

# Simulation de formes réalistes de développement résidentiel, de l'échelle du bâtiment à celle de l'ensemble d'une région urbaine

Soutenance de thèse de doctorat de l'Université Paris-Est

École doctorale MSTIC - spécialité "sciences et technologies de l'information géographique"

Maxime Colomb

27 septembre 2019

Composition du jury :

Cyrille Genre-Grandpierre Jacques Teller	Professeur des Universités, Université d'Avignon - UMR Espace Professeur, Université de Liège, Belgique	Rapporteur Rapporteur
Hélène Houot Florent Le Néchet	Maître de conférence, Université de Franche-Comté - UMR ThéMA Maître de conférences, Université Paris-Est - UMR LVMT	Examinaterice Examinateur
Mickaël Brasebin Julien Perret Cécile Tannier	Dr., Ingénieur des Travaux Cartographiques d'État, IGN/LaSTIG - ENSG Directeur de Recherche du Développement Durable, IGN/LaSTIG - ENSG Directrice de Recherche CNRS - UMR ThéMA	Encadrant Directeur de thèse Directrice de thèse

# Contexte : le phénomène d'étalement urbain

- Urbanisation désordonnée de terrains non-bâtis en marge des centres urbains
  - Dynamiques résidentielles prépondérantes (Joly 03, Wiel 13)
- Multiples effets négatifs
- Objectif de régulation des pouvoirs publics



# Divers documents d'aménagement réglementant l'extension résidentielle

Échelle  
Administrative

Échelle du bassin  
de vie

Échelle inter-  
communale

Échelle  
communale

Échelle parcellaire

Document d'aménagement

Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT)

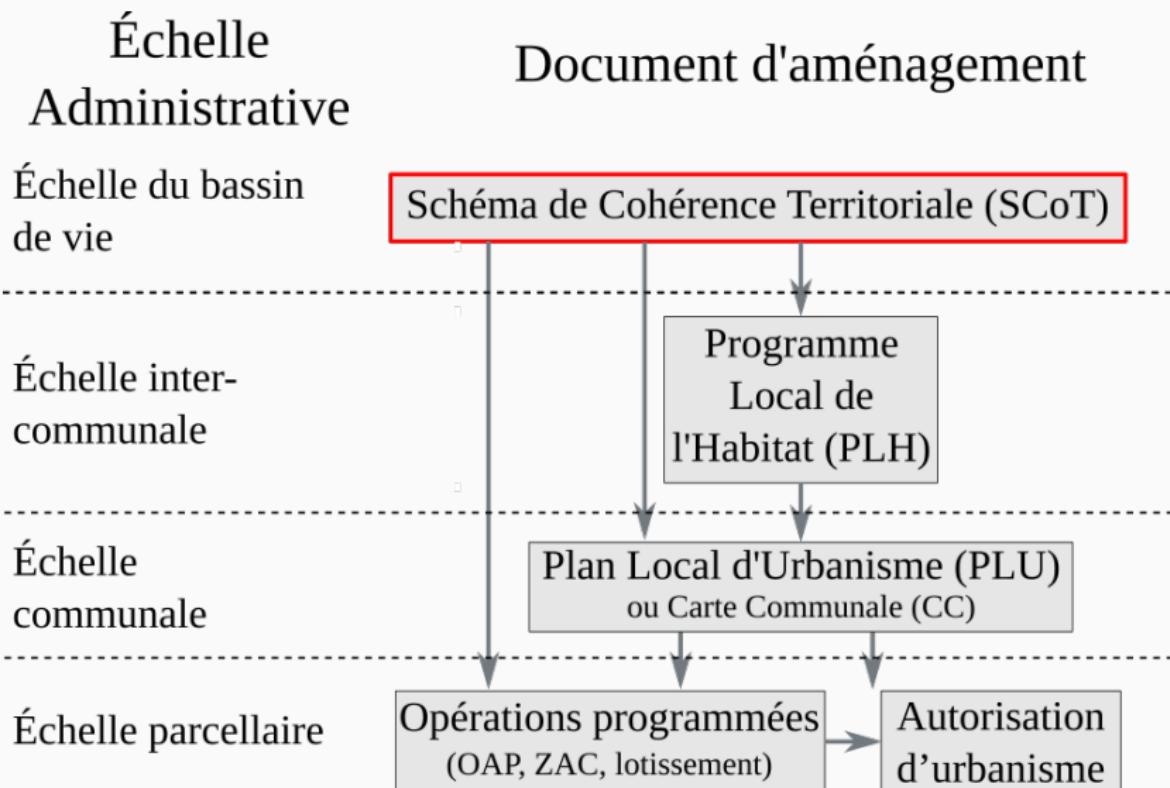
Programme  
Local de  
l'Habitat (PLH)

Plan Local d'Urbanisme (PLU)  
ou Carte Communale (CC)

Opérations programmées  
(OAP, ZAC, lotissement)

Autorisation  
d'urbanisme

# Divers documents d'aménagement réglementant l'extension résidentielle



# Divers documents d'aménagement réglementant l'extension résidentielle

Échelle  
Administrative

Échelle du bassin  
de vie

Échelle inter-  
communale

Échelle  
communale

Échelle parcellaire

Document d'aménagement

Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT)

Programme  
Local de  
l'Habitat (PLH)

Plan Local d'Urbanisme (PLU)  
ou Carte Communale (CC)

Opérations programmées  
(OAP, ZAC, lotissement)

Autorisation  
d'urbanisme

# Divers documents d'aménagement réglementant l'extension résidentielle

Échelle  
Administrative

Échelle du bassin  
de vie

Échelle inter-  
communale

Échelle  
communale

Échelle parcellaire

Document d'aménagement

Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT)

Programme  
Local de  
l'Habitat (PLH)

Plan Local d'Urbanisme (PLU)  
ou Carte Communale (CC)

Opérations programmées  
(OAP, ZAC, lotissement)

Autorisation  
d'urbanisme

# Divers documents d'aménagement réglementant l'extension résidentielle

Échelle  
Administrative

Échelle du bassin  
de vie

Échelle inter-  
communale

Échelle  
communale

Échelle parcellaire

Document d'aménagement

Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT)

Programme  
Local de  
l'Habitat (PLH)

Plan Local d'Urbanisme (PLU)  
ou Carte Communale (CC)

Opérations programmées  
(OAP, ZAC, lotissement)

Autorisation  
d'urbanisme

# Différents types de contraintes réglementaires

Type de contrainte Échelle	Zone non urbanisable	Emplacement du développement résidentiel	Type des bâtiments	Type des logements
Bassin de vie	<b>Artificialisation</b> <b>Trames vertes et bleues</b>	Orientation générale	<b>Densification</b>	
Inter-communale	<b>Prévention des risques</b>	Accessibilité	Type des opérations de construction	Objectif de <b>création de logements</b>
Communale		<b>Zonage</b>	<b>Règlement</b>	
Parcellaire			Opérations spéciales d'aménagement	

# Différents types de contraintes réglementaires

Type de contrainte Échelle	Zone non urbanisable	Emplacement du développement résidentiel	Type des bâtiments	Type des logements
Bassin de vie	<b>Artificialisation</b> <b>Trames vertes et bleues</b>	Orientation générale	<b>Densification</b>	
Inter-communale	<b>Prévention des risques</b>	Accessibilité	Type des opérations de construction	<b>Objectif de création de logements</b>
Communale		<b>Zonage</b>	<b>Règlement</b>	
Parcellaire			Opérations spéciales d'aménagement	

# Différents types de contraintes réglementaires

Type de contrainte Échelle	Zone non urbanisable	Emplacement du développement résidentiel	Type des bâtiments	Type des logements
Bassin de vie	<b>Artificialisation</b> <b>Trames vertes et bleues</b>	Orientation générale	<b>Densification</b>	
Inter-communale	<b>Prévention des risques</b>	Accessibilité	Type des opérations de construction	Objectif de <b>création de logements</b>
Communale	<b>Zonage</b>		<b>Règlement</b>	
Parcellaire			Opérations spéciales d'aménagement	



- Différents **rédacteurs** des documents de planification et d'urbanisme
- Différentes **échelles** d'application du développement résidentiel
- Objectifs divers
- Effets incertains de chaque document
- Combinaisons potentiellement **contradictoires**

- Différents **rédacteurs** des documents de planification et d'urbanisme
- Différentes **échelles** d'application du développement résidentiel
- Objectifs divers
- Effets incertains de chaque document
- Combinaisons potentiellement **contradictoires**

**Modéliser l'articulation de ces contraintes pour tester leurs combinaisons**

## Objectifs

- Simuler et évaluer le développement résidentiel à différents niveaux d'échelle et selon les contraintes issues de la réglementation

# Objectifs de la modélisation

## Objectifs

- Simuler et évaluer le développement résidentiel à différents niveaux d'échelle et selon les contraintes issues de la réglementation
- Exprimer divers objectifs de la planification :

# Objectifs de la modélisation

## Objectifs

- Simuler et évaluer le développement résidentiel à différents niveaux d'échelle et selon les contraintes issues de la réglementation
- Exprimer divers objectifs de la planification :
  - La création de logements

# Objectifs de la modélisation

## Objectifs

- Simuler et évaluer le développement résidentiel à différents niveaux d'échelle et selon les contraintes issues de la réglementation
- Exprimer divers objectifs de la planification :
  - La création de logements
  - La densité de logements par hectare

# Objectifs de la modélisation

## Objectifs

- Simuler et évaluer le développement résidentiel à différents niveaux d'échelle et selon les contraintes issues de la réglementation
- Exprimer divers objectifs de la planification :
  - La création de logements
  - La densité de logements par hectare
  - L'accessibilité (aux transports en communs, ...)

# Objectifs de la modélisation

## Objectifs

- Simuler et évaluer le développement résidentiel à différents niveaux d'échelle et selon les contraintes issues de la réglementation
- Exprimer divers objectifs de la planification :
  - La création de logements
  - La densité de logements par hectare
  - L'accessibilité (aux transports en communs, ...)

## Moyens

- Modélisation descriptive

# Objectifs de la modélisation

## Objectifs

- Simuler et évaluer le développement résidentiel à différents niveaux d'échelle et selon les contraintes issues de la réglementation
- Exprimer divers objectifs de la planification :
  - La création de logements
  - La densité de logements par hectare
  - L'accessibilité (aux transports en communs, ...)

## Moyens

- Modélisation descriptive
- Passage d'un état initial à un état final

# Objectifs de la modélisation

## Objectifs

- Simuler et évaluer le développement résidentiel à différents niveaux d'échelle et selon les contraintes issues de la réglementation
- Exprimer divers objectifs de la planification :
  - La création de logements
  - La densité de logements par hectare
  - L'accessibilité (aux transports en communs, ...)

## Moyens

- Modélisation descriptive
- Passage d'un état initial à un état final
- Pas de reproduction des phénomènes antérieurs

# Objectifs de la modélisation

## Objectifs

- Simuler et évaluer le développement résidentiel à différents niveaux d'échelle et selon les contraintes issues de la réglementation
- Exprimer divers objectifs de la planification :
  - La création de logements
  - La densité de logements par hectare
  - L'accessibilité (aux transports en communs, ...)

## Moyens

- Modélisation descriptive
- Passage d'un état initial à un état final
- Pas de reproduction des phénomènes antérieurs

## Prérequis

- Utilisation de modèles préexistants

# Objectifs de la modélisation

## Objectifs

- Simuler et évaluer le développement résidentiel à différents niveaux d'échelle et selon les contraintes issues de la réglementation
- Exprimer divers objectifs de la planification :
  - La création de logements
  - La densité de logements par hectare
  - L'accessibilité (aux transports en communs, ...)

## Moyens

- Modélisation descriptive
- Passage d'un état initial à un état final
- Pas de reproduction des phénomènes antérieurs

## Prérequis

- Utilisation de modèles préexistants
- Solutions libres et open-source pour une recherche **vérifiable** et **reproductible**

Les modèles d'**occupation du sol** (Batty 1997, Arentze 2008, Tannier 2010, Mustapha 2018).

- Simulation du changement d'état de l'occupation du sol et particulièrement de l'urbanisation
- Poursuis de nombreux objectifs :
  - Exploratoire (potentiels d'urbanisation)
  - Prévisionnel (marché immobilier, changements démographiques)
  - Prospectif (évolutions possibles)

Limites par rapport à nos objectifs :

- Espace géographique simplifié
- Peu de place pour la prise en compte des réglementations
- Souvent calibrés sur des dynamiques passées

# État de l'art des modèles intégrés simulant le développement résidentiel

Les approches intégrées, telles que les LUTI (Land-Use and Transportation Interaction), permettent de :

- Simuler les interactions entre différents modèles (occupation du sol, mobilités, systèmes économiques ...)
- Articuler différents systèmes modélisés

Limites par rapport à nos objectifs :

- Modélisation des mobilités non nécessaires à notre problème

# État de l'art des modèles intégrés simulant le développement résidentiel

Les approches intégrées, telles que les LUTI (Land-Use and Transportation Interaction), permettent de :

- Simuler les interactions entre différents modèles (occupation du sol, mobilités, systèmes économiques ...)
- Articuler différents systèmes modélisés

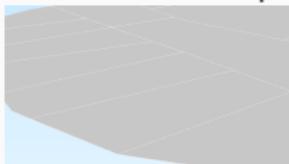
Limites par rapport à nos objectifs :

- Modélisation des mobilités non nécessaires à notre problème

Approches du couplage du modèle en phase avec mes objectifs agissant à **différentes échelles**

# État de l'art des modèles génératifs de développements résidentiels

## Génération de parcelles

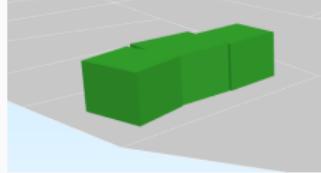


- Processus géo-historiques (Perret 2015)
- Génération procédurale (Vanegas 2012)
- Génération paramétrique (Yazycy 2016)

Limites par rapport à nos objectifs :

- Appliqué à un niveau très local

## Génération de bâtiments



- Génération procédurale (BIM)
- Génération paramétrique (Coors 2009)
- Optimisation sous contrainte (Brasebin 2014)

# Problématique

Comment simuler le **développement résidentiel**  
d'une région urbaine à un niveau **très détaillé**,  
afin d'identifier et d'explorer les effets combinés des différents  
types de **documents de planification et d'urbanisme** ?

Développer un **outil d'aide à la décision** pour l'aménagement, couplant différentes approches de simulation du développement résidentiel, appelé **ArtiScales**

Développer un **outil d'aide à la décision** pour l'aménagement, couplant différentes approches de simulation du développement résidentiel, appelé **ArtiScales**

## Utilisations

- Permettre de comparer plusieurs **scénarios** de développement résidentiels
- Représenter des futurs hypothétiques, recherchés, redoutés

# Plan de la présentation

Introduction  
ArtiScales  
Validation  
Expérimentation  
Conclusion

- Méthodologie d'**ArtiScales** et de ses **modules**
- **Analyse et validation** des modules d'ArtiScales
- **Expérimentation** d'ArtiScales

# ArtiScales

---

Création d'un modèle de développement résidentiel :

- réaliste
- multi-échelle
- ouvert

Estimations concernant :

- Le nombre et de type de logements
- La densités de logements par hectare

Simulation d'un nombre et d'un type  
de logements

Simulation de bâtiments contraints  
par les règlements d'urbanisme sur  
certaines parcelles



Simulation d'un nombre et d'un type  
de logements

Simulation de bâtiments contraints  
par les règlements d'urbanisme sur  
certaines parcelles

**SimPLU3D**

Simulation d'un nombre et d'un type  
de logements



Sélection d'emplacements intéressants à urbaniser et traduisant des contraintes d'aménagement

Simulation de bâtiments contraints par les règlements d'urbanisme sur certaines parcelles

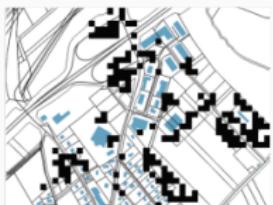
**SimPLU3D**

Simulation d'un nombre et d'un type de logements



Sélection d'emplacements intéressants à urbaniser et traduisant des contraintes d'aménagement

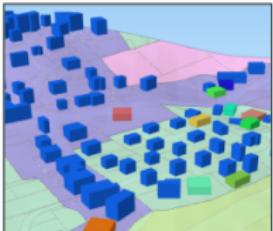
## MUP-City



Simulation de bâtiments contraints par les règlements d'urbanisme sur certaines parcelles

## SimPLU3D

Simulation d'un nombre et d'un type de logements

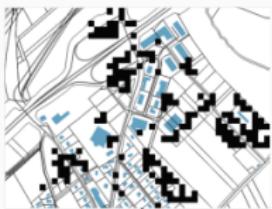


# ArtiScales : Fonctionnement

Sélection d'emplacements intéressants à urbaniser et traduisant des contraintes d'aménagement



Cellules d'environ 20 mètres de côté



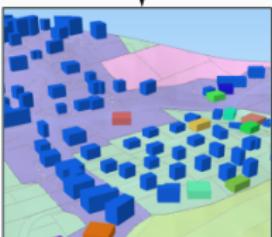
?

Simulation de bâtiments contraints par les règlements d'urbanisme sur certaines parcelles



Parcelle d'entrée

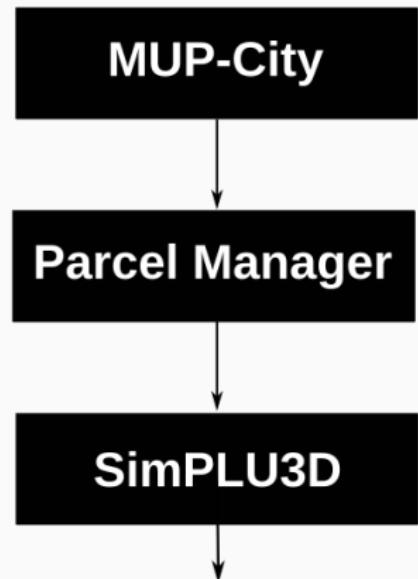
Simulation d'un nombre et d'un type de logements



Sélection d'emplacements intéressants à urbaniser et traduisant des contraintes d'aménagement

Sélection (et recomposition) parcellaire

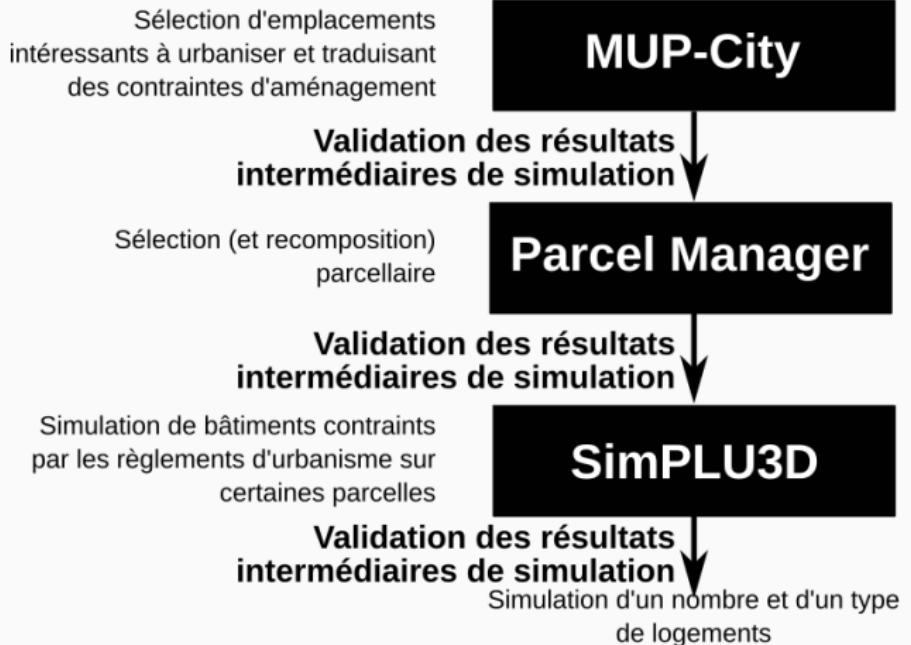
Simulation de bâtiments contraints par les règlements d'urbanisme sur certaines parcelles



Simulation d'un nombre et d'un type de logements



# ArtiScales : Fonctionnement



# **ArtiScales**

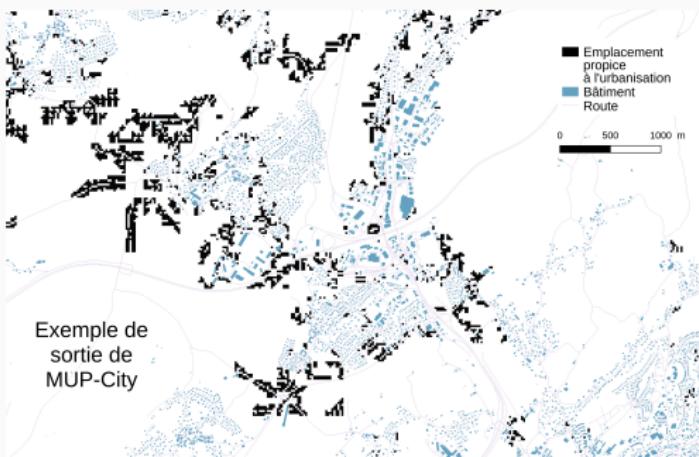
---

**MUP-City et l'indentification  
d'emplacements pour le développement  
résidentiel**

# MUP-City : principes et objectifs



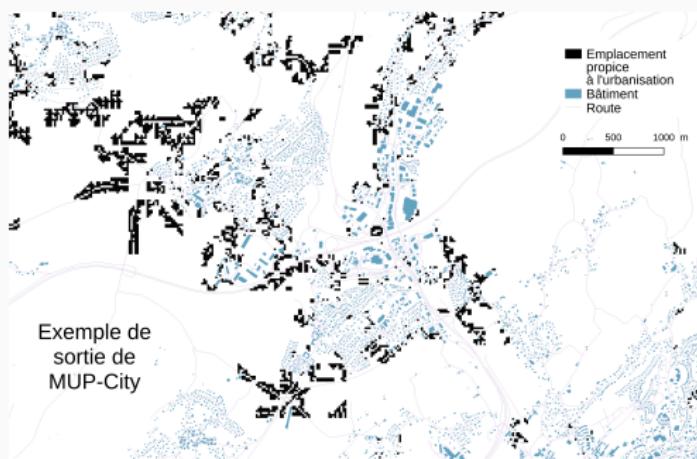
- Propose une **organisation spatiale locale** de développement résidentiel pour une **région urbaine**



# MUP-City : principes et objectifs



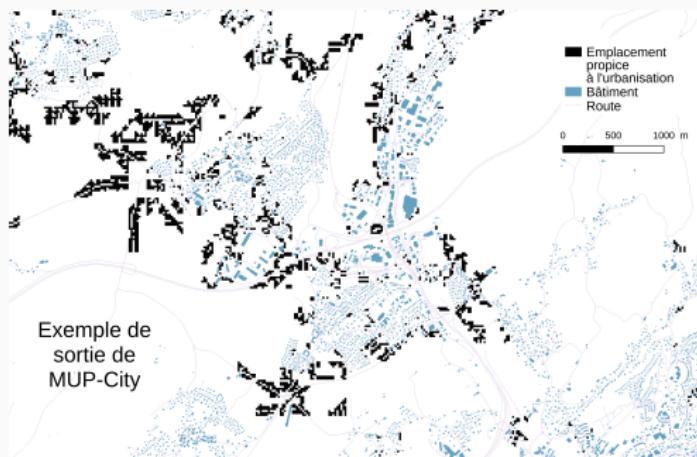
- Propose une **organisation spatiale locale** de développement résidentiel pour une **région urbaine**
  - organisation fractale



# MUP-City : principes et objectifs

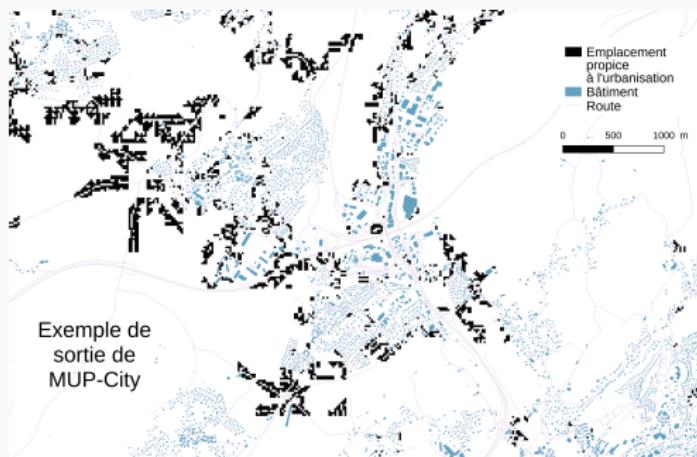


- Propose une **organisation spatiale locale** de développement résidentiel pour une **région urbaine**
  - organisation fractale
  - accessibilité à diverses aménités

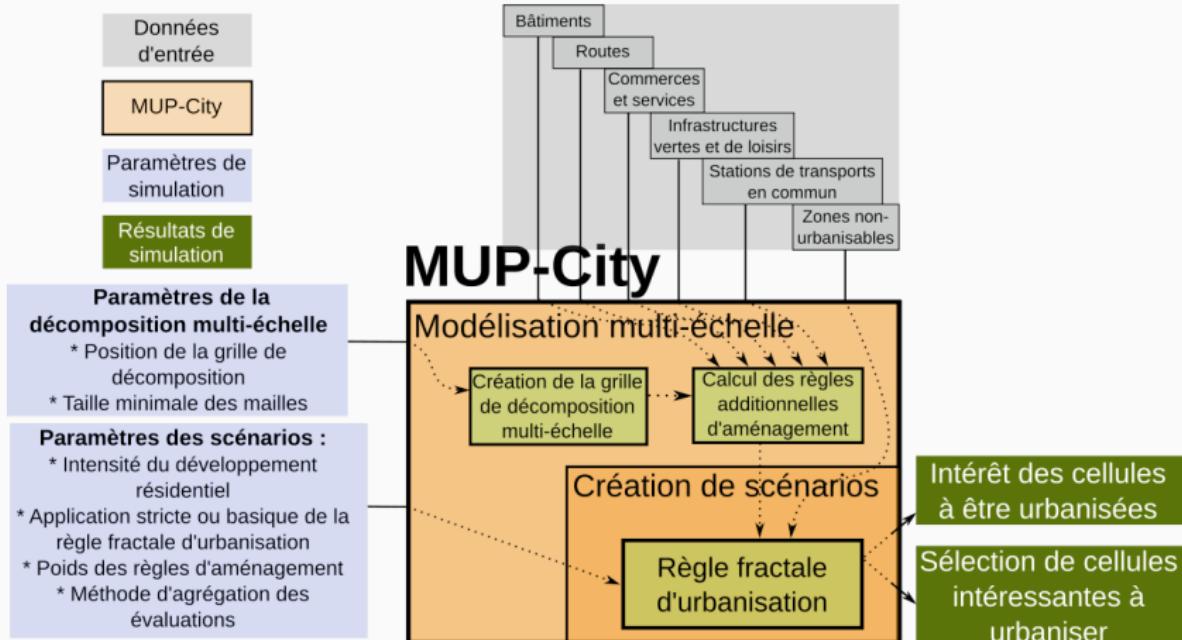




- Propose une **organisation spatiale locale** de développement résidentiel pour une **région urbaine**
  - organisation fractale
  - accessibilité à diverses aménités
- Représente différentes **orientations d'aménagement** grâce à de multiples paramètres.



# MUP-City: fonctionnement



# Variabilité de MUP-City

Les résultats de simulations de MUP-City sont très variables (Tannier 2012, Fremont 2015)

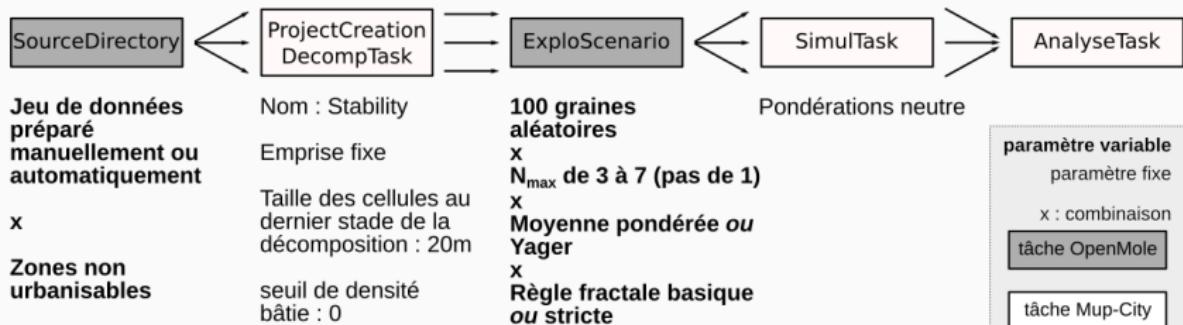


exemple de variations stochastiques des résultats de MUP-City

# Variabilité de MUP-City

Les résultats de simulations de MUP-City sont très variables (Tannier 2012, Fremont 2015)

Exécution automatisé des processus du modèle pour mener une analyse de variabilité



exemple de *workflow* pour l'exploration de la stabilité de MUP-City sur la plateforme OpenMOLE (Reuillon 2013)

# **ArtiScales**

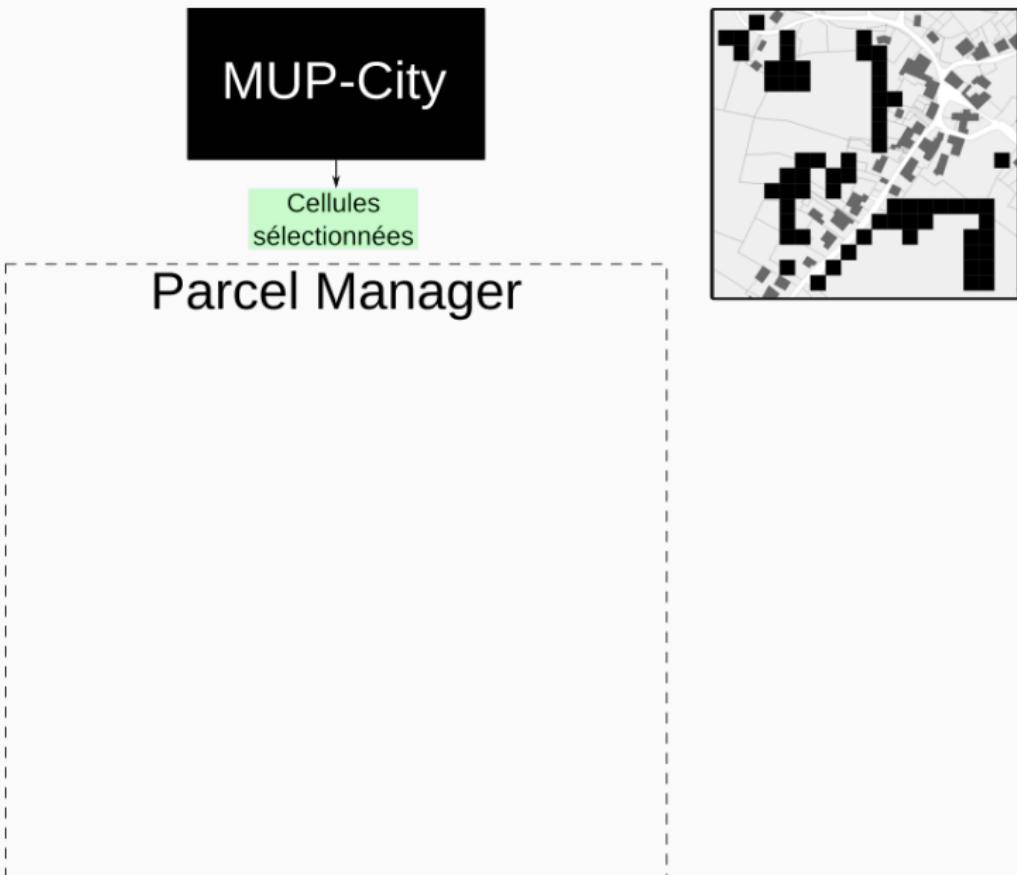
---

**Parcel Manager pour la gestion du  
parcellaire**

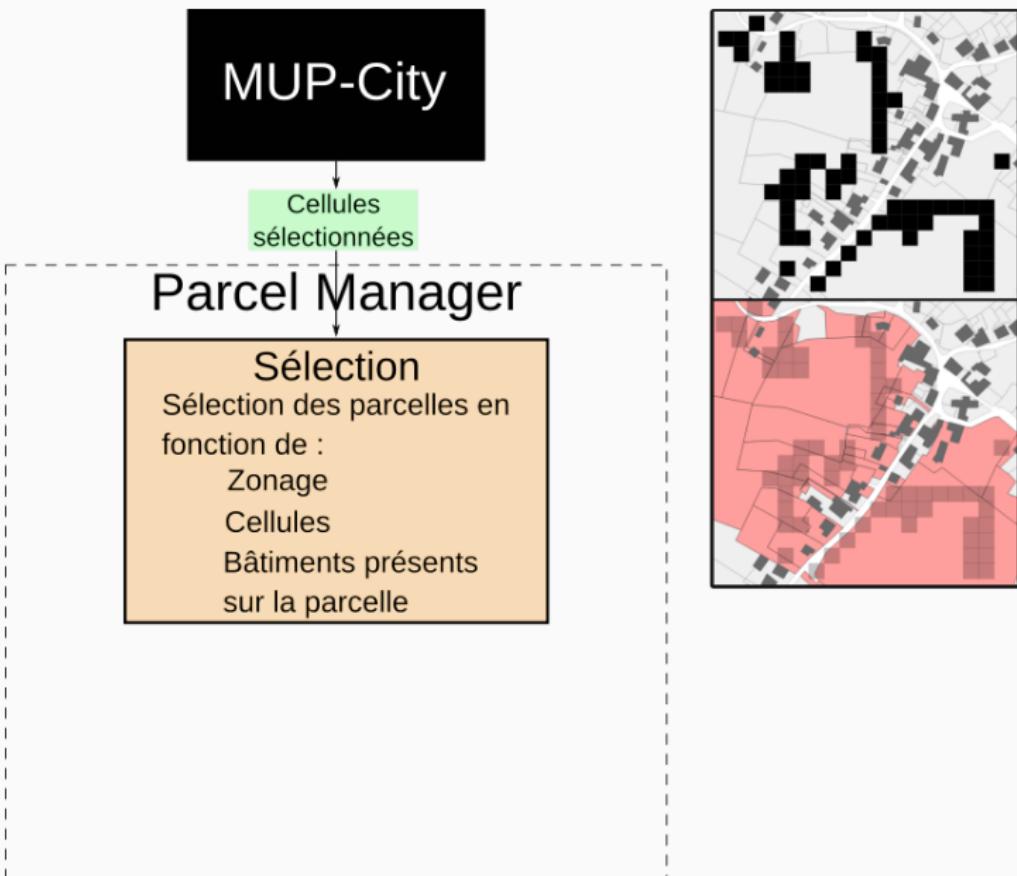
Parcel Manager



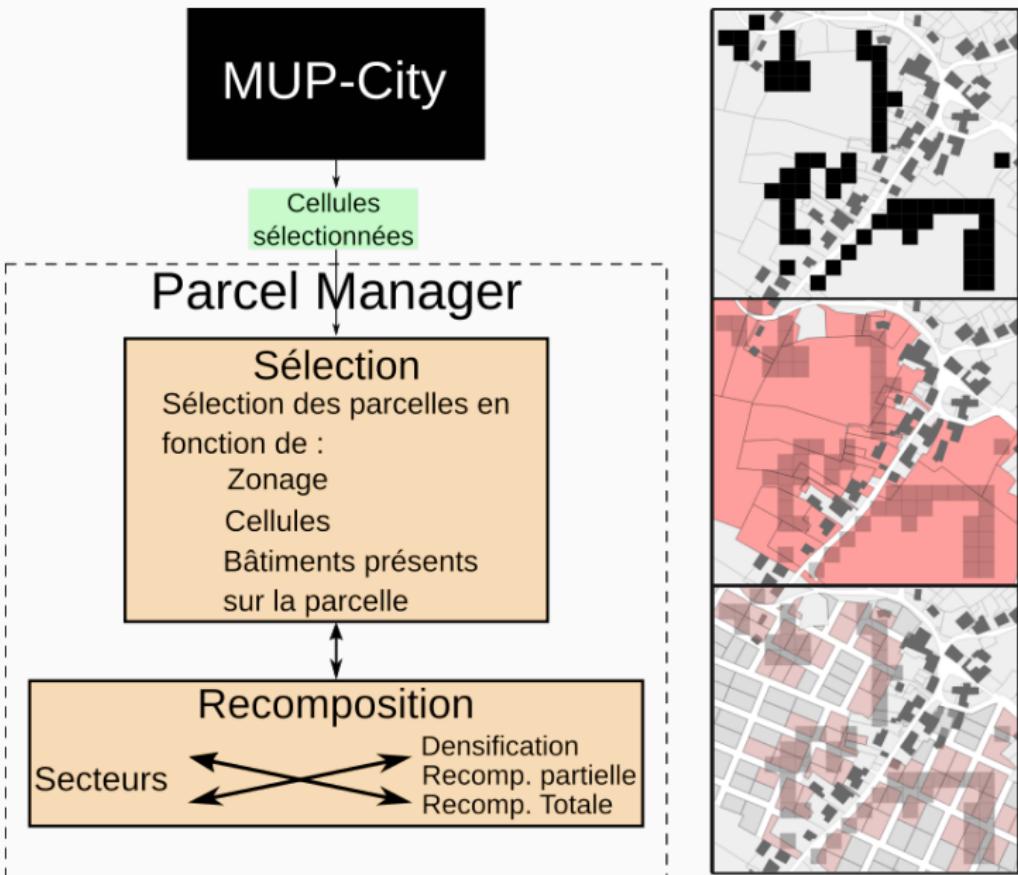
# Présentation du modèle



# Présentation du modèle

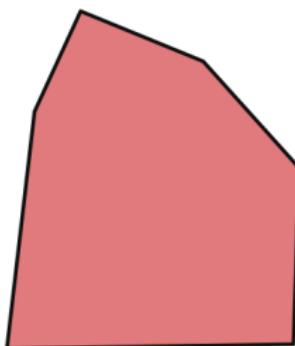


# Présentation du modèle



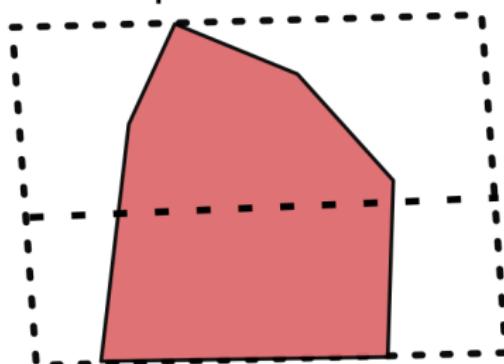
# Algorithme de découpage parcellaire

Parcelle initiale

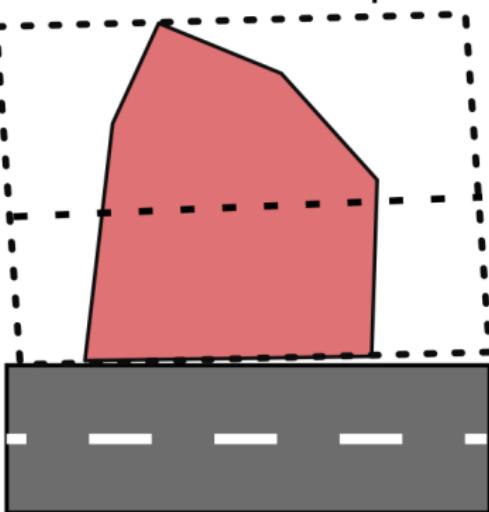


# Algorithme de découpage parcellaire

Boite englobante orientée et séparée en deux

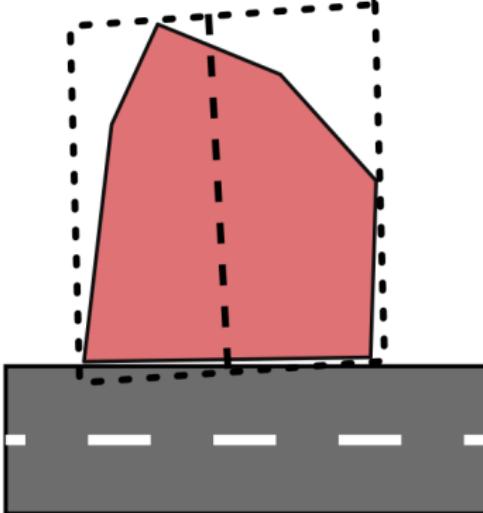


Cherchant à donner un accès à la route aux parcelles

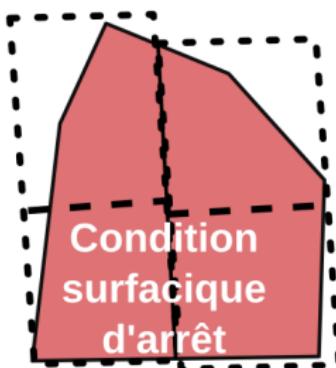


# Algorithme de découpage parcellaire

Cherchant à donner un accès à la route aux parcelles



## Processus itératif



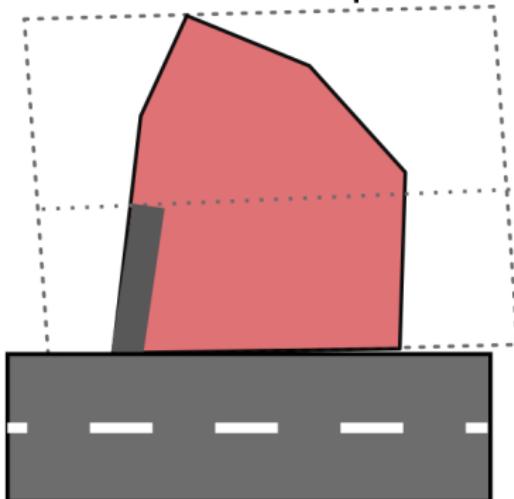
# Algorithme de découpage parcellaire

création de voirie?



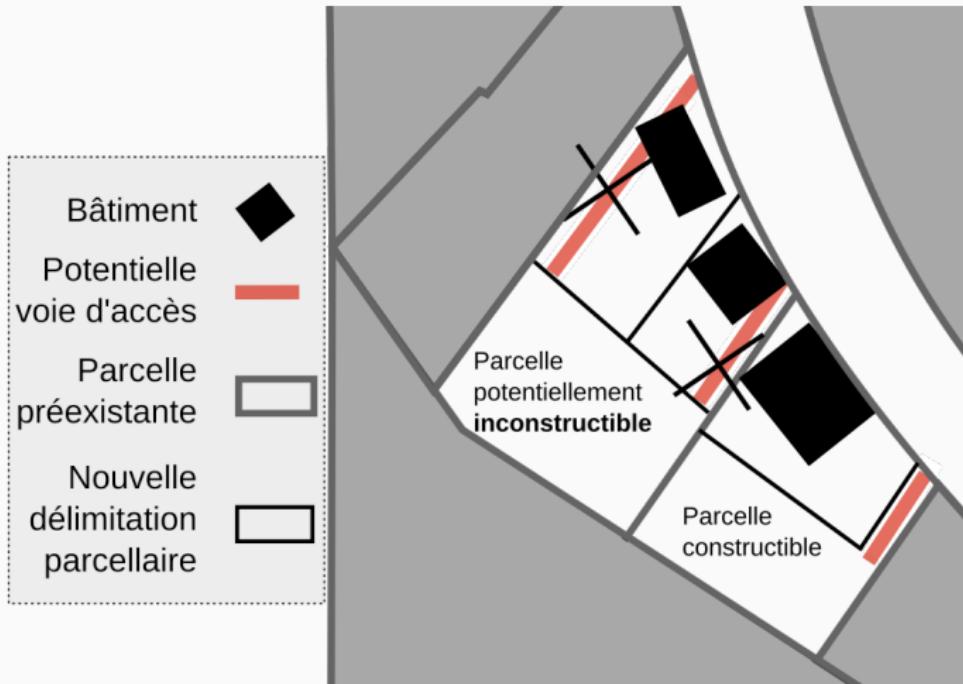
# Algorithme de découpage parcellaire

Possibilité de générer une route  
sur un côté de la parcelle ?



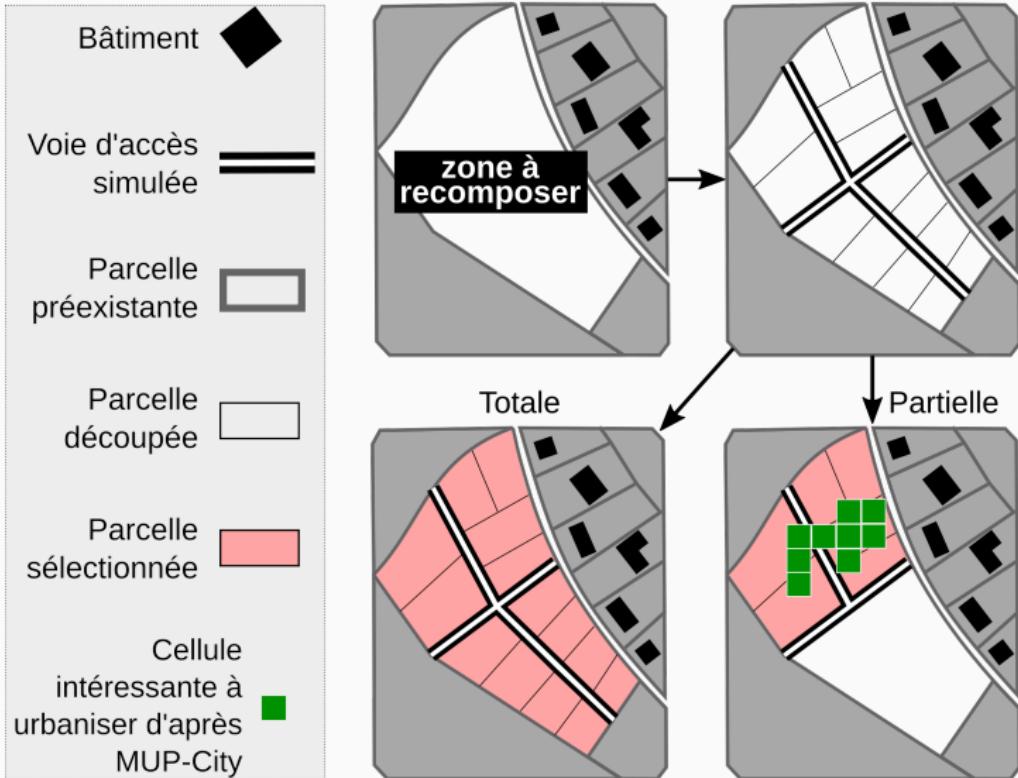
- Densification
- Recomposition parcellaire totale
- Recomposition parcellaire partielle

# Densification



- Densification
- Recomposition parcellaire totale
- Recomposition parcellaire partielle

# Recomposition parcellaire totale et partielle



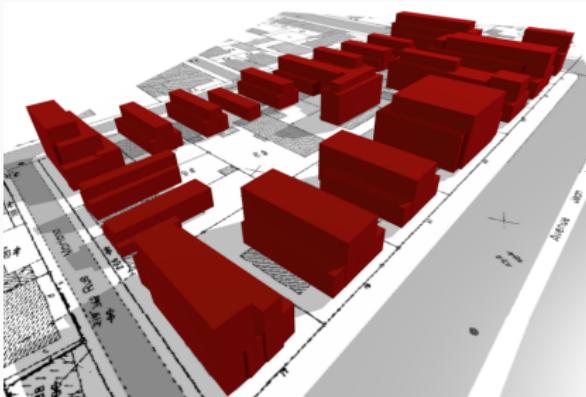
# **ArtiScales**

---

**SimPLU3D et la simulation de bâtiments**

## SimPLU3D

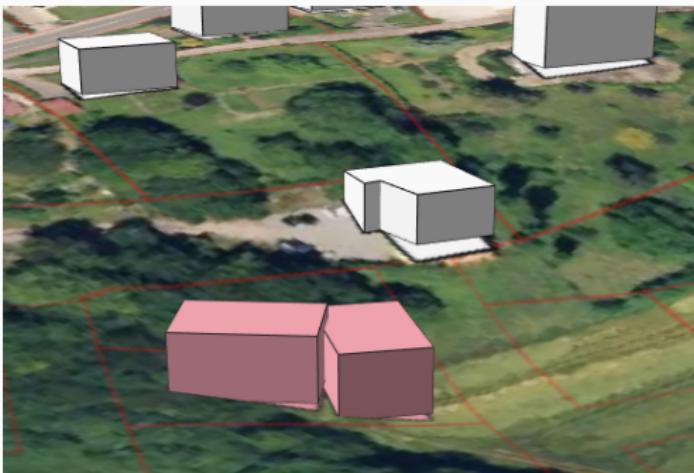
- Génère un ensemble de bâtiments selon
  - les **contraintes réglementaires**
  - un type de forme prédéterminé
- Optimise certains paramètres afin de poursuivre différents **objectifs de construction**
- Simule le comportement d'agents constructeurs



# Formes prédéterminées des bâtiments

Adapter la **forme des bâtiments** simulés aux secteurs  
Cinq types de bâtiments proposés :

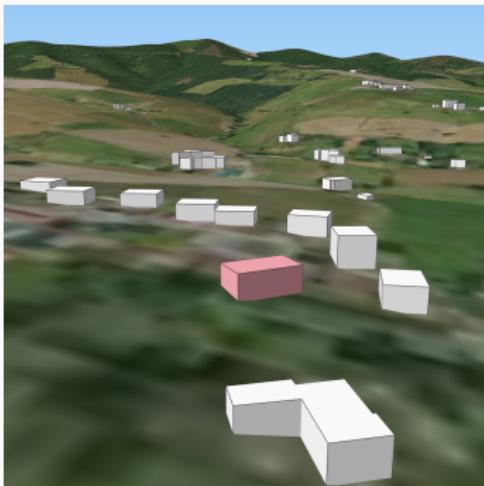
## Maison isolée



logement individuel

Adapter la **forme des bâtiments** simulés aux secteurs  
Cinq types de bâtiments proposés :

## Pavillon de lotissement



logement individuel

Adapter la **forme des bâtiments** simulés aux secteurs  
Cinq types de bâtiments proposés :

## Immeuble d'habitat intermédiaire



[2 – 9] logements

Adapter la **forme des bâtiments** simulés aux secteurs  
Cinq types de bâtiments proposés :

## Petit immeuble collectif



[5 – 30] logements

Adapter la **forme des bâtiments** simulés aux secteurs  
Cinq types de bâtiments proposés :

## Immeuble collectif de taille moyenne



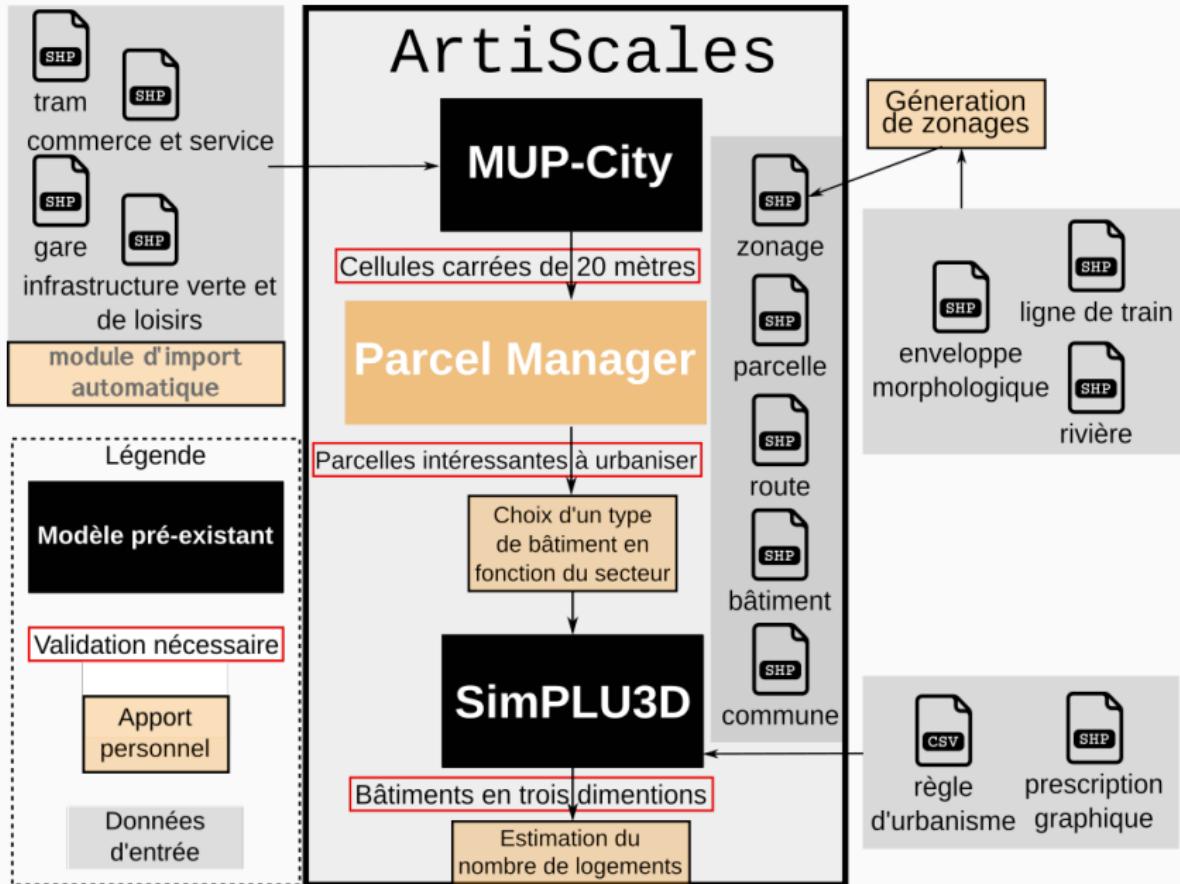
[30 – 60] logements

Unicité d'un bâtiment : contraintes non native

Temps de calculs importants ( $\subset [5\text{minutes} - 20\text{heures}]$ )

- Tirage aléatoire d'une classe d'appartements
- Surface paramétrable de ces classes
- Distribution paramétrable des logements dans l'immeuble

# Construction du modèle ArtiScales



## **Validation des modules d'ArtiScales**

---

# **Validation des modules d'Artiscales**

---

## **Validation du modèle MUP-City**

## Principes

Analyser la variation des résultats de simulation d'un modèle

Rechercher de la source de cette variabilité

## Principes

Analyser la variation des résultats de simulation d'un modèle

Rechercher de la source de cette variabilité

## Objectifs

Évaluer la **fiabilité** des résultats de simulation

Sélectionner de **configurations résidentielles** à exploiter

## Principes

Analyser la variation des résultats de simulation d'un modèle

Rechercher de la source de cette variabilité

## Objectifs

Évaluer la **fiabilité** des résultats de simulation

Sélectionner de **configurations résidentielles** à exploiter

## Approche

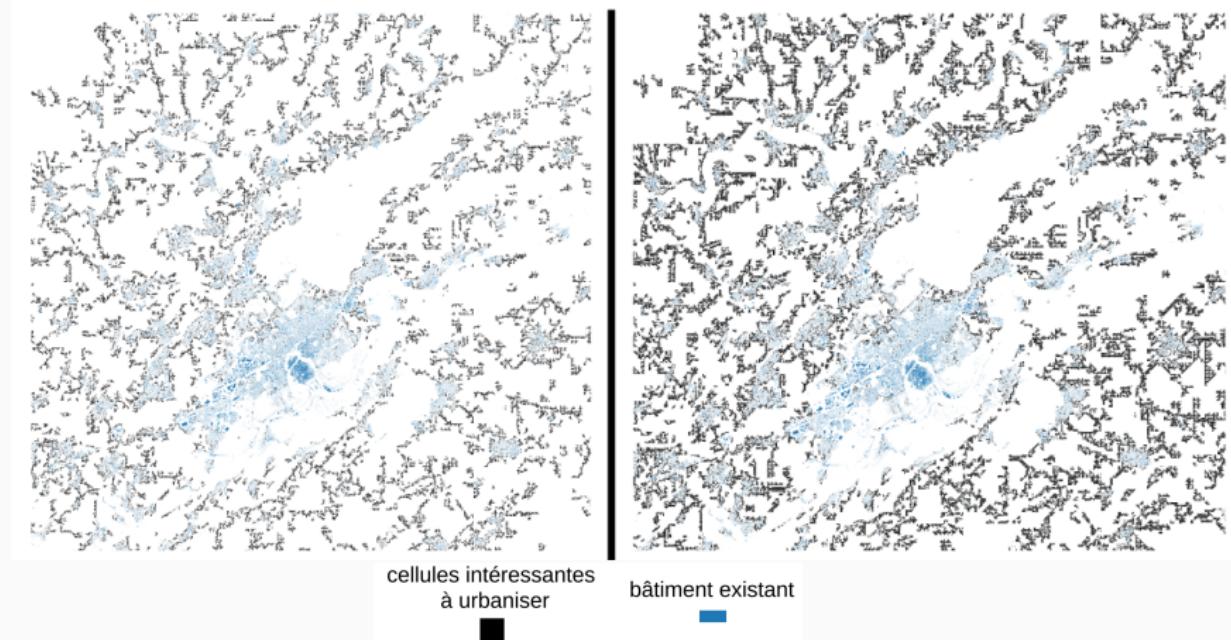
Étude des paramètres dits **techniques** différencié des paramètres dits **scénaristiques**

Différentes catégories de **paramètres techniques** :

- Graine du générateur de nombres pseudo-aléatoires
- Définition et méthode de préparation des jeux de données d'entrée
- Position de la grille de décomposition
- Taille des cellules en sortie

## 1. Intensité du développement résidentiel

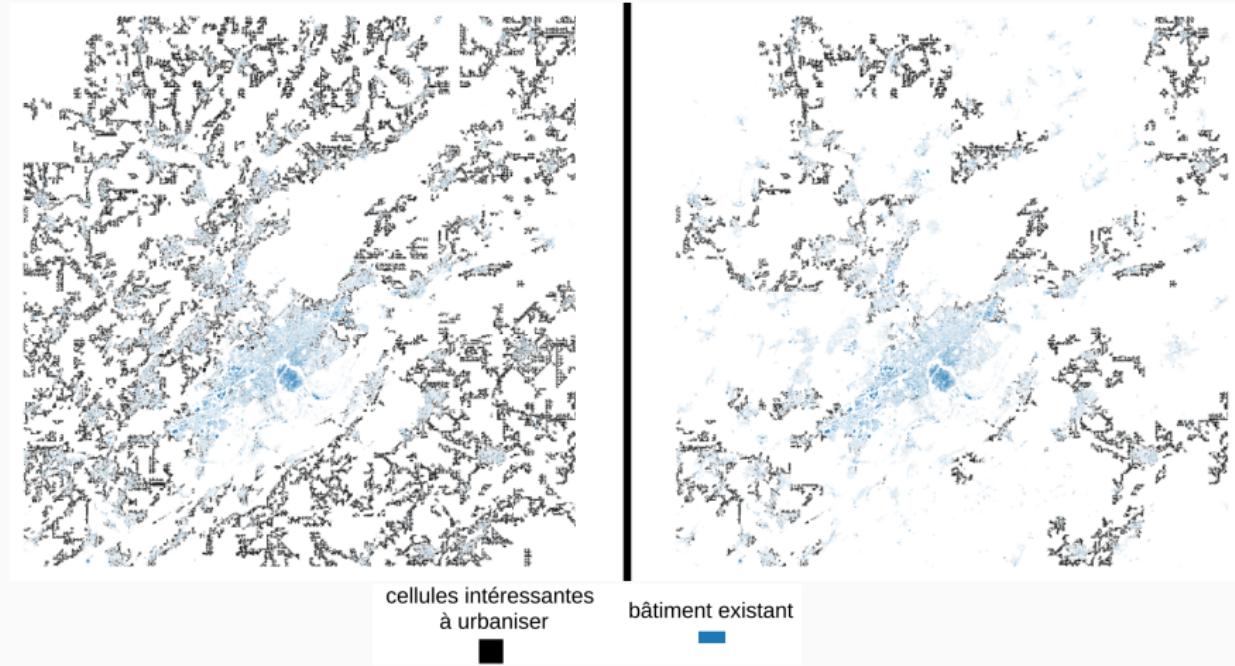
# MUP-City : intensité du développement résidentiel



Exemples d'un scénario peu dense et d'un scénario modérément dense

1. Intensité du développement résidentiel
2. Uniformité du développement résidentiel

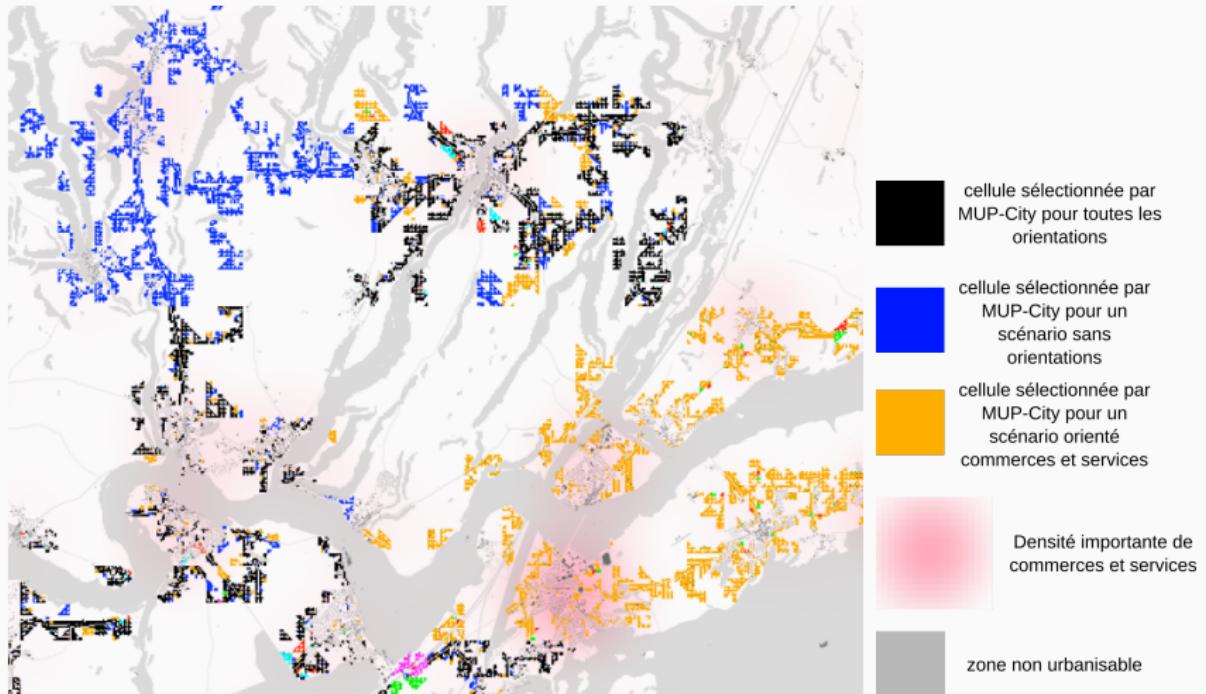
# MUP-City : uniformité du développement résidentiel



Exemples d'un scénario uniforme et d'un scénario contrasté

1. Intensité du développement résidentiel
2. Uniformité du développement résidentiel
3. **Pondération des règles additionnelles d'aménagement**

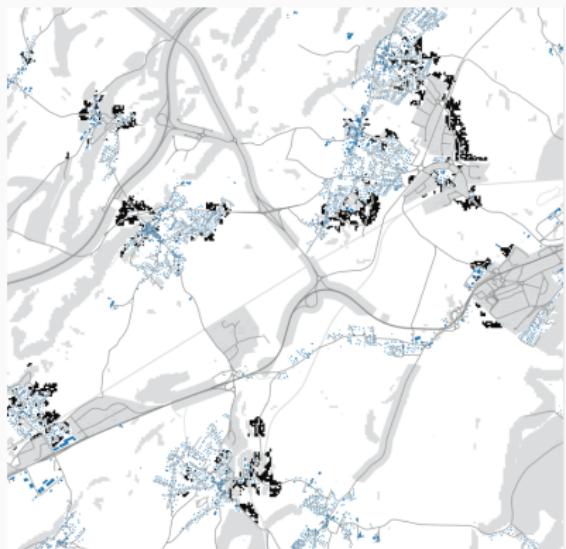
# MUP-City : orientation du développement résidentiel



Exemple de différentes orientations poursuivies par le développement résidentiel

1. Intensité du développement résidentiel
2. Uniformité du développement résidentiel
3. Pondération des règles additionnelles d'aménagement
4. Aggrégation des règles additionnelles d'aménagement

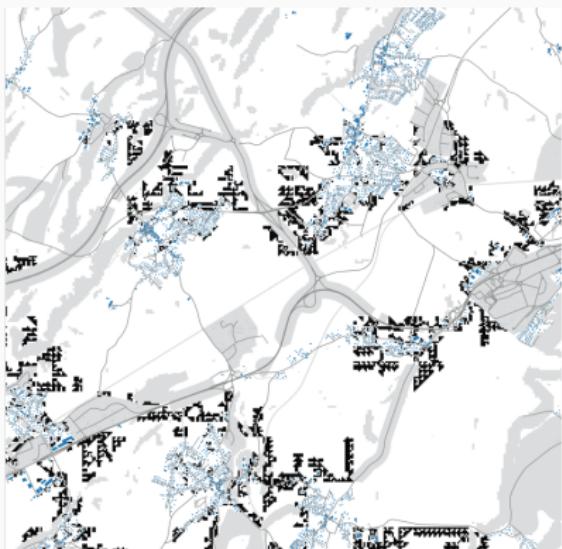
# MUP-City : caractère extensif ou non de l'extension résidentielle



méthode de Yager (1977) (évaluation minimale)

cellules intéressantes  
à urbaniser

bâtiment existant



méthode des moyennes pondérées

zone non urbanisable



# Validation de différentes configurations spatiales de MUP-City

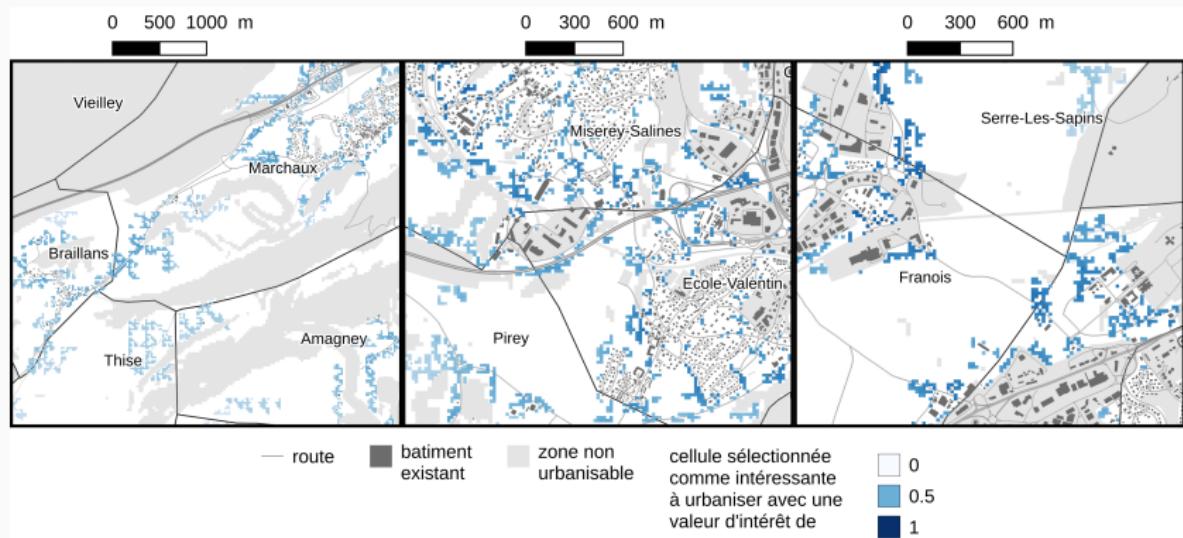
## Indicateurs utilisés

- Nombre de cellules selon leurs localisations
- Correspondance aux objectifs de création de logements
- Dimension fractale, accessibilité ...

# Validation de différentes configurations spatiales de MUP-City

## Scénario d'**étalement** résidentiel

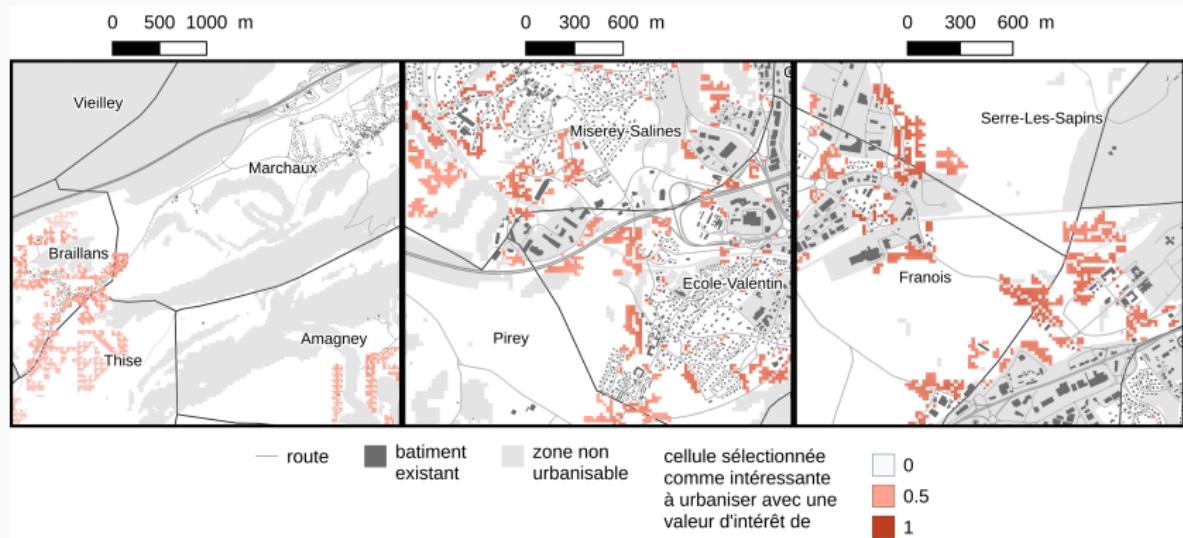
Scénario de développement résidentiel **uniforme, peu intense et extensif** :



# Validation de différentes configurations spatiales de MUP-City

## Scénario de développement résidentiel ciblée

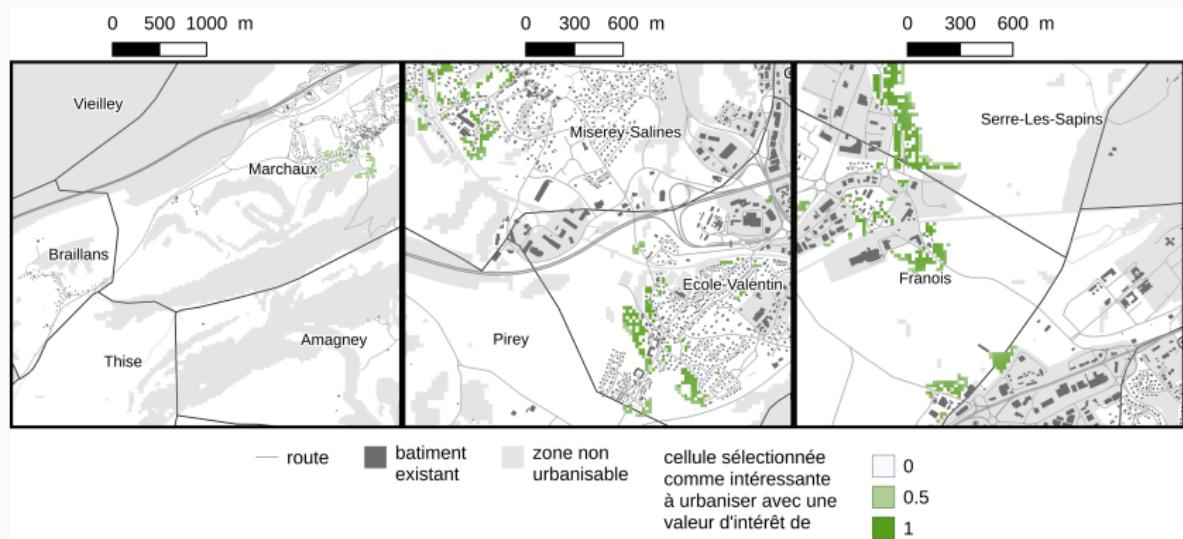
Scénario de développement résidentiel **contrasté, extensif et intense** :



# Validation de différentes configurations spatiales de MUP-City

## Scénario d'**intensification** de la densité résidentielle

Scénario de développement résidentiel **peu extensif et très intense** :



Combinaison des paramètres techniques aux scénarios définis

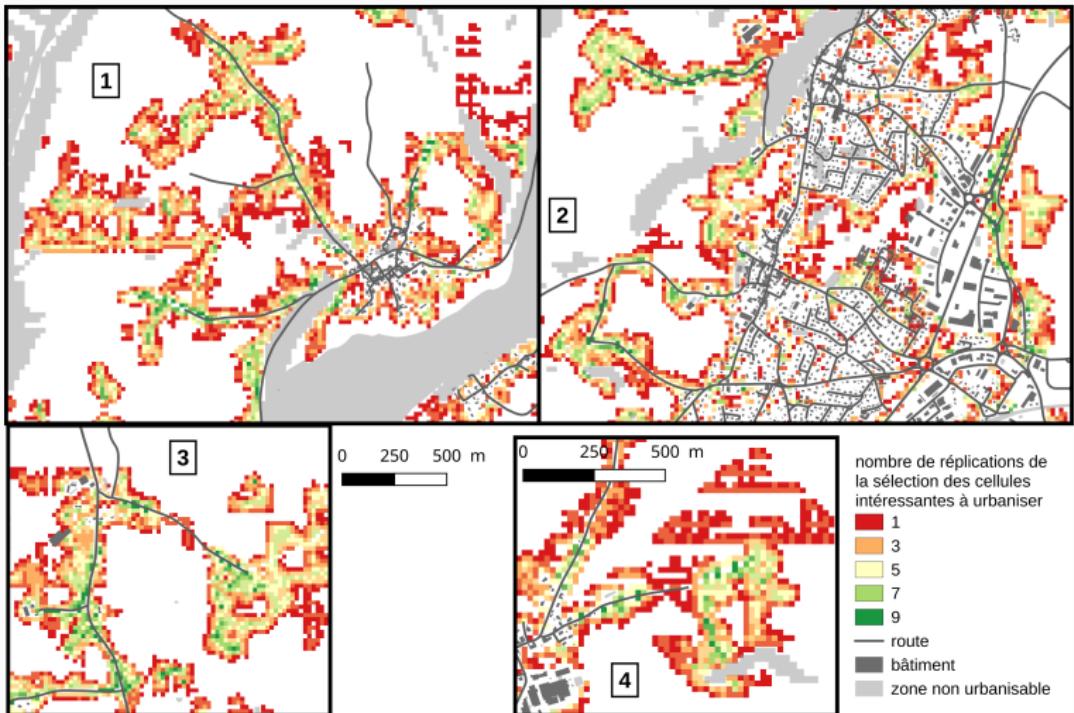
## Indicateurs :

- RéPLICATION de la sélection des cellules
- Intérêt des cellules à être urbanisées
- Surface sélectionnée

## Scénario d'**étalement** résidentiel

- Variable selon la position éloignée de la grille de décomposition
- Peu variable selon d'autres paramètres techniques

# MUP-City : variabilité due aux paramètres techniques

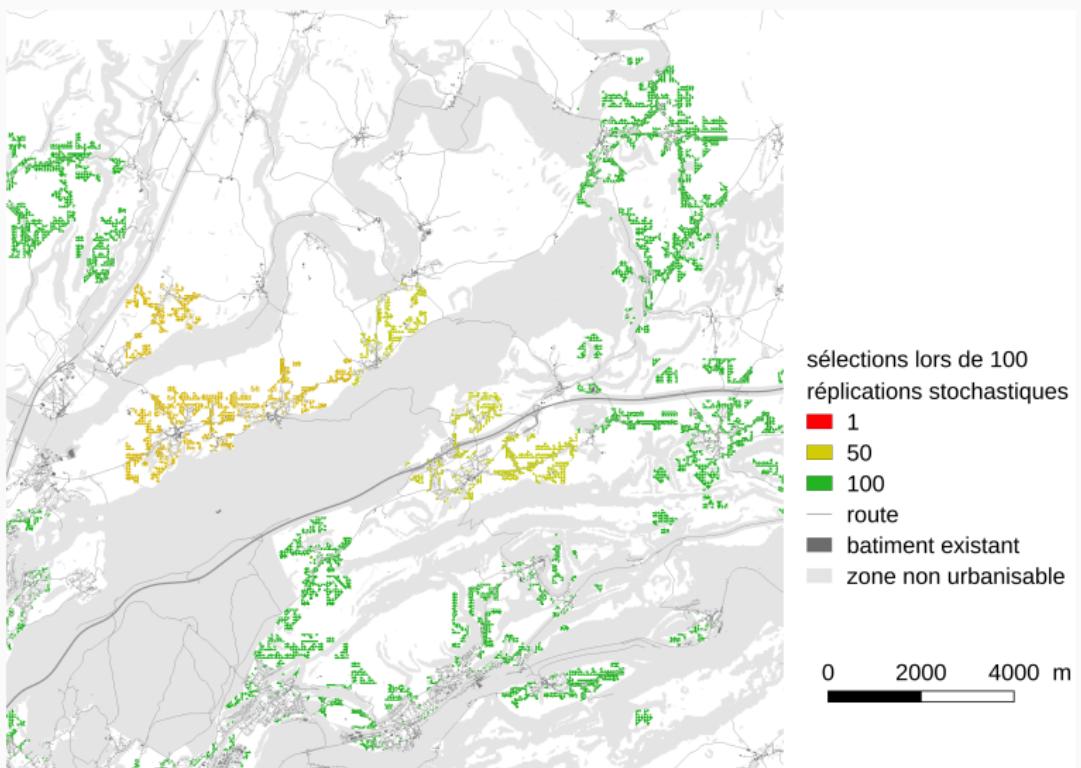


exemple de l'application d'un décalage de 20 mètres à la grille de décomposition

## Scénario de **développement** résidentiel **ciblé**

- Variable selon la position éloignée de la grille de décomposition
- Très variable selon la taille des cellules
- Potentiellement très variable du fait du **caractère aléatoire**

# MUP-City : variabilité due aux paramètres techniques

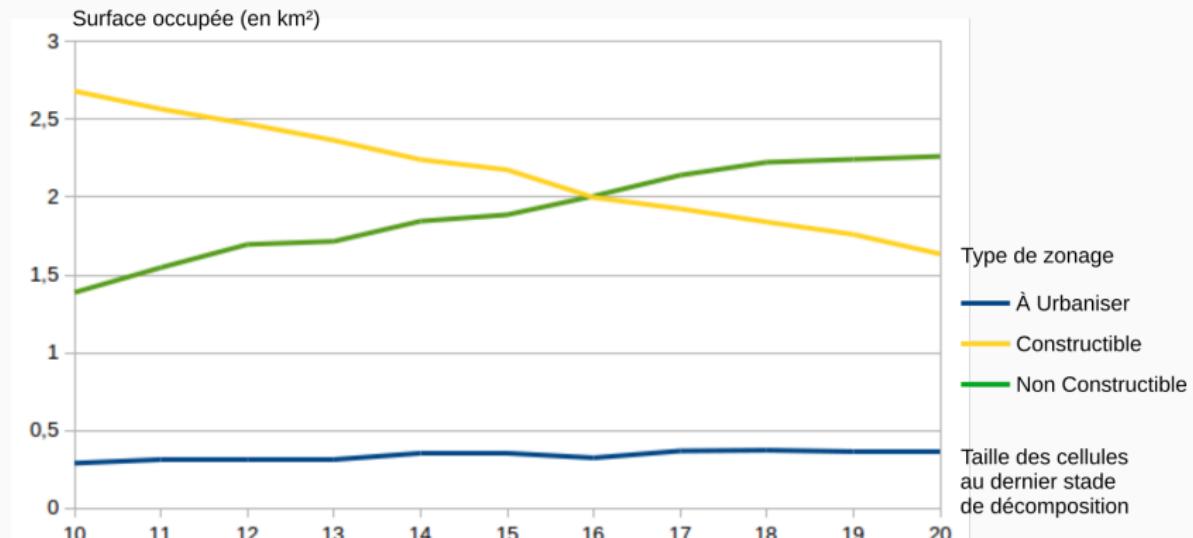


exemple de réplications stochastique

## Scénario d'**intensification** de la densité résidentielle

- Variable du fait du **caractère aléatoire**
- Localement très sensible à la position de la grille de décomposition
- Taille des cellules selon différents types de zonage

# MUP-City : variabilité due aux paramètres techniques



surface de cellules sélectionnée selon différents types de zonage

## Conclusion

La variation des paramètres techniques n'ont pas les mêmes effets selon les scénarios

## Conclusion

La variation des paramètres techniques n'ont pas les mêmes effets selon les scénarios

Sélection de différents **scénarios de développement résidentiel** ainsi que des **variantes** de ces scénarios

## Conclusion

La variation des paramètres techniques n'ont pas les mêmes effets selon les scénarios

Sélection de différents **scénarios de développement résidentiel** ainsi que des **variantes** de ces scénarios

**Validation thématique** de ces scénarios

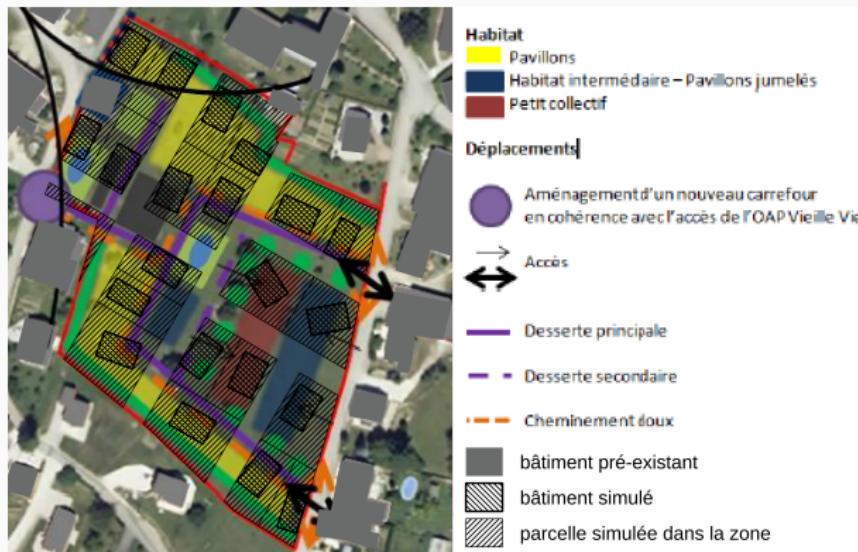
# **Validation des modules d'Artiscales**

---

## **Validation du Parcel Manager**

# Validation du Parcel Manager

Application de l'algorithme sur l'ensemble des zones AU et comparaison visuelle avec certaines opérations spéciales d'aménagement



comparaison du mécanisme de recomposition parcellaire totale appliqué sur les zones AU avec un OAP de *la tour de Scay*

# **Validation des modules d'Artiscales**

---

## **Validation du Parcel Manager**

## Étude des paramètres de SimPLU3D

- Étude du caractère aléatoire : très faible (*Brasebin, 2014*)
- Étude de l'effet des paramètres scénaristiques : (*Chapron et al, 2017*)

## Étude des paramètres de SimPLU3D

- Étude du caractère aléatoire : très faible (*Brasebin, 2014*)
- Étude de l'effet des paramètres scénaristiques : (*Chapron et al, 2017*)
- Pour chaque bâtiments : estimations du nombre de logement et comparaison avec les attente pour le type de bâtiment
  - Rétro-calculation si incompatibilité
- **Validation thématique** de ces définitions de type de bâtiment

# **Expérimentation d'ArtiScales sur l'aire urbaine de Besançon**

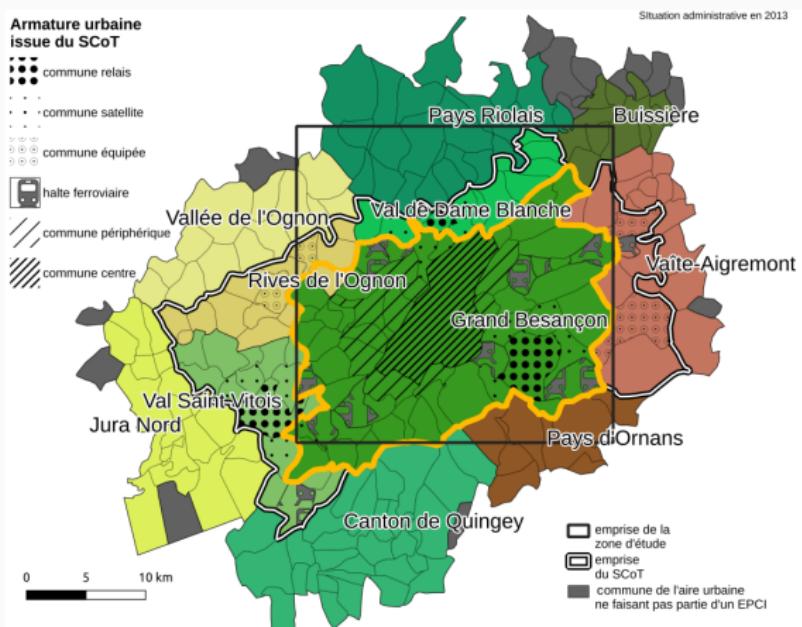
---

## Objectifs de l'expérimentation

- Évaluer le fonctionnement d'ArtiScales
- Vérification de son intérêt pour l'évaluation des documents de planification et d'urbanisme

## Application à l'aire urbaine de Besançon

### Données d'entrées du modèle : 2012



Nécessité d'une grande puissance de calcul

**Distribution** sur divers environnements grâce à OpenMOLE

- Grille de calcul européenne
- Cluster du LAL

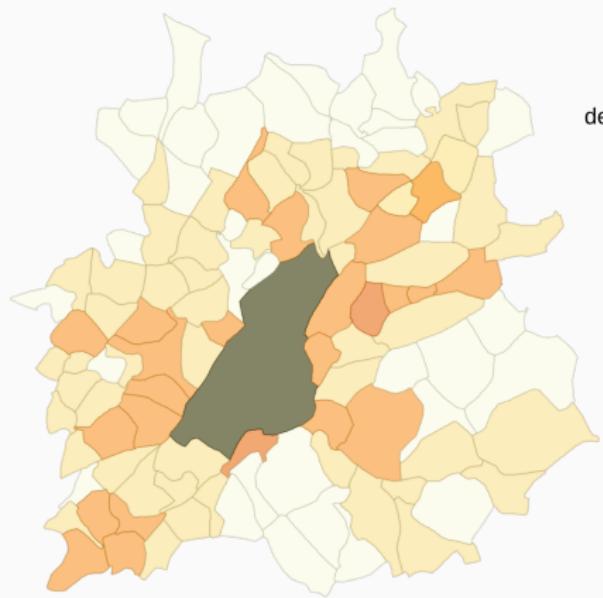
## Deux scénarios de développement résidentiel (+ variantes)

- Développement ciblée (développement résidentiel **contrasté, intense et extensif**)
- Intensification (développement résidentiel **peu extensif** mais **uniforme et très intense**)

## Deux paramétrages de Parcel Manager et SimPLU3D

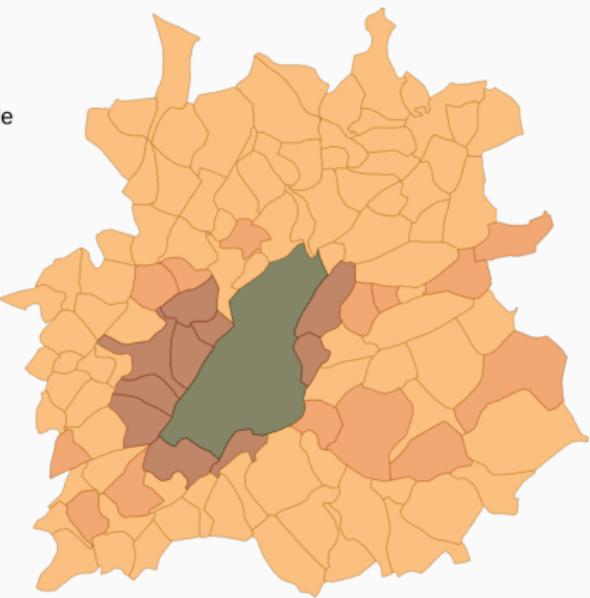
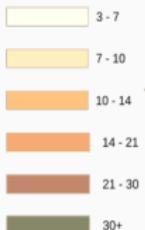
- Forte augmentation de la densité
- Augmentation modérée de la densité

# ArtiScales : Densité nette de logements par hectare



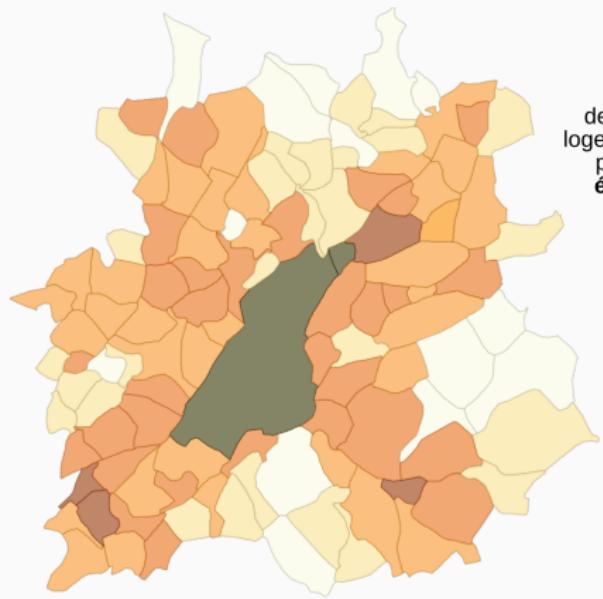
densités initiales

densités nettes de logements par hectare



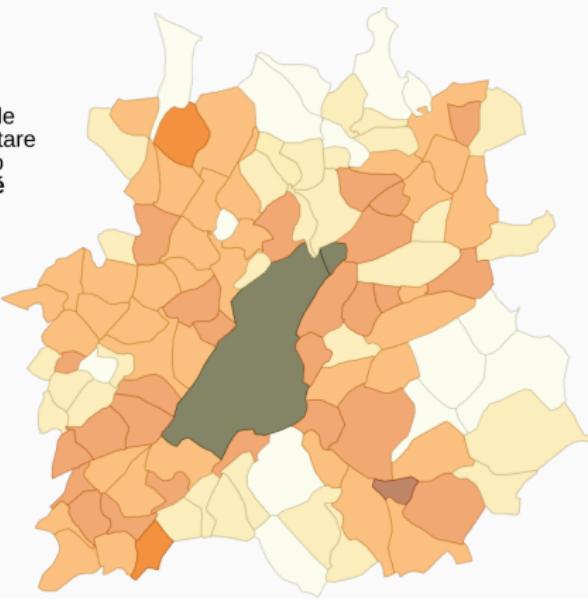
densités objectives

# ArtiScales : Densité nette de logements par hectare



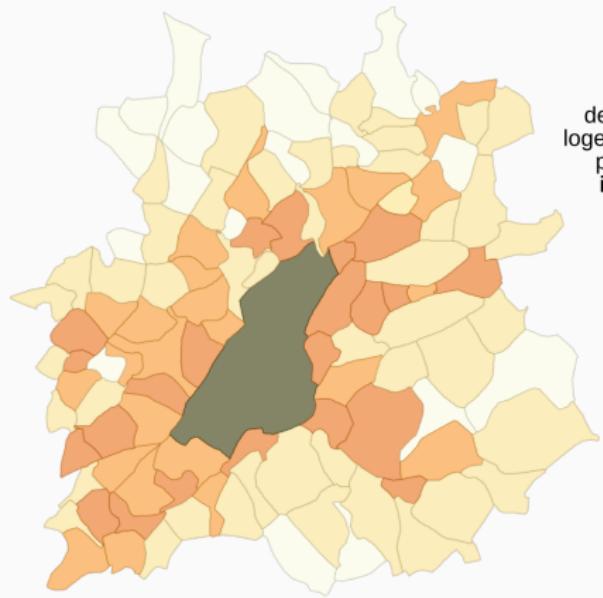
paramétrage **dense**

densités nettes de logements par hectare pour le scénario étalement ciblé



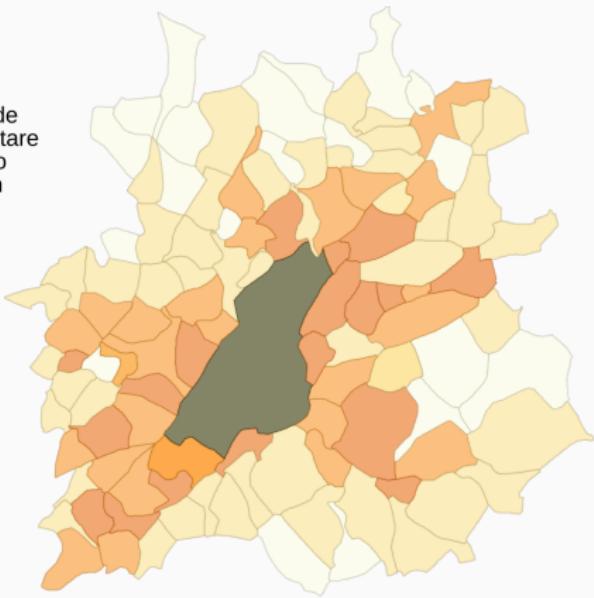
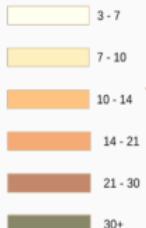
paramétrage **peu dense**

# ArtiScales : Densité nette de logements par hectare



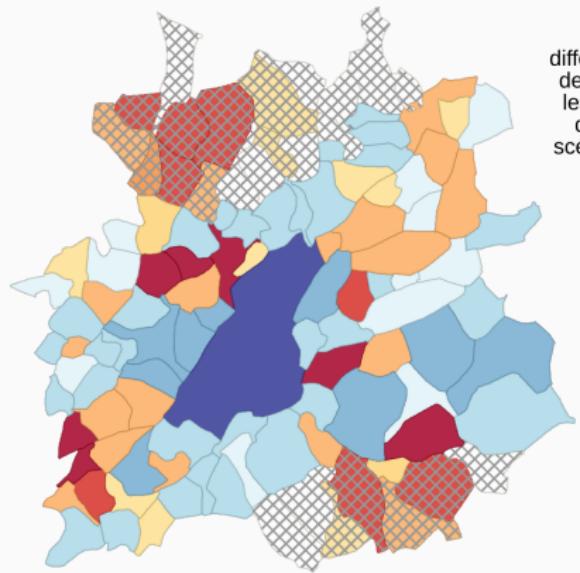
paramétrage **dense**

densités nettes de logements par hectare pour le scénario intensification



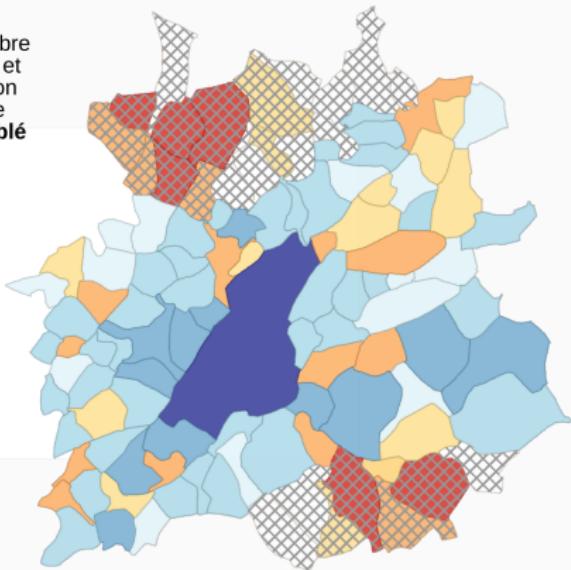
paramétrage **peu dense**

# ArtiScales : Simulation de logements



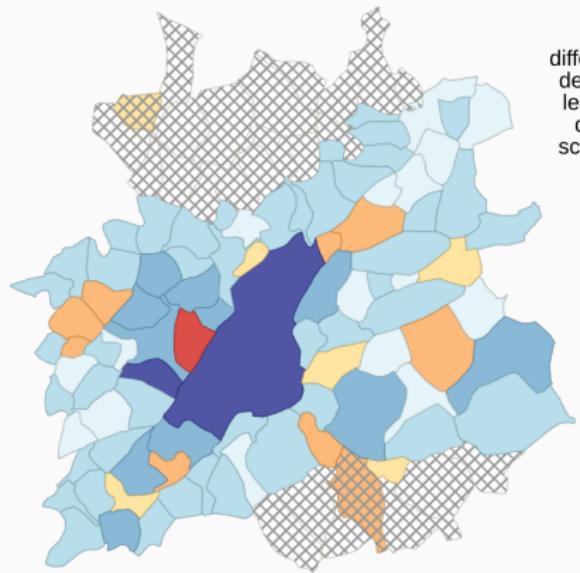
paramétrage dense

différence entre le nombre de logements simulés et les objectifs de création de logements pour le scénario **étalement ciblé**



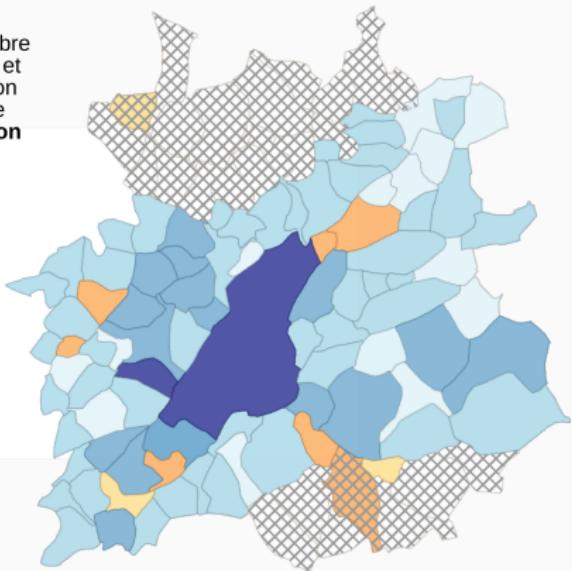
paramétrage peu dense

# ArtiScales : Simulation de logements



paramétrage dense

différence entre le nombre de logements simulés et les objectifs de création de logements pour le scénario **intensification**



paramétrage peu dense

# ArtiScales : Simulation de logements

**Table 1:** Comparaison de la création de logements mesurée par le SCoT avec les estimations des simulations d'ArtiScales

Typologie de l'armature	Densité moyenne simulée pour le scénario :		étalement ciblé		intensification	
	Objectif du SCoT sur 25 ans	Nombre de logements produits en 4 ans <sup>1</sup>	paramétrage dense	paramétrage modérément dense	paramétrage dense	paramétrage modérément dense
Ville centre	18 200	2 621	2 841	3 891	3 192	3 777
Communes périphériques	3 500	505	2 017	1 519	1 764	1 425
Communes relais	1 250	147	402	489	331	356
Communes équipées	600	42	123	21	102	17
Halte ferroviaire	2 200	328	3 248	948	1 207	613
Commune hors armature	5 250	1 055	4 274	1 908	3 511	1 433

<sup>1</sup>d'après l'évaluation du SCoT sur la période 2012-2016

# ArtiScales : Simulation de logements

**Table 1:** Comparaison de la création de logements mesurée par le SCoT avec les estimations des simulations d'ArtiScales

Typologie de l'armature	Densité moyenne simulée pour le scénario :		étalement ciblé		intensification	
	Objectif du SCoT sur 25 ans	Nombre de logements produits en 4 ans <sup>1</sup>	paramétrage dense	paramétrage modérément dense	paramétrage dense	paramétrage modérément dense
Ville centre	18 200 (7 280)	2 621	2 841	3 891	3 192	3 777
Communes périphériques	3 500 (1 400)	505	2 017	1 519	1 764	1 425
Communes relais	1 250 (500)	147	402	489	331	356
Communes équipées	600 (240)	42	123	21	102	17
Halte ferroviaire	2 200 (880)	328	3 248	948	1 207	613
Commune hors armature	5 250 (2 100)	1 055	4 274	1 908	3 511	1 433

De 2012 à 2016, on compte 60% de *renouvellement urbain*

<sup>1</sup>d'après l'évaluation du SCoT sur la période 2012-2016

# ArtiScales : Simulation de logements

**Table 1:** Comparaison de la création de logements mesurée par le SCoT avec les estimations des simulations d'ArtiScales

Typologie de l'armature	Densité moyenne simulée pour le scénario :		étalement ciblé		intensification	
	Objectif du SCoT sur 25 ans	Nombre de logements produits en 4 ans <sup>1</sup>	paramétrage dense	paramétrage modérément dense	paramétrage dense	paramétrage modérément dense
Ville centre	18 200 (7 280)	2 621 -2%	2 841	3 891	3 192	3 777
Communes périphériques	3 500 (1 400)	505 -2%	2 017	1 519	1 764	1 425
Communes relais	1 250 (500)	147 -4%	402	489	331	356
Communes équipées	600 (240)	42 -9%	123	21	102	17
Halte ferroviaire	2 200 (880)	328 -1%	3 248	948	1 207	613
Commune hors armature	5 250 (2 100)	1 055 +4%	4 274	1 908	3 511	1 433

En 4 ans : Production de logements en deçà des objectifs

<sup>1</sup>d'après l'évaluation du SCoT sur la période 2012-2016

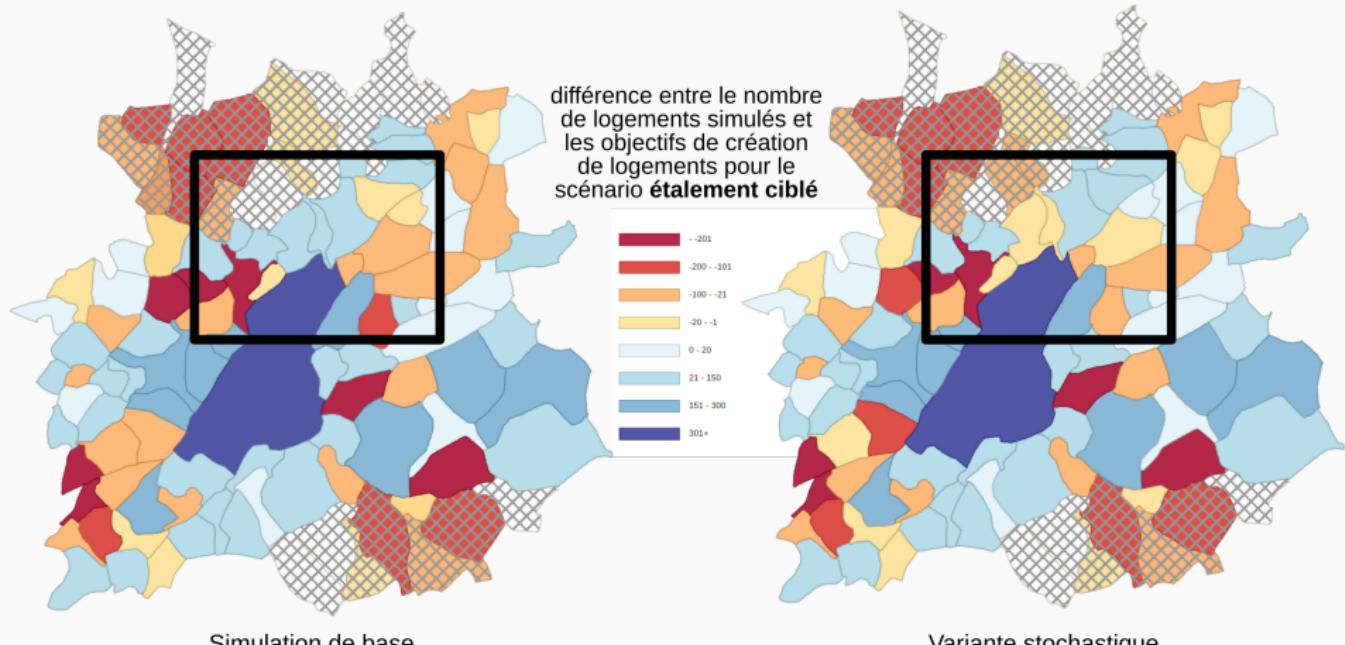
# ArtiScales : Simulation de logements

**Table 1:** Comparaison de la création de logements mesurée par le SCoT avec les estimations des simulations d'ArtiScales

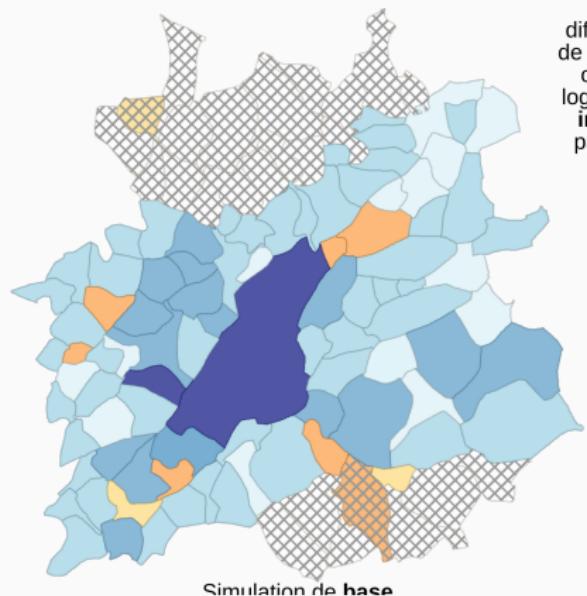
Typologie de l'armature	Densité moyenne simulée pour le scénario :		étalement ciblé		intensification	
	Objectif du SCoT sur 25 ans	Nombre de logements produits en 4 ans <sup>1</sup>	paramétrage dense	paramétrage modérément dense	paramétrage dense	paramétrage modérément dense
Ville centre	18 200 (7 280)	2 621 -2%	2 841	3 891	3 192	3 777
Communes périphériques	3 500 (1 400)	505 -2%	2 017	1 519	1 764	1 425
Communes relais	1 250 (500)	147 -4%	402	489	331	356
Communes équipées	600 (240)	42 -9%	123	21	102	17
Halte ferroviaire	2 200 (880)	328 -1%	3 248	948	1 207	613
Commune hors armature	5 250 (2 100)	1 055 +4%	4 274	1 908	3 511	1 433

<sup>1</sup>d'après l'évaluation du SCoT sur la période 2012-2016

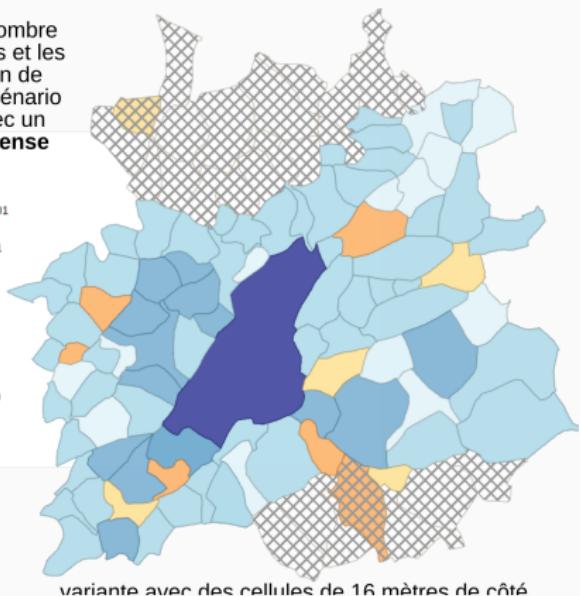
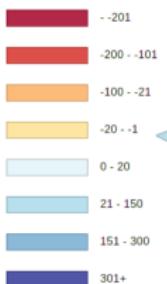
# ArtiScales : Comparaison avec les variantes



# ArtiScales : Comparaison avec les variantes



différence entre le nombre de logements simulés et les objectifs de création de logements pour le scénario **intensification** avec un paramétrage **peu dense**



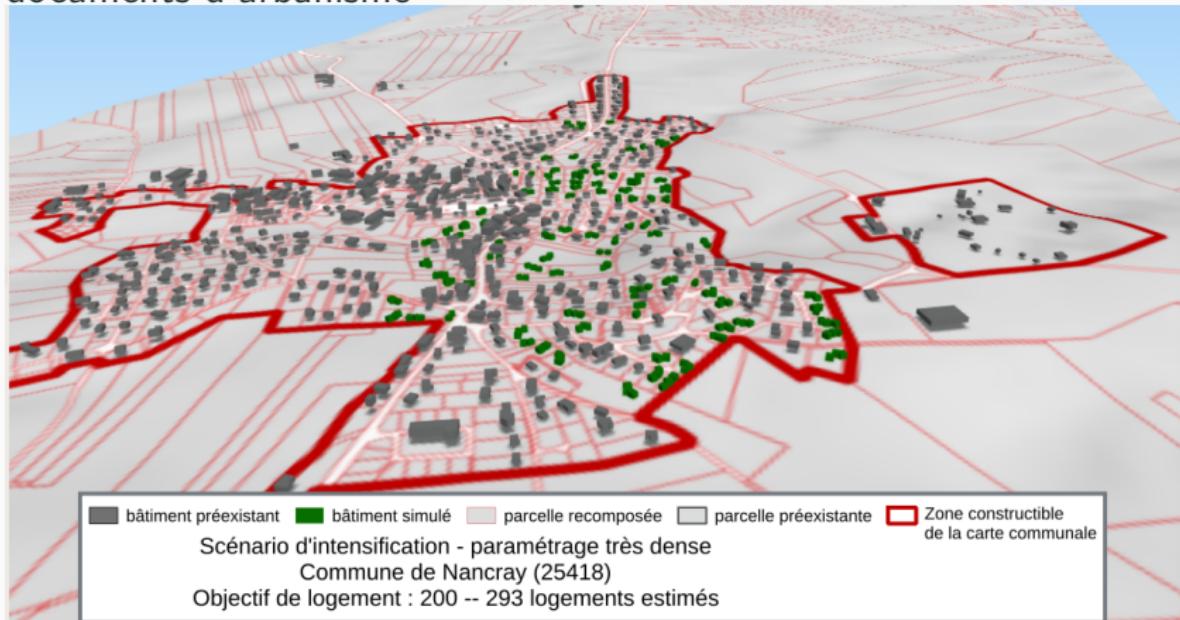
# **Expérimentation d'Artiscales sur l'aire urbaine de Besançon**

---

**Utilisation thématique des résultats  
d'Artiscales**

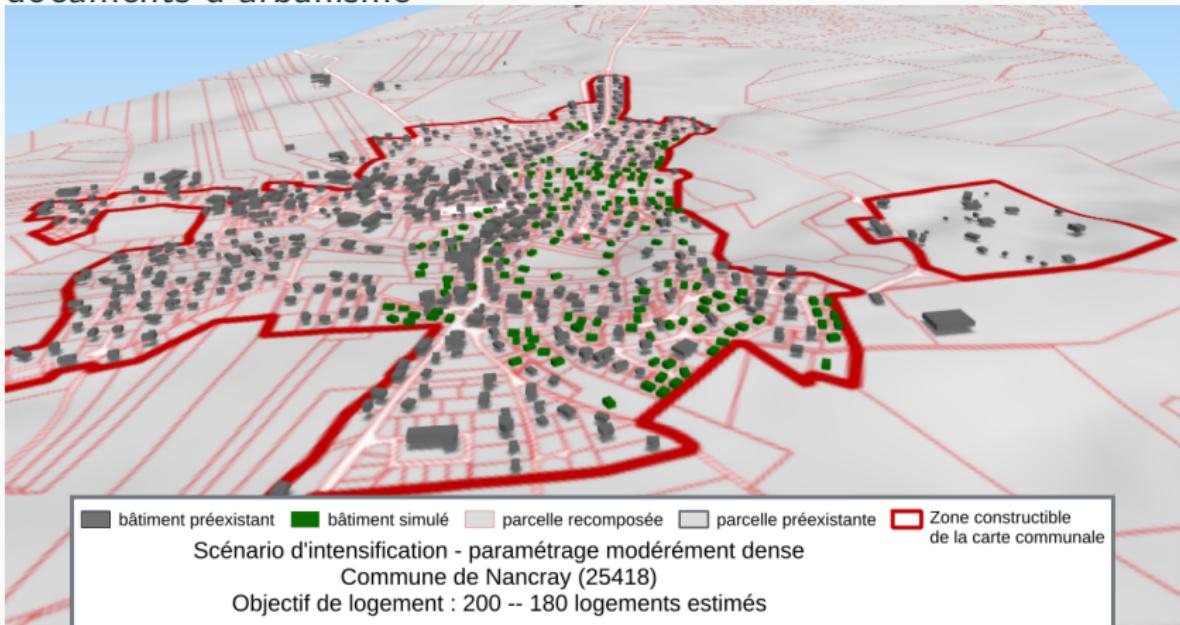
# Incompatibilité entre les documents

Incompatibilité entre les objectifs de création de logements et les documents d'urbanisme



# Incompatibilité entre les documents

Incompatibilité entre les objectifs de création de logements et les documents d'urbanisme



# Incompatibilité entre les documents

Incompatibilité entre les objectifs de création de logements et les documents d'urbanisme



Avanne-Aveney	Objectif de création de logements : 350
Scénario d'ArtiScales	Nombre de logement manquant
Développement ciblé - dense	75
Développement ciblé - peu dense	245
Intensification - dense	259
Intensification - peu dense	285

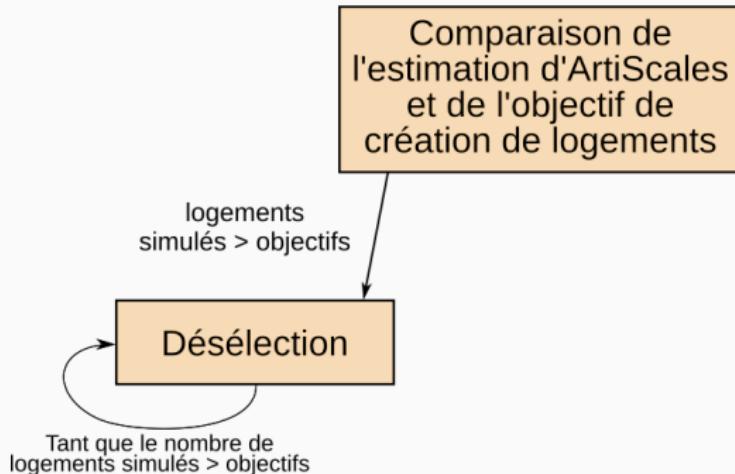
# Incompatibilité entre les documents

## Rétro-action sur le zonage

Comparaison de  
l'estimation d'ArtiScales  
et de l'objectif de  
création de logements

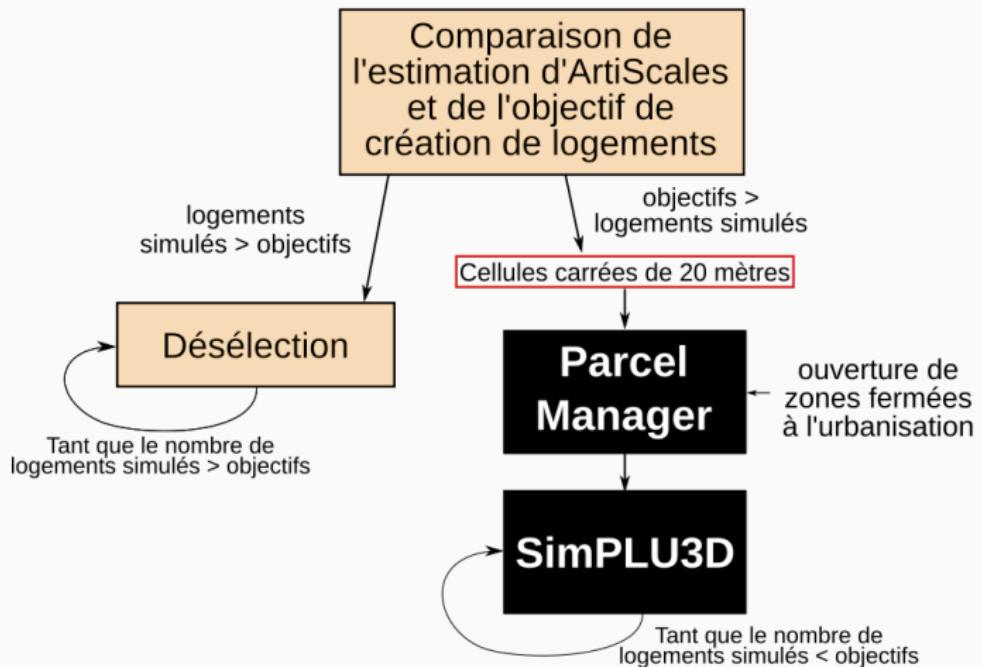
# Incompatibilité entre les documents

## Rétro-action sur le zonage



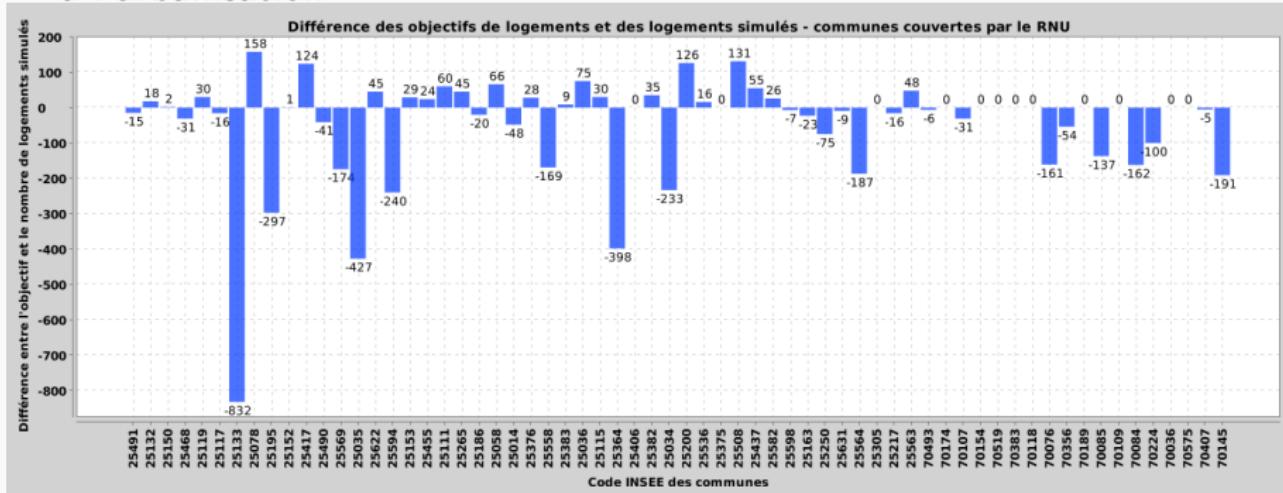
# Incompatibilité entre les documents

## Rétro-action sur le zonage



# Déetecter la nécessité d'un zonage

De nombreuses communes où s'applique le RNU<sup>2</sup> sont trop ouverte à l'urbanisation



<sup>2</sup>dans les communes sans zonage pré-défini, le RNU s'applique dans les *Parties Actuellement Urbanisée (PAU)*

# Possibilité de génération automatique de Cartes Communales

---

Génération automatique de zonage :

# Possibilité de génération automatique de Cartes Communales

---

Génération automatique de zonage :

- enveloppe des parcelles urbanisées

# Possibilité de génération automatique de Cartes Communales

---

Génération automatique de zonage :

- enveloppe des parcelles urbanisées
- ajout des parcelles les plus intéressantes à urbaniser, tout en

# Possibilité de génération automatique de Cartes Communales

---

Génération automatique de zonage :

- enveloppe des parcelles urbanisées
- ajout des parcelles les plus intéressantes à urbaniser, tout en
  - respectant les densités objectives et des objectifs de création de logements

# Possibilité de génération automatique de Cartes Communales

Génération automatique de zonage :

- enveloppe des parcelles urbanisées
- ajout des parcelles les plus intéressantes à urbaniser, tout en
  - respectant les densités objectives et des objectifs de création de logements
  - certifiant un certain non-étalement urbain

## **Conclusion et perspectives**

---

**Simulateur hybride** : couplage de **modèles génératifs** avec un **modèle stylisé** pour en faire un outil **opérationnel d'aide à la décision pour l'aménagement**

Résultats réalistes et plausibles au regard des évolutions du territoire

# Conclusion sur les modules utilisés par ArtiScales

## Utilisation de MUP-City :

- variabilité intéressante pour proposer différentes configurations résidentielles
- plus adapté à générer une extension résidentielle
- possibilité de compléter ce module ?

## Utilisation de SimPLU3D :

- Optimisation de la simulation nécessaire
- Effet des paramètres techniques : potentiellement important (*soulevé par l'expérimentation de la thèse*)

# Apports de la thèse

- Création d'un modèle de développement résidentiel complexe
  - Création d'un modèle de gestion parcellaire
- Analyse de la variabilité des modules composant ce modèle
- Utilisation de cette variabilité pour proposer différentes orientations d'aménagement

# Perspectives d'utilisation d'ArtiScales dans l'aide à la décision territoriale

Comparer certaines versions de documents en modifiant certaines contraintes des règlements

Par exemple :

- Zonage (expérimenté dans la thèse)
- Articles du PLU (hauteur, retraits)
- Objectifs de la planification (création de logements, densité...)

# Perspectives d'utilisation d'ArtiScales dans l'aide à la décision territoriale

Comparer certaines versions de documents en modifiant certaines contraintes des règlements

Par exemple :

- Zonage (expérimenté dans la thèse)
- Articles du PLU (hauteur, retraits)
- Objectifs de la planification (création de logements, densité...)

Mise en œuvre opérationnelle dans le cadre d'un contrat post-doctoral sur le PLU intercommunal de Besançon

Développer de nouveaux indicateurs pour évaluer les scénarios de développement résidentiel

Automatiser l'analyse de variabilité pour permettre la génération de configurations spatiales intéressantes à urbaniser

Orienter la conception des documents d'aménagement vers des configurations résidentielles intéressantes

**Merci pour votre attention**

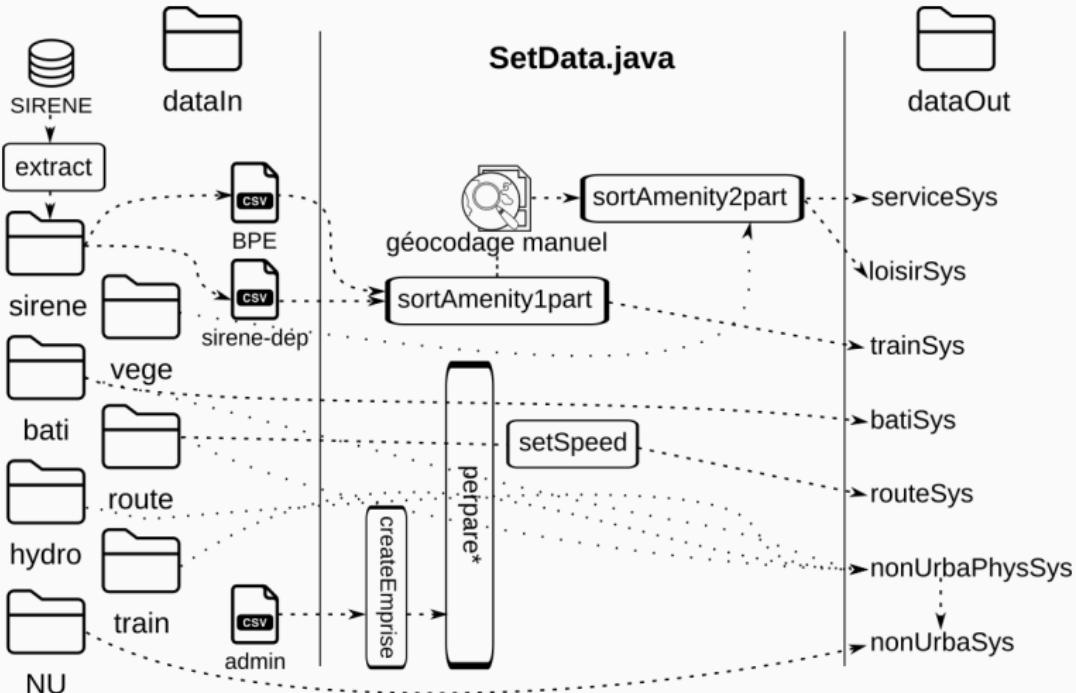
**Everything we do is open source**

**MUP-City:** <https://sourcesup.renater.fr/mupcity/>

**SimPLU3D:** <https://github.com/IGNF/simplu3D>

**ArtiScales :** <https://github.com/ArtiScales/>

# Données nécessaire à l'exécution de MUP-City



# Données nécessaire à l'exécution de SimPLU3D

Le **Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT)** **synchronise** les politiques territoriales régionales

- Territorialise la construction de logements
- Fixe des contraintes morphologiques et de densité

Le **Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT)** synchronise les politiques territoriales régionales

- Territorialise la construction de logements
- Fixe des contraintes morphologiques et de densité

Le **Programme Local de l'Habitat (PLH)** fixe la **politique du logement**

- Précise le nombre et le type de logements prévus par communes
- Programme de futures opérations

Le **Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT)** synchronise les politiques territoriales régionales

- Territorialise la construction de logements
- Fixe des contraintes morphologiques et de densité

Le **Programme Local de l'Habitat (PLH)** fixe la **politique du logement**

- Précise le nombre et le type de logements prévus par communes
- Programme de futures opérations

**Relation de compatibilité entre ces deux documents**

# Documents de planification régionale - Exemple

## Légende

Emprise du SCoT

Nombre de logements prévus par le SCoT

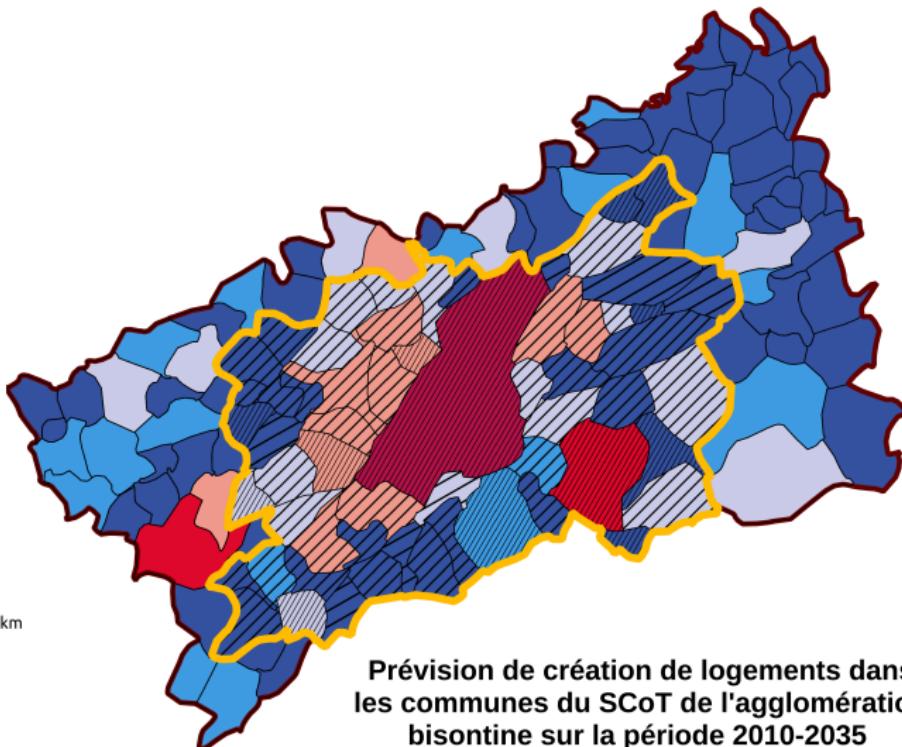
- [Dark Blue] 3 - 63
- [Light Blue] 63 - 163
- [Light Purple] 163 - 275
- [Orange] 275 - 400
- [Red] 400 - 1138
- [Maroon] 18625

Emprise du PLH

Logements à construire par un acteur public dans le PLH

- [Diagonal lines] 0% - 25%
- [Vertical lines] 25% - 35%
- [Horizontal lines] 35% - 50%

0 5 10 km



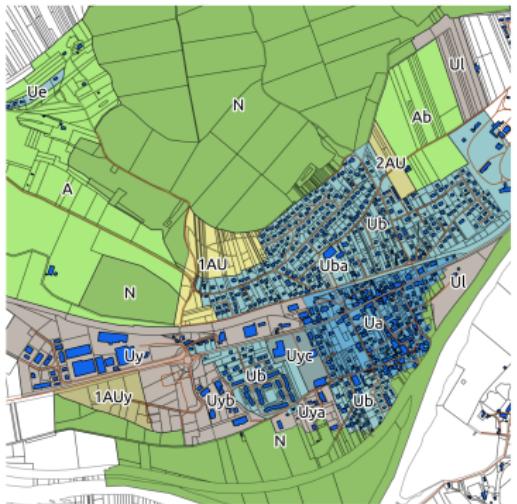
Le **Plan Local de l'Urbanisme (PLU)** détaille et spatialise les contraintes de constructibilité au sein d'une commune

- a des **effets directs sur la constructibilité** mais ne planifie pas la construction
- **donne un cadre** pour la création de programmes de construction de logements (*OAP, ZAC, ZAD*)
- se compose en partie d'un **zonage** et d'un **règlement**

# Application d'un PLU - Le zonage

Zones générales et sous-zones particulières

- Naturelles (**N**) *non constructibles*
- Agricoles (**A**) *non constructibles*
- Urbanisées (**U**)
- À Urbaniser (**AU**)



Légende

■ Bâtiment Zone du PLU
— Route
■ A
■ AU
■ N
■ U
■ U non constructible

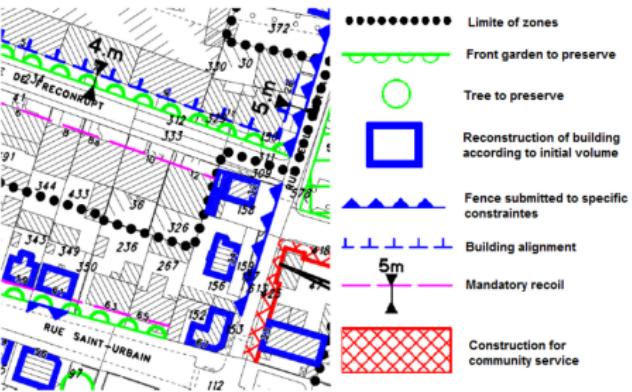
Plan de zonage du PLU de  
Roche-lez-Beaupré (25)

# Rétro action pour la compatibilité en modifiant le zonage

# Application d'un PLU - Le règlement

Pour chaque sous-zone :

- Articles 1, 2 : restrictions d'**usage du sol**
- Articles 6, 7, 8 : **position des bâtiments**  
relativement aux autres bâtiments, aux limites de parcelles ou à la voirie
- Article 10 : **hauteur maximale**
- Article 11 : **aspect extérieur**



Pour l'ensemble de la zone d'étude :

- nombre total de bâtiments et de logements simulés,
- emprise au sol totale et surface de plancher totale.
- densité (logements, surface au sol, surface de plancher) par surface de parcelles bâties.

Pour chaque commune :

- surface des parcelles où un bâtiment est simulé
- densité de l'ensemble de la commune après simulation.
- nombre de logements simulés et différenciés selon leurs types
- différentiel entre le nombre de logements créés et les objectifs de création de logements
- valeur moyenne (et écart type) de la densité de logements simulée et comparé aux objectifs

## Orientations d'Aménagement et de Programmation :

Définition de l'organisation pour l'urbanisation de certaines zones.

# Comparaison d'OAP et des résultats de simulation

**Table 2:** Comparaison de la simulation utilisant le scénario **c** et un paramétrage induisant une *forte densité* avec les objectifs de création de logements dans les OAP de Saône (25532)

Nom de la zone	Petite Saône	La Messarde	Au Cras	La Gilleroye
Objectif de création de logements	9	62	24	219
Estimation d'ArtiScales	7	54	16	151
Ressemblance des plans	non	oui	oui	non

# Comparaison d'OAP et des résultats de simulation

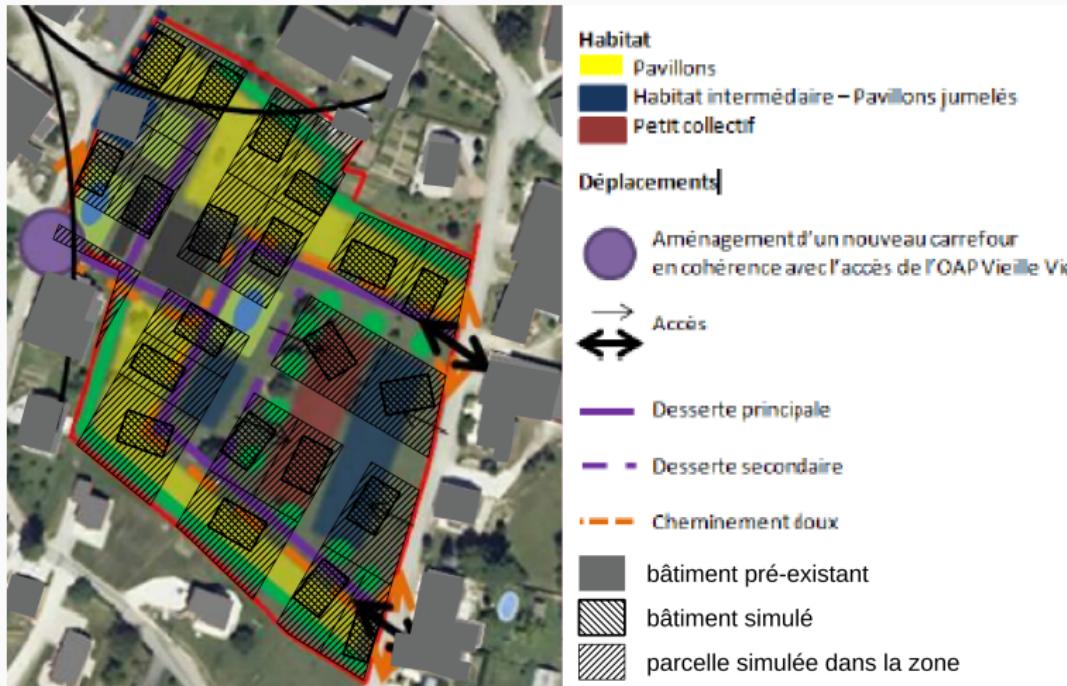


Illustration superposant l'OAP du *Champ Sera à La Tour De Say* (25640) et les résultats de la simulation provenant du scénario c avec le paramétrage induisant une forte densité

**Table 2:** Consommation foncière des différents scénarios

Scenario	Extension ciblée		Intensifi
Paramétrage densité	forte	modérée	forte
Surface de parcelles urbanisée ( $km^2$ )	6,267	6,678	3,406
Surface de parcelles en zone urbanisée ( $km^2$ )	3,867	4,006	1,174
Surface de parcelles en zone ouverte à l'urbanisation ( $km^2$ )	2,400	2,617	2,232

# ArtiScales : Densité nette de logements par $m^2$

**Table 3:** Comparaison de la moyenne des densités nettes de logements par hectare entre les objectifs du SCoT et les développements résidentiels simulés par ArtiScales

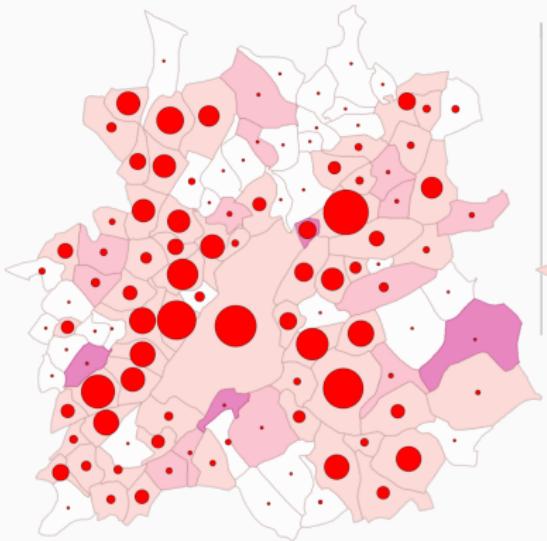
Typologie de l'armature	Densité moyenne simulée dans le scénario :		étalement ciblé		intensification	
	Densité moyenne fixée par le SCoT	Densité moyenne observée	paramétrage dense	paramétrage modérément dense	paramétrage dense	paramétrage modérément dense
Ville centre	50	60	45	56	49	57
Communes périphériques	23	21	22	16	23	17
Communes relais	20	20	21	16	21	16
Communes équipées	15	12	16	14	17	15
Halte ferroviaire	20	18	43	17	26	16
Commune hors armature	13	13	18	15	19	16

## Neuf variantes de développement résidentiels

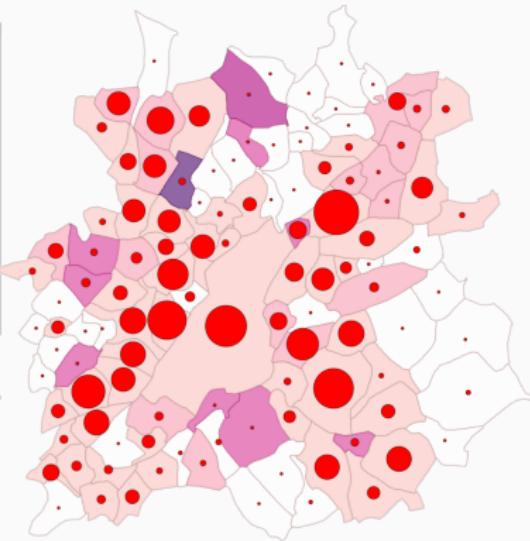
Deux répliques de la modification des paramètres techniques :

- graine aléatoire
- taille des cellules
- petits mouvements de la grille de décomposition
- grands mouvements de la grille de décomposition

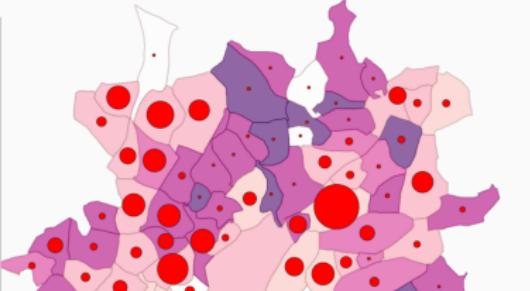
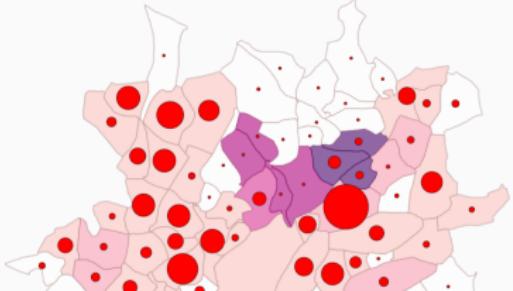
# Présentation rapide des résultats des variantes



petits déplacements de la grille de décomposition  
graines aléatoires



grands déplacements de la grille de décomposition  
tailles des cellules du dernier niveau de décomposition



- Définition de données adaptées à la simulation des évolutions
- Proposition de service aux acteurs de la planification sur l'ensemble du territoire français
- Certification de la robustesse du processus de simulation relativement à la qualité des données