministère français de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE), dans le cadre du programme PREDIT.

1 Règle 1 : préservation du contact entre bâti et non bâti tout en minimisant la fragmentation des espaces non bâtis (règle morphologique)

L'objectif de cette règle est de permettre aux résidents d'une agglomération urbaine d'avoir un accès direct aux espaces ouverts (i.e. non bâtis), tout en évitant la fragmentation tant des espaces bâtis que non bâtis. Selon cette règle, une cellule non bâtie est intéressante à urbaniser si elle respecte les trois conditions suivantes.

- 1) La cellule évaluée doit avoir au moins une cellule non bâtie dans son voisinage immédiat (cellules qui lui sont contiguës).
- 2) Les cellules bâties contiguës à la cellule évaluée doivent avoir des cellules non bâties dans leur voisinage immédiat.

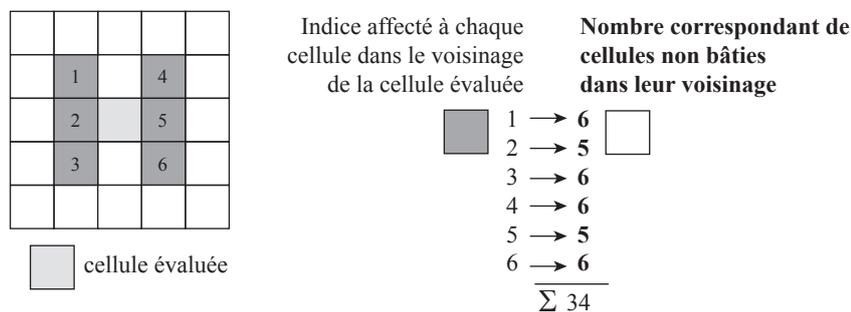


Figure 2: Configuration des cellules permettant d'obtenir la meilleure évaluation possible résultant de l'application de la règle morphologique

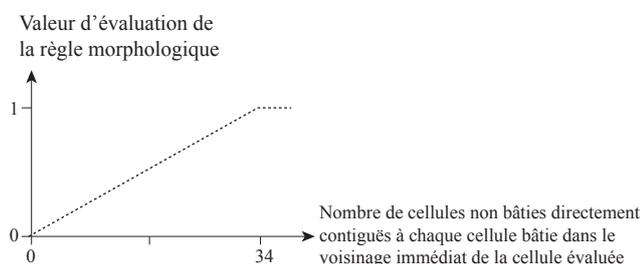


Figure 3: Variable floue utilisée pour définir la règle morphologique

3) La cellule évaluée doit avoir le plus grand nombre possible de cellules bâties autour d'elle en respectant les deux conditions énoncées ci-dessus.

L'application de la règle consiste à dénombrer, pour chaque cellule bâtie dans le voisinage immédiat de la cellule évaluée, les cellules non bâties qui lui sont directement contiguës (Figure 2).

La somme de ces nombres donne la valeur d'entrée de la règle. La valeur d'évaluation de la cellule $\mu(x)$ se calcule ensuite ainsi : $\mu(x) = x/34$ avec $\mu(x) \in [0; 1]$, et avec x , le nombre total de cellules non bâties contiguës à chaque cellule bâtie voisine de la cellule évaluée. Le calcul de cette fonction est intégré dans MUP-City sous la forme d'une variable floue (Figure 3). Une valeur $\mu(x) = 0$ caractérise une très mauvaise évaluation de la cellule alors qu'une valeur égale à 1 caractérise une très bonne évaluation de la cellule.

Le calcul de cette règle est dépendant du voisinage immédiat des cellules évaluées. Ainsi, un changement dans le voisinage d'une cellule évaluée, suite à l'urbanisation d'une ou plusieurs cellules alentours, modifie la valeur d'évaluation initiale de ladite cellule.

2 Règle 2 : proximité au réseau routier existant

L'objectif de cette règle est d'éviter la construction de nouvelles infrastructures routières associées au développement résidentiel, en vue de limiter les coûts économiques liés à la construction de nouvelles routes mais également d'éviter

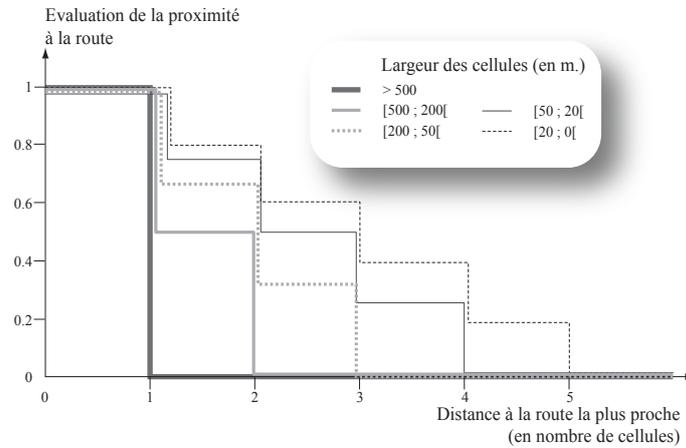


Figure 4: Variables floues utilisées pour évaluer la proximité au réseau routier existant

une fragmentation paysagère supplémentaire induite par la construction de ces infrastructures.

La règle de proximité à la route est simple : plus la cellule évaluée est éloignée du réseau routier existant, plus son intérêt à être urbanisée est faible. La valeur d'évaluation de la cellule décroît donc selon la distance à la route et varie selon la taille de la cellule considérée (plus la taille de la cellule est réduite, plus le nombre de cellules considéré dans le voisinage est élevé - Figure 4).

3 Règle 3 : accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne

L'établissement (commerce ou service de fréquentation quotidienne) le plus proche doit être localisé à une distance maximum d_{max} (valeur par défaut : 600 m.) de la cellule résidentielle à évaluer. Sinon, l'évaluation tombe à 0.

A partir de l'établissement le plus proche localisé à moins de 600m., on considère tous les établissements distants de proche en proche de 200m. maximum, dans la limite d'une distance d_{maxmax} (valeur par défaut : 1000m.) entre l'établissement le plus éloigné et la cellule à évaluer. Ce faisant, on définit des agrégats commerciaux qui sont propres à chaque cellule résidentielle (cette procédure est différente de celle appelée dans la version 0.8 de MUP-City).

Principe de la règle : plus l'offre en commerces et services dans un agrégat donné est bonne (en nombre et en diversité d'établissements), plus ce dernier peut être éloigné de la cellule.

Formalisation de la règle :

Soit n_j le nombre d'établissements dans un agrégat commercial j

Soit δ_j le nombre de types d'établissements dans un agrégat commercial j

Soit $d_{i,j}$ la distance entre la cellule et l'établissement le plus proche

Soit $Y_{i,j}$ l'attractivité d'un agrégat commercial j

$$Y_{ij} = \left[\mu(n_j)^{1-\mu(\delta_j)} \cdot \mu(d_{ij}) \right]^{1-\mu(d_{ij})} \cdot \left[1 - \left(1 - \mu(n_j)^{1-\mu(\delta_j)} \right) \cdot (1 - \mu(d_{ij})) \right]^{\mu(d_{ij})} \quad (1)$$

Quand on prend en compte tous les agrégats j existants dans le voisinage d'une cellule, on obtient φ_i (l'évaluation de l'accessibilité d'une cellule résidentielle i).

$$\varphi_i = 1 - \prod (1 - Y_{ij}) \quad (2)$$

Explications quant au choix de la formalisation

Première hypothèse : plus grande est la diversité des types d'établissements dans un agrégat de commerces et services, meilleure est l'attractivité de cet agrégat.

Formalisation choisie : un exposant $\mu(\delta_j)$ de valeurs comprises entre 0 et 1. Quand la valeur de $\mu(\delta_j)$ est égale à 1, elle augmente l'attractivité de l'agrégat considéré. En effet, dans ce cas, le couple $\mu(n_j)^{1-\mu(\delta_j)}$ est égal à 1.

Autres hypothèses : l'attractivité d'un agrégat j de commerces et services pour une cellule donnée i correspond à l'évaluation du nombre et de la diversité des établissements présents dans cet agrégat combinée à la distance qui sépare cet agrégat de la cellule évaluée. Quand cette distance est grande (proche de d_{max}), le processus d'agrégation est pessimiste : une bonne évaluation $\mu(n_j)^{1-\mu(\delta_j)}$ des caractéristiques de l'agrégat (nombre élevé d'établissements et diversité importante des types d'établissements présents) ne compense pas la mauvaise évaluation de la distance $\mu(\delta_j)$ de la cellule i à cet agrégat. Au contraire, quand la distance qui sépare l'agrégat de la cellule évaluée est proche de 0, le processus d'agrégation est optimiste : une mauvaise évaluation $\mu(n_j)^{1-\mu(\delta_j)}$ des caractéristiques de l'agrégat est compensée par la bonne évaluation de la distance $\mu(\delta_j)$ de la cellule i à cet agrégat.

4 Règle 4 : accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire

Un agrégat de commerces et services de fréquentation hebdomadaire est composé de 1 à n établissements de fréquence de recours hebdomadaire et de 0 à n établissements de fréquence de recours quotidienne. Les calculs se font en prenant en compte l'ensemble de ces établissements, que leur fréquence de recours soit quotidienne ou hebdomadaire.

L'établissement (commerce ou service) le plus proche doit être localisé à une distance maximale d_{max} (valeur par défaut : 2000 m.) de la cellule résidentielle à évaluer. Sinon, l'évaluation tombe à 0.

A partir de l'établissement le plus proche localisé à moins de 2000m., on considère tous les établissements distants de proche en proche de 200m. maximum, dans la limite d'une distance d_{maxmax} (valeur par défaut : 3000m.) entre l'établissement le plus éloigné et la cellule à évaluer. Ce faisant, on définit des agrégats commerciaux qui sont propres à chaque cellule résidentielle.

Principe de la règle : plus l'offre en commerces et services dans un agrégat donné est bonne (en nombre et en diversité d'établissements), plus ce dernier peut être éloigné de la cellule.

Formalisation de la règle :

Soit n_j le nombre d'établissements (de fréquence de recours quotidienne ou hebdomadaire) dans un agrégat commercial j

Soit δ_j le nombre de types d'établissements (de fréquence de recours quotidienne ou hebdomadaire) dans un agrégat commercial j

Soit d_{ij} la distance entre la cellule et l'établissement le plus proche

Soit Y_{ij} l'attractivité d'un agrégat commercial j

$$Y_{ij} = \left[\mu(n_j)^{1-\mu(\delta_j)} \cdot \mu(d_{ij}) \right]^{1-\mu(d_{ij})} \cdot \left[1 - \left(1 - \mu(n_j)^{1-\mu(\delta_j)} \right) \cdot (1 - \mu(d_{ij})) \right]^{\mu(d_{ij})} \quad (3)$$

Quand on prend en compte tous les agrégats j existants dans le voisinage d'une cellule, on obtient φ_i (l'évaluation de l'accessibilité d'une cellule résidentielle i).

$$\varphi_i = 1 - \prod (1 - Y_{ij}) \quad (4)$$

5 Règle 5 : accessibilité aux commerces et services de fréquentation potentielle mensuelle ou plus rare

Contrairement aux commerces et services de fréquentation quotidienne et hebdomadaire, où il est intéressant d'avoir une offre conséquente dans un voisinage très proche, on peut considérer qu'avoir un commerce ou service de chaque catégorie à une proximité "raisonnable" de la cellule est suffisant. Par exemple, il n'est pas nécessaire d'avoir deux hôpitaux, deux dentistes ou deux bibliothèques à proximité immédiate de son domicile. En revanche, il est intéressant d'être à quelques dizaines de minutes de l'ensemble de ces commerces et services. Cette hypothèse est aussi justifiée au regard de l'accessibilité aux administrations publiques. Il n'est pas indispensable d'être à équidistance de deux administrations communales, puisque par définition un logement se situe dans une seule commune. Dans ce cas, la proximité à la mairie la plus proche est recherchée.

Objectif de la règle : la distance aux m commerces et services les plus proches de types différents doit être égale ou inférieure à une norme de distance fixée par l'utilisateur pour chaque agglomération. Comme les commerces et services de fréquentation potentielle mensuelle ou plus rare correspondent à des fonctions centrales, nous devrions prendre en compte l'accessibilité à la fois en voiture et en transports en commun, mais ceci n'est pas le cas actuellement : la modélisation du réseau de transport en commun n'est pas encore intégré dans MUP-City.

Pour chaque établissement de type δ :

Soit d_{ij} la distance-temps minimum entre la cellule i et l'établissement (commerce ou service) j ,

Soit n le nombre d'établissements j ,

$D_j = \{d_{i1}, \dots, d_{ij}, \dots, d_{in}\}$

On calcule:

$$\lambda_{ij} = \text{MIN}[D_j] \quad (5)$$

Soit m le nombre de types d'établissements différents : $\delta = \{1, 2, \dots, m\}$

Soit Λ_i la distance aux m commerces et services les plus proches de types différents pour la cellule i

$$\Lambda_i = \frac{1}{m} \sum_{\delta=1}^m \lambda_{ij} \quad (6)$$

Le résultat de la règle consiste en l'évaluation de la distance Λ_i au moyen d'une variable floue $\mu(\Lambda)$ pour laquelle la norme de distance fixée correspond à la valeur $\mu(\Lambda) = 1$. Cette norme est définie comme la moyenne ou médiane de la distribution des distances aux m commerces et services les plus proches pour tous les résidents de l'agglomération. Le troisième quartile de cette distribution correspond à la valeur $\mu(\Lambda) = 0$.

6 Règle 6 : accessibilité au réseau de transport en commun

Concernant les haltes ferroviaires (TER, tram-train), on considère un seuil de distance d_{fer} (valeur par défaut : 2000m) autour de la halte la plus proche pour définir la variable floue $\mu(fer)$.

Concernant le nombre d'arrêts de transport en commun (bus, tram...), on considère un voisinage (rayon de distance) d_{TC} (valeur par défaut : 400m.) entre chaque arrêt et la cellule évaluée pour définir la variable floue $\mu(TC)$. Dans les applications faites jusqu'à présent, nous avons comptabilisé le nombre d'arrêts par ligne, les arrêts des lignes allant dans un sens ou dans l'autre étant différenciés.

Sur cette base, l'évaluation de l'accès au réseau de transport en commun se calcule ainsi :

$$\text{MAX}[\mu(TC); \mu(fer)] \quad (7)$$

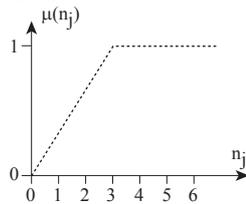
7 Accessibilité aux infrastructures vertes et de loisir : règles 7, 8 et 9

Les infrastructures vertes et de loisir considérées pour la simulation d'un scénario de développement résidentiel avec MUP-City peuvent être, par exemple, les bois

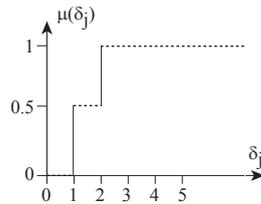
Exemple de paramétrages pour les variables μ de MUP-City

Agrégat de commerces et services de fréquentation potentielle quotidienne

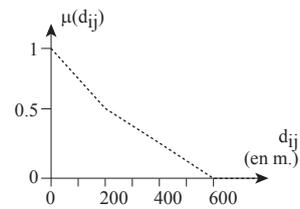
Evaluation du nombre d'établissements dans un agrégat



Evaluation de la diversité des types d'établissements dans un agrégat

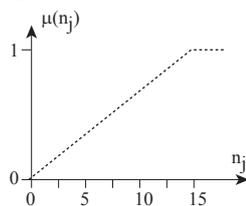


Evaluation de la distance entre la cellule évaluée et l'agrégat considéré

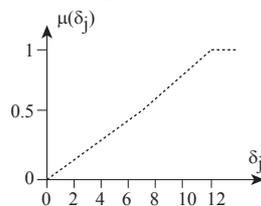


Agrégat de commerces et services de fréquentation potentielle hebdomadaire

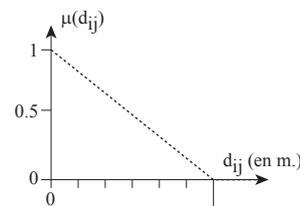
Evaluation du nombre d'établissements dans un agrégat



Evaluation de la diversité des types d'établissements dans un agrégat



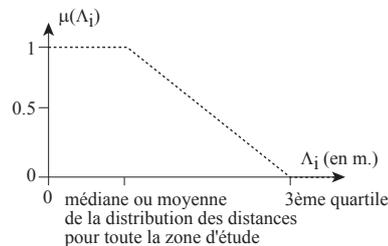
Evaluation de la distance entre la cellule évaluée et l'agrégat considéré



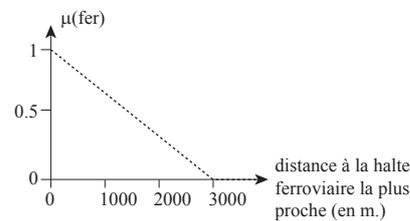
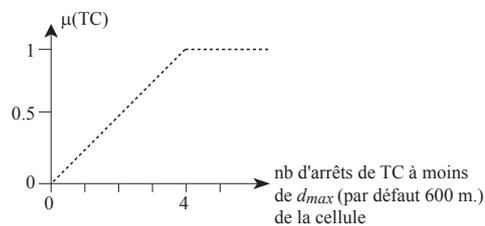
aire de chalandise maximum d'un établissement dans la zone d'étude (valeur par défaut : 4000 m.)

Agrégat de commerces et services de fréquentation potentielle mensuelle ou plus rare

Evaluation de la distance aux m plus proches établissements de chaque type



Accessibilité aux transports en commun



et forêts, les parcs et jardins, les terrains de sports (football, tennis) ou les centres sportifs (golfs, piscines, gymnases). L'hypothèse principale présidant à l'évaluation de l'accessibilité aux infrastructures vertes et de loisir est que la

diversité des infrastructures présentes à proximité d'une cellule est plus importante que le nombre d'infrastructures. Ainsi, l'accès à un seul terrain de football ou de tennis est aussi intéressant que l'accès à deux de ces terrains. En revanche, l'accès à un terrain de football et à un court de tennis est davantage valorisé que l'accès à un seul type de terrains.

Première étape du calcul d'accessibilité : évaluation de chaque type d'infrastructures en fonction de sa distance à la cellule considérée. On ne considère que les infrastructures les plus proches de types différents.

Notations pour le niveau L_1 (évaluation égale à 0 à partir d'une distance de 300m. par défaut, paramétrable dans MUP-City) : $\mu[L_1(\text{forest})]$; $\mu[L_1(\text{parc})]$; ...

Notations pour le niveau L_2 (évaluation égale à 0 à partir d'une distance de 2000m. par défaut, paramétrable dans MUP-City) : $\mu[L_2(\text{forest})]$; $\mu[L_2(\text{football})]$; $\mu[L_2(\text{tennis})]$; $\mu[L_2(\text{golf})]$; $\mu[L_2(\text{swim})]$; $\mu[L_2(\text{gymn})]$; ...

Notation pour le niveau L_3 (évaluation égale à 0 à partir d'une distance de 5000m. par défaut, paramétrable dans MUP-City) : $\mu[L_3(\text{forest})]$; ...

NB : selon les agglomérations étudiées, le nombre et le type d'infrastructures différentes considérées dans chaque niveau fonctionnel est susceptible de varier.

Deuxième étape du calcul d'accessibilité : agrégation de ces évaluations partielles en une évaluation globale. Les principes de cette agrégation sont les suivants :

- meilleures sont les évaluations partielles, meilleure doit être l'évaluation globale ;
- pour une même distance, mieux vaut deux infrastructures différentes qu'une seule ;
- une seule infrastructure très proche est moins intéressante qu'une infrastructure très proche et une autre plus éloignée.

La formalisation choisie pour répondre à ces principes est cumulative et n'intègre pas de compensation entre critères : jamais une mauvaise évaluation partielle ne fait diminuer une bonne évaluation partielle. L'opérateur d'agrégation conçu à cet effet donne des résultats supérieurs ou égaux au MAX, et d'autant supérieurs que le nombre d'évaluations partielles à agréger est élevé. Autrement dit, le nombre de critères agrégés augmente le degré d'optimisme de l'opérateur.

Soit $y_i(L_1)$ le nombre d'infrastructures différentes de niveau L_1 dont l'évaluation est supérieure à 0, au voisinage de la cellule i considérée ;

soit $y_{max}(L_1)$ le nombre maximal d'infrastructures différentes de niveau L_1 au voisinage d'une cellule ;

soit $o_i(L_1)$ le degré d'optimisme de l'opérateur en fonction du nombre d'évaluations partielles à agréger. (N'est calculé que dans les cas où $y_{max}(L_1) > 0$) ;

soit $s_i(L_1)$ l'évaluation globale de l'accessibilité d'une cellule i aux infrastructures vertes et de loisir de niveau L_1 (règle 7).

$$o_i(L_1) = 1 - \left[(y(L_1) - 1) \times \left(\frac{1}{(y_{max}(L_1) - 1)} \right) \right] \quad (8)$$

$$s_i(L_1) = [MAX(\mu_i[L_{1(forest)}]; \mu_i[L_{1(parc)}])]^{o_i(L_1)} \quad (9)$$

Remarque : dans le cas où $y_{max}(L_1) = 2$, si une cellule compte deux infrastructures différentes de niveau L_1 à moins de 300m., son évaluation globale $s_i(L_1)$ est toujours égale à 1, quelles que soient les valeurs d'évaluation partielles $\mu[L_{1(forest)}]$ et $\mu[L_{1(parc)}]$.

8 Points techniques

- Les différentes fonctions d'appartenance μ sont modifiables par l'utilisateur.
- Les seuils de distance pour la définition des agrégats commerciaux sont également modifiables par l'utilisateur.
- **Les calculs de distance se font par défaut à vol d'oiseau. Pour calculer des distances sur le réseau, il faut le préciser au moment de la décomposition multi-échelle (en cliquant sur le bouton intitulé "Distances").**

9 Agrégation des différentes valeurs d'évaluation en une valeur synthétique d'intérêt d'une cellule à être urbanisée

L'idée est de faire varier le poids de chacune des règles dans l'évaluation synthétique S_i de l'intérêt d'une cellule à être urbanisée, de manière à simuler différentes orientations d'aménagement. Pour agréger les évaluations issues des différentes règles en une valeur d'évaluation synthétique, deux possibilités sont proposées : la somme pondérée ou la méthode d'agrégation de (Yager, 1977).

9.1 Procédure pour déterminer l'importance respective des différentes règles

La procédure utilisée dans MUP-City est la comparaison par paires de Saaty (1977, 1990). Les règles sont d'abord comparées deux à deux afin d'identifier dans chaque paire quelle est la règle la plus importante, et déterminer si celle-ci est peu ou nettement plus importante que l'autre. On se sert pour ce faire du tableau ci-après considérant une paire de critères (ici, de règles) X et Y .

| Importance w_{XY} | Définition |
|------------------------|--|
| 1 | Egale importance du critère X par rapport au critère Y |
| 3 | Faible importance du critère X par rapport au critère Y |
| 5 | Forte importance du critère X par rapport au critère Y |
| 7 | Importance absolue du critère X par rapport au critère Y |
| 2,4,6 | Valeurs intermédiaires entre deux évaluations successives |

Exemple pour déterminer les importances deux à deux de trois règles. Si la règle X est plus importante que la règle Y , on affecte à X une valeur d'importance du tableau ci-dessous w_{XY} et on affecte à Y la valeur $[1/(w_{XY})]$.

| Importance d'une règle par rapport à une autre | Valeur d'importance pour une règle | Valeur d'importance correspondante pour l'autre règle |
|---|------------------------------------|---|
| Y est un peu plus importante que X | $w_{XY} = 1/3$ | $w_{YX} = 3$ |
| Z est entre égale et légèrement plus importante que X | $w_{XZ} = 1/2$ | $w_{ZX} = 2$ |
| Y est légèrement plus importante que Z | $w_{YZ} = 3$ | $w_{ZY} = 1/3$ |

A partir du tableau ci-dessus, MUP-City crée une matrice de comparaison des importances ((X , Y , Z) en lignes et en colonnes).

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 \\ 3 & 1 & 3 \\ 2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

MUP-City calcule ensuite le vecteur propre de cette matrice, qui donne le poids ω de chaque critère.

$$\omega = \begin{pmatrix} 0,16 \\ 0,59 \\ 0,25 \end{pmatrix}$$

Dans le cas de l'agrégation de (Yager, 1977), on utilise non pas les poids ω de chaque critère, mais les poids w qui correspondent aux valeurs du vecteur propre multipliées par le nombre de critères considérés (égal à 3 dans l'exemple choisi).

$$w = \begin{pmatrix} 0,48 \\ 1,77 \\ 0,75 \end{pmatrix}$$

9.2 Agrégation au moyen d'une somme pondérée avec la somme des poids des critères normalisée à 1

Soit S_i l'intérêt synthétique à ce que la cellule i soit urbanisée

Soit $s_i(r)$ l'évaluation de la cellule i issue de la règle r

Soit ω_r le poids de la règle r .

Soit R le nombre de règles prises en compte.

$$S_i = \sum_{r=1}^R (s_i(r) \times \omega_r) \quad (10)$$

9.3 Agrégation de (Yager, 1977)

Soit S_i l'intérêt synthétique à ce que la cellule i soit urbanisée

Soit $s_i(r)$ l'évaluation de la cellule i issue de la règle r

Soit w_r le poids de la règle r .

$$S_i = \text{MIN}[s_i(r_1)^{w_1}; s_i(r_2)^{w_2}; \dots; s_i(r_R)^{w_R}] \quad (11)$$

Exemple de calcul

| Critère considéré | Evaluation Y | Importance y | Combinaison Y^y |
|-------------------|----------------|----------------|-------------------|
| A | 0.9 | 0.8 | 0.92 |
| B | 0.2 | 2.4 | 0.02 |
| C | 0.2 | 0.5 | 0.4 |
| D | 0.9 | 0.3 | 0.97 |

Résultat de l'agrégation = 0.02

NB : selon cette méthode, 0 est une note éliminatoire. En effet, si une des évaluations est égale à 0 alors le résultat de l'agrégation sera également égal à 0. Pour éviter ceci, les variables floues permettant de calculer les évaluations peuvent être définies sur l'intervalle $[0.001; \infty]$.

Commentaire : en utilisant la somme pondérée (avec la somme des poids normalisée à 1), aucune évaluation ne diminue le total de l'agrégation : tout s'ajoute. On pourrait intituler cet opérateur d'agrégation : "*l'opérateur qui donne bonne conscience*". Au contraire, la méthode d'agrégation de (Yager, 1977) permet de représenter une application beaucoup plus stricte (ou exigeante) de normes d'aménagement. De son application résulte une différenciation plus importante des cellules au regard de leur intérêt à être urbanisées.

10 Prise en compte des zones non urbanisables

Dans MUP-City, la prise en compte de zones non urbanisables (zones naturelles protégées, zones de fortes pentes, zones inondables...) suit une logique multi-échelle. Le développement résidentiel est possible dans une cellule uniquement

quand celle-ci contient davantage de zones urbanisables que de zones non urbanisables.

Le seuil s_{urba} correspond à la part maximale de surfaces non urbanisables recouvrant la cellule, au-delà de laquelle la cellule n'est plus urbanisable. Pour chaque scénario de développement résidentiel, s_{urba} varie en fonction de la dimension fractale visée pour les nouvelles extensions bâties.

$$s_{urba} = 1 - [N_{max}/r^2] \quad (12)$$

où r est le coefficient de réduction d'une taille de cellule donnée à la taille immédiatement inférieure (par défaut, $r = 3$ ce qui correspond à $i_2 = 1/3(i_1)$, cf. Figure 1) et N_{max} est le nombre maximal de cellules pouvant être urbanisées dans une maille.

$s_{urba} \in [0; 1]$. Quand le ratio entre la surface de zones non urbanisables et la surface de la cellule est strictement supérieur à ce seuil, la cellule n'est pas urbanisable.

Quand on simule un scénario non fractal de développement résidentiel, s_{urba} est égal à 0.5.

11 Evaluation ex-post des scénarios simulés

Les indicateurs d'évaluation ex-post sont calculés par MUP-City pour chaque cellule bâtie par simulation ainsi que pour le bâti résidentiel initial, rasterisé par l'application (à cet effet, un shapefile du bâti résidentiel doit être chargé en entrée de l'évaluation ex-post). Les résultats fournis se présentent sous la forme de cartes raster geotiff, une carte par indicateur calculé et une carte pour l'agrégation des indicateurs (l'opérateur d'agrégation et les pondérations affectées à chaque indicateur sont choisis par l'utilisateur). Les valeurs d'évaluation ex-post sont comprises en 0 et 1. Les indicateurs calculés sont les suivants :

- la distance (en marche à pied : réseau des routes et chemins) de chaque cellule bâtie au commerce et service de fréquence de recours potentielle quotidienne le plus proche
- le nombre de commerces et services de fréquence de recours potentielle quotidienne situés à une distance inférieure ou égale à $d_{max}(N1)$ (400 m. par défaut) de chaque cellule bâtie (en marche à pied : réseau des routes et chemins)
- la distance moyenne (en marche à pied : réseau des routes et chemins) de chaque cellule bâtie à chaque type de commerces et service de fréquence de recours potentielle quotidienne le plus proche
- la distance de chaque cellule bâtie au commerce et service de fréquence de recours potentielle hebdomadaire le plus proche
- le nombre de commerces et services de fréquence de recours potentielle quotidienne situés à une distance inférieure ou égale à $d_{max}(N2)$ (2000 m. par défaut) au plus de chaque cellule bâtie (sur le réseau des routes sans les chemins)

- la distance moyenne (sur le réseau des routes sans les chemins) de chaque cellule à chaque type de commerces et services de fréquence de recours potentielle hebdomadaire le plus proche
- la distance moyenne (sur le réseau des routes sans les chemins) de chaque cellule bâtie à chaque type de commerces et services de fréquence de recours potentielle mensuelle ou plus rare le plus proche
- le nombre d'arrêts de transport en commun situés à une distance inférieure ou égale à $d_{max}(TC)$ (400 m. par défaut) au plus de chaque cellule bâtie (sur le réseau des routes et des chemins)
- la distance de chaque cellule bâtie à la gare TER la plus proche (sur le réseau des routes et des chemins)
- la distance (en marche à pied : réseau des routes et chemins) de chaque cellule bâtie à l'infrastructure verte ou de loisir de fréquence de recours potentielle quotidienne la plus proche
- le nombre d'infrastructures vertes ou de loisir de fréquence de recours potentielle quotidienne situées à une distance inférieure ou égale à $d_{max}(L1)$ (400 m. par défaut) au plus de chaque cellule bâtie (en marche à pied : réseau des routes et chemins)
- la distance moyenne (en marche à pied : réseau des routes et chemins) de chaque cellule bâtie à chaque type d'infrastructures vertes ou de loisir de fréquence de recours potentielle quotidienne la plus proche
- la distance (sur le réseau des routes sans les chemins) de chaque cellule bâtie à l'infrastructure verte ou de loisir de fréquence de recours potentielle hebdomadaire la plus proche
- le nombre d'infrastructures vertes ou de loisir de fréquence de recours potentielle hebdomadaire situées à une distance inférieure ou égale à $d_{max}(L2)$ (2000 m. par défaut) au plus de chaque cellule bâtie (sur le réseau des routes sans chemins)
- la distance moyenne (sur le réseau des routes sans les chemins) de chaque cellule bâtie à chaque type d'infrastructures vertes ou de loisir de fréquence de recours potentielle hebdomadaire le plus proche
- la distance (sur le réseau des routes sans les chemins) de chaque cellule bâtie à l'infrastructure verte ou de loisir de fréquence de recours potentielle mensuelle ou plus rare la plus proche
- le nombre de cellules non bâties dans le voisinage immédiat (voisinage de Moore) de chaque cellule bâtie
- la distance minimale (en marche à pied : réseau des routes et chemins) de chaque cellule bâtie à la limite ville-campagne (représentée par l'enveloppe morphologique des agrégats bâtis)
- le fait que la cellule bâtie soit localisée (évaluation égale à 1) ou non (évaluation égale à 0) sur la limite ville-campagne

NB : toutes les distances sont calculées sur le réseau routier. Pour calculer les distances aux commerces, services et infrastructures de fréquentation hebdomadaire ou mensuelle ou plus rare, le réseau pris en compte est celui des routes utilisé pour construire le projet de simulation. Pour calculer les distances aux commerces, services et infrastructures de fréquentation quotidienne ainsi qu'à la limite ville-campagne, le réseau pris en compte est celui des routes et des chemins fourni par l'utilisateur spécifiquement pour les évaluations ex-post.

12 Données requises pour la simulation d'un scénario quand toutes les règles d'aménagement sont activées

Neuf cartes (shapefiles) sont nécessaires.

Une carte (shp : surfaces) des bâtiments existants (tous types).

Une carte (shp : surfaces) des zones non urbanisables.

Une carte (shp : points) des commerces et services classés par fréquence de recours potentielle, ainsi que l'aire de chalandise maximale pour les commerces et services de fréquentation hebdomadaire.

Une carte (shp : lignes) du réseau de routes et chemins. Pour la règle n°5 : les vitesses maximales sur chaque tronçon.

Une carte (shp : points) des arrêts de TC (bus et/ou tram).

Une carte (shp : points) des arrêts de TER.

Pour les règles 7, 8 et 9 : une carte (shp : points) des espaces naturels et de loisir, classés par type, représentés par leur centroïde ou leurs points d'entrée (cas des bois et forêts).

Pour calculer les évaluations ex-post : une carte (shp : lignes) du réseau de routes sans les chemins.

Pour calculer les évaluations ex-post : une carte (shp : lignes) du réseau de routes avec les chemins.

Types de commerces et services de fréquentation potentielle mensuelle ou plus rare pris en compte dans la thèse de M. Frémond (2015) :

- administration publique
- théâtre
- cinéma
- bibliothèque

- salle de spectacle
- dentiste
- librairie
- mairie
- médecin spécialiste

Types de commerces et services de fréquentation potentielle mensuelle ou plus rare pris en compte dans la thèse de M. Colomb :

- grand équipement culturel (musée, cinéma, salle de spectacle...)
- hôpital
- zone commerciale
- autres (bowling, casino, discothèque...)

Exemple de typologie des bois et forêts : typologie des espaces naturels établie par Natural England, au travers de l'Accessible Natural Greenspace Standard (ANGSt) :

- L_1 : espace vert de moins de 2Ha : distance max 300m
- L_2 : espace vert de moins de 20Ha : distance max 2000m
- L_2 ou L_3 : espace vert de moins de 100Ha : distance max 5000m
- L_3 : espace vert de moins de 500Ha : distance max 10000m

Exemple de typologie des infrastructures vertes et de loisir :

- Fréquentation quotidienne L_1 : parcs et jardins, bois et forêts de moins de 2Ha
- Fréquentation hebdomadaire L_2 : terrains de sports (football, tennis), centres sportifs (golfs, piscines, gymnases), bois et forêts de 2 à 100Ha
- Fréquentation mensuelle ou plus rare L_3 : bois et forêts de plus de 100Ha