

**Interreg**

Alpine Space



EUROPEAN UNION

**ASTUS**

**Modélisation de l'étalement urbain à  
partir de FORESIGHT et LUCSIM**

**Territoire d'étude de  
Thonon Agglomération**

**Deliverable D.T2.2.4**



**Novembre 2018**



**r s a iSPACE**



Landeshauptstadt  
München

**UNIVERSITÉ  
Grenoble  
Alpes**



**SIR**  
SALZBURGER INSTITUT FÜR  
RAUMORDNUNG & WOHNFEN

Technical  
University  
of Munich

**TUM**

**RÉGION  
BOURGOGNE  
FRANCHE  
COMTE**



Unione  
Nazionale  
Comuni Comunità  
Etni  
Montani  
**UNIMEM**  
Delegazione Piemontese



**Auvergne-  
Rhône-Alpes**  
La Région

Contact of the Lead Partner  
Auvergne-Rhône-Alps Région  
Spatial planning and Mountain Department  
+33 4 26 73 46 67  
astus@auvergnhonealpes.fr

## Table des matières

1	Introduction.....	4
2	Présentation des logiciels retenus.....	5
2.1	Choix d'un type de logiciel de modélisation .....	5
2.2	Présentation des deux modèles retenus .....	6
2.2.1	FOREcasting Scenarios for citles using GeographHic daTa/FORESIGHT .....	6
2.2.1	Land Use Cellular Automata Simulation/LUCSIM.....	11
3	Programme d'étude – « Ce que nous avons prévu de faire ! ».....	14
3.1	Cadrage du programme .....	14
3.2	Stratégie d'expérimentation .....	15
3.2.1	À partir de FORESIGHT.....	15
3.2.2	À partir de LUCSIM.....	16
4	Présentation du territoire et contenu des scénarios .....	17
4.1	Données territoriales .....	18
4.1.1	Démographie .....	19
4.1.2	Logements .....	20
4.1.3	Occupation du sol et consommation d'espace.....	21
4.2	Scénario tendanciel.....	22
4.2.1	Démographie .....	22
4.2.2	Consommation d'espace .....	22
4.3	Scénario stratégique .....	23
4.3.1	Démographie .....	24
4.3.2	Consommation d'espace .....	25
4.3.3	Protection des espaces naturels, agricoles et forestiers .....	26
4.4	Déclinaison des scénarios tendanciels et stratégiques au sein des logiciels de modélisation .....	28
4.4.1	Pour la construction de la carte d'attractivité.....	28
4.4.2	Pour FORESIGHT .....	29
4.4.3	Pour LUCSIM .....	30
5	Résultats et analyse – « Ce que nous avons réussi à faire ! » .....	32
5.1	Retour d'expérience.....	32
5.1.1	Exploitation de la carte d'attractivité .....	32
5.1.2	Expérimentation à partir de FORESIGHT .....	33
5.1.3	Expérimentation à partir de LUCSIM .....	37
5.2	Analyse des résultats.....	41
5.2.1	Analyse visuelle.....	41

5.2.2	Analyse par EPCI .....	42
5.2.3	Analyse selon l'armature .....	44
5.2.4	Synthèse de l'analyse.....	45
5.3	Analyse des résultats issus de LUCSIM .....	45
5.3.1	Fonctionnement .....	45
5.3.2	Les modélisations .....	46
6	Quels résultats et quels retours sur les logiciels de modélisation ? .....	50
6.1.1	Modéliser avec FORESIGHT .....	50
6.1.2	Modéliser avec LUCSIM .....	51

# 1 Introduction

Le projet européen ASTUS pour Alpine Smart Transport and Urbanism Strategies se décline en différents Work Package (WP) ainsi qu'au niveau territorial en fonction des différents partenaires. Dans le cadre du WP2, il est prévu la co-construction d'outils bas carbone et le développement d'outils d'aide à la décision sur les projets/actions des sites pilotes en s'assurant de la transférabilité européenne des outils.

La déclinaison sur le territoire Rhônealpin du WP2 du projet ASTUS prévoit la production d'un outil CO2 minimizer (TUM), méthodologie transnationale pour des scénarios bas carbone. Il est également programmé l'expérimentation d'outils de modélisations de l'étalement urbain par le Cerema Sud-Ouest sur les territoires de Thonon Agglomération et le PNR des Bauges.

Pour cette action plus spécifique, les objectifs sont de :

- Développer une approche en coût global de l'aménagement au travers des coûts induits par l'étalement urbain ;
- Éclairer les choix d'aménagement et de mobilités qui sont pris à un moment donné sur les territoires par les décideurs grâce à une modélisation de l'impact de ces décisions à plus ou moins long terme en matière d'étalement urbain et d'évolution de l'occupation du sol ;
- Expérimenter concrètement sur les territoires du PNR des Bauges et Thonon Agglomération des logiciels de modélisation des changements d'occupation et d'usage des sols.

Le présent document détaille l'expérimentation qui a été réalisée en se concentrant les résultats obtenus sur le territoire de Thonon Agglomération.

Il a également été produit un rapport méthodologique détaillant le fonctionnement de chaque outil et les opérations concrètement réalisées.

## 2 Présentation des logiciels retenus

### 2.1 Choix d'un type de logiciel de modélisation

Une analyse d'opportunité préalable menée par le Cerema Sud-Ouest a permis d'identifier deux grands types d'outils de modélisation qui pourraient être utilisés dans le cadre du projet ASTUS aux regards des résultats qu'ils donnent en termes d'évaluation des phénomènes d'étalement urbain ou d'évolution de l'occupation du sol :

- Les modèles intégrés occupation du sol / transport (Land Use Transport Integrated/LUTI). « Un modèle intégré Transport / occupation du sol est capable de simuler l'évolution simultanée du système de transport et de l'occupation du sol, car les performances du système de transport font partie des variables à partir desquelles les ménages et les entreprises font leur choix de localisation. Un modèle intégré prend en compte le fait que les ménages font des choix de localisation à partir de variables exogènes (historique d'une zone) et endogènes (prix, accessibilité, présence d'aménités) et que ces choix comme ces variables sont susceptibles de changer, à la fois du fait de la modification du système de transport et du fait de politiques urbaines »<sup>1</sup>.
- Les automates cellulaires (Cellular Automata/CA). Dans un modèle d'automate cellulaire, le territoire est intégralement représenté par un réseau de cellules, chacune étant définie par un état donné, un type d'occupation du sol par exemple, qui peut ensuite évoluer dans le temps en fonction d'une série de règles dites de transition.

Les contraintes que l'on se fixe dans le cadre du projet ASTUS, notamment en termes de délais de mise en œuvre et d'ambition de pouvoir transposer au niveau européen les méthodes et outils déployés sur les territoires d'expérimentation, font que les modèles LUTI sont à la fois parfaitement appropriés au regard des objectifs qu'ils se donnent en termes de modélisation mais disproportionnés et trop lourds à mettre en œuvre dans ce cadre.

Ainsi, nous leur préférons les modèles de type automates cellulaires, car, même s'ils ne permettent pas a priori de répondre à toutes les questions que l'on pourrait se poser, ils sont d'une utilisation relativement simple et nous assurent de pouvoir modéliser rapidement différents scénarios d'évolution du territoire en matière d'occupation du sol. L'intérêt de ces modèles réside notamment en leur capacité à modéliser des comportements complexes à partir de règles de fonctionnement très simples.

---

<sup>1</sup> Mathieu Saujot (2013). Analyse économique et simulation prospective dans la planification de la ville sobre en carbone : Application à Grenoble du modèle TRANUS+. Économies et nuances. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. 470 p.

## 2.2 Présentation des deux modèles retenus

Pour une présentation détaillée de chaque outil, se référer au rapport méthodologique.

### 2.2.1 FOREcasting Scenarios for citles using GeographHic daTa/FORESIGHT

<b>Nom du logiciel</b>	FORESIGHT
<b>Propriétaire</b>	Toulouse Tech Transfert (www.toulouse-tech-transfer.com)
<b>Références</b>	Houet T., Aguejdad R., Doukari O, Battaia G., Clarke K., (2016) Description and validation of a 'non path-dependent' model for projecting contrasting urban growth futures, <i>Cybergeo</i> , 759 <a href="http://cybergeo.revues.org/27397">http://cybergeo.revues.org/27397</a>
<b>Licence</b>	Payante (gratuite pour un usage à des fins de recherche ou académiques)
<b>Objectif</b>	Modéliser différents scénarios prospectifs d'étalement urbain

#### 2.2.1.1 Principe de fonctionnement

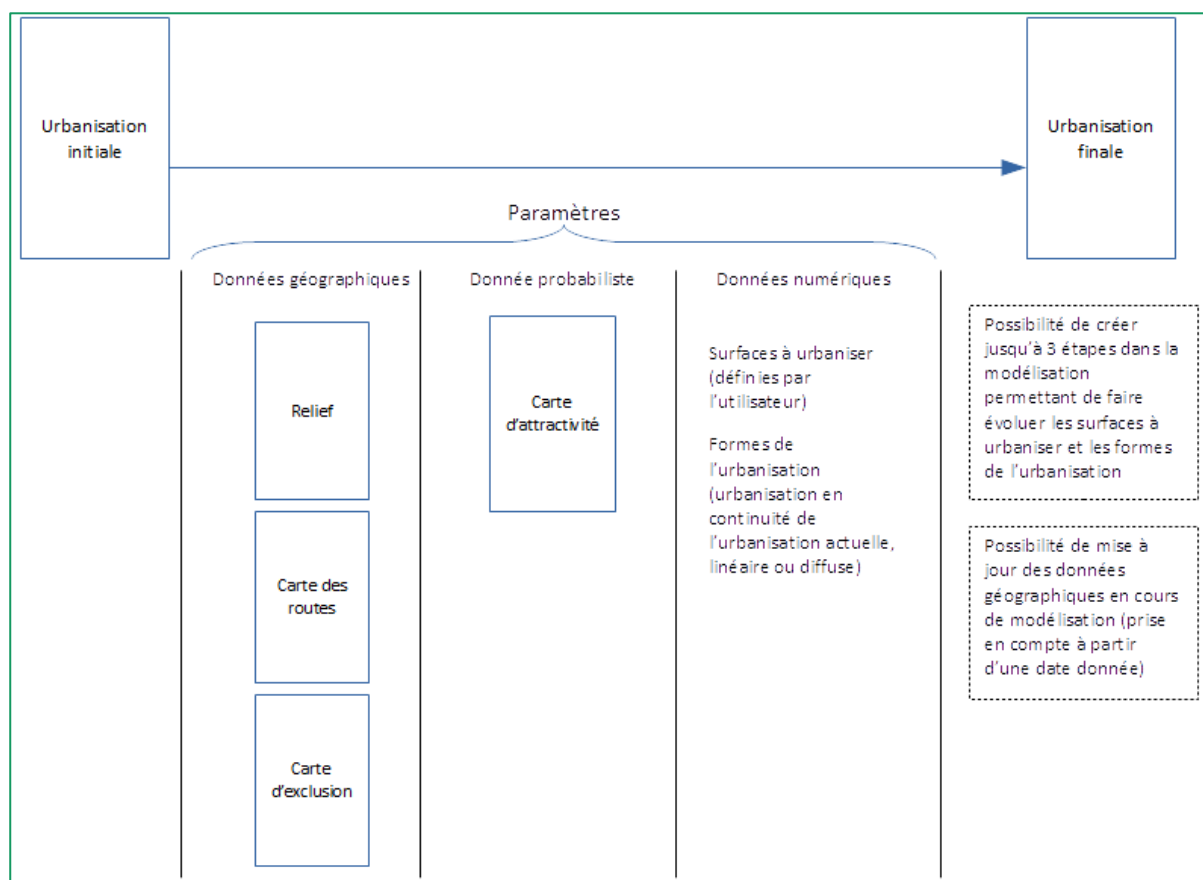


Figure 1 : Schéma de fonctionnement du logiciel FORESIGHT

### 2.2.1.2 Données d'entrées

FORESIGHT dispose d'un module de pré-traitement permettant de préparer les données géographiques d'entrées.

- Initial Urban Map : carte de l'urbanisation initiale (format \*.shp / sources : Urban Atlas et Corine Land Cover)
- Slope Map : carte du relief (format raster / sources : Shuttle Radar Topography Mission, IGN data)
- Hillshade : fond de carte (format raster / sources : Shuttle Radar Topography Mission, IGN data)
- Roads Map : carte du réseau routier (format \*.shp / source : Open Street Map)
- Excluded Map : carte d'exclusion (format \*.shp)
- Attractiveness Map : carte d'attractivité (image \*.gif qui peut être générée automatiquement par l'outil FORESIGHT)

Il est important de signaler que pour FORESIGHT, comme pour LUCSIM, les données traitées ne sont que des données raster, des images. De fait, la notion d'espace urbanisé ou artificialisé n'a pas de sens spécifique pour chacun de ces logiciels. Il s'agit juste d'une occupation du sol comme une autre. Pour cette raison et tout au long de ce document nous utiliserons le terme d'espace urbanisé sans en préciser le contenu, ce dernier pouvant désigner ce que l'on souhaite : espaces urbanisés au sens des documents d'urbanisme, tache urbaine (quelle que soit la méthode utilisée), espaces artificialisés, etc.

### 2.2.1.3 Carte d'attractivité

Cette carte est établie sur le principe méthodologique d'une carte coût-distance :

- En considérant que le « coût » de l'urbanisation d'un pixel sur le territoire n'est pas le même partout, qu'il est notamment plus important dans des espaces agricoles, forestiers ou protégés que dans des espaces déjà urbanisés ou définis comme étant à urbaniser dans un document d'urbanisme par exemple, le logiciel évalue alors à partir d'un point donné (ou d'un ensemble de points et/ou de polygones) sur le territoire le coût nécessaire pour se déplacer depuis ce point-là à tout autre point sur le territoire et définit ainsi le coût de l'urbanisation en tout point du territoire.

FORESIGHT dispose d'un module permettant d'établir simplement une carte d'attractivité. Ce module prend en compte :

- L'occupation du sol (sources : CLC ou Urban Atlas) : pour chaque classe d'occupation du sol un coefficient de friction peut être défini ;
- Le réseau routier (source : Open Street Map) : pour chaque type de route, il est possible de définir un coefficient de friction traduisant l'influence du réseau routier en tant que vecteur d'urbanisation ;
- Des points : le module peut prendre en compte un réseau de points ou de polygones à partir desquels l'outil va évaluer le coût de l'urbanisation de tous les pixels du territoire.

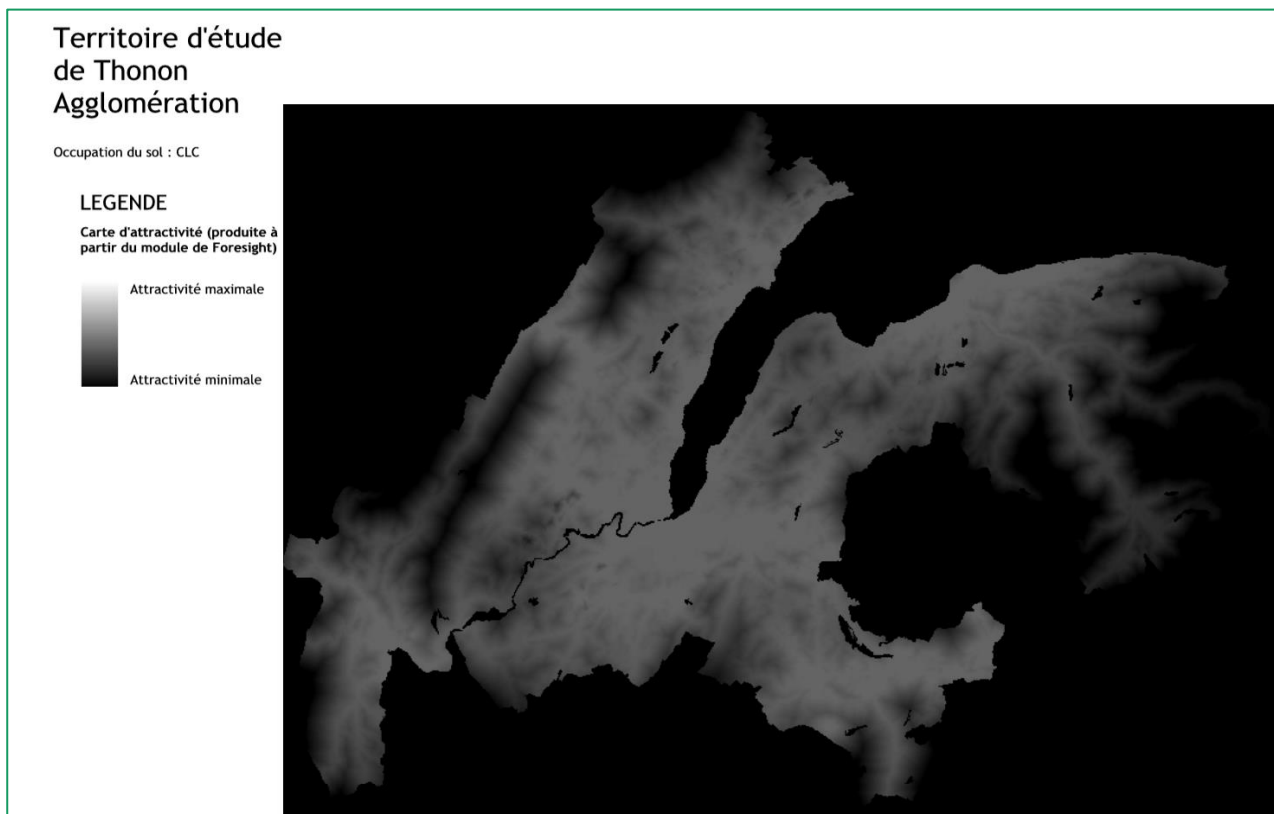


Figure 2 : Carte d'attractivité produite à partir du module dédié de Foresight (occupation du sol à partir de CLC, routes à partir d'OSM) pour le scénario stratégique et sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération

#### 2.2.1.4 Paramètres

Pour modéliser l'étalement urbain entre deux dates données, FORESIGHT donne accès aux paramètres suivant :

- L'enveloppe de consommation d'espace,
- Les formes de l'étalement urbain qui sont entièrement déterminées par 4 Patterns :
  - phénomène d'urbanisation spontanée (Spontaneous) ;
  - phénomène de création de nouvelles centralités / concentration (New Spread Center) ;
  - phénomène d'urbanisation linéaire (Road Influenced) ;
  - phénomène d'urbanisation en continuité de l'urbanisation existante (Edge Growth).

À ces paramètres s'ajoutent également deux critères permettant de préciser l'influence du relief et du réseau routier sur la localisation préférentielle de l'urbanisation.

Il est possible de créer jusqu'à trois étapes au sein d'une modélisation permettant de faire évoluer les enveloppes de consommation d'espace ou les formes de l'étalement urbain.

FORESIGHT permet ensuite d'intégrer une modification des données cartographiques (carte d'exclusion, carte d'attractivité, carte des routes) en cours de modélisation en précisant la date à partir de laquelle ces nouvelles données seront prises en compte par le module de simulation.

#### 2.2.1.5 Données de sortie



Pour un scénario, FORESIGHT simule des cartes annuelles du développement urbain/étalement urbain ainsi qu'une carte synthétique qui agrège toutes les informations générées en une seule carte.

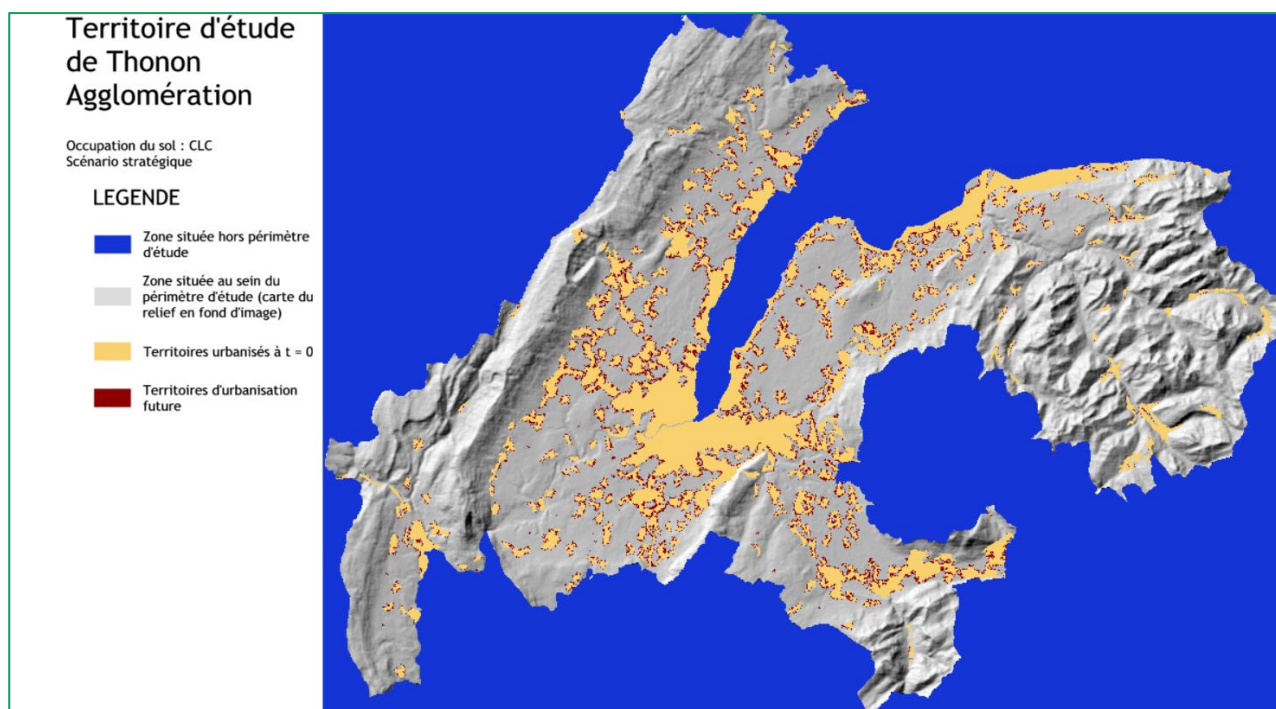


Figure 3 : Modélisation jusqu'en 2050 de l'étalement urbain sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération (scénario stratégique, occupation du sol CLC)

Le logiciel permet également de réaliser, pour un scénario donné, plusieurs modélisations.

Le logiciel dispose enfin d'un module lui permettant d'agrèger les résultats de plusieurs scénarios ou de plusieurs modélisations en une seule carte de probabilité de la croissance urbaine.

À partir de différentes modélisations, le logiciel va générer une carte indiquant la probabilité pour chaque pixel du territoire que ce dernier soit urbanisé correspondant au rapport entre le nombre de modélisation où ce pixel est urbanisé et le nombre total de modélisations prises en compte.

Cette carte peut être générée, par exemple :

- À partir de 20 modélisations que nous aurions réalisées pour un scénario donné à partir du cadre *Scenario uncertainty* : nous aurions alors une information qui nous indique, pour un scénario donné, quels sont les secteurs pour lesquels la probabilité d'urbanisation est proche de 100 %, quasi certaine, de ceux pour lesquels la donnée est beaucoup plus incertaine ou aléatoire.
- À partir de modélisations issues de différents scénarios : nous aurions alors une information qui nous indique quels sont les secteurs où il est fortement probable que l'urbanisation se fasse et ce, quel que soit le scénario d'évolution du territoire.

## Territoire d'étude de Thonon Agglomération

Occupation du sol : CLC  
Scénario stratégique

### LEGENDE

 Territoire urbanisé à t= 0

Probabilité d'urbanisation future  
(obtenue à partir de  
20 modélisations)

Probabilité : 0%

 Probabilité : 5% - 40%

 Probabilité : 45% - 60%

 Probabilité : 65% - 70%

 Probabilité : 75%

 Probabilité : 80%

 Probabilité : 85%

 Probabilité : 90%

 Probabilité : 95%


 Probabilité : 100%



Figure 4 : Probabilité d'urbanisation obtenue à partir de 20 modélisations pour le territoire d'étude de Thonon Agglomération (scénario stratégique, occupation du sol CLC)

## 2.2.1 Land Use Cellular Automata Simulation/LUCSIM

<b>Nom du logiciel</b>	LUCSIM
<b>Propriétaire</b>	Université de Bourgogne-Franche-Comté / Laboratoire ThéMA
<b>Site Internet</b>	<a href="https://sourcesup.renater.fr/LUCSIM/">https://sourcesup.renater.fr/LUCSIM/</a>
<b>Licence</b>	GNU (licence libre et gratuite)
<b>Objectif</b>	Modéliser l'évolution de l'occupation du sol

### 2.2.1.1 Principe de fonctionnement

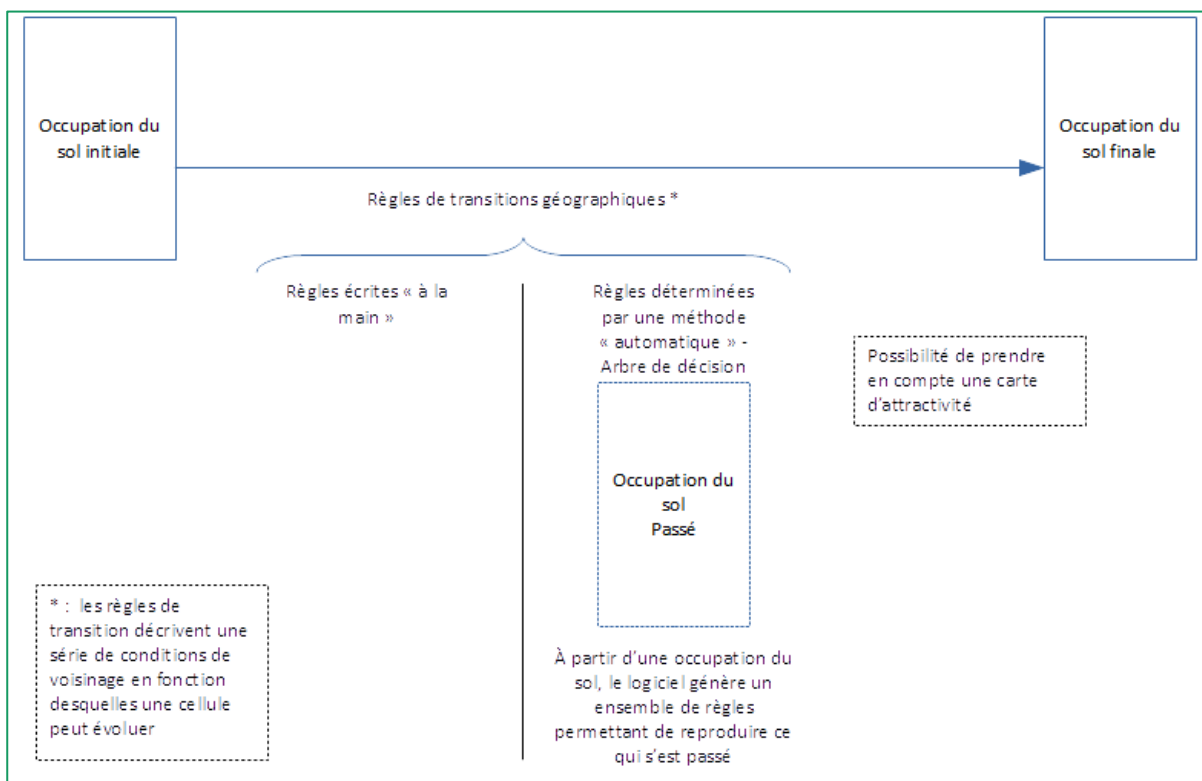


Figure 5 : Schéma de fonctionnement du logiciel LUCSIM

### 2.2.1.2 Données d'entrées

Pour réaliser une modélisation de l'évolution de l'occupation du sol d'un territoire donné, il faut, au minimum, disposer d'une carte de l'occupation du sol à une date donnée. Ces cartes sont des images au format \*.tif où les codes de pixels correspondent à différentes catégories d'occupation du sol.

Pour pouvoir utiliser l'arbre de décision afin de générer des règles de transition de manière « automatique », il est nécessaire de disposer de 2 cartes pour déterminer l'évolution passée de l'occupation du sol et extrapoler son devenir.

D'autres couches raster peuvent être ajoutées, comme une carte d'attractivité ou une carte d'exclusion, qui vont permettre d'orienter l'évolution du territoire.

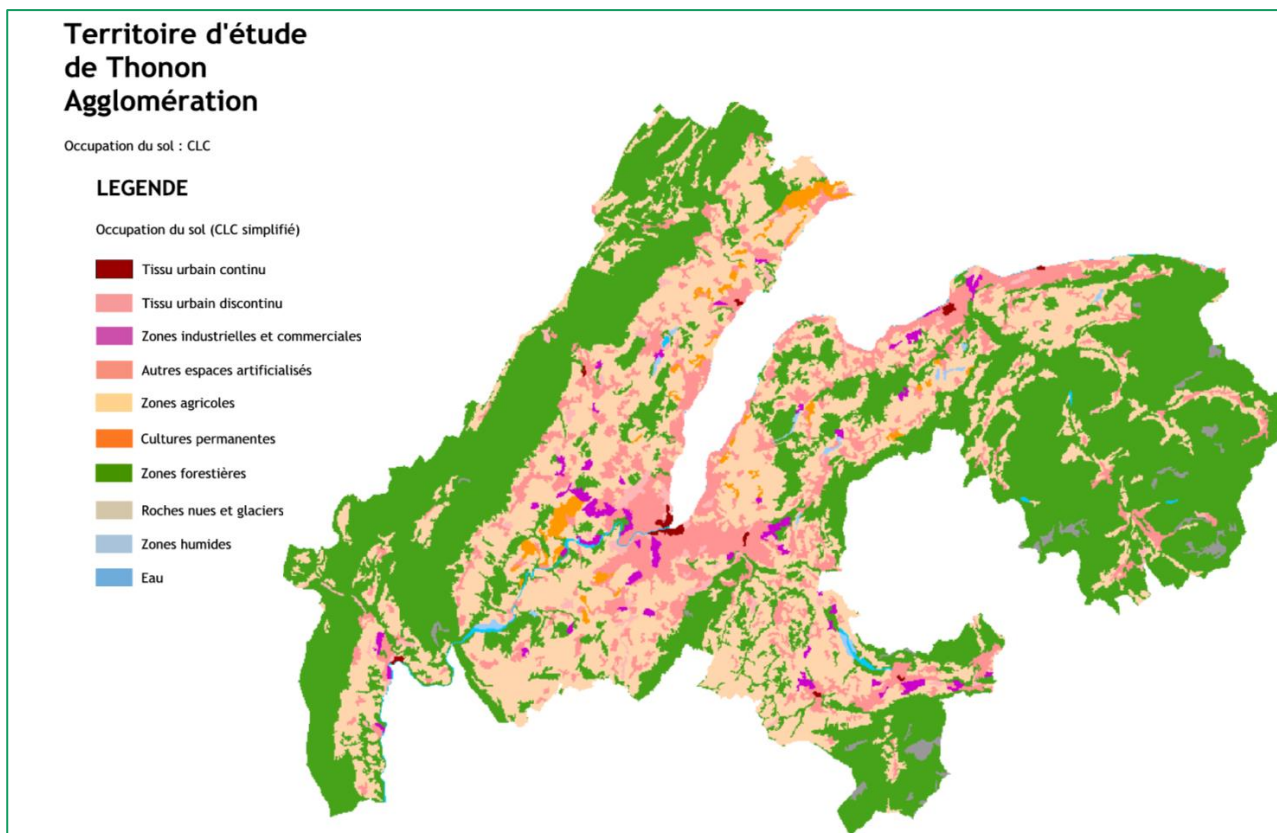


Figure 6 : Occupation du sol (CLC simplifié) en 2012 sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération

### 2.2.1.3 Paramètres

Le logiciel permet de disposer de certaines informations statistiques, de comparer deux couches d'occupation du sol entre elles.

Pour calibrer la modélisation de l'évolution de l'occupation du sol, il est possible de contraindre la modélisation à partir :

- D'un modèle de potentiel, ce qui équivaut à la prise en compte d'une donnée raster du type carte d'attractivité ;
- D'une chaîne de Markov qui permet de limiter l'évolution de l'occupation du sol en pré-déterminant les quantités de changement pouvant intervenir au regard des évolutions observables entre nos deux couches de référence.

#### 2.2.1.4 Écriture des règles de transition

L'écriture des règles de transition nécessite une syntaxe particulière propre au logiciel et s'appuie sur l'utilisation de 14 fonctions distinctes. L'outil dispose d'un module pour aider à la création de ces règles.

Les règles de transition peuvent être écrites à la main ou déterminées de manière « automatique » par le logiciel à l'aide d'un arbre de décision. L'arbre de décision calcule, à partir de l'analyse des différences au niveau de l'occupation du sol entre deux dates distinctes, des règles de transition lui permettant de reproduire au mieux les évolutions qui sont intervenues sur cette période.

#### 2.2.1.5 Données de sortie

Une fois établies les règles de transition, le logiciel est alors en capacité de réaliser une modélisation de l'évolution du territoire.

Il n'existe pas de notion temporelle dans le logiciel et chaque étape de modélisation s'arrête soit :

- Parce que, à une étape donnée, tous les pixels d'une image peuvent être transformés,
- Parce que toutes les règles ne peuvent plus s'appliquer (les conditions ne peuvent plus être remplies),
- Parce qu'on lui a appliqué certaines limitations, par l'exploitation des chaînes de Markov par exemple, sur les quantités d'évolutions possibles.

## 3 Programme d'étude – « Ce que nous avons prévu de faire ! »

### 3.1 Cadrage du programme

Au regard des objectifs du projet ASTUS et du fonctionnement des deux logiciels qui doivent être expérimentés, voici trois points essentiels qui viennent structurer le programme d'étude qui a été proposé aux sites pilotes :

- Utilisation de différentes bases de données :
  - Afin de pouvoir transposer l'expérimentation réalisée sur nos territoires test, il est nécessaire d'utiliser, sur au moins une modélisation, des sources de données européennes, notamment au niveau de l'occupation du sol.
  - Pour l'approfondissement du travail sur chacun du territoire, il est proposé d'exploiter d'autres sources de données lorsque ce sera possible.
- Modélisation de différents scénarios :
  - Pour pouvoir analyser les résultats obtenus, il est important de rappeler que l'intérêt de ces outils ne réside pas tant dans la représentation d'une image future du territoire, car il ne s'agit en aucun cas d'une prédiction qui resterait largement sujette à débat au regard des raisons qui font que tel ou tel secteur est urbanisé ou ne l'est pas, mais plutôt dans une analyse spatiale comparative de différentes simulations.
  - Pour cette raison, l'objectif sera de proposer différents scénarios d'évolution du territoire à décliner pour chacun des deux logiciels. Sur la base de quelques indicateurs notamment de consommation d'espace ou d'évolution démographique, deux scénarios seront établis, un scénario tendanciel et un scénario stratégique dont la conception proviendrait de l'analyse des principaux documents de planification stratégique du territoire.
- Modélisation à une échelle macroscopique :
  - Les logiciels FORESIGHT et LUCSIM qui seront utilisés dans le cadre du projet ASTUS sont tous deux des outils de type automate cellulaire. De par leur construction, ces modèles ne permettent pas de modéliser une évolution de l'occupation du sol à des échelles trop fines (à la parcelle, à l'échelle d'un quartier) car ils ne traduisent pas concrètement un comportement réel sur le territoire. Ils sont en revanche reconnus pour leur capacité à modéliser des évolutions de l'occupation du sol à des échelles macroscopiques.

## 3.2 Stratégie d'expérimentation

### 3.2.1 À partir de FORESIGHT

Pour l'expérimentation du logiciel FORESIGHT, il est proposé de retenir la stratégie suivante :

- Exploitation d'une à deux bases de données pour l'occupation du sol :
  - Corine Land Cover (CLC), millésime 2012
    - Base de données de l'occupation du sol disponible avec une résolution spatiale de 100 m au niveau européen disposant d'une nomenclature détaillée déclinée en trois niveaux (5 postes au premier niveau jusqu'à 44 postes au troisième niveau) et disponibles pour les millésimes 1990, 2000, 2006 et 2012.
  - OSCOM, millésime 2013 (disponible uniquement en région Auvergne-Rhône-Alpes)
    - Base de données de l'occupation du sol (DREAL AURA) disponible à ce jour pour un seul millésime et proposant une nomenclature détaillée déclinée en deux niveaux (5 postes au premier niveau et 15 postes au second niveau) et une résolution spatiale de 10 m.
- Modélisation d'un scénario tendanciel et d'un scénario stratégique. Ces deux scénarios se distingueront sur les éléments suivants :
  - L'enveloppe de consommation foncière :
    - Pour le scénario tendanciel, cette enveloppe sera établie par reconduction des tendances observées entre 2000 et 2012 à partir de CLC.
    - Pour le scénario stratégique, cette enveloppe sera déterminée à partir des données issues des différents documents stratégiques du territoire.
  - La carte d'attractivité du territoire :
    - Deux cartes d'attractivités, une pour chacun des deux scénarios, seront établies sans avoir recours au module dédié disponible au sein du logiciel FORESIGHT.
    - Pour le scénario tendanciel, l'attractivité des différents espaces urbanisés sera modulée en fonction des dynamiques démographiques récentes. L'attractivité (ou plutôt la notion inverse de friction) des espaces naturels, agricoles et forestiers sera modulée au regard du rythme de consommation de ces espaces entre 2000 et 2012.
    - Pour le scénario stratégique, l'attractivité des différents espaces urbanisés sera modulée en fonction de l'armature territoriale définie dans les documents stratégiques du territoire. L'attractivité des espaces naturels, agricoles et forestiers sera modulée en fonction d'une appréciation du niveau de protection de ces différents espaces du territoire au sein des documents stratégiques pris en compte.
  - Les formes de l'étalement urbain :
    - Pour le scénario tendanciel, la clé de répartition entre ces différents *Patterns* sera basée sur l'analyse à partir de CLC de l'évolution du territoire entre 2000 et 2012.
    - Pour le scénario stratégique, la clé de répartition entre ces différents *Patterns* sera modulée en fonction d'une appréciation des informations recueillies dans les documents stratégiques du territoire.

### 3.2.2 À partir de LUCSIM

Pour l'expérimentation du logiciel LUCSIM, il est proposé de retenir la stratégie suivante :

- L'écriture des règles « à la main » nécessiterait un partage important entre le territoire et le Cerema pour convenir des règles que l'on souhaiterait modéliser. Ce travail ne pouvant pas être mené dans le cadre du projet ASTUS, on privilégiera l'utilisation du logiciel en mode « automatique ».
- Exploitation de différentes bases de données pour l'occupation du sol sachant que l'utilisation en mode « automatique » du logiciel impose que l'on dispose a minima d'au moins deux millésimes :
  - Corine Land Cover, millésimes 2000 et 2012, résolution spatiale de 100 m,
  - High Resolution Layers (HRL), résolution spatiale de 20 m,
    - Produite par le programme européen Copernicus (fournisseur de la donnée CLC), cette donnée est disponible en 4 couches raster (espaces artificialisés, forêts, prairies, zones humides et surfaces en eau) avec un niveau de définition largement supérieur à celui de CLC. Pour les espaces artificialisés, il existe plusieurs millésimes (2006, 2009, 2012 et 2015) alors qu'il n'en existe qu'un seul pour toutes les autres occupations du sol (2015)<sup>2</sup>.
  - Theïa
    - Theïa diffuse une base d'occupation du sol à l'échelle de toute la France à partir de données satellitaires, Landsat 5 pour les millésimes 2009, 2010, 2011 et 2014 et Landsat 8 et Sentinelle 2 pour 2016 et 2017. Pour cette dernière, le niveau de résolution est de 10 m (30 m pour Landsat 5) et la couche est établie sur la base d'une nomenclature en 17 catégories<sup>3</sup>.
- Modélisation d'un scénario « tendanciel » calculé par le logiciel et d'un scénario « stratégique » adapté du scénario stratégique décliné pour FORESIGHT :
  - Le scénario « tendanciel » exploiterait le mode « automatique » du logiciel LUCSIM au sein duquel on viendrait contraindre la modélisation par une chaîne de Markov dimensionnée sur l'enveloppe d'étalement urbain du scénario tendanciel établi pour FORESIGHT.
  - Le scénario « stratégique » exploiterait également le mode « automatique » du logiciel LUCSIM au sein duquel on viendrait contraindre la modélisation par une chaîne de Markov dimensionnée sur l'enveloppe d'étalement urbain du scénario stratégique établi pour FORESIGHT et par la carte d'attractivité établie pour ce même scénario. Incertain de la prise en compte de notre carte d'attractivité par le modèle, le *Potential Model* sera également utilisé pour adapter notre scénario stratégique au logiciel LUCSIM.

---

<sup>2</sup> Le millésime 2012 a, depuis, été publié sur le site Internet de Copernicus le 21 juin 2018.

<sup>3</sup> Les données 2016 et 2017 sont disponibles depuis juin 2018 au double format raster et vecteur.



## 4 Présentation du territoire et contenu des scénarios

Les scénarios stratégiques et tendanciels qui permettront d'expérimenter les logiciels de modélisation ne relèvent pas d'une démarche prospective. Néanmoins, il semblait important d'en détailler, succinctement, le contenu pour leur donner une certaine cohérence interne qui traduise une évolution potentielle du territoire. Au sein de cette partie sont synthétisées :

- Les données de diagnostic : principales caractéristiques et dynamiques du territoire d'étude en termes de démographie, logement, occupation du sol. Les données statistiques sont issues pour la partie française de l'INSEE et pour la partie Suisse de l'office fédéral de la statistique. Les cartes établies ne sont disponibles que sur la partie française du territoire d'étude.
- Les données tendanciels et stratégiques : projections de population et de consommation d'espace et estimation du niveau de protection des espaces naturels, agricoles et forestiers. Pour le scénario tendanciel, ces informations seront estimées à partir des dynamiques observables sur le territoire lorsque, pour le scénario stratégique, ces informations seront extraites des principaux documents d'urbanisme stratégique du territoire.

Attention : Suite aux échanges initiaux avec le territoire, un premier périmètre d'étude a été validé. Néanmoins, à la demande du territoire, ce dernier a été modifié en cours de route ce qui fait que les éléments de diagnostic et pour partie ceux des scénarios ont été construits après la réalisation des modélisations, de fait, il y a parfois un écart entre la donnée retenue pour la modélisation et l'estimation produite a posteriori au niveau des scénarios.

## 4.1 Données territoriales

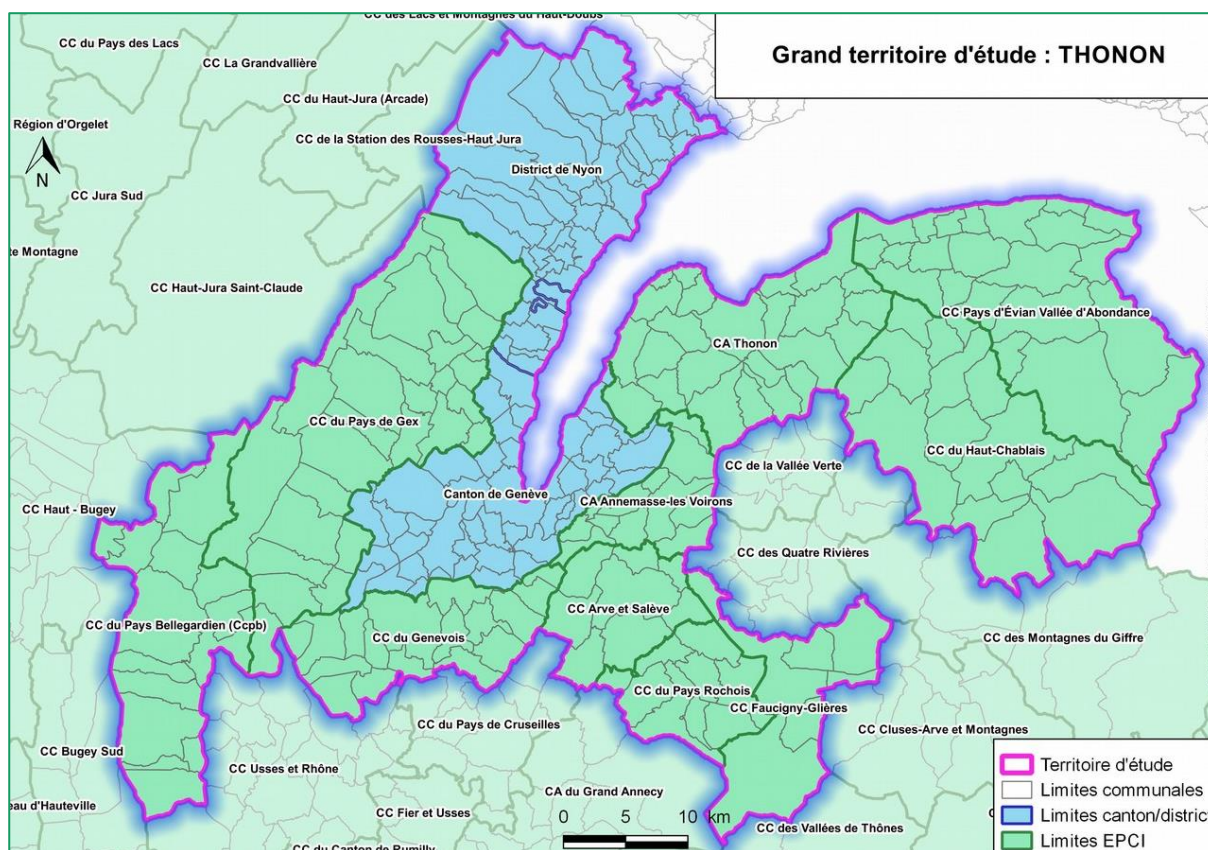


Figure 7 : Territoire d'étude

Le territoire d'étude recouvre l'intégralité de l'ARC Genevois et du SIAC. Transfrontalier, ce territoire intègre 10 EPCI côté français :

- Communauté d'agglomération de Thonon
- Communauté d'agglomération Annemasse-les Voirons
- Communauté de communes du Pays d'Évian Vallée d'Abondance,
- Communauté de communes du Haut-Chablais,
- Communauté de communes du Genevois,
- Communauté de commune du Pays de Gex,
- Communauté de commune du Pays Bellegardien,
- Communauté de commune Arve et Salève,
- Communauté de commune Faucigny-Glières,
- Communauté de commune du Pays Rochois.

Côté Suisse, le territoire intègre :

- le Canton de Genève,
- le District de Nyon.

Ce périmètre recouvre 247 communes, 92 communes côté suisse et 155 communes côté français.

## 4.1.1 Démographie

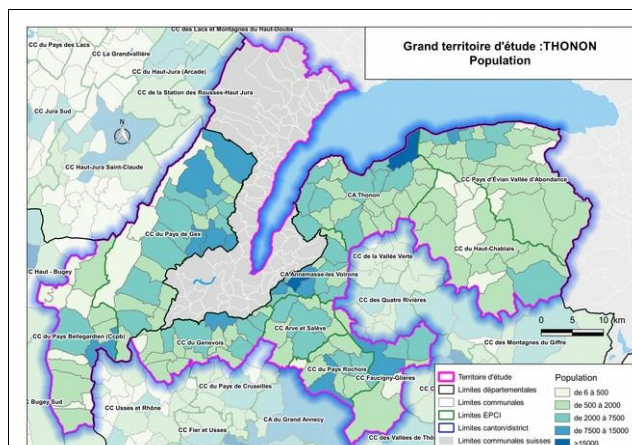


Figure 8 : Population communale en 2014 (INSEE)

### Territoire d'étude (France) : 446 616 habitants

CC du Pays de Gex : 87 609 habitants  
 CC du Pays Bellegardien : 21 373 habitants  
 CC Genevois : 41 482 habitants  
 CC Arve et Salève : 18 933 habitants  
 CC du Pays Rochois : 26 647 habitants  
 CC Faucigny-Glières : 26 015 habitants  
 CA Annemasse-les Voirons : 88 276 habitants  
 CA Thonon : 85 019 habitants  
 CA du Haut-Chablais : 12 451 habitants  
 CC du Pays d'Évian Vallée d'Abondance : 38 811 habitants

### Territoire d'étude (Suisse) : 572 933 habitants

Canton de Genève : 477 385 habitants  
 District de Nyon : 95 548 habitants

### Territoire d'étude (global) : 1 019 549 habitants

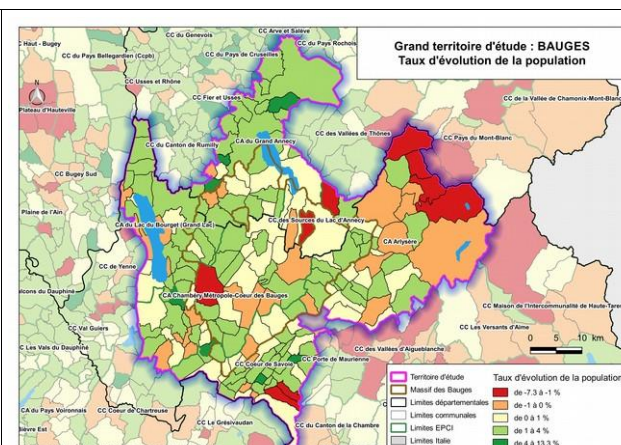


Figure 9 : Taux d'évolution annuelle de la population communale entre 2009 et 2014 (INSEE)

### Territoire d'étude (France) : 2,17 %

CC du Pays de Gex : 3,31 %  
 CC du Pays Bellegardien : 0,61 %  
 CC Genevois : 3,68 %  
 CC Arve et Salève : 2,09 %  
 CC du Pays Rochois : 1,78 %  
 CC Faucigny-Glières : 1,13 %  
 CA Annemasse-les Voirons : 2,38  
 CA Thonon : 1,56 %  
 CA du Haut-Chablais : 0,98 %  
 CC du Pays d'Évian Vallée d'Abondance : 1,36 %

### Territoire d'étude (Suisse) : 1,12 %

Canton de Genève : 1,04 %  
 District de Nyon : 1,51 %

### Territoire d'étude (global) : 1,57 %

## 4.1.2 Logements

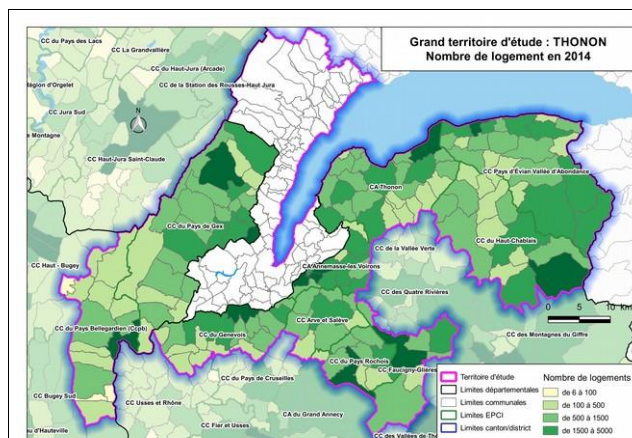


Figure 10 : Nombre de logements en 2014 (INSEE)

### Territoire d'étude (France) : 252 132 logements

CC du Pays de Gex : 44 218 logements  
 CC du Pays Bellegardien : 10 553 logements  
 CC Genevois : 21 344 logements  
 CC Arve et Salève : 8 799 logements  
 CC du Pays Rochois : 11 996 logements  
 CC Faucigny-Glières : 12 394 logements  
 CA Annemasse-les Voirons : 45 711 logements  
 CA Thonon : 43 996 logements  
 CA du Haut-Chablais : 21 507 logements  
 CC du Pays d'Évian Vallée d'Abondance : 31 614 logements

### Territoire d'étude (Suisse) : 269 657 logements

Canton de Genève : 225 378 logements  
 District de Nyon : 44 279 logements

### Territoire d'étude (global) : 521 789 logements

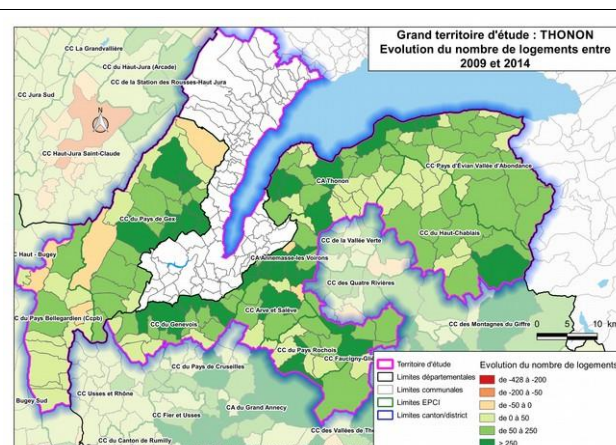


Figure 11 : Évolution du nombre de logements entre 2009 et 2014 (INSEE)

### Territoire d'étude (France) : +26 057 logements (+2,2 %/an)

CC du Pays de Gex : +6 109 logements (+3,0 %/an)  
 CC du Pays Bellegardien : +321 logements (+0,6 %/an)  
 CC Genevois : +3 424 logements (+3,6 %/an)  
 CC Arve et Salève : +926 logements (+2,2 %/an)  
 CC du Pays Rochois : 1 041 logements (+1,8 %/an)  
 CC Faucigny-Glières : +1 035 logements (+1,8 %/an)  
 CA Annemasse-les Voirons : +5 213 logements (+2,5 %/an)  
 CA Thonon : +3 837 logements (+1,8 %/an)  
 CA du Haut-Chablais : +1 585 logements (+1,5 %/an)  
 CC du Pays d'Évian Vallée d'Abondance : +2 566 logements (+1,7 %/an)

### Territoire d'étude (Suisse) : +16 614 logements (+1,28 %/an)

Canton de Genève : +11 939 logements (+1,09 %/an)  
 District de Nyon : +4 675 logements (+2,26 %/an)

### Territoire d'étude (global) : +42 671 logements (+1,72 %/an)

### 4.1.3 Occupation du sol et consommation d'espace

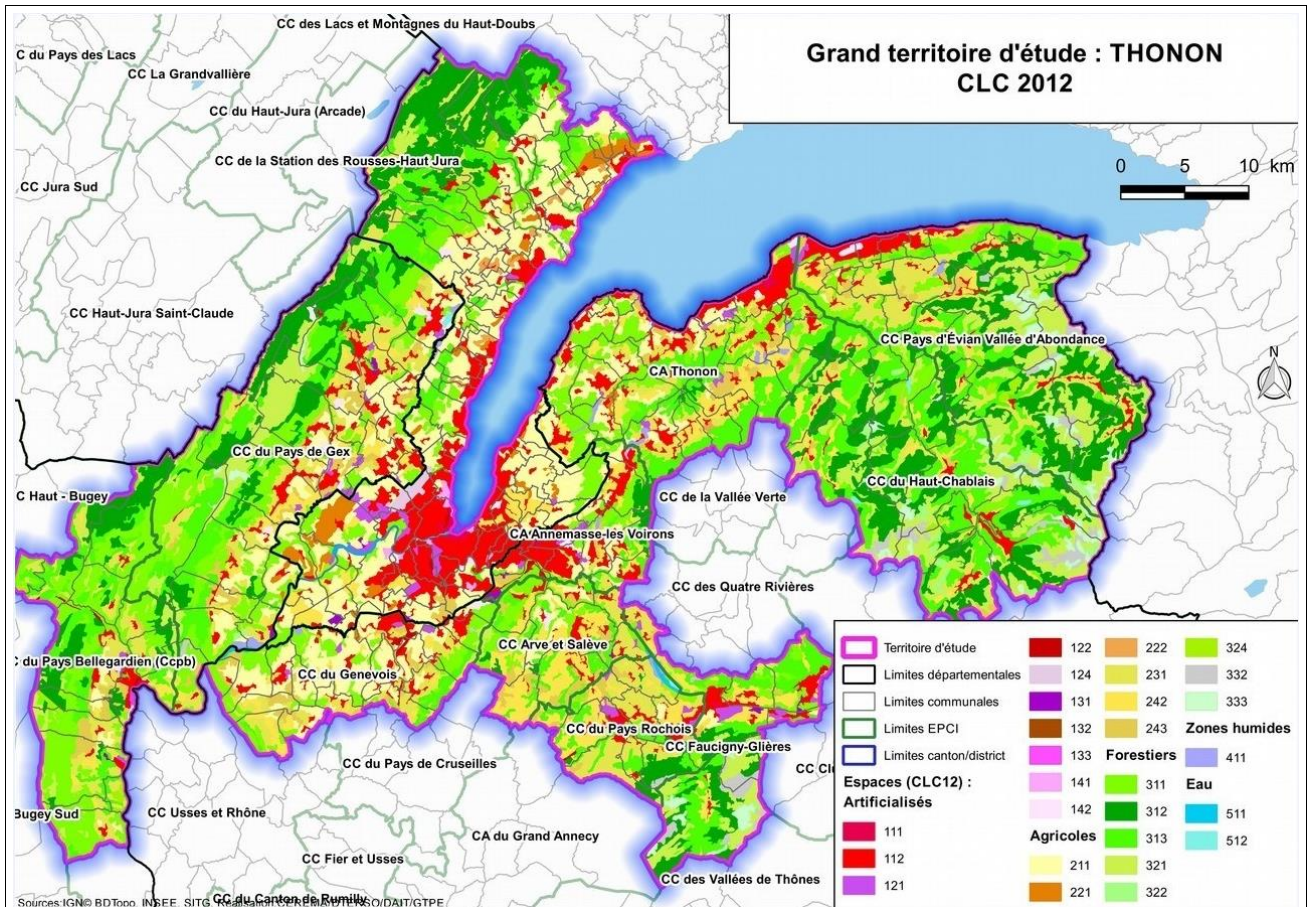


Figure 12 : CLC 2012

À partir des données CLC 2012, superficie des territoires artificialisés (part des territoires artificialisés)

**Territoire d'étude (France) : 24 113 ha (11,7 %)**

CC du Pays de Gex : 4 503 ha (11,1 %)  
 CC du Pays Bellegardien : 1 320 ha (5,9 %)  
 CC Genevois : 2 145 ha (14,2 %)  
 CC Arve et Salève : 1 116 ha (11,3 %)  
 CC du Pays Rochois : 1 394 ha (14,9 %)  
 CC Faucigny-Glières : 1 607 ha (12,1 %)  
 CA Annemasse-les Voirons : 2 902 ha (37,3 %)  
 CA Thonon : 4 880 ha (20,4 %)  
 CA du Haut-Chablais : 1 274 ha (4,1 %)  
 CC du Pays d'Évian Vallée d'Abondance : 2 974 ha (9,2 %)

**Territoire d'étude (Suisse) : 12 577 ha**

Canton de Genève : 9 172 ha  
 District de Nyon : 3 405 ha

**Territoire d'étude (global) : 36 690 ha**

À partir des données CLC 2012, superficie des territoires agricoles (part des territoires agricoles)

**Territoire d'étude (France) : 62 728 ha (30,6 %)**

CC du Pays de Gex : 12 498 ha (30,9 %)  
 CC du Pays Bellegardien : 5 353 ha (23,7 %)  
 CC Genevois : 8 711 ha (57,8 %)  
 CC Arve et Salève : 5 674 ha (57,3 %)  
 CC du Pays Rochois : 5 312 ha (56,7 %)  
 CC Faucigny-Glières : 2 372 ha (17,9 %)  
 CA Annemasse-les Voirons : 2 523 ha (32,4 %)  
 CA Thonon : 9 956 ha (41,7 %)  
 CA du Haut-Chablais : 3 657 ha (11,8 %)  
 CC du Pays d'Évian Vallée d'Abondance : 6 671 ha (20,7 %)

**Territoire d'étude (Suisse) : 25 577 ha**

Canton de Genève : 12 309 ha  
 District de Nyon : 13 268 ha

**Territoire d'étude (global) : 88 305 ha**

À partir des données CLC 2012, superficie des territoires forestiers (part des territoires forestiers)

**Territoire d'étude (France) : 117 137 ha (57,0 %)**

CC du Pays de Gex : 23 074 ha (57,1 %)  
 CC du Pays Bellegardien : 15 739 ha (69,8 %)  
 CC Genevois : 4 125 ha (27,4 %)  
 CC Arve et Salève : 3 086 ha (31,2 %)  
 CC du Pays Rochois : 2 458 ha (26,2 %)  
 CC Faucigny-Glières : 9 224 ha (69,6 %)  
 CA Annemasse-les Voirons : 2 320 ha (29,8 %)  
 CA Thonon : 8 767 ha (36,7 %)  
 CA du Haut-Chablais : 25 891 ha (83,8 %)  
 CC du Pays d'Évian Vallée d'Abondance : 22 452 ha (69,8 %)

**Territoire d'étude (Suisse) : 16 765 ha**

Canton de Genève : 2 762 ha  
 District de Nyon : 14 003 ha

**Territoire d'étude (global) : 133 902 ha**

## 4.2 Scénario tendanciel

### 4.2.1 Démographie

Au sein du territoire d'étude, nous avons une population totale en 2014 de 1 019 549 habitants :

- 446 616 habitants côté français,
- 572 933 habitants côté suisse.

Entre 2009 et 2014, le taux d'évolution annuel moyen de la population est de 1,57 % à l'échelle de l'ensemble du territoire d'étude, soit un gain de population de 76 459 habitants en 5 ans.

La simple reconduction de ce gain de population entre 2014 et 2050 nous donne une population estimée en 2050 de 1 570 000 habitants, soit un gain d'environ 550 500 habitants.

Pour, le scénario tendanciel, nous retiendrons cette hypothèse :

- Hypothèse démographique : 1 570 000 habitants en 2050 (+550 500 habitants entre 2014 et 2050).

### 4.2.2 Consommation d'espace

À partir de la donnée CLC et en se concentrant sur les espaces artificialisés, ceux-ci atteignent 36 690 ha en 2012. Ces mêmes espaces artificialisés occupaient 33 390 ha en 2000 ce qui nous donne une consommation d'espace de 3 300 ha (+0,79 %/an).

En poursuivant cette tendance, cela nous donne une consommation d'espace à horizon 2050 de +10 450 ha (espaces artificialisés en 2050 : 47 140 ha).

Pour le scénario tendanciel, nous retenons cette hypothèse :

- Hypothèse de consommation d'espace : +10 450 ha entre 2012 et 2050 (espaces artificialisés en 2050 : 47 140 ha).
- Attention : les modélisations ont été réalisées avant la formalisation de cette hypothèse. Une première hypothèse de travail nous avait conduit à retenir une consommation d'espace de 15 500 ha en se basant sur les données issues du projet de territoire du Grand Genève. Pour ce projet, le scénario tendanciel, entre 2016 et 2030, projetait une consommation d'espace de 5 000 ha, soit environ 357 ha/an. Cette dynamique de consommation d'espace, si elle est étendue à l'ensemble de notre territoire d'étude et sur la période 2012-2050, conduit à une estimation d'une consommation d'espace d'environ 15 500 ha à horizon 2050.

À partir de CLC, entre 2000 et 2012, 3 300 ha ont été consommés par les espaces artificialisés, quasi exclusivement sur les espaces agricoles, forestiers et semi-naturels. Au final, ce sont plus de 4 fois plus d'espaces agricoles qui ont disparu sur cette période que d'espaces forestiers et semi-naturels.

### 4.3 Scénario stratégique

Pour la constitution du scénario stratégique nous nous sommes appuyés sur les documents suivants qui permettent de couvrir l'ensemble du territoire d'étude :

- Projet de territoire du Grand Genève 2016-2030,
- SCoT Chablais.

D'autres documents ont également été consultés :

- PLUi du Bas Chablais,
- PLH Collines du Léman,
- PLH du Bas Chablais,
- Diagnostic réalisé dans le cadre du WP1 du projet ASTUS.

Pour la construction des éléments chiffrés du scénario stratégique (projections démographiques et consommation d'espace) nous nous appuyons sur les documents analysés pour réaliser des projections à 2050 en reconduisant les tendances inscrites dans ces documents.

Ce scénario stratégique ne réinterroge pas les projections réalisées dans ces documents.

### 4.3.1 Démographie

Document source	Point de départ	Ambition	Projection à 2050
Projet du Grand Genève	2013 : 947 000 habitants Donnée réactualisée en 2016 : 996 000 habitants	+200 000 habitants en 2030 Données réactualisées <sup>4</sup> : +210 000 habitants en 2030 +343 000 habitants en 2040	
SCoT Chablais	2007 : 121 604 habitants 2013 : 133 968 habitants <sup>5</sup>	2020 : 151 000 habitants (+29 400 habitants) <sup>6</sup> Objectif : +1,67 %/an 2030 : 178 000 habitants	
Territoire d'étude	2014 : 1 019 549 habitants	Donnée harmonisée : +13 500 habitants supplémentaires par an Taux annuel moyen : 1,15 %/an	1 433 000 habitants (+486 400 habitants) 1 540 000 habitants à partir du taux annuel moyen (+520 000 habitants)

Pour la cohérence de nos deux scénarios, nous retenons comme hypothèse démographique du scénario stratégique :

- Population totale en 2050 : 1 540 000 habitants (+520 000 habitants).

<sup>4</sup> Projection de population et d'emplois – Annexe 4 : prospective et évaluation, Page 24

<sup>5</sup> Page 14 de l'analyse des résultats de l'application du SCoT 2012-2016

<sup>6</sup> Page 81 du rapport de présentation – diagnostic du SCoT du Chablais



### 4.3.2 Consommation d'espace

Document source	Point de départ	Ambition	Projection à 2050
Projet du Grand Genève	34 700 ha artificialisés ou réservé à l'urbanisation dans les documents d'urbanisme en 2016 <sup>7</sup>  14 % sont réservé à l'urbanisation mais non encore construits	Tendanciel : +5 000 ha en 2030 Projet stratégique : +2 700 ha en 2030 <sup>8</sup>	
SCoT Chablais	2009 : 6003 ha <sup>9</sup>	Tendanciel : +1 360 ha en 2020 <sup>10</sup>  Pas d'objectifs chiffrés de réduction de la consommation d'espace dans le SCoT (mais des actions mises en place)	
Territoire d'étude	2012 : 36 690 ha (espaces artificialisés selon CLC)	Donnée harmonisée : +190 ha/an	43 910 ha (+7 220 ha)

Nous retenons comme hypothèse de consommation d'espace du scénario stratégique :

- Surfaces artificialisées en 2050 : 43 910 ha (+7 220 ha).
- Attention : Suite à une erreur d'appréciation, les modélisations ont été réalisées à partir d'une consommation d'espace estimée à 9 000 ha entre 2012 et 2050.

<sup>7</sup> Occupation et affectation du sol (p.105) – Annexe 2 : diagnostic

<sup>8</sup> Occupation et affectation du sol (p.101) – Annexe 2 : diagnostic

<sup>9</sup> Page 116 du rapport de présentation – diagnostic du SCoT du Chablais

<sup>10</sup> Page 116 du rapport de présentation – diagnostic du SCoT du Chablais

### 4.3.3 Protection des espaces naturels, agricoles et forestiers

Au travers des différents documents stratégiques analysés, il est complexe d’harmoniser le contenu de ceux-ci pour définir à l’échelle de notre territoire d’étude les principes généraux de protection des espaces naturels, agricoles et forestiers. Face à ce constat, notre objectif se limitera ici à estimer l’ambition de ces documents dans la protection des espaces non artificialisés, en reprenant la nomenclature de CLC, c’est-à-dire les espaces agricoles, les espaces forestiers et semi-naturels et les zones humides et surfaces en eau.

Pour les zones humides :

Document source	Ambition
Projet du Grand Genève	Assurer la préservation des prairies sèches, la renaturation de cours d’eau et la restauration de marais/zones humides. <sup>11</sup>
SCoT Chablais	Valoriser le patrimoine environnemental identitaire du Chablais, dont les zones humides <sup>12</sup> Préserver l’armature écologique du territoire et les milieux aquatiques qui sont fortement présents dans le Chablais. Les espaces naturels d’intérêt écologique majeurs et réservoirs de biodiversité sont protégés. Le SCoT reconnaît comme une nécessité de préserver, assurer la gestion et la valorisation des zones humides. <sup>13</sup>
Territoire d’étude	Principe général de protection des zones humides.

Pour les zones agricoles :

Document source	Ambition
Projet du Grand Genève	Préserver et valoriser les espaces naturels, agricoles et paysagers ainsi que leurs interconnexions. <sup>14</sup> Réduire la consommation de surfaces naturelles et agricoles. <sup>15</sup> Déclinaison d’un projet agricole d’agglomération (orienté production et activité, impacts du changement climatiques, accroissement des surfaces productives, autonomie alimentaire, etc.). <sup>16</sup> Conserver les grandes entités agricoles et forestières. <sup>17</sup>
SCoT Chablais	Moins consommer les espaces agricoles en renforçant l’armature urbaine du territoire et en favorisant la densification des espaces déjà urbanisés. <sup>18</sup> Assurer la pérennité de l’activité agricole, plus largement promouvoir les activités agricoles, viticoles, pastorales, sylvicoles et piscicoles. <sup>19</sup>

<sup>11</sup> Page 259 du projet de territoire du Grand Genève 2016-2030

<sup>12</sup> Page 10 du PADD du SCoT du Chablais

<sup>13</sup> Page 34 du DOG du SCoT du Chablais

<sup>14</sup> Page 14 du projet de territoire du Grand Genève 2016-2030

<sup>15</sup> Page 85 du projet de territoire du Grand Genève 2016-2030

<sup>16</sup> Page 94 du projet de territoire du Grand Genève 2016-2030

<sup>17</sup> Page 258 du projet de territoire du Grand Genève 2016-2030

<sup>18</sup> Page 6, 11 du PADD du SCoT du Chablais, page 16 du DOG

<sup>19</sup> Page 13 du PADD du SCoT du Chablais, page 42 du DOG

	Préserver les espaces agricoles, pastoraux et forestiers. <sup>20</sup> Assurer la protection des espaces agricoles stratégiques et pérenniser l'armature agri-pastorale. <sup>21</sup>
Territoire d'étude	Également cités pour leurs rôles au sein des paysages, les espaces agricoles sont préservés, protégés pour les plus stratégiques, tout en s'accordant sur le fait que ce sont sur ces espaces que se fait l'essentiel de la consommation d'espace. Le Grand Genève déploie un véritable projet agricole.

Pour les zones forestières :

Document source	Ambition
Projet du Grand Genève	Conserver les grandes entités agricoles et forestières. <sup>22</sup>
SCoT Chablais	Renforcer et promouvoir l'activité sylvicole. <sup>23</sup> Préserver les espaces agricoles, pastoraux et forestiers. <sup>24</sup>
Territoire d'étude	Peu cités dans les documents de référence, les espaces forestiers sont préservés.

<sup>20</sup> Page 86 du DOG du SCoT du Chablais

<sup>21</sup> Page 38 du DOG du SCoT du Chablais

<sup>22</sup> Page 258 du projet de territoire du Grand Genève 2016-2030

<sup>23</sup> Page 13 du PADD du SCoT du Chablais, page 42 du DOG

<sup>24</sup> Page 86 du DOG du SCoT du Chablais

## 4.4 Déclinaison des scénarios tendanciels et stratégiques au sein des logiciels de modélisation

### 4.4.1 Pour la construction de la carte d'attractivité

Pour réaliser la carte d'attractivité sans exploiter le module dédié disponible au sein du logiciel FORESIGHT, nous avons dans un premier temps conçu une carte de « friction ». Cette carte de friction nous a permis d'affecter à chaque pixel du territoire une valeur plus ou moins élevée en fonction de l'estimation que nous avons de sa perméabilité à l'urbanisation : les pixels d'urbanisation existante avaient les valeurs les plus faibles de frictions alors que d'autres espaces (notamment les espaces en eau) se retrouvaient avec une valeur maximale.

Pour le scénario tendanciel, l'attractivité des différents espaces urbanisés a été modulée en fonction des dynamiques démographiques récentes (entre 2009 et 2014). Pour les espaces non artificialisés, les coefficients de friction ont été modulés en rapport avec le rythme de consommation de ces espaces observables entre 2000 et 2012. La consommation d'espace se fait en très grande majorité sur les espaces agricoles et forestiers et pour une part plus minime sur les zones humides. Nous avons donc affecté un coefficient pour chacun de ces espaces tout en traitant à part certaines occupations du sol plus spécifiques comme les cultures permanentes, qui n'évoluent quasiment pas sur nos territoires d'études, les roches nues ou les glaciers qui sont fixes dans le temps.

Pour le scénario stratégique, l'attractivité des différents espaces urbanisés a été modulée en fonction de l'armature territoriale définie dans les documents stratégiques du territoire tout en s'accordant sur une manière d'harmoniser le niveau de ces différentes polarités à l'échelle de notre territoire d'étude. Pour le coefficient de friction des espaces non-artificialisés, nous avons retenu les principes suivant, en harmonisant les informations recueillies sur nos territoires d'études :

- Renforcement important de la protection des zones humides ;
- Renforcement de la protection des espaces agricoles ;
- Pas d'évolution du niveau de friction des espaces forestiers : naturellement mieux préservés du phénomène de consommation d'espace et, au final, assez peu traités dans les documents stratégiques en dehors des questions de trame verte et bleue, nous avons décidé de ne pas faire évoluer le coefficient de friction des espaces forestiers.

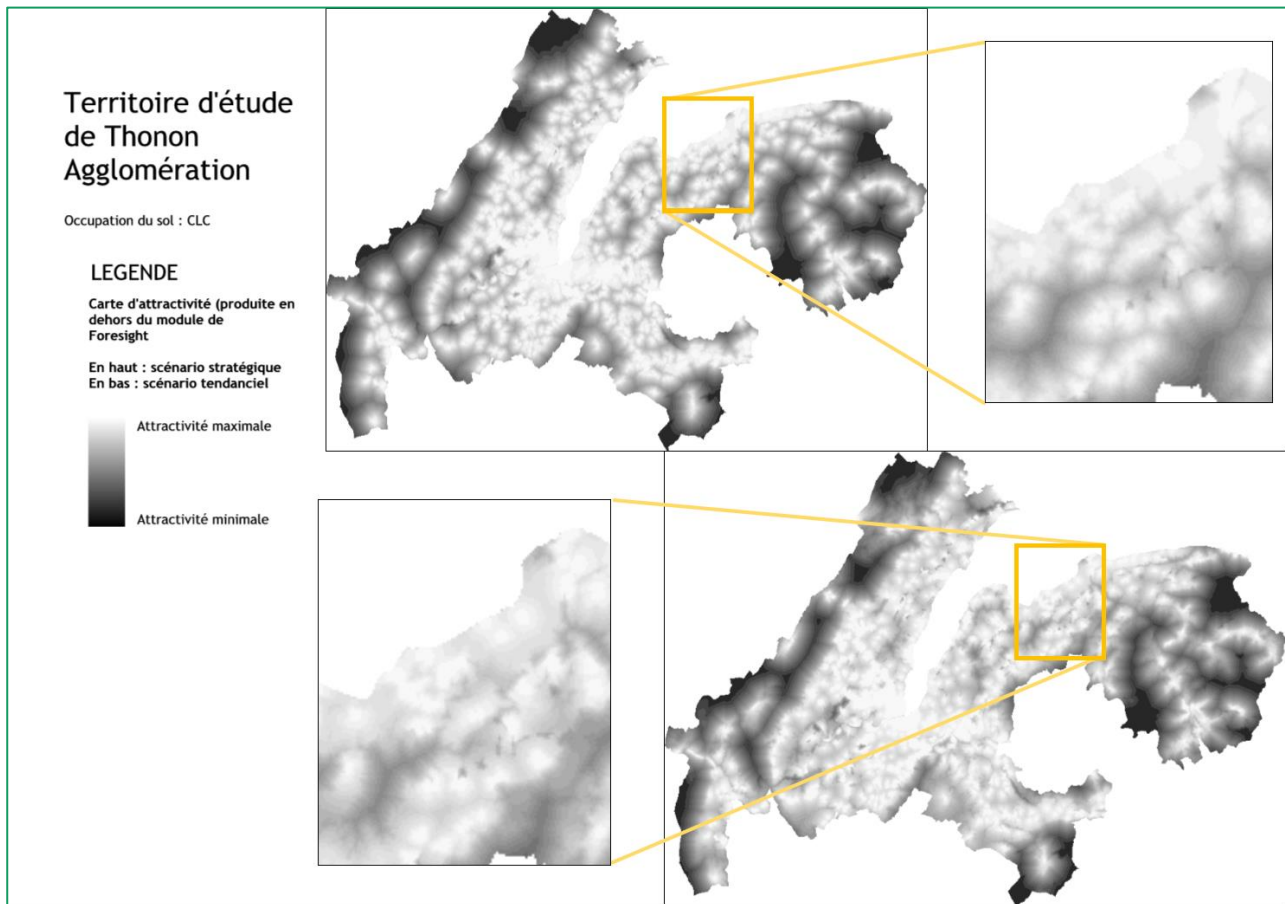


Figure 13 : Cartes d'attractivité produites en dehors du module dédié de FORESIGHT sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération (et zoom) pour les scénarios stratégiques et tendanciels

#### 4.4.2 Pour FORESIGHT

Pour décliner les scénarios tendanciels et stratégiques, nous avons également prévu de faire varier deux autres paramètres disponibles au sein de FORESIGHT :

- L'enveloppe de consommation d'espace :
  - Elle a été fixée à 15 500 ha pour le scénario tendanciel et 9 000 ha pour le scénario stratégique
- Les formes de l'étalement urbain (intitulés *Patterns* au sein du logiciel) :
  - Pour le scénario tendanciel, les valeurs ont été fixées d'après l'analyse de l'évolution de la tache urbaine entre 2009 et 2017<sup>25</sup>
    - *Spontaneous* : 5,
    - *New Spread Center* : 5,
    - *Road Influenced* : 25,
    - *Edge-Growth* : 65,

<sup>25</sup> Voir le Rapport méthodologique

- Pour le scénario stratégique, les phénomènes de mitages et d'étalement linéaire sont largement réduits
  - *Spontaneous* : 0,
  - *New Spread Center* : 2,
  - *Road Influenced* : 13,
  - *Edge-Growth* : 85.

### 4.4.3 Pour LUCSIM

Pour décliner les scénarios tendanciels et stratégiques au sein de LUCSIM, nous avons suivi le programme d'étude, c'est-à-dire une utilisation du logiciel au mode « tout automatique » pour modéliser le scénario tendanciel, en contraignant la modélisation uniquement à partir des chaînes de Markov pour limiter le développement urbain à hauteur d'environ 15 000 ha.

Pour la déclinaison du scénario stratégique, les chaînes de Markov ont également été utilisées pour limiter le développement urbain aux environs de 9 000 ha. Nous avons aussi utilisé la carte d'attractivité du scénario stratégique à la fois en tant qu'information supplémentaire au sein de l'arbre de décision et en tant que contrainte (contrainte de type *Potential Model*).

Incertain de l'influence de notre carte d'attractivité, nous avons également réalisé une série de modélisation en exploitant le modèle de potentiel intégré à LUCSIM. Le calcul du modèle de potentiel se fait en affectant un poids à chaque type d'occupation du sol, les poids les plus élevés correspondant à une attractivité plus importante.

Nous sommes partis sur les poids suivant :

Tissu urbain continu	100	Tissu urbain discontinu	95	Zones industrielles et commerciales	10
Autres espaces artificialisés	20	Zones agricoles	80	Cultures permanentes	20
Zones forestières	70	Roches nues et glaciers	0	Zones humides	1
Eau	0				

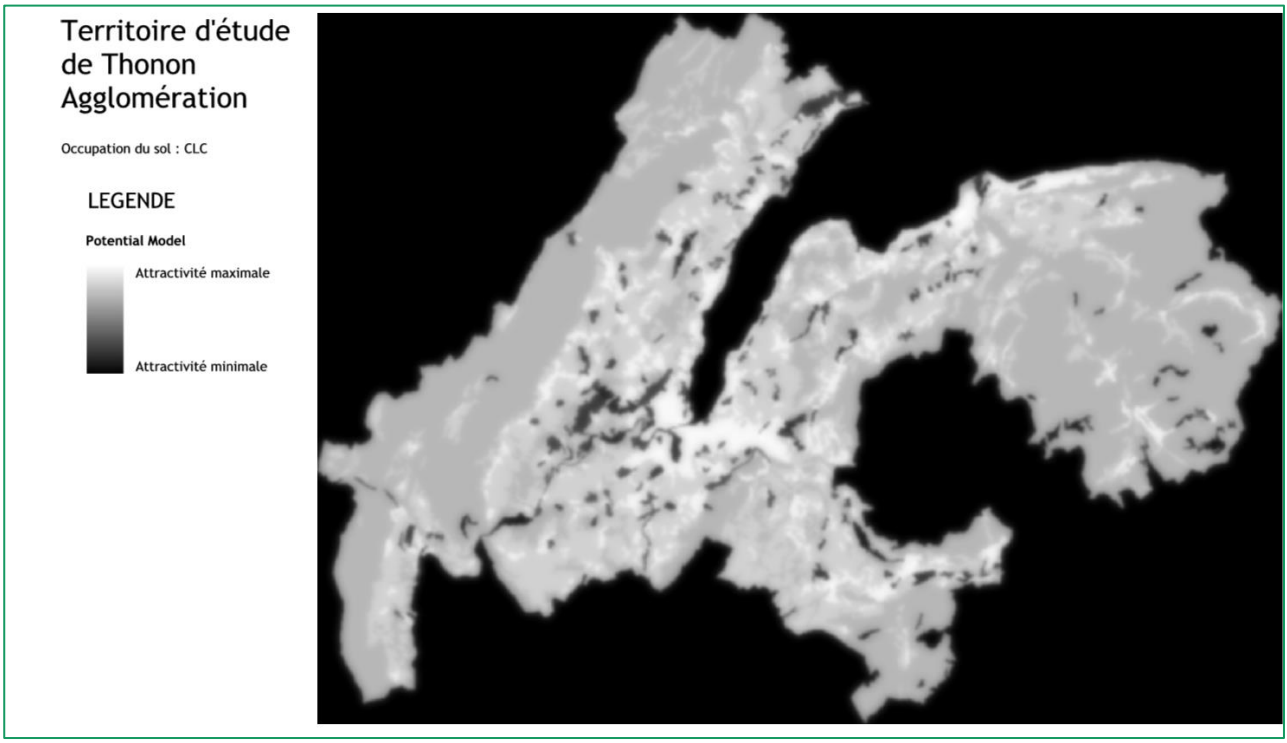


Figure 14 : Modèle de potentiel sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération

## 5 Résultats et analyse – « Ce que nous avons réussi à faire ! »

### 5.1 Retour d'expérience

Un retour d'expérience plus détaillé est donné dans le rapport méthodologique.

#### 5.1.1 Exploitation de la carte d'attractivité

Une fois produites nos cartes d'attractivités pour chacun de nos scénarios, nous avons pu les intégrer sans difficulté à LUCSIM, même si la réalisation des modélisations en toute fin de mission ne nous permet pas d'avoir un véritable recul sur l'impact de ces dernières sur les modélisations.

En revanche, à partir de FORESIGHT, nous n'avons pas réussi à intégrer nos cartes d'attractivités à la modélisation (donnée non reconnue)<sup>26</sup>. Face à ce constat, nous avons adapté notre méthodologie pour produire malgré tout une carte d'attractivité, cette fois-ci à partir du module dédié de FORESIGHT. Grâce à cela, nous avons pu poursuivre notre expérimentation de FORESIGHT.

---

<sup>26</sup> À la suite de nouveaux tests, il a été possible d'intégrer une de nos cartes d'attractivité au sein de FORESIGHT. L'intégration par l'intermédiaire de l'onglet *Pre-processing* n'a définitivement pas fonctionné. Il a été, en revanche, possible de générer directement le fichier \*.gif d'une de nos cartes d'attractivité via ArcGIS (en faisant en sorte que la résolution et l'emprise soient strictement identiques aux fichiers générés par FORESIGHT dans le dossier *Input* pour la donnée *Initial Urban Map* par exemple). Ce fichier a été ensuite copié au sein d'un dossier *Input* d'une modélisation, a été reconnu par le logiciel (*Preview dans l'onglet Initial Settings*) et a permis ensuite de générer une modélisation tenant compte de notre propre carte d'attractivité.



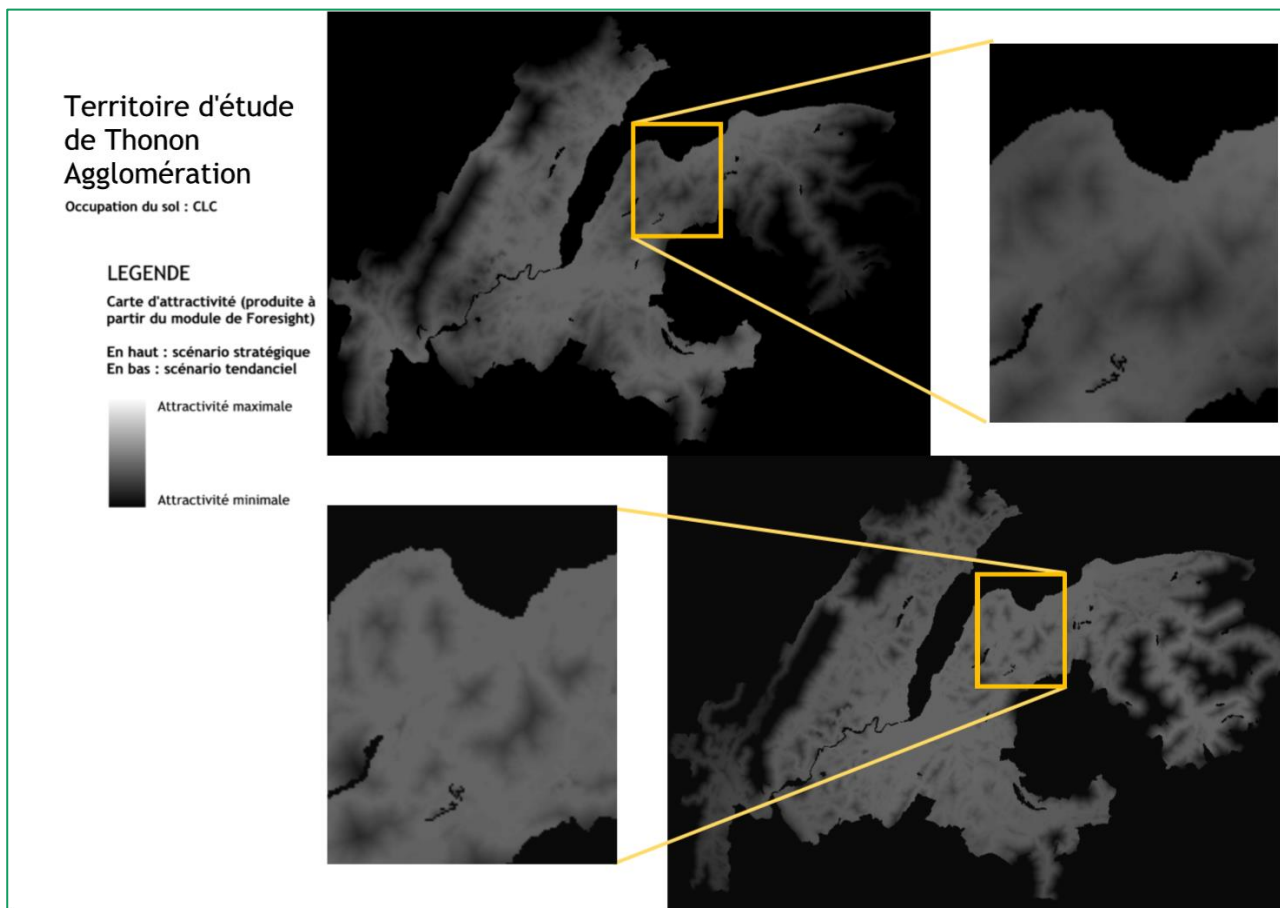


Figure 15 : : Cartes d'attractivité produites à partir de FORESIGHT sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération (et zoom) pour les scénarios stratégiques et tendanciels

## 5.1.2 Expérimentation à partir de FORESIGHT

### 5.1.2.1 Modélisation

Pour notre territoire d'étude, pour la base CLC nous permettant de définir l'*Initial Urban Map* et pour chacun de nos deux scénarios, « Tendanciel » et « Stratégique », nous avons réalisé :

- Une modélisation unique à l'échelle du territoire,
- Une série de 20 modélisations,
- Une carte de la probabilité d'urbanisation pour chaque scénario à partir de l'option *Future uncertainty* sur la base des 20 modélisations réalisées auparavant.

L'urbanisation créée par FORESIGHT est de 15 500 ha pour le scénario tendanciel et de 9 000 ha pour le scénario stratégique<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> L'explication des valeurs retenues est donnée au sein des deux rapports pour les territoires.

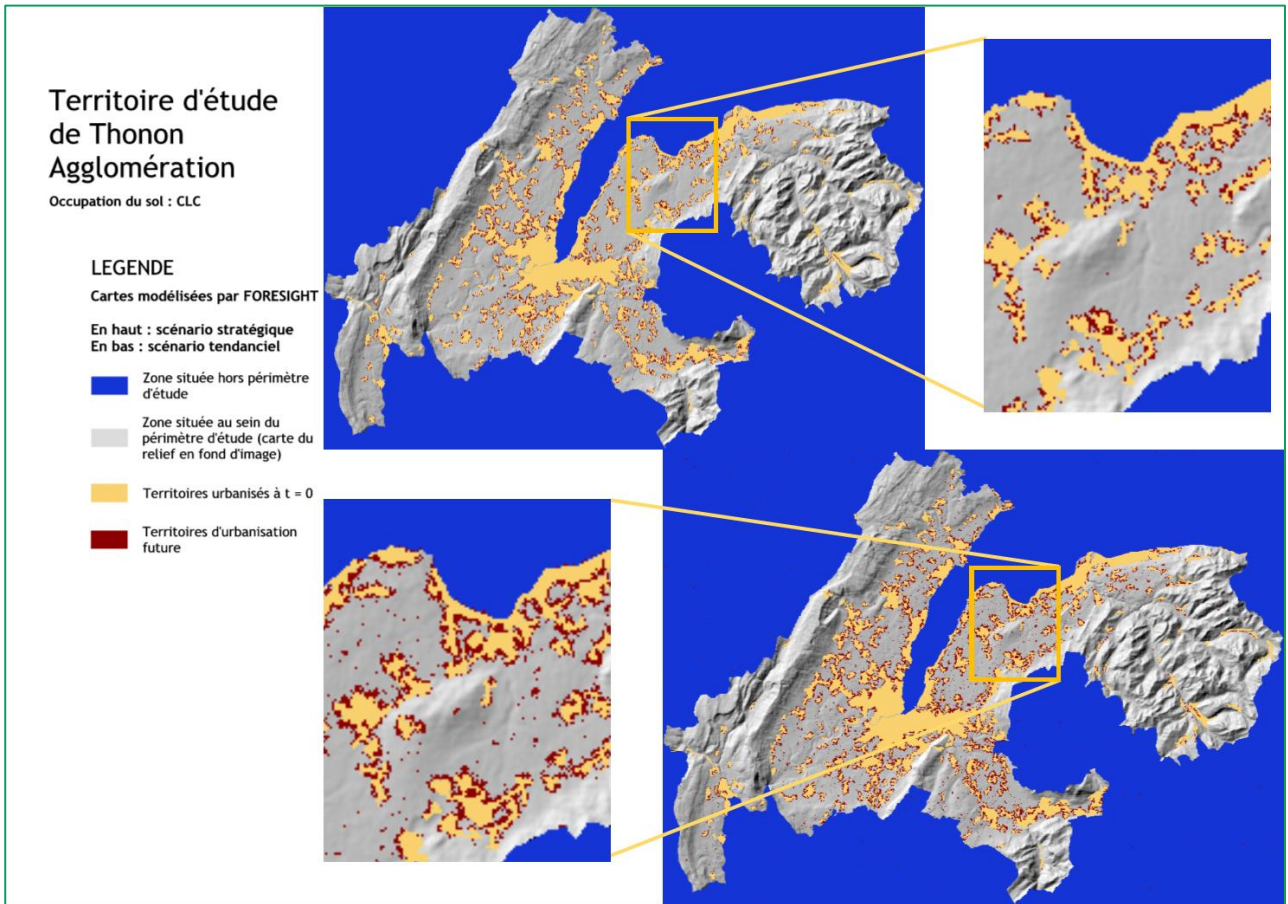


Figure 16 : Modélisations obtenues sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération à partir de la donnée CLC et pour les scénarios stratégiques et tendanciel

Les cartes de probabilités ont été obtenues à partir de 20 modélisations réalisées pour chacun de nos scénarios.

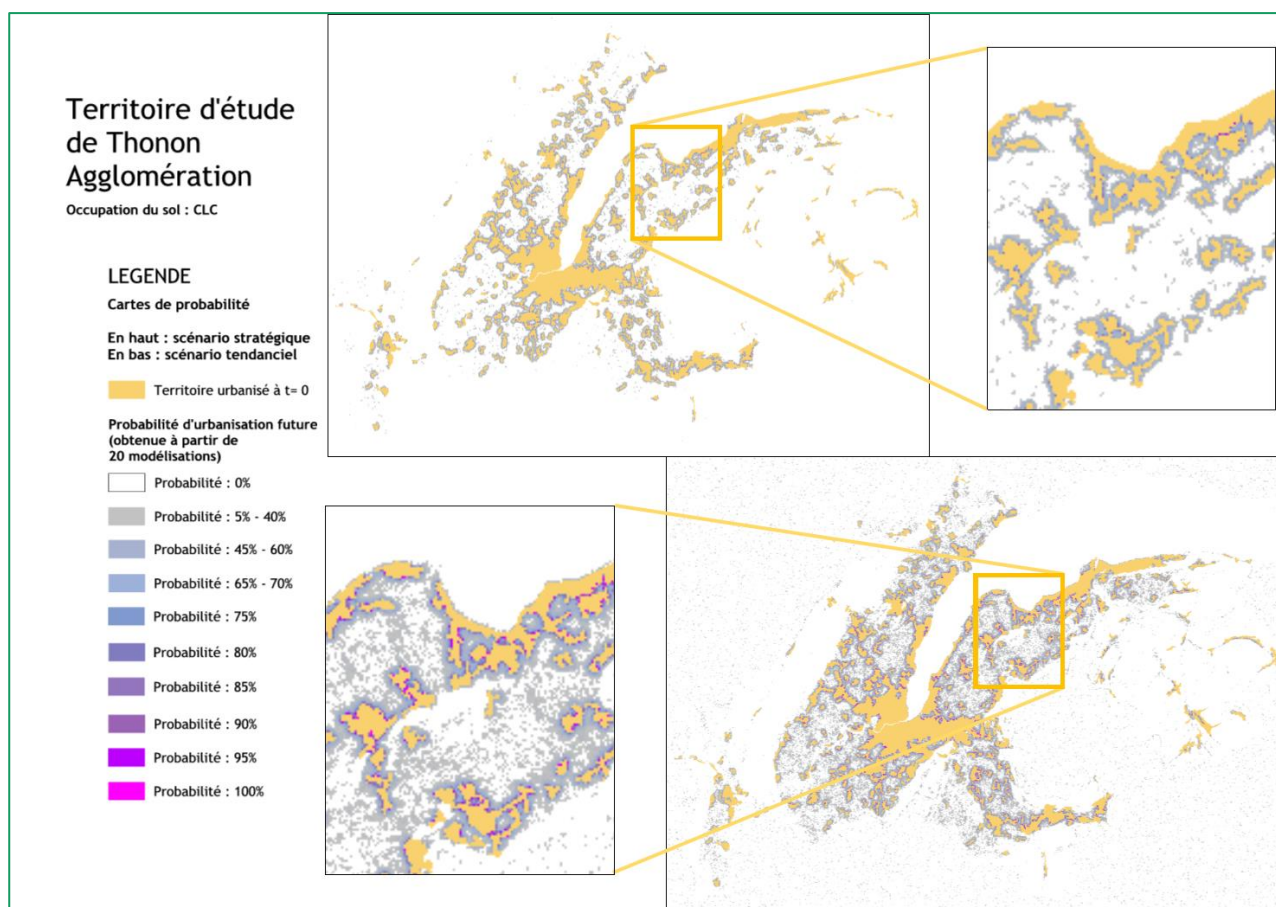


Figure 17 : Probabilités d'urbanisation obtenues à partir de 20 modélisations sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération à partir de la donnée CLC et pour les scénarios stratégiques et tendanciels

### 5.1.2.2 Analyse des cartes modélisées

Suite à notre expérimentation du logiciel, nous bénéficions de deux types de sorties à partir de FORESIGHT :

- La carte de l'urbanisation créée,
- La carte de probabilité.

Chacune de ces données, au format \*.gif doit être géoréférencée pour être intégrée au sein d'un logiciel SIG. Notre stratégie d'analyse repose ensuite sur un décompte des différents types de pixels, qui n'ont pas la même signification en fonction des différentes cartes produites.

Pour pouvoir comparer l'impact de chaque scénario sur les modélisations obtenues à partir de FORESIGHT, notre stratégie d'analyse repose également sur une analyse de ces différentes cartes selon deux prismes territoriaux :

- Sur la base du découpage par EPCI,

- Sur la base de l'armature territoriale (définie à partir de l'analyse des documents stratégiques du territoire).

Nos objectifs sont de confirmer les différences entre nos scénarios au niveau de l'enveloppe de consommation d'espace et sur la manière d'urbaniser le territoire, preuve que la modification des *Patterns* a effectivement un impact sur les modélisations.

L'analyse réalisée selon l'armature territoriale a pour objectif de confirmer l'impact des cartes d'attractivité sur la localisation préférentielle des nouveaux pixels d'urbanisation sur le territoire.

Tout autre découpage territorial aurait pu être utilisé pour mener cette analyse. Si une analyse de la localisation précise des pixels (à la parcelle par exemple) générés par FORESIGHT n'a que peu de sens, l'analyse par secteur géographique en a bien plus et la répétition des modélisations permet d'améliorer la qualité de l'information recueillie.

### 5.1.2.3 Analyse des cartes de probabilités

Les cartes de probabilités offrent des informations complémentaires aux cartes modélisées. En nous permettant d'identifier des secteurs sur lesquels les probabilités d'urbanisation sont très fortes pour un scénario donné, cela permet d'avoir une approche bien plus microscopique qu'avec une simple carte modélisée par FORESIGHT. De plus, l'on voit apparaître sur ces cartes, plus aisément des tendances d'urbanisation, que soit les phénomènes d'urbanisation linéaire ou des phénomènes de jonction entre plusieurs espaces urbanisés (comblement progressif de certains espaces vides).

Pour toutes ces raisons, ces cartes mériteraient d'être analysées plus finement que ce que nous avons pu le faire puisque nous avons repris le même type de traitement pour ces cartes qu'avec les cartes modélisées.

Néanmoins, cette analyse permet de confirmer certains effets :

- L'influence des *Patterns* : en effet, les paramètres *Spontaneous* ou *New Spread Center* sont typiquement des phénomènes aléatoires dont les effets en termes d'urbanisation ne sont pas systématiques. Cela se traduit au niveau de la carte de probabilité par une multiplication de pixels aux probabilités d'urbanisation relativement faibles. À l'inverse, le paramètre *Edge-Growth* va, pour toutes les modélisations, urbaniser systématiquement le pourtour des toutes les entités urbanisées initialement. De fait, nous aurons des probabilités très importantes à observer à proximité immédiate de ces espaces.

## 5.1.3 Expérimentation à partir de LUCSIM

### 5.1.3.1 À partir de la base CLC

Pour chacun de nos territoires, nous avons pu intégrer les millésimes 2000 et 2012 de CLC sur la base d'une nomenclature simplifiée en 10 postes.

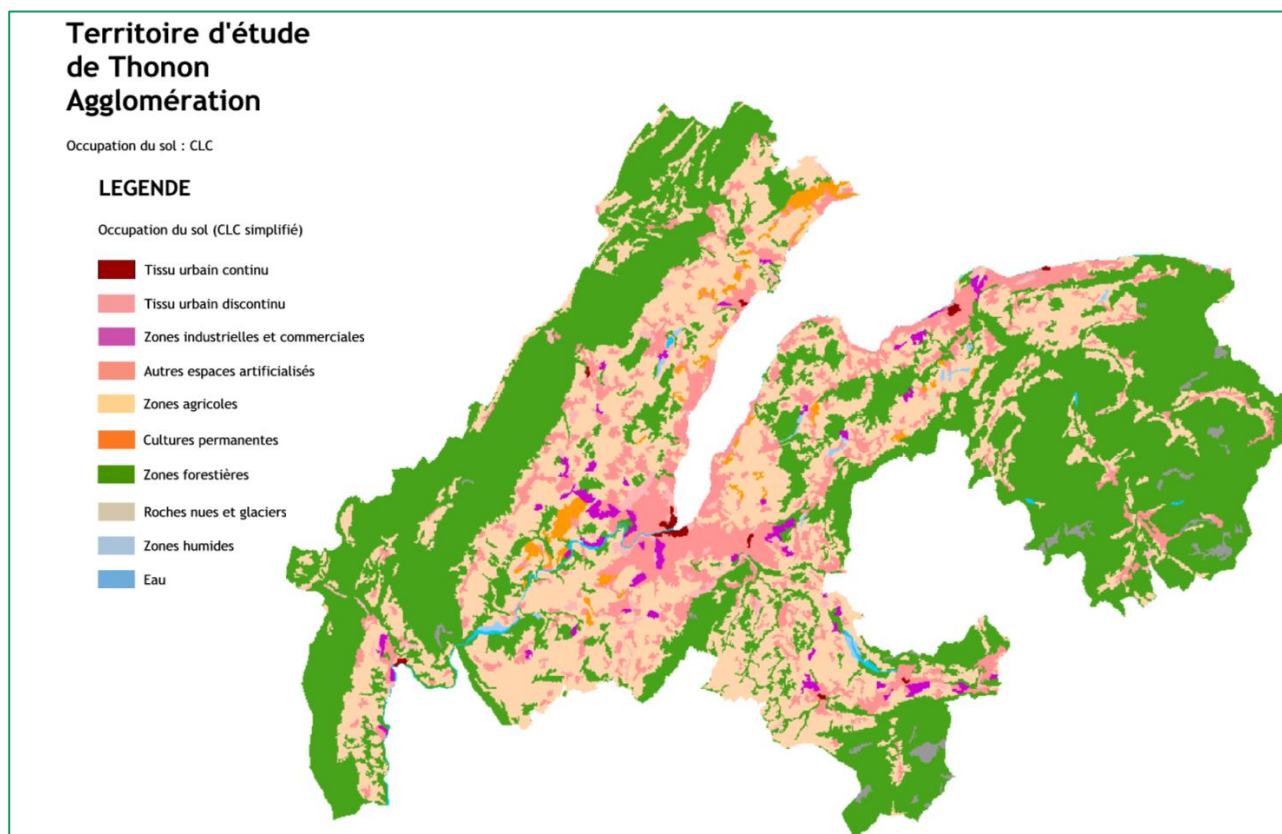


Figure 18 : Occupation du sol (CLC simplifié) en 2012 sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération

La catégorie d'occupation du sol *Tissu urbain continu* est très faiblement représentée à l'échelle de nos territoires d'études, nous n'avons donc pas souhaité l'intégrer dans la modélisation. Nous nous sommes concentrés uniquement sur la catégorie d'occupation du sol *Tissu urbain discontinu*.

En suivant le programme d'étude envisagé, nous avons donc réalisé trois séries modélisations :

- Sans carte d'attractivité, ni modèle de potentiel,
- Avec un modèle de potentiel calculé par LUCSIM, intégré à la fois au niveau de l'arbre de décision et au niveau des contraintes,
- Avec la carte d'attractivité (produite par nos soins) du scénario stratégique, intégrée à la fois au niveau de l'arbre de décision et au niveau des contraintes.

Pour chaque modélisation, nous avons également appliqué la contrainte d'une chaîne de Markov (*Markov Chain*) :

- Comme rappelé dans le principe de fonctionnement de LUCSIM, la *Markov Chain* se présente sous la forme d'une matrice de transition que l'on peut ensuite élever à la puissance souhaitée. En

multipliant cette matrice de transition avec l'occupation du sol initiale (sous forme matricielle), on obtient une quantité théorique de chaque occupation du sol finale. Ce calcul traduit le principe suivant : si l'on reconduisait les tendances passées X fois (X étant la valeur de la puissance de la matrice de transition) alors quelles seraient les nouvelles quantités des différents types d'occupation du sol de nos territoires d'étude.

- En se concentrant uniquement sur le *Tissu urbain discontinu*, nous avons retenu les valeurs de puissance permettant d'atteindre une quantité de pixels créés ( $\approx$  consommation d'espace) équivalente à la consommation d'espace calculée pour nos scénarios stratégiques et tendanciels. Pour la série de modélisations sans carte d'attractivité, ni modèle de potentiel, nous avons retenu la consommation d'espace du scénario tendanciel. Pour les autres séries de modélisations nous avons retenu la donnée du scénario stratégique.

Pour chaque situation, nous avons fait tourner 3 ou 4 fois l'arbre de décision en faisant varier, au sein de ce dernier, la taille du secteur d'apprentissage (paramètres *Neighborhood Radius*).

Au sein de l'ensemble des règles de transition ainsi obtenues, nous n'avons finalement conservé pour la modélisation que celles qui ne faisaient pas explicitement évoluer les type d'occupation du sol suivant : *Eau, Zones Humides, Espaces urbains continus, Zones industrielles et commerciales, Autres espaces artificialisés*, en estimant que ces règles produiraient des effets non souhaités.

### 5.1.3.2 Explosion du temps de calcul pour l'analyse des bases HRL et Theïa

Lors de notre expérimentation de LUCSIM à partir des autres bases, nous avons été confrontés à une difficulté. Le temps nécessaire pour l'exécution de l'arbre de décision à partir des données Theïa et HRL, a « explosé ». À partir des données CLC, nous étions sur des temps d'exécution de l'ordre de la demi-heure. Pour HRL comme pour Theïa, nous avons stoppé le processus au bout de deux jours sans avoir encore obtenu de résultats.

Cette situation est largement imputable au niveau de précision de la donnée initiale (taille de la maille et précision de la nomenclature), avec une maille bien plus fine pour ces deux dernières bases que pour la donnée CLC qui complexifie le déroulement de l'algorithme de l'arbre de décision.

### Pour aller plus loin

Face à cette augmentation des temps d'exécution, qui remet en cause la réalisation de modélisations à partir de ces différentes bases et pour réduire le temps de calcul, il serait possible de :

- Simplifier l'apprentissage au sein de l'arbre de décision :
  - Réduire la part d'apprentissage : au sein de l'arbre de décision, le *Training ratio*, fixé par défaut à 75/100, indique la proportion de pixels à partir desquels l'arbre de décision détermine les règles de transition. Sans certitude, la réduction de ce ratio devrait permettre de réduire le temps de calcul.
  - Réduire le secteur d'apprentissage : en jouant sur les paramètres *Neighborhood Radius* au sein de l'arbre de décision, c'est-à-dire le paramètre qui permet de fixer le secteur autour de chaque pixel étudié par l'arbre de décision pour déterminer les règles de transition, il est possible de le diminuer et par la même de réduire le temps de calcul. Par exemple, une réduction du radius de 10 à 8 permet de réduire environ par 2 la quantité de pixels de chaque secteur analysé par l'algorithme.
  - Ne pas utiliser l'option *Weight* : cette option permet de surévaluer les évolutions dans l'objectif d'améliorer la précision des règles, néanmoins, elle complexifie l'algorithme de l'arbre de distance, ce qui peut avoir un impact sur le temps de calcul.
- Simplifier la donnée d'entrée :
  - Réduire le nombre de classes.
  - Réduire la précision de l'information : HRL est disponible avec des pixels de 20 mètres de côté et Theia avec des pixels de 30 mètres de côté. Une piste pour réduire le temps de traitement serait d'utiliser des pixels de plus grande taille, allant jusqu'à 100 mètres, ce qui nous donnerait un niveau de précision comparable à CLC. Attention néanmoins, puisque cela a pour effet direct de réduire la précision de l'information.

Face à ce constat, nous avons pris la décision de mettre en œuvre une partie de ces pistes de solutions à partir de la donnée HRL et sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération. À partir d'HRL, les évolutions observées entre 2006 et 2015 sont nettement supérieures sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération que sur celui du PNR des Bauges (évolutions minimales). Nous avons donc décidé de limiter nos derniers traitements au territoire d'étude de Thonon Agglomération.

#### 5.1.3.3 Une modélisation à partir de la donnée HRL sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération

Pour simplifier la donnée d'entrée, nous avons réduit le niveau de précision de l'information HRL en augmentant la taille des pixels (100 mètres de côté). À partir de nos deux couches, 2006 et 2015, il a alors été possible d'obtenir des résultats concrets en matière de définition des règles à partir de l'arbre de décision. L'arbre de décision a été appliqué sur l'ensemble des différents types d'occupation du sol pour pouvoir générer des évolutions pour chacun d'eux.

Par manque de temps, nous n'avons pas réalisé de modélisations contraintes par le modèle de potentiel ou une carte d'attractivité. À noter que notre volonté de faire évoluer concomitamment différents types d'occupation du sol rend quasi-inapplicable une contrainte du type chaîne de Markov. En effet, ce n'est pas parce que la chaîne de Markov indique des évolutions pour chaque type d'occupation du sol que celles-ci se feront effectivement par application de nos règles de transition. On peut très bien se retrouver dans la modélisation, ce qui a été notre cas, avec un type d'occupation du sol qui évolue beaucoup alors que les autres sont stables voire diminuent car cela dépend directement des règles appliquées

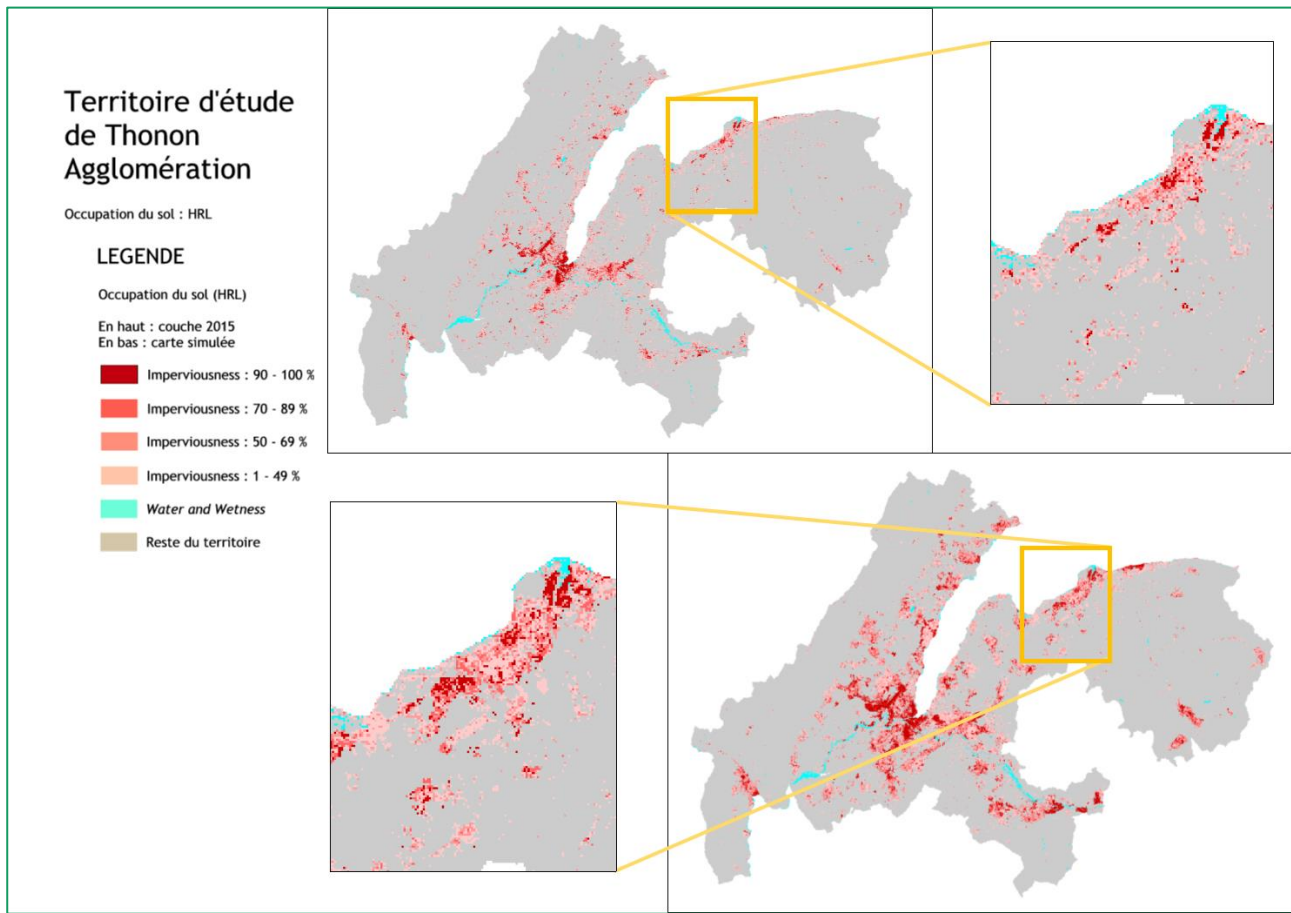


Figure 19 : Modélisation obtenue à partir de LUCSIM sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération et pour la base de donnée HRL

#### 5.1.3.4 Analyse des résultats et retour d'expérience

Par manque de temps, aucune véritable stratégie d'analyse des résultats issus de LUCSIM n'a pu être mise en place.



## 5.2 Analyse des résultats

L'ensemble des résultats cartographiques ont été présentés ci-avant.

### 5.2.1 Analyse visuelle

Au niveau des cartes modélisées, l'analyse visuelle permet d'identifier des différences entre nos deux scénarios.

Le paramètre d'enveloppe de consommation foncière est nettement différent entre nos deux scénarios et est donc directement identifiable sur les cartes modélisées.

Il est également assez évident de mesurer l'impact des distinctions introduites entre nos deux scénarios au niveau des formes d'urbanisation générées :

- Le scénario stratégique privilégie une dynamique d'urbanisation en continuité de l'urbanisation existante alors que le scénario tendanciel a des effets de mitage et d'urbanisation linéaire plus marqués. Visuellement, cela se traduit par une urbanisation plus concentrée sur le scénario stratégique et plus dispersée pour le scénario tendanciel.

Il est en revanche quasi-impossible par une seule analyse visuelle de vérifier l'impact de nos cartes d'attractivité présentée ci-avant, sur la localisation du développement urbain.

## 5.2.2 Analyse par EPCI

Pour compléter cette première analyse visuelle, nous avons réalisé ci-après une analyse des résultats sur la base d'un découpage du territoire par EPCI. Pour notre première analyse, nous avons procédé à une découpe du territoire d'étude par EPCI. Pour ces différents périmètres ainsi que le périmètre total du territoire d'étude, nous avons compté l'ensemble des pixels créés par FORESIGHT, tout d'abord à partir d'une modélisation puis à partir de la donnée agrégée pour 20 modélisations et bien entendu nos deux scénarios d'évolution.

### 5.2.2.1 Pour une modélisation

Territoire THONON	CLC 2050			
	Stratégique		Tendanciel	
CC Haut Chablais	65	0,73 %	242	1,60 %
CC Genevois	793	8,89 %	1363	9,03 %
CC Faucigny Glières	353	3,96 %	496	3,29 %
CC du Pays Rochois	556	6,23 %	890	5,90 %
CC Arve et Saleve	475	5,32 %	947	6,28 %
District de Nyon	1095	12,27 %	1687	11,18 %
CA de Thonon	1424	15,96 %	2676	17,74 %
CA Annemasse	517	5,79 %	817	5,42 %
CC du Pays de Gex	1516	16,99 %	2254	14,94 %
CC du Pays d'Evian	370	4,15 %	726	4,81 %
CC du Pays Bellegardien	250	2,80 %	306	2,03 %
Canton de Geneve	1579	17,70 %	2682	17,78 %
Grand territoire d'étude	8923	100,00 %	15086	100,00 %
Pixels créés en dehors du périmètre d'étude	77		414	
Somme des pixels créés	9000		15500	

Tableau 1 : Nombres de pixels (et proportion) créés par EPCI pour chaque scénario à partir de la donnée CLC

Cette première analyse souligne un premier effet : l'impact des distinctions introduites entre nos deux scénarios.

- À partir de la donnée CLC, la répartition des pixels créés en fonction des scénarios est différente :
  - La proportion de pixels créés dans le Haut Chablais, Arve et Salève, Thonon et le Pays d'Évian est plus importante dans le scénario tendanciel que dans le scénario stratégique.
  - Effet inverse, la proportion de pixels créés dans Faucigny-Glière, le District de Nyon, le Pays de Gex et le Pays Bellegardien est plus importante dans le scénario stratégique que dans le scénario tendanciel.
  - On a ensuite des EPCI pour lesquels les différences sont minimales (moins significatives), c'est le cas pour la CA d'Annemasse, le Genevois, le canton de Genève et le Pays Rochois.

Une deuxième modélisation, identique dans ses paramètres confirme cette répartition et notre analyse semble distinguer les scénarios stratégiques et tendanciels au niveau de la répartition de l'étalement urbain par EPCI.

À noter que nous n'avons pas explicitement exclu, dans le cadre des modélisations réalisées, les territoires extérieurs à notre territoire d'étude ce qui explique la création par le logiciel d'un certain nombre de pixels en dehors de ce territoire d'étude. L'effet est nettement plus marqué pour le scénario tendanciel, ceci s'expliquant tout simplement par des phénomènes de dispersion de mitages plus important pour ce dernier scénario.

### 5.2.2.2 À partir de 20 modélisations

Territoire THONON	CLC 2050							
	Stratégique				Tendanciel			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Nb pixels pour une probabilité	<25	25-50	50-75	75-100	<25	25-50	50-75	75-100
CA Annemasse	760	399	362	63	1075	412	411	300
CA de Thonon	2649	1261	879	121	5715	1177	1321	1032
Canton de Geneve	2690	1171	1015	195	5793	1178	1232	1042
Canton de Vaud	2266	876	591	87	4975	945	819	369
CC Arve et Saleve	967	401	296	54	2209	448	453	323
CC du Pays Bellegardien	754	231	129	18	1501	236	136	10
CC du Pays d'Evian	967	378	198	11	2022	411	403	143
CC du Pays de Gex	2605	1127	944	177	4940	1186	1169	753
CC du Pays Rochois	939	410	321	73	2124	426	404	248
CC Faucigny Glières	433	226	241	64	704	217	240	187
CC Genevois	1652	714	447	74	3572	712	726	388
CC Haut Chablais	293	75	13	1	825	143	124	47
Grand territoire d'étude	16980	7269	5432	938	43316	7530	7463	4843
Proportion	55,46 %	23,74 %	17,74 %	3,06 %	68,59 %	11,92 %	11,82 %	7,67 %

Tableau 2 : Nombres de pixels en fonction de leur valeur par EPCI, pour chaque scénario et pour la base CLC

Bien plus complexe à analyser, ces cartes permettent de corroborer certains effets.

La comparaison des résultats pour les deux scénarios permet de distinguer les scénarios stratégiques et tendanciels. La proportion de pixels qui ont une forte probabilité d'être urbanisés est supérieure pour le scénario stratégique que pour le scénario tendanciel. Néanmoins cet effet est contrebalancé par le fait que la quantité d'espaces consommés est nettement supérieur pour le scénario tendanciel par rapport au scénario stratégique.

Dans le même sens, la proportion de pixels qui ont une très faible probabilité d'être urbanisés est nettement supérieur pour le scénario tendanciel que pour le scénario stratégique, constat directement imputable aux *Patterns Spontaneous* ou *New Spred Center*.

Ces constats sont directement imputables à la différenciation introduite entre ces deux scénarios au niveau des *Patterns*. Le scénario stratégique privilégie une urbanisation en continuité de l'urbanisation existante et diminue drastiquement les phénomènes de mitages à l'inverse du scénario tendanciel. Pour le scénario stratégique, ceci conduit inévitablement à la reproduction d'une urbanisation semblable d'une modélisation à l'autre et va avoir pour effet d'augmenter la quantité de pixels aux probabilités élevées. Pour le scénario tendanciel, avec des effets de mitages plus marqués, nous aurons, à l'inverse, une part importante d'aléatoire dans nos modélisations se traduisant, sur les cartes de probabilités, par une proportion conséquente de pixels aux probabilités faibles.

### 5.2.3 Analyse selon l'armature

Pour notre seconde analyse, nous avons procédé à une découpe du territoire d'étude en fonction de l'armature territoriale du territoire d'étude.

À noter que la dénomination des différents niveaux de polarités du territoire est identique sur nos deux territoires d'étude et calquée sur celle provenant du territoire de l'ARC Genevois.

À noter également que pour cette seconde analyse, nous n'avons réalisé le travail qu'à partir des cartes de simulations, sans étudier les cartes de probabilités.

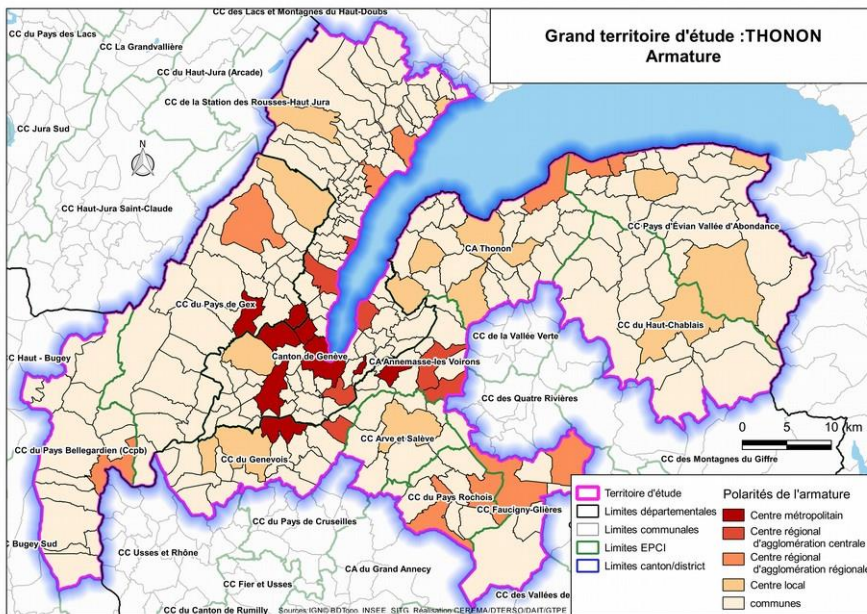


Figure 20 : Armature territoriale (nomenclature Cerema, identique pour les deux territoires d'études)

Territoire THONON	CLC 2050			
	Stratégique		Tendancier	
Centres métropolitains	612	6,86 %	846	5,61 %
Centres régionaux d'agglomération centrale	460	5,16 %	671	4,45 %
Centres régionaux	897	10,05 %	1244	8,25 %
Centres locaux	1218	13,65 %	2296	15,22 %
Autres communes	5827	65,30 %	10063	66,70 %
<b>Grand territoire d'étude</b>	<b>8923</b>	<b>100,00 %</b>	<b>15086</b>	<b>100,00 %</b>
Pixels créés en dehors du périmètre d'étude	77		414	
<b>Somme des pixels créés</b>	<b>9000</b>		<b>15500</b>	

Tableau 3 : Nombres de pixels (et proportion) créés pour chaque niveau de l'armature territoriale et pour chaque scénario à partir de la donnée CLC

Cette seconde analyse souligne un premier effet : l'impact des distinctions introduites entre nos deux scénarios.

- À partir de la donnée CLC, la répartition des pixels créés en fonction des scénarios est différente : la proportion de pixels créés sur les 4 premiers niveaux de polarités du territoire est nettement plus importante dans le scénario stratégique que dans le tendanciel et cette différence est plus marquée sur les 3 premiers niveaux (Centres métropolitains, Centres régionaux d'agglomération centrale et Centres régionaux).

Cette seconde analyse, réalisée à partir d'une modélisation, semble distinguer les scénarios stratégiques et tendanciels au niveau de la répartition de l'étalement urbain en fonction de l'armature territoriale et met donc en avant le rôle de la carte d'attractivité. L'effet de concentration sur les polarités du niveau stratégique ressort nettement.

- Seule cette analyse réitérée à partir de plusieurs modélisations pourrait confirmer cet effet.

### 5.2.4 Synthèse de l'analyse

L'analyse réalisée sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération confirme l'existence d'un impact des choix que nous avons faits pour distinguer nos deux scénarios d'évolution du territoire. On a ainsi pu illustrer l'impact de l'enveloppe de consommation foncière, des *Patterns*, mais également de la carte d'attractivité en recentrant l'analyse sur l'armature territoriale.

## 5.3 Analyse des résultats issus de LUCSIM

Comme indiqué plus haut, par manque de temps, aucune véritable stratégie d'analyse des résultats issus de LUCSIM n'a pu être mise en place. D'un fonctionnement théorique très simple, LUCSIM s'est avéré finalement assez complexe à appréhender et les modélisations obtenues mériteraient d'être étudiées bien plus finement que nous n'avons pu le faire.

### 5.3.1 Fonctionnement

Voici un retour d'expérience détaillé sur les différentes étapes menées dans le cadre de cette expérimentation.

Au niveau de l'arbre de décision :

- Les temps de traitement peuvent être long. L'impact de la précision de la donnée source est tel que nous n'avons pas pu réaliser de modélisations à partir de nos données les plus fines.
- L'impact d'une Suitability Map (carte d'attractivité ou modèle de potentiel) est difficilement vérifiable : s'il y a parfois des conditions faisant appel spécifiquement à la Suitability Map ou une modification du nombre de règles, de nombreuses règles sont parfaitement identiques avec ou sans Suitability Map.

Au niveau de la modélisation :

- Il est possible d'intégrer une contrainte du type *Potential/Suitability Map*) mais son impact, qui est réel sur les modélisations, n'a pu être finement analysé.
- Il est possible d'intégrer une contrainte du type *Markov Chain* (contrainte sur la quantité de changement) mais cela n'implique pas pour autant que le logiciel sera en mesure, à partir des règles de transition qui lui sont fournies, de procéder à une évolution du territoire suffisante pour atteindre le maximum fixé par la chaîne de Markov.
- Les temps de traitement peuvent être long : ce temps est impacté par la taille du territoire d'étude mais également par le nombre et la complexité des règles de transitions.

### 5.3.2 Les modélisations

Au-delà du fonctionnement du logiciel, nous avons réalisé un nombre important de modélisations et si aucune analyse détaillée n'a été faite de chacune, par manque de temps, quelques résultats s'en dégagent :

- À chaque étape/itération de la modélisation, les règles de transition reposent sur des conditions géographiques qui peuvent ou pas être vérifiées sur le territoire d'étude :
  - Une règle qui ne peut pas s'appliquer n'aura aucun impact dans la modélisation,
  - Une règle qui ne peut s'appliquer que sur une part minimale du territoire aura un impact très limité et très localisé dans la modélisation,
  - Une règle qui, à l'inverse, peut s'appliquer sur de grands secteurs du territoire, va avoir (sauf contrainte du type chaîne de Markov) un grand impact dans la modélisation même si ce dernier restera a priori toujours localisé.
- Il semblerait que la majorité des règles présentant une certaine complexité ont des conditions géographiques telles qu'elles n'ont donc qu'un impact très limité et localisé à chaque itération. Elles finissent généralement par ne plus pouvoir s'appliquer du tout.
- D'autre part, nous n'avons toujours modélisé que l'évolution d'un seul type d'espace (*Tissu urbain discontinu*). Tous les autres types d'occupation du sol ne peuvent aller qu'en diminuant. Si pour certaines occupations du sol très largement majoritaires sur nos territoires d'études (Forêts ou territoires agricoles) cela n'a, a priori que peu d'impact, sur l'applicabilité des règles, pour d'autres (notamment tous les autres espaces urbanisés), cela va avoir pour effet de rendre rapidement inapplicables nombre de conditions au sein des règles utilisées. Nous avons voulu limiter cet effet en supprimant toutes les règles conduisant à la transformation de ces autres espaces urbanisés, mais, malgré tout, le *Tissu urbain discontinu* s'étant développé, il s'est instauré un certain éloignement avec ces espaces rendant caduques un grand nombre de conditions donc de règles.
- Il n'est pas toujours possible d'atteindre les seuils fixés avec la chaîne de Markov.

L'analyse visuelle des modélisations produites par LUCSIM, dans ce fonctionnement tout automatique, permet d'illustrer certains phénomènes :

- Au regard des modélisations produites, on se rend compte que certains secteurs n'évoluent jamais.
- À l'inverse certains territoires évoluent, et parfois les évolutions observées ressemblent à des phénomènes assez classiques d'épaississement urbain, de développement plus ou moins linéaire ou d'urbanisation spontanée.

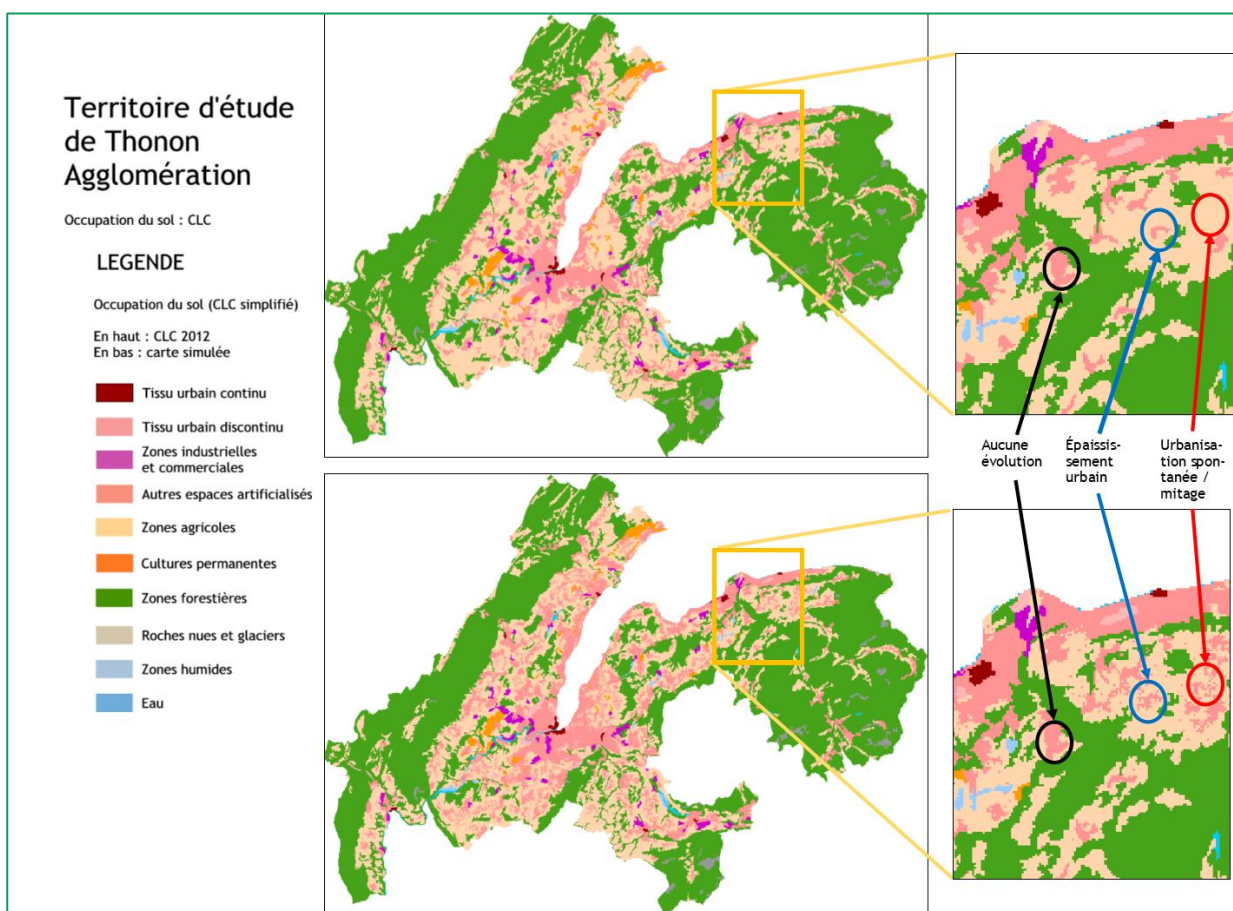


Figure 21 : Illustration sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération de phénomènes modélisés par LUCSIM (aucune évolution, épaississement urbain et urbanisation spontanée)

- Il existe ensuite un autre type de phénomène impossible de rattacher à un phénomène réaliste. Ce phénomène résulte de l'effet réitéré d'une combinaison de règles qui créent à chaque étape de la modélisation les conditions suffisantes pour pouvoir s'appliquer de nouveau. Il a tendance à apparaître avec le temps lorsque le nombre d'itération dans la simulation augmente. Apparaît alors de véritables « serpents » ou « taches d'huile ».

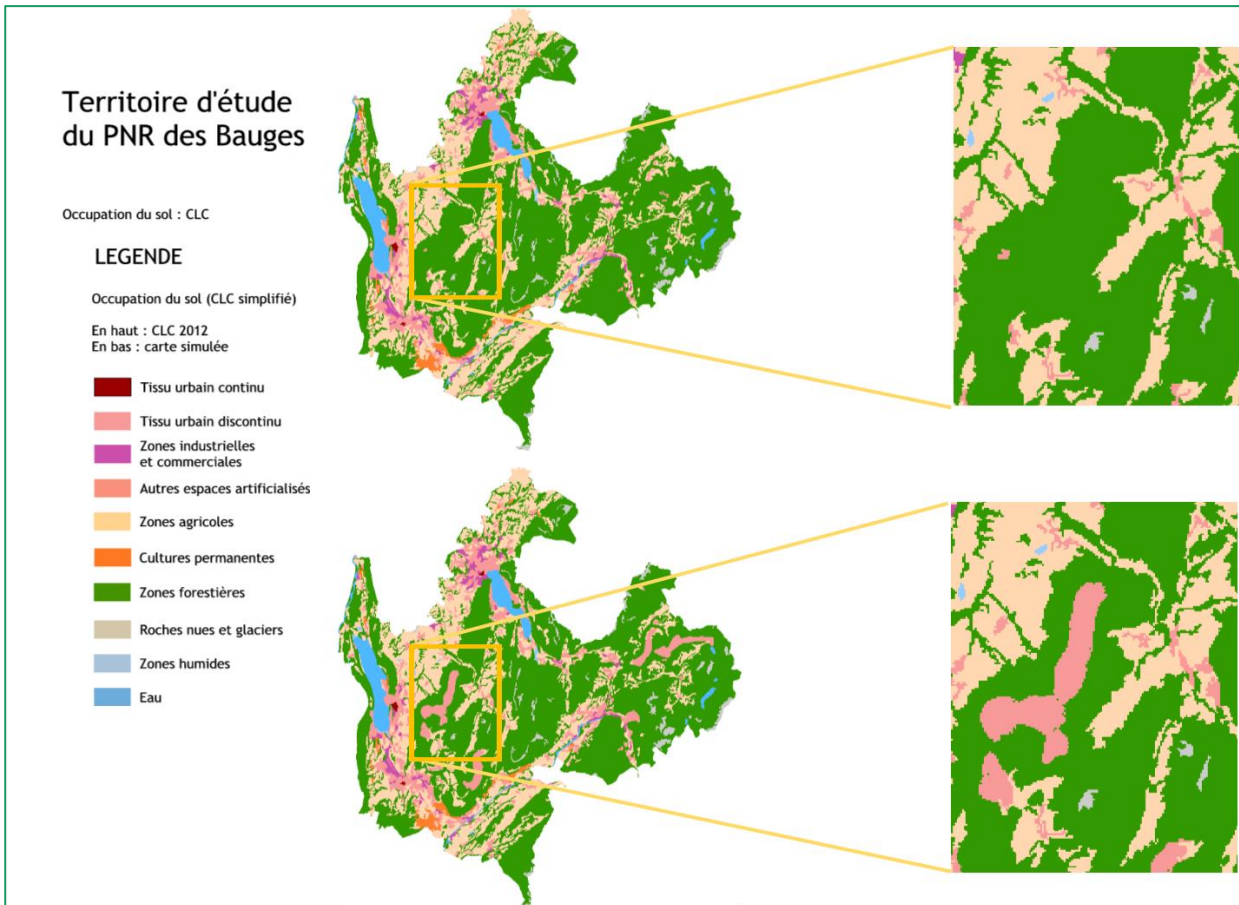


Figure 22 : Illustration sur le territoire d'étude du PNR des Bauges du phénomène du « serpent » modélisé par LUCSIM



À ce jeu-là, les modélisations obtenues sur nos deux territoires d'études ne sont pas du tout équivalentes.

Si nos deux territoires d'études ont une taille équivalente ( $\approx 2\,600\text{ km}^2$ ), les espaces urbanisés sont nettement plus étendus sur celui de Thonon Agglomération (36 694 ha) que sur celui du PNR des Bauges (23 037 ha) et les phénomènes d'étalement urbain y sont également plus marqués entre 2000 et 2012. Il apparaît très clairement que nos deux territoires d'études n'ont alors pas été traités de manière identique par LUCSIM :

- Les évolutions observables entre 2000 et 2012 ont un impact direct sur la définition des règles d'évolutions par arbre de décision au sein de LUCSIM, bien plus faciles à déterminer et plus nombreuses sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération par rapport à celui du PNR des Bauges. Au niveau de l'arbre de décision, nous avons obtenu pour tous nos tests entre 18 et 30 règles de transition sur le territoire d'étude du PNR des Bauges et entre 89 et 169 règles sur celui de Thonon Agglomération (à stratégie de modélisation strictement identique),
- Au niveau des modélisations, les quantités « urbanisées » se sont développées entre 1 500 ha et 8 400 ha (seuil maximum utilisé à partir de la chaîne de Markov) sur le territoire d'étude du PNR des Bauges et entre 7 800 ha et 14 800 ha (seuil maximum utilisé à partir de la chaîne de Markov) sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération.
- Au niveau du nombre d'itération avant arrêt de la modélisation, certaines modélisations ont nécessité jusqu'à une centaine d'étapes sur le territoire d'étude du PNR des Bauges et n'ont jamais dépassé les 30 étapes sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération. Il n'existe pas de lien, de manière évidente, entre les quantités urbanisées et le nombre d'itération. En revanche, plus le nombre d'itération augmente et plus l'on a tendance à observer des phénomènes « impossibles » type « serpents » (illustration ci-dessus).
- Fixées à des seuils différents en fonction des modélisations de type tendancielle ou stratégiques, les seuils fixés par chaîne de Markov ont été atteints pour 4 modélisations sur 9 sur le territoire d'étude du PNR des Bauges et pour 7 modélisations sur 14 sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération.

Une dernière série de modélisations pour le territoire d'étude de Thonon Agglomération a pu être réalisée à partir de la donnée *Imperviousness* d'HRL, en diminuant artificiellement la précision de l'information pour avoir une taille de pixel d'un hectare (comme pour CLC). Pour celles-ci, nous avons appliqué l'arbre de décision pour chaque type d'occupation du sol cherchant ainsi à avoir des règles permettant théoriquement de faire évoluer concomitamment tous les types d'occupation du sol.

Obtenues en toute fin de mission, aucune analyse des résultats n'a pu être faite à partir de cette donnée.

## 6 Quels résultats et quels retours sur les logiciels de modélisation ?

### 6.1 Modéliser avec FORESIGHT

Du point de vue fonctionnement du logiciel, FORESIGHT est facile à prendre en main et dispose d'une aide détaillée permettant d'arriver à réaliser rapidement des premières modélisations d'évolution du territoire.

Le principe de modélisation est explicite et d'assimilation plutôt simple puisque les phénomènes décrits sont directement rattachables à des observations réelles du territoire (phénomènes de mitage ou d'urbanisation linéaire par exemple, quantité d'espaces consommés, etc.).

Pour rappel, dans le cadre de notre expérimentation, nous avons plusieurs objectifs :

- Modéliser l'évolution du territoire à partir de bases distinctes,
- Modéliser différents scénarios en distinguant ces scénarios à partir de la carte d'attractivité, de l'enveloppe de consommation foncière et des formes de l'étalement urbain (*Patterns*).

Si aucune difficulté n'a été rencontrée pour intégrer nos deux bases qui se distinguaient notamment dans la précision de l'information, il faut cependant noter que les modélisations ont été réalisées à partir d'une maille d'un hectare, ce qui a conduit à une « simplification » de la donnée la plus précise. Sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération, territoire transfrontalier, nous n'avions pas de couche unifiée sur l'ensemble de notre territoire d'occupation du sol plus précise que CLC.

Il n'a, de plus, pas été possible d'expérimenter l'intégration de nos propres cartes d'attractivité<sup>28</sup>. Néanmoins, une solution alternative a pu être produite à partir du module de création de la carte d'attractivité du logiciel. Paramètres d'entrées des modélisations, les enveloppes foncières de consommation d'espace et formes de l'étalement urbain ont pu être définies pour chacun de nos scénarios.

L'analyse, notamment visuelle, des résultats souligne l'impact des paramètres enveloppes foncières et formes de l'étalement urbain. Il a également été possible d'identifier un impact des distinctions introduites dans nos cartes d'attractivité même s'il était en revanche plus complexe de mesurer concrètement ce dernier.

Sur le territoire d'étude du PNR des Bauges, sur lequel nous avons pu tester deux sources de données pour définir la carte de l'urbanisation initiale (CLC et OSCOM) les résultats ne sont pas identiques. Il y a donc un impact lié à la source mobilisée. Malgré un recalibrage de l'information d'OSCOM à une maille d'un hectare, son niveau de précision a des effets sur la modélisation. Quel que soit le scénario, avec OSCOM, l'urbanisation est plus dispersée sur tout le territoire et les quantités de pixels créés suivant les mailles étudiées ne sont pas les mêmes par rapport aux résultats à partir de CLC.

Au regard de l'expérimentation réalisée dans le cadre du projet ASTUS, nous pouvons affirmer que le logiciel FORESIGHT est un outil qu'il peut être intéressant d'utiliser pour modéliser de l'étalement urbain sur un territoire. D'un usage simple, ce logiciel offre toutefois des fonctionnalités intéressantes (formes de l'étalement urbain, lien infrastructures de transports et urbanisme, carte d'attractivité) qui permettent d'adapter concrètement les modélisations aux territoires. Au-delà des paramètres chiffrés du logiciel qui nécessitent un calibrage préalable, la carte d'attractivité offre théoriquement de vraies possibilités pour intégrer par exemple tout ou partie des informations géographiques du territoire, ce qui permet de faire assez simplement le lien avec les documents de planification de l'aménagement et de l'urbanisme de ce

---

<sup>28</sup> À la suite de nouveaux tests, il a été possible d'intégrer une de nos cartes d'attractivité au sein de FORESIGHT. L'intégration par l'intermédiaire de l'onglet *Pre-processing* n'a définitivement pas fonctionné. Il a été, en revanche, possible de générer directement le fichier \*.gif d'une de nos cartes d'attractivité via ArcGIS (en faisant en sorte que la résolution et l'emprise soient strictement identiques aux fichiers générés par FORESIGHT dans le dossier *Input* pour la donnée *Initial Urban Map* par exemple). Ce fichier a été ensuite copié au sein d'un dossier *Input* d'une modélisation, a été reconnu par le logiciel (*Preview dans l'onglet Initial Settings*) et a permis ensuite de générer une modélisation tenant compte de notre propre carte d'attractivité.

territoire. Néanmoins, bémol important, dans le cadre de l'expérimentation que nous avons réalisée, nous n'avons pas réussi à intégrer au logiciel nos propres cartes d'attractivité.

Dans tous les cas, cet outil ayant été en capacité de produire une image de ce que pourrait être l'avenir de notre territoire, il apporte une information qui peut directement intéresser les décideurs d'un territoire dans la mesure où il donne à voir l'impact que pourrait avoir l'étalement urbain sur le territoire, l'impact de certaines orientations prises dans les documents d'urbanisme et des effets conjugués à grande échelle de tous ces documents d'urbanisme.

Avec certaines précautions, notamment en multipliant les modélisations et en combinant les résultats, il est également possible de procéder à une analyse à fine échelle de ces cartes. Cette approche permettrait alors d'étudier l'impact de cette nouvelle urbanisation sur les questions de réseaux, de mobilités, d'équipement et/ou de formes urbaines.

## 6.2 Modéliser avec LUCSIM

Du point de vue fonctionnement du logiciel, en mode « tout automatique », comme nous avons pu l'expérimenter dans le cadre du projet ASTUS, LUCSIM est facile à prendre en main même s'il ne dispose que d'une aide succincte.

Pour pouvoir exploiter l'arbre de décision afin de définir des règles de transition de manière automatique et pour utiliser une contrainte du type chaîne de Markov permettant de fixer un maximum à la quantité de changement d'occupation du sol pouvant intervenir dans le cadre de la modélisation, il est nécessaire de disposer de deux couches d'occupation du sol à deux dates distinctes. De plus, l'arbre de décision travaillant sur les changements étant intervenus entre ces deux dates, plus ceux-ci sont nombreux, plus les résultats seront précis et pertinents.

L'exploitation de l'arbre de décision permet d'obtenir assez rapidement des premières règles d'évolution du territoire afin de pouvoir réaliser nos premières modélisations. À noter que la précision de l'information initiale a un impact très important sur les temps de traitement nécessaires à l'arbre de décision pour fournir ses résultats, passant de quelques minutes à partir de la donnée CLC à plusieurs jours pour les bases plus précises que nous avons étudiées comme HRL ou Theïa (sans garantie de résultat). À noter également, que le nombre de règles générées par l'arbre de décision aura un impact sur la modélisation à venir.

Les règles générées par LUCSIM sont purement géographiques et l'évolution d'une cellule donnée dépend de la présence dans un voisinage défini de certaines quantités des différents types d'occupation du sol disponible au sein de la couche d'occupation du sol initiale. Les effets de ce type de règles sont difficilement représentables ou rattachables à des phénomènes classiques de type urbanisation linéaire, mitage, etc. À ce titre-là, le fonctionnement en mode « tout automatique » de LUCSIM n'est pas vraiment explicite.

Pour rappel, dans le cadre de notre expérimentation, nous avons plusieurs objectifs :

- Modéliser l'évolution du territoire à partir de bases distinctes,
- Modéliser différents scénarios en distinguant ces scénarios par l'utilisation d'une carte d'attractivité (et du modèle de potentiel intégré à LUCSIM) et par une contrainte du type chaîne de Markov.

Peu de difficultés ont été rencontrées pour réaliser des modélisations à partir de CLC à partir du *Tissu urbain discontinu*, mais en raison des temps de traitements par arbre de décision, aucun résultat n'a été obtenu à partir des bases HRL et Theïa. Pour la base HRL, moyennant une simplification de la donnée (passage d'une maille de 20 mètres à 100 mètres de côté), une modélisation a pu être réalisée sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération.

Aucune analyse détaillée des résultats que nous avons pu obtenir à partir de LUCSIM n'a pu être réalisée.

Par une simple étude des règles de transition obtenues par arbre de décision et par une analyse visuelle des modélisations obtenues, il est possible d'ores-et-déjà de formuler quelques remarques quant au fonctionnement de LUCSIM :

- Si la chaîne de Markov est un moyen de fixer un maximum à l'évolution de certains types d'occupation du sol, il n'est pas toujours possible d'atteindre ces seuils et souvent la modélisation s'arrête avant car les règles de transition ne peuvent plus être appliquées sur le territoire.
- La carte d'attractivité, la *Suitability Map*, ou le modèle de potentiel proposé par LUCSIM ont un impact sur la définition des règles par arbre de décision et sur les modélisations elles-mêmes.
- N'intégrant aucune notion de temporalité les évolutions ne sont pas régulières dans le temps ni dans l'espace. Les premières itérations de la modélisation engendrent généralement beaucoup d'évolution alors que les dernières n'en engendrent que très peu.
- La répartition des évolutions engendrées par les modélisations sur le territoire est très loin d'être uniforme :
  - Certains secteurs n'évoluent pas alors que d'autres évoluent de manière significative,
  - Les évolutions du *Tissu urbain discontinu* ressemblent parfois à des phénomènes d'urbanisation classique du type épaissement urbain, urbanisation linéaire ou mitage,
  - À d'autres moments apparaissent des phénomènes de « tache d'huile », ou de « serpents » qui n'ont rien de concrets.

Compte-tenu de ces résultats, il semble très complexe de pouvoir tirer une conclusion quant à la capacité de ce logiciel à pouvoir être utilisé comme outil d'aide à la décision.

Par certains aspects, LUCSIM présente de véritables atouts :

- LUCSIM est intéressant, notamment, car ce logiciel doit permettre de faire évoluer concomitamment différents types d'occupation du sol et serait donc en capacité de modéliser certains phénomènes de densification.
- LUCSIM est intéressant, car il doit permettre d'identifier et de modéliser l'impact de certaines interactions entre le milieu urbain et le milieu naturel et, si la couche d'occupation du sol initiale est suffisamment détaillée, entre les différents types d'occupation du sol d'un milieu urbain.

Néanmoins, nous sommes très loin, dans le cadre du projet ASTUS, d'avoir pu tester concrètement ces possibilités.