

Interreg

Alpine Space



ASTUS

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

Territoire d'étude du PNR des Bauges

Deliverable D.T2.2.4



Novembre 2018



Landeshauptstadt München



Technical University of Munich



RÉGION BOURGOGNE FRANCHE COMTE



Auvergne-Rhône-Alpes
La Région

Contact of the Lead Partner
Auvergne-Rhône-Alpes Région
Spatial planning and Mountain Department
+33 4 26 73 46 67
astus@auvergnerrhonealpes.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.....	23
4.2.1	Démographie	23
4.2.2	Consommation d'espace	23
4.3	Scénario stratégique	24
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	29
4.4.1	Pour la construction de la carte d'attractivité.....	29
4.4.2	Pour FORESIGHT	30
4.4.3	Pour LUCSIM	31
5	Résultats et analyse – « Ce que nous avons réussi à faire ! »	33
5.1	Retour d'expérience.....	33
5.1.1	Exploitation de la carte d'attractivité	33
5.1.2	Expérimentation à partir de FORESIGHT	34
5.1.3	Expérimentation à partir de LUCSIM	40
5.2	Analyse des résultats issus de FORESIGHT.....	44
5.2.1	Analyse visuelle.....	44

5.2.2	Analyse par EPCI	44
5.2.3	Analyse selon l'armature	47
5.2.4	Synthèse de l'analyse.....	48
5.3	Analyse des résultats issus de LUCSIM	49
5.3.1	Fonctionnement	49
5.3.2	Les modélisations	49
6	Quels résultats et quels retours sur les logiciels de modélisation ?	53
6.1	Modéliser avec FORESIGHT.....	53
6.2	Modéliser avec LUCSIM	54

1 Introduction

Le projet européen ASTUS pour Alpine Smart Transport and Urbanism Strategies se décline en différents Work Packages (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 du PNR des Bauges

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 »¹.
- 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.

¹ 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 GeograpHic daTa/FORESIGHT

Nom du logiciel	FORESIGHT
Propriétaire	Toulouse Tech Transfert (www.toulouse-tech-transfer.com)
Références	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 http://cybergeo.revues.org/27397
Licence	Payante (gratuite pour un usage à des fins de recherche ou académiques)
Objectif	Modéliser différents scénarios prospectifs d'étalement urbain

2.2.1.1 Principe de fonctionnement

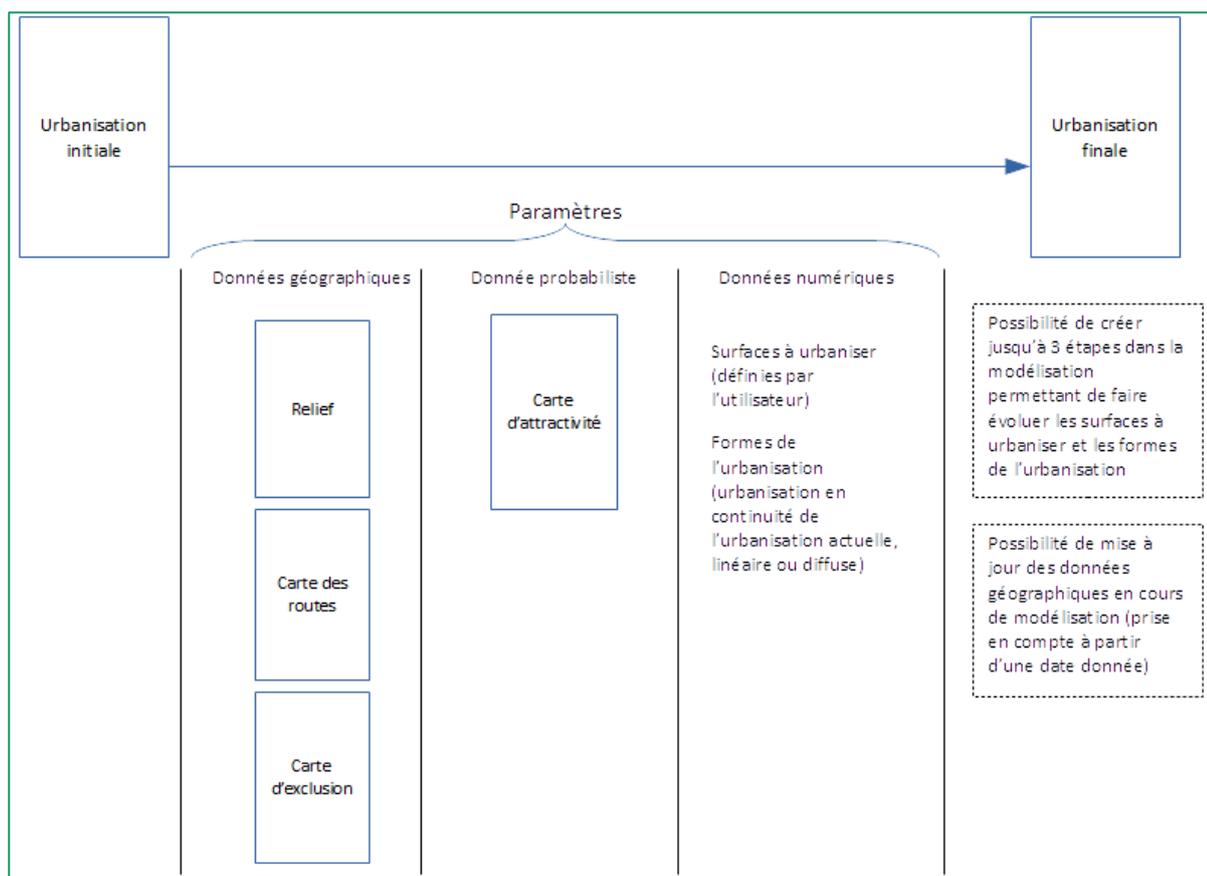


Figure 1 : Schéma de fonctionnement du logiciel FORESIGHT

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.

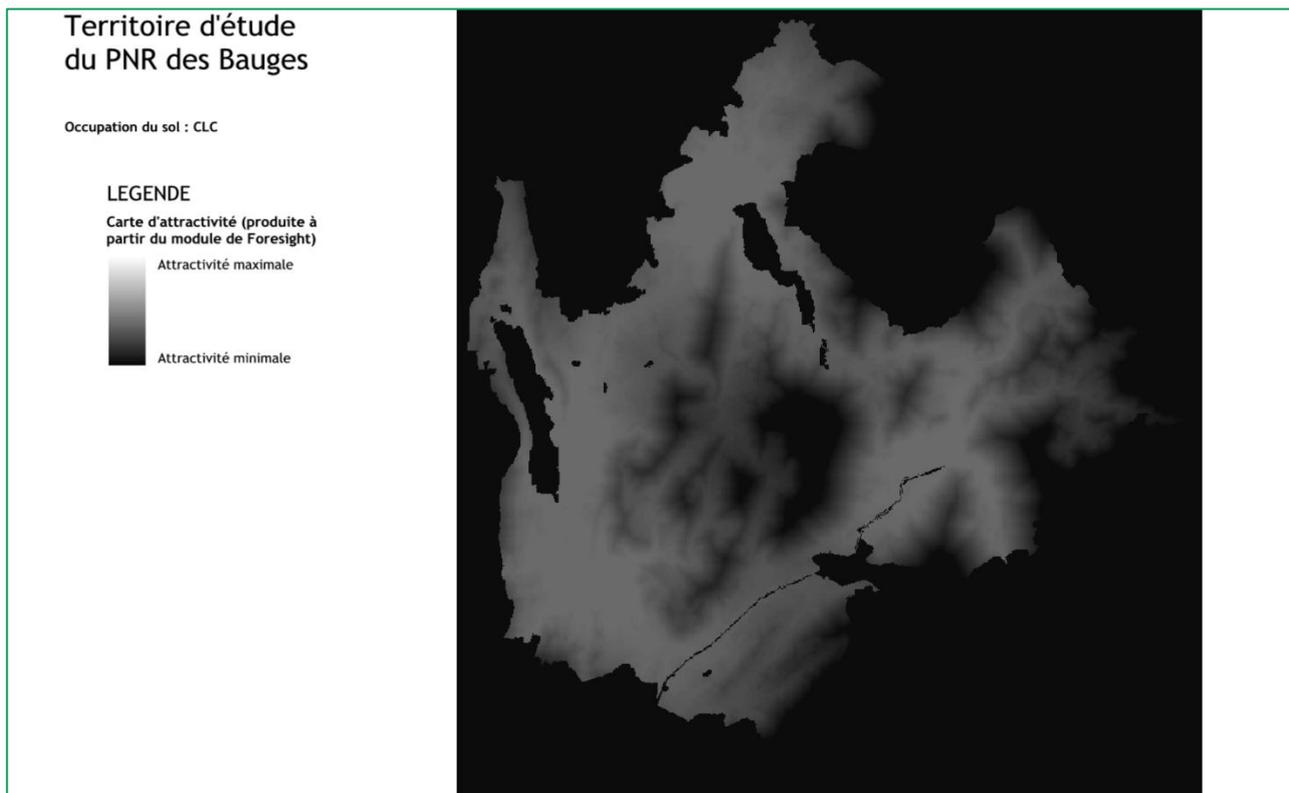


Figure 2 : Carte d'attractivité produite à partir du module dédié de Foresight (occupation du sol à partir de CLC, routes à partir d'OSM) pour le scénario stratégique et sur le territoire d'étude du PNR des Bauges

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.

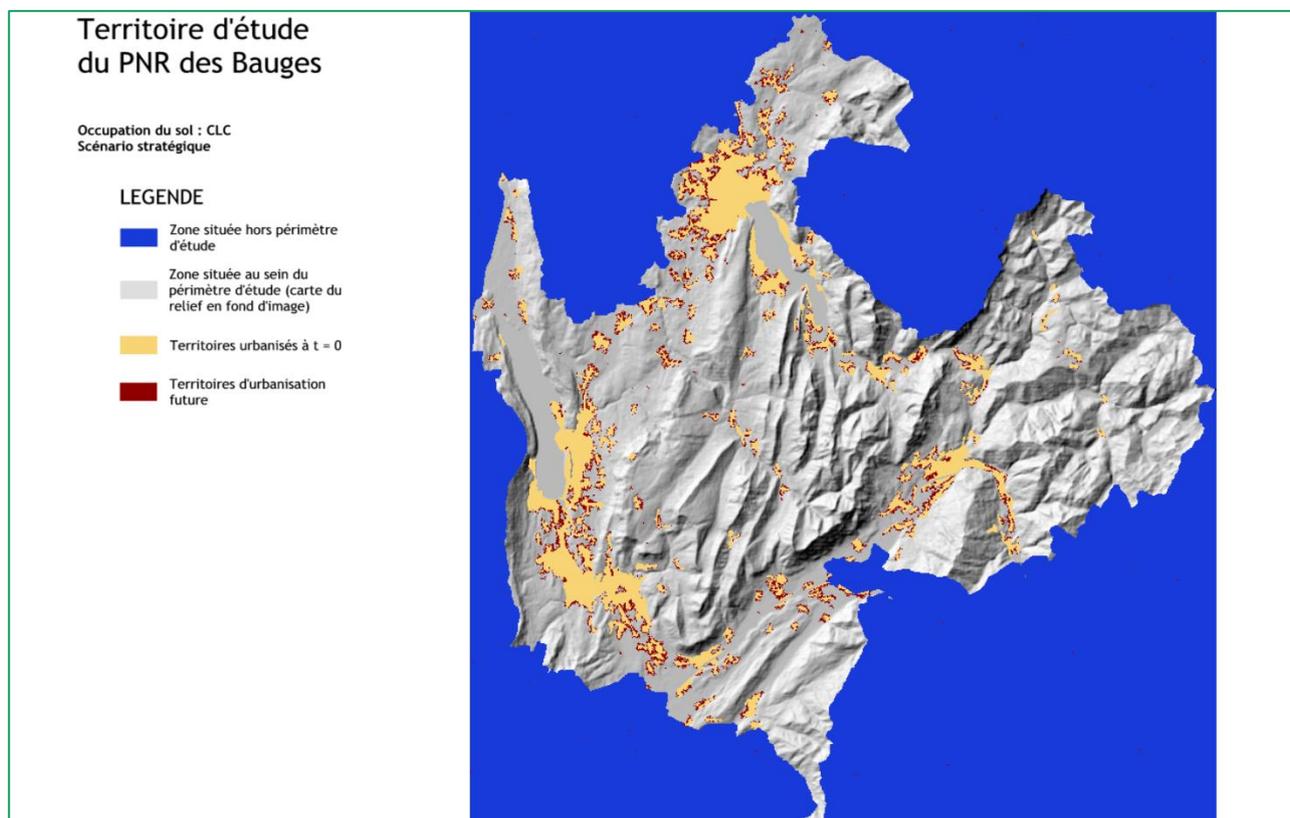


Figure 3 : Modélisation jusqu'en 2050 de l'étalement urbain sur le territoire d'étude du PNR des Bauges (scénario stratégique, occupation du sol CLC)

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

Le logiciel dispose enfin d'un module lui permettant d'agréger 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.

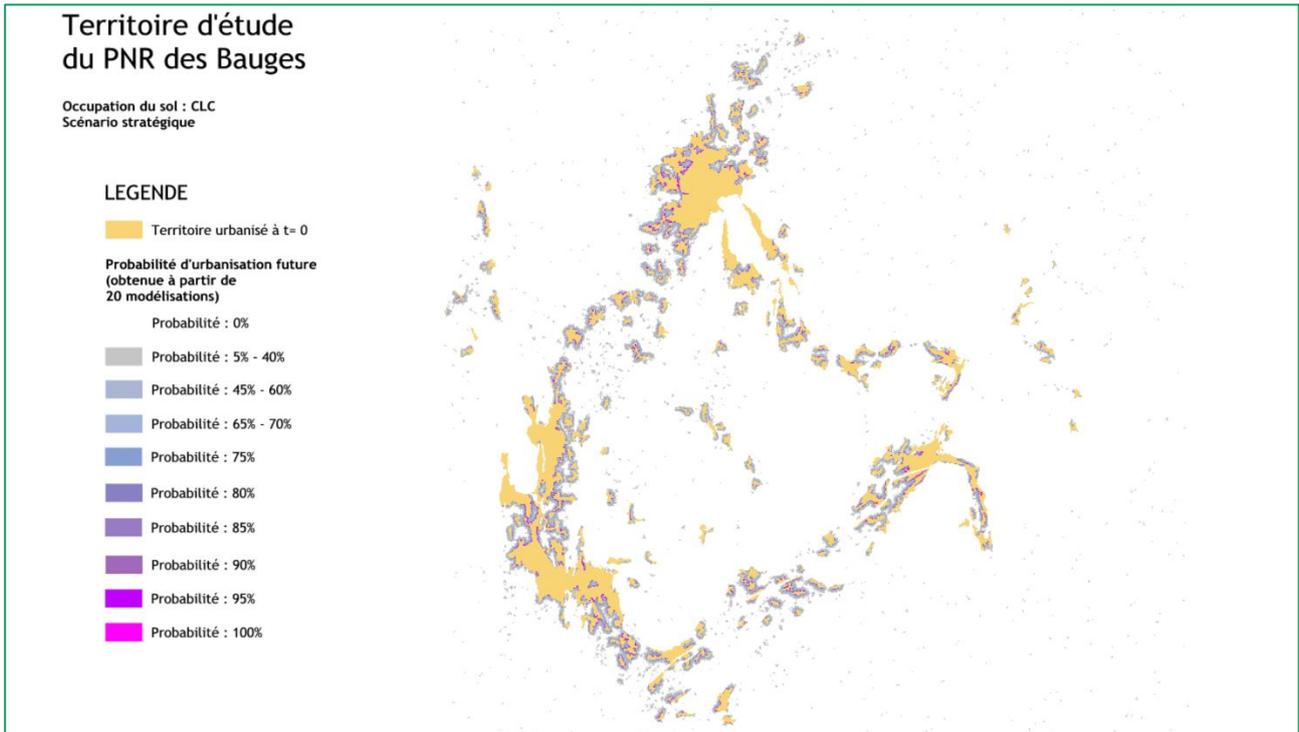


Figure 4 : Probabilité d'urbanisation obtenue à partir de 20 modélisations pour le territoire d'étude du PNR des Bauges (scénario stratégique, occupation du sol CLC)

2.2.1 Land Use Cellular Automata Simulation/LUCSIM

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

2.2.1.1 Principe de fonctionnement

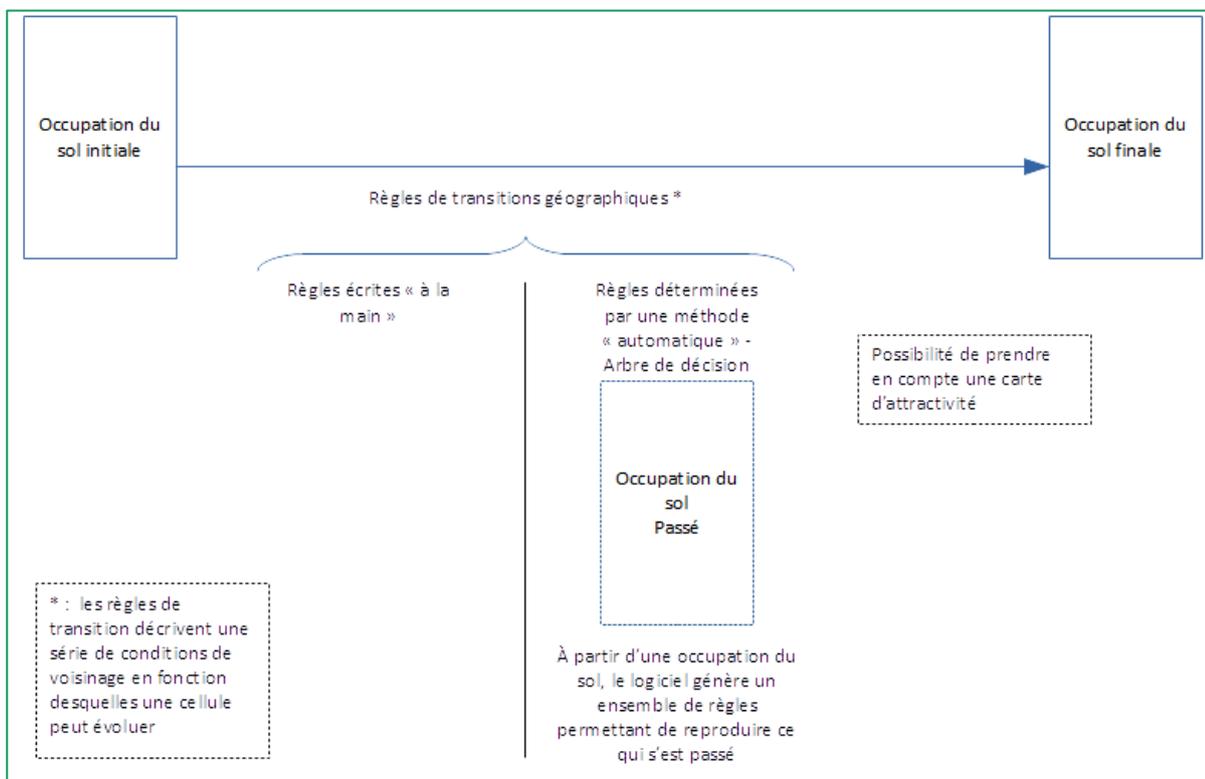


Figure 5 : Schéma de fonctionnement du logiciel LUCSIM

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.

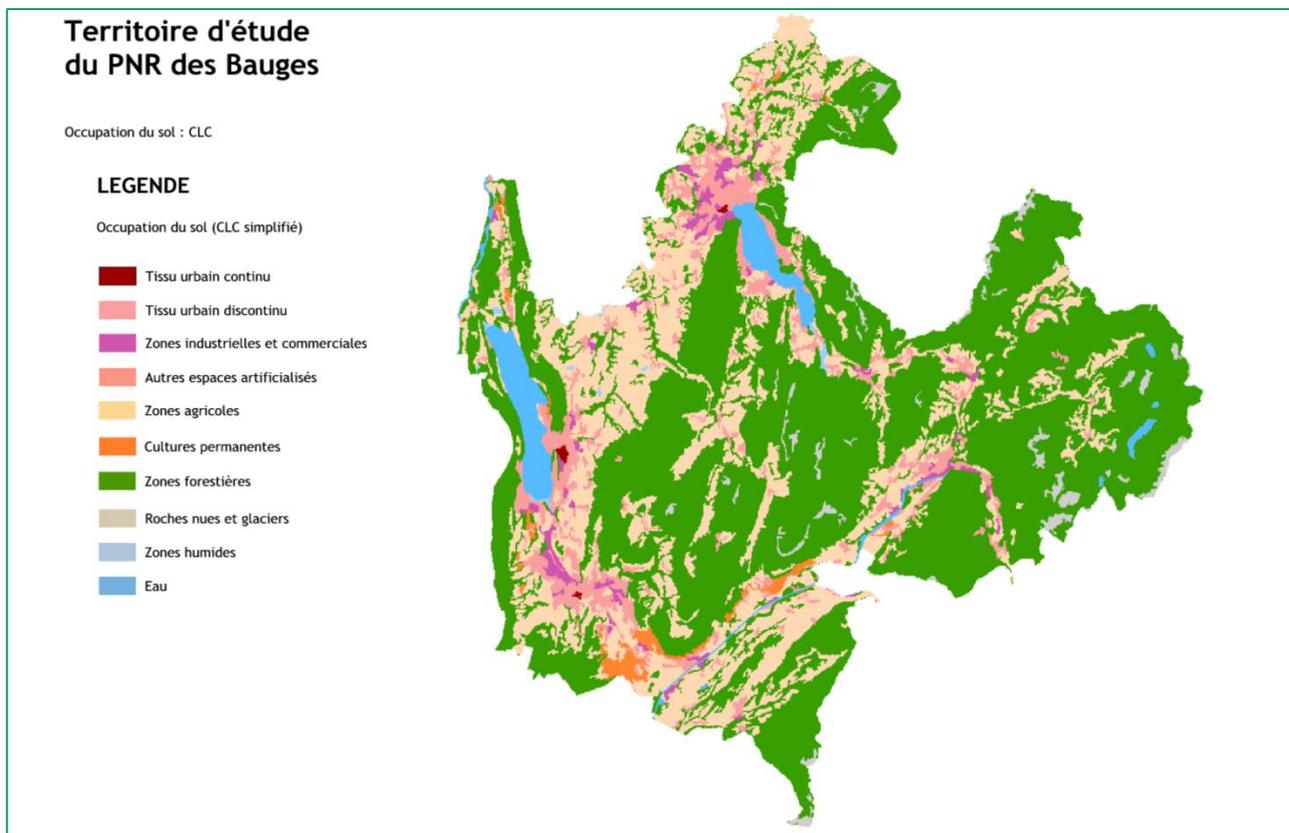


Figure 6 : Occupation du sol (CLC simplifié) en 2012 sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération

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)².
 - 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 catégories³.
- 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.

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

³ 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 tendanciennes 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.

4.1 Données territoriales

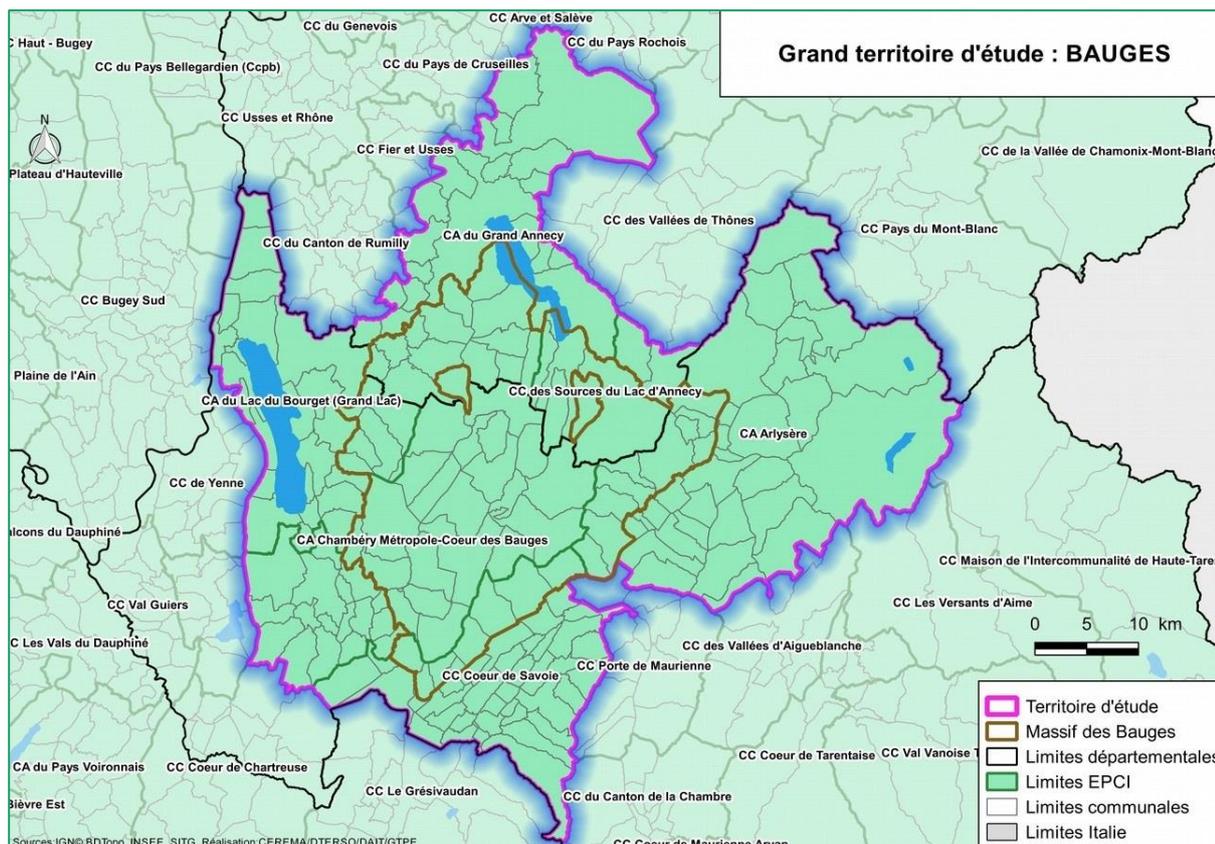


Figure 7 : Territoire d'étude

Le territoire d'étude recouvre l'intégralité du PNR des Bauges, il s'appuie sur le périmètre de 6 EPCI :

- Communauté d'Agglomération Grand Lac,
- Communauté d'Agglomération Chambéry Métropole-Coeur des Bauges,
- Communauté d'Agglomération Arlysère,
- Communauté d'Agglomération du Grand Anney,
- Communauté de Communes Coeur de Savoie,
- Communauté de Communes des Sources du Lac d'Anney

Ce périmètre recouvre 188 communes.

4.1.1 Démographie

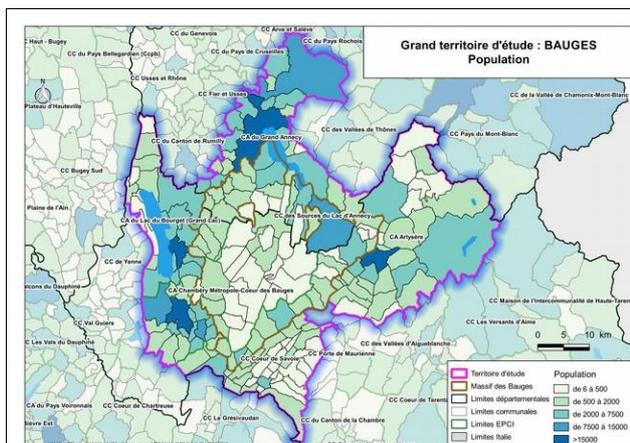


Figure 8 : Population communale en 2014 (INSEE)

Territoire d'étude : 513 153 habitants

CA Grand Anney : 196 332 habitants
 CA Arlysère : 60 101 habitants
 CA Grand Lac : 73 665 habitants
 CA Chambéry Métropole-Coeur de Savoie : 132 046 habitants
 CC Coeur de Savoie : 35 895 habitants
 CC Sources du Lac d'Anney : 15 114 habitants

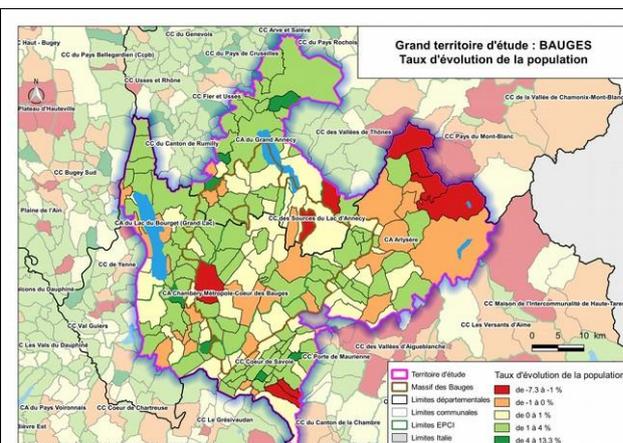


Figure 9 : Taux d'évolution annuelle de la population communale entre 2009 et 2014 (INSEE)

Territoire d'étude : 1,22 %

CA Grand Anney : 1,52 %
 CA Arlysère : 0,38 %
 CA Grand Lac : 1,96 %
 CA Chambéry Métropole-Coeur de Savoie : 0,89 %
 CC Coeur de Savoie : 1,05 %
 CC Sources du Lac d'Anney : 0,78 %

4.1.2 Logements

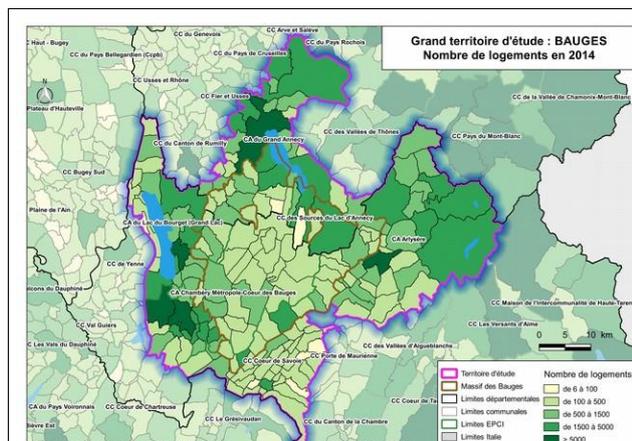


Figure 10 : Nombre de logements en 2014 (INSEE)

Territoire d'étude : 277 918 logements

CA Grand Anney : 100 635 logements
 CA Arlysère : 42 383 logements
 CA Grand Lac : 40 935 logements
 CA Chambéry Métropole-Coeur de Savoie : 68 449 logements
 CC Coeur de Savoie : 17 288 logements
 CC Sources du Lac d'Anney : 8 228 logements

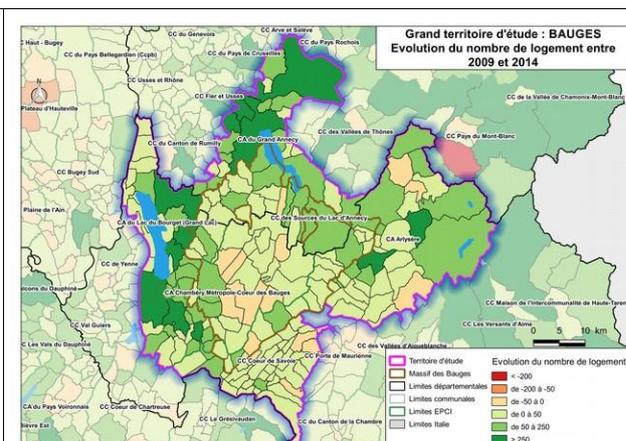


Figure 11 : Évolution du nombre de logements entre 2009 et 2014 (INSEE)

Territoire d'étude : +21 392 logements (+1,6 %/an)

CA Grand Anney : +8 222 logements (+1,8 %/an)
 CA Arlysère : +3 028 logements (+1,5 %/an)
 CA Grand Lac : 3 807 logements (+2,0 %/an)
 CA Chambéry Métropole-Coeur de Savoie : +4 259 logements (+1,3 %/an)
 CC Coeur de Savoie : +1 247 logements (+1,5 %/an)
 CC Sources du Lac d'Anney : + 559 logements (+1,4 %/an)

4.1.3 Occupation du sol et consommation d'espace

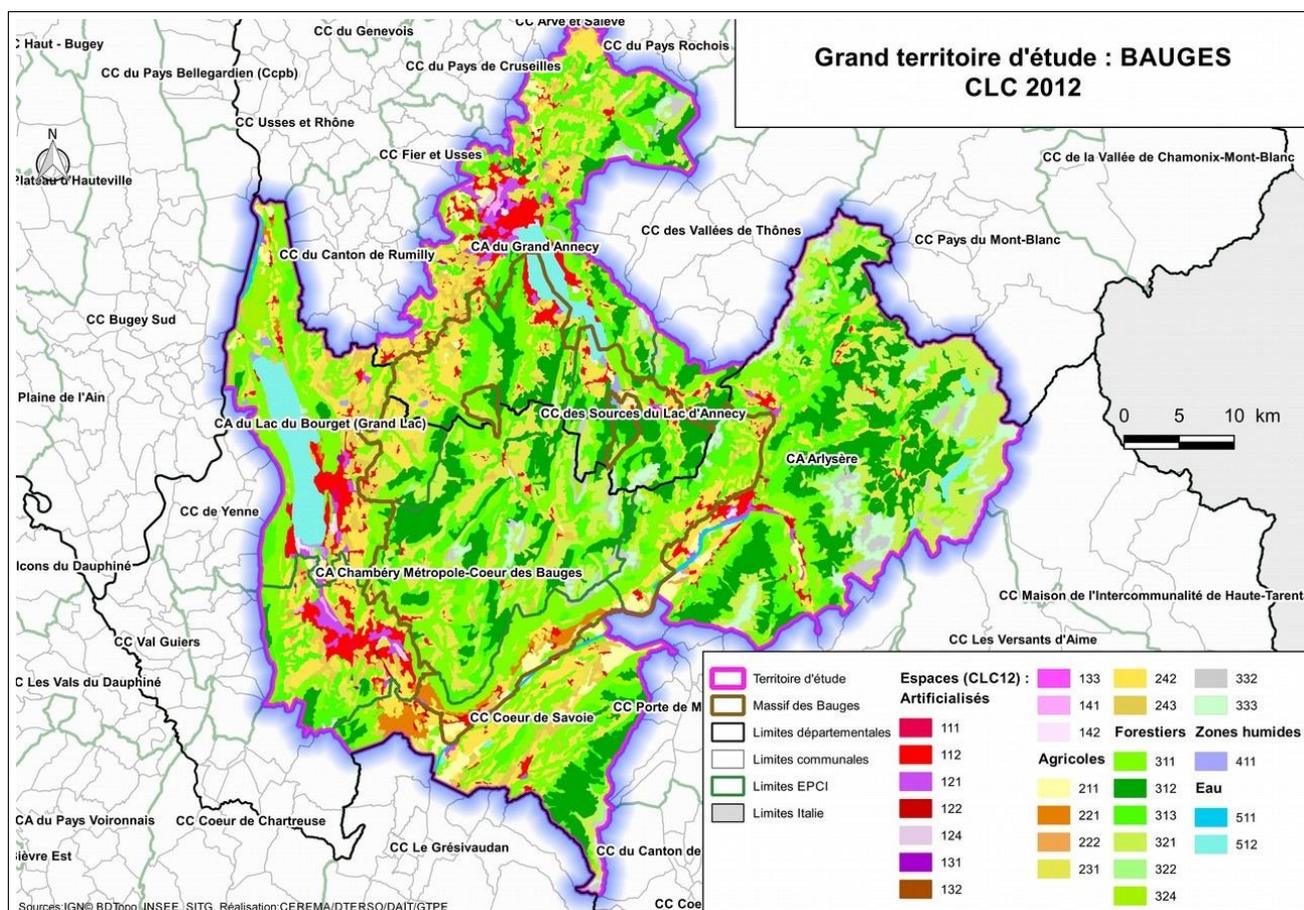


Figure 12 : CLC 2012

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

Territoire d'étude : 23 041 ha (8,7 %)

CA Grand Anney : 7 723 ha (14,4 %)
 CA Arlysère : 3 495 ha (4,6 %)
 CA Grand Lac : 4 138 ha (11,9 %)
 CA Chambéry Métropole-Coeur de Savoie : 4 789 ha (9,2 %)
 CC Coeur de Savoie : 1 849 ha (5,6 %)
 CC Sources du Lac d'Anney : 1 046 ha (6,9 %)
 Territoire d'étude (Suisse) : 12 577 ha

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

Territoire d'étude : 71 707 ha (27,0 %)

CA Grand Anney : 19 040 ha (35,4 %)
 CA Arlysère : 11 222 ha (14,7 %)
 CA Grand Lac : 11 386 ha (32,7 %)
 CA Chambéry Métropole-Coeur de Savoie : 13 840 ha (26,5 %)
 CC Coeur de Savoie : 13 841 ha (41,9 %)
 CC Sources du Lac d'Anney : 2 379 ha (15,6 %)

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

Territoire d'étude : 161 924 ha (60,9 %)

CA Grand Anney : 24 498 ha (45,6 %)
 CA Arlysère : 60 971 ha (79,7 %)
 CA Grand Lac : 14 339 ha (41,1 %)
 CA Chambéry Métropole-Coeur de Savoie : 33 680 ha (64,4 %)
 CC Coeur de Savoie : 16 991 ha (51,4 %)
 CC Sources du Lac d'Anney : 11 446 ha (75,0 %)

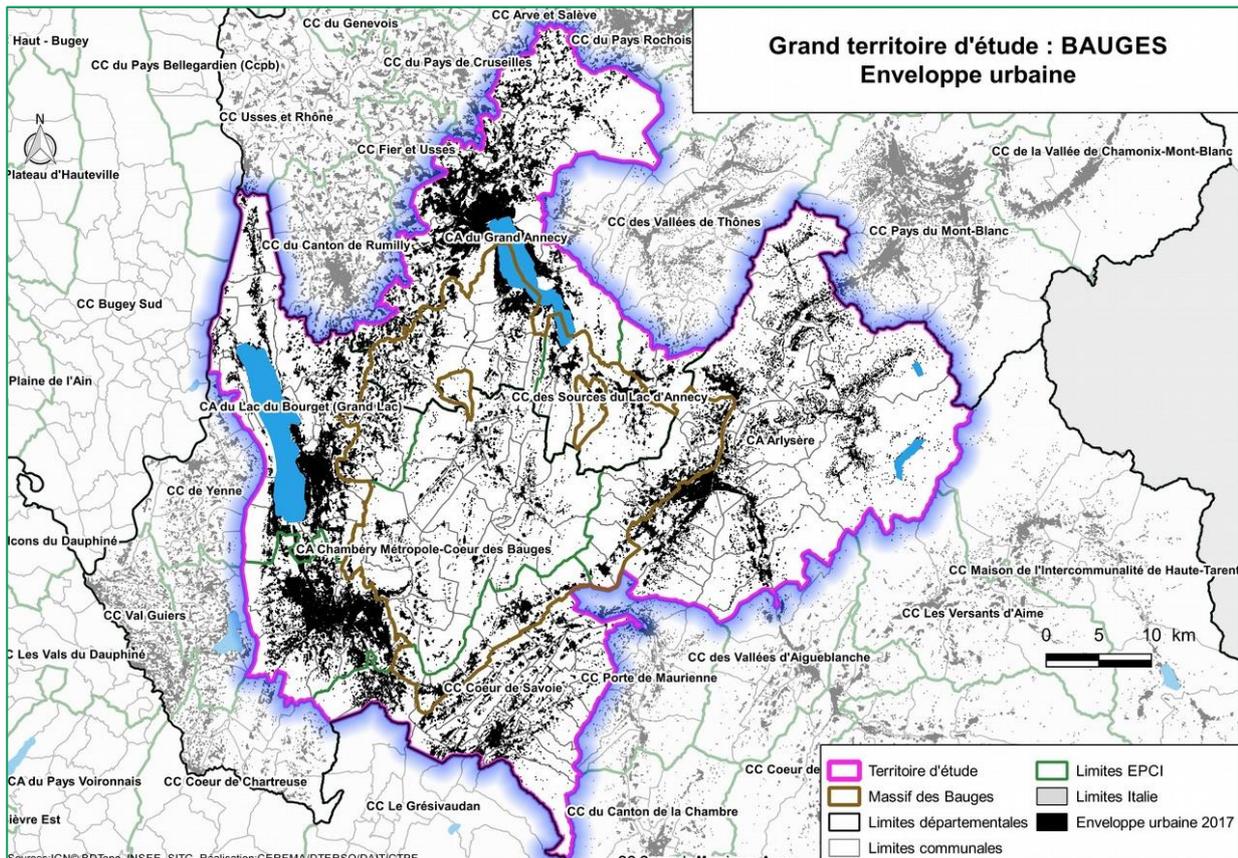


Figure 13 : Enveloppe urbaine en 2017

Pour le territoire d'étude, la tache urbaine en 2017, calculée à partir de la BD Topo (méthode Cerema Sud-Ouest) est de 19 247 ha et a progressé depuis 2009 de 1 618 ha.

4.2 Scénario tendanciel

4.2.1 Démographie

Au sein du territoire d'étude, nous avons une population totale en 2014 de 513 153 habitants. Si l'on se concentre sur la seule évolution de la population sur ce territoire, depuis 1968 et que l'on fait une projection jusqu'en 2050 (projection polynomiale), cela nous conduit à une population totale en 2050 de 656 500 habitants, soit une progression de plus de 143 000 habitants entre 2014 et 2050.

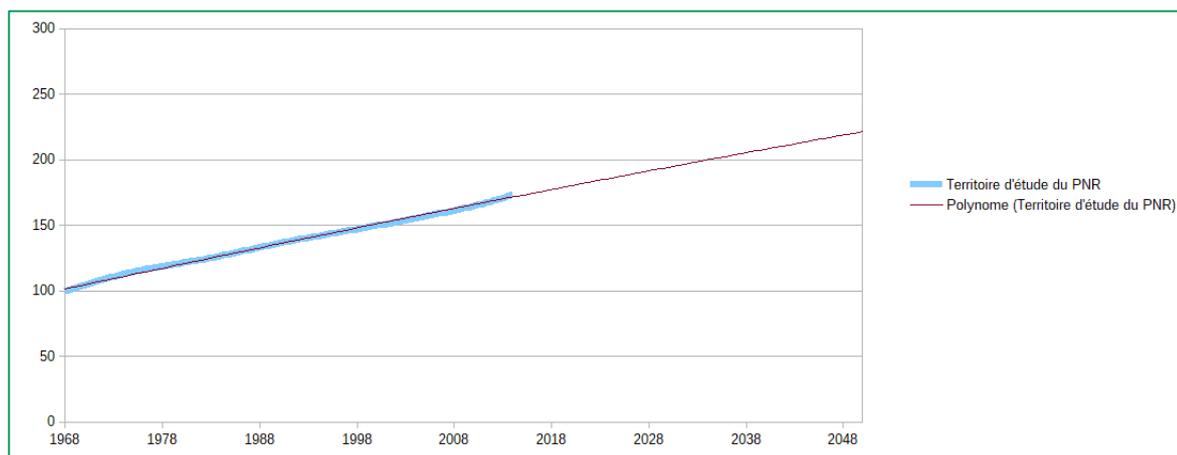


Figure 14 : Évolution de la population du territoire d'étude du PNR des Bauges (base 100 en 1968) et projection à 2050

Pour, le scénario tendanciel, nous retiendrons cette hypothèse :

- Hypothèse démographique : 656 500 habitants en 2050 (+143 000 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 23 041 ha en 2012. Ces mêmes espaces artificialisés occupaient 20 862 ha en 2000. Ceci nous donne une évolution totale entre 2000 et 2012 de : +2 179 ha (+0,83 %/an).

En poursuivant cette tendance, cela nous donne une consommation d'espace à horizon 2050 de +6 900 ha (espaces artificialisés en 2050 : 29 941 ha).

À partir de la donnée tache urbaine calculée par nos soins, nous avons une tache urbaine de 19 247 ha en 2017 ayant augmenté de 1 618 ha depuis 2009 ce qui, par simple reconduction de ce rythme de consommation d'espace, nous donne une perspective à 2050 d'une tache urbaine de 25 921 ha, soit 6 674 ha consommés entre 2017 et 2050. À partir de cette donnée, nous trouvons une consommation d'espace du même ordre d'idée que la donnée calculée à partir de CLC entre 2000 et 2012.

Nous retenons donc l'hypothèse calculée à partir de la donnée 2000-2012, qui nous donne une consommation entre 2012 et 2050 de 6 900 ha que nous arrondissons à 7 000 ha.

À partir des données CLC et sur la base des millésimes 2000 et 2012, près de 2 200 ha ont été consommés par les espaces artificialisés, quasi-exclusivement sur les espaces agricoles, forestiers et semi-naturels. Au final, ce sont près de 3,7 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 :

- SCoT Albanais,
- SCoT Arlysère,
- SCoT Bassin Annecien,
- SCoT Métropole Savoie,
- PLUi Coeur des Bauges.

D'autres documents ont également été consultés :

- PLUi Sources du lac d'Annecy,
- PLUi Pays d'Alby,
- Charte du PNR des Bauges,
- 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 exclusivement sur les documents analysés pour réaliser des projections à 2050 en reconduisant les tendances inscrites dans ces documents même si ces derniers n'ont pas été établis à la même période ni pour les mêmes échéances de projection.

4.3.1 Démographie

Document source	Point de départ	Ambition	Projection à 2050
SCoT Albanais	2004 (approbation en 2005)	+12 000 à +15 000 habitants en 20 ans	
SCoT Arlysère	2010 (approbation 2012)	+8 000 habitants en 10 ans (2010-2020) ⁴	
SCoT Bassin Annecien	2014 (approbation 2014)	+40 000 habitants en 20 ans ⁵	
SCoT Métropole Savoie	2005 (modif en 2013)	+45 000 habitants entre 1999 et 2020 ⁶	
PLUi Coeur des Bauges	2015 (approbation 2016)	+750 habitants supplémentaires par an à horizon 2030 ⁷	
Territoire d'étude	2014 Population : 513 153 habitants	Donnée harmonisée : +6 400 à 6 550 habitants supplémentaires par an	De 743 553 habitants (+230 400 habitants) À 748 953 habitants (+235 800 habitants)

⁴ Page 8 du DOG du SCoT Arlysère

⁵ Page 17 du PADD du SCoT Bassin Annecien

⁶ Page 67 du SCoT Métropole Savoie

⁷ Page 9 du PADD du PLUi Coeur des Bauges

Nous retenons comme hypothèse démographique du scénario stratégique :

- Population totale en 2050 : 745 000 habitants (+232 000 habitants).

4.3.2 Consommation d'espace

Document source	Point de départ	Ambition	Projection à 2050
SCoT Albanais	2004 (approbation en 2005)	+600 ha en 20 ans (dont +450 ha pour l'habitat) ⁸	
SCoT Arlysère	2010 (approbation 2012)	+125 ha pour les logements en 10 ans +150 ha pour l'activité en 20 ans ⁹	
SCoT Bassin Annecien	2014	Moins de 1 100 ha en 20 ans (dont 520 ha pour l'habitat et a minima 300 ha pour l'activité) ¹⁰	
SCoT Métropole Savoie	2005 (modif en 2013)	1 754 ha sur 20 ans ¹¹	
PLUi Coeur des Bauges	2015 (approbation 2016)	22 à 33 ha en urbanisation nouvelle par an jusqu'en 2030 ¹²	
Territoire d'étude	2012 Espaces artificialisés : 23 041 ha	Donnée harmonisée : +215 à +225 ha par an	De 30 781 ha (+7 740 ha) À 31 166 ha (+8 125 ha)

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

- Surfaces artificialisées en 2050 : 31 000 ha,
- Consommation d'espace entre 2012 et 2050 : +8 000 ha.

⁸ Page 21 du DOG du SCoT de l'Albanais

⁹ Page 9 du DOG du SCoT Arlysère

¹⁰ Page 33 du DOO du SCoT Bassin Annecien

¹¹ Tableau par commune page 112 du SCoT Métropole Savoie

¹² Page 19 du PADD du PLUi Coeur des Bauges

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
SCoT Albanais	Assurer la protection des cours d’eau et zones humides ¹³ Un « niveau de protection intégrale » pour les zones humides ¹⁴
SCoT Arlysère	Non dégradation des zones humides ¹⁵ Inscription des zones humides dans les corridors écologiques : préserver et assurer le maintien de la continuité, assurer la pérennité de la continuité identifiée. Les infrastructures ne sont pas interdites (rétablissement de la continuité). Une extension urbaine très limitée peut être exceptionnellement autorisée au sein de la continuité écologique (multiples conditions) ¹⁶
SCoT Bassin Annecien	Inscription des zones humides au sein des corridors écologiques : préserver, garantir le maintien des fonctionnalités des corridors. Certains aménagements sont autorisés. ¹⁷
SCoT Métropole Savoie	Préservation des zones humides ¹⁸ Protéger les zones humides ¹⁹
PLUi Coeur des Bauges	Maintien des exigences de qualité du réseau hydrographique ²⁰
Territoire d’étude	Protection des zones humides. L’urbanisation y est par principe exclue sauf sous certaines conditions

Pour les zones agricoles :

Document source	Ambition
SCoT Albanais	Protéger 24 000 ha de zones naturelles et agricoles (à échéance du SCoT) ²¹ Protection des terres agricoles (notion de grands ensembles agricoles) ²²

¹³ Page 27 du DOG du SCoT Albanais

¹⁴ Page 16 et 45 du DOG du SCoT Albanais

¹⁵ Page 12 du DOG du SCoT Arlysère

¹⁶ Page 13 du DOG du SCoT Arlysère

¹⁷ Page 10 du DOO du SCoT Bassin Annecien

¹⁸ Page 59 du SCoT Métropole Savoie

¹⁹ Page 97 du SCoT Métropole Savoie

²⁰ Page 15 du PADD du PLUi Coeur des Bauges

²¹ Page 27 du DOG du SCoT Albanais

²² Page 32 du DOG du SCoT Albanais

SCoT Arlysère	Principe d'équilibre entre développement et préservation des espaces naturels et agricoles ²³ Les espaces naturels et agricoles ne sont pas ouverts à l'urbanisation (identification des espaces agricoles à préserver, aménagements exceptionnellement autorisés sous certaines conditions) ²⁴
SCoT Bassin Annecien	Préserver les terres agricoles ²⁵ Préserver les zones agricoles à enjeux forts ²⁶ Préserver le plus longtemps possible les zones agricoles ordinaires ²⁷
SCoT Métropole Savoie	Protection de l'agriculture ²⁸ Le dimensionnement adéquat des PLU contribue à la préservation des terres agricoles ²⁹ Possibilité de protéger plus spécifiquement certains espaces agricoles à enjeux ³⁰
PLUi Coeur des Bauges	Préserver le foncier agricole ³¹ Inscrire l'agriculture et la sylviculture dans la durabilité (maintenir et développer l'activité) ³²
Territoire d'étude	Compte-tenu de l'étendue de ces espaces agricoles au niveau des territoires, même si un principe de préservation générale est appliqué par tous, une majorité de la consommation d'espace se fera sur ceux-ci. Par principe, les espaces agricoles au sein des continuités écologiques sont préservés et à ce titre ils bénéficient d'un niveau de protection élevé. La plupart des documents prévoient l'identification de secteurs agricoles à enjeux ou les identifient eux-mêmes. Sur ces espaces, le niveau de protection est généralement renforcé. <i>Il n'a pas été possible d'identifier ces espaces à l'échelle du territoire d'étude.</i> Pour les autres espaces agricoles, les principes énoncés vont dans le sens du maintien et de la pérennisation de l'activité agricole (ne pas compromettre l'exploitation agricole).

Pour les zones forestières :

Document source	Ambition
SCoT Albanais	Protection intégrale ou stricte des grands massifs forestiers ³³
SCoT Arlysère	

²³ Page 9 du DOG du SCoT Arlysère

²⁴ Page 11, 19 du DOG du SCoT Arlysère

²⁵ Page 6 du DOO du SCoT Bassin Annecien

²⁶ Page 17 du DOO du SCoT Bassin Annecien

²⁷ Page 19 du DOO du SCoT Bassin Annecien

²⁸ Page 59 du SCoT Métropole Savoie

²⁹ Page 113 du SCoT Métropole Savoie

³⁰ Page 121 du SCoT Métropole Savoie

³¹ Page 19 du PADD du PLUi Coeur des Bauges

³² Page 21 du PADD du PLUi Coeur des Bauges

³³ Page 15, 29 du DOG du SCoT Albanais

SCoT Bassin Annecien	Protéger l'activité forestière ³⁴ Protéger (au titre de la loi Littoral), les espaces boisés identifiés comme espaces remarquables ³⁵
SCoT Métropole Savoie	
PLUi Coeur des Bauges	Inscrire l'agriculture et la sylviculture dans la durabilité (maintenir et développer l'activité) ³⁶
Territoire d'étude	L'activité forestière, l'exploitation du bois-énergie sont des informations que l'on retrouve dans les SCoT. Néanmoins, en dehors de ces éléments, on ne retrouve pas toujours la question de la protection de ces espaces au sein des documents analysés. Par principe, les espaces forestiers au sein des continuités écologiques sont préservés et à ce titre ils bénéficient d'un niveau de protection élevé. Certains documents, notamment ceux soumis à la loi Littoral, assurent la préservation des grands massifs boisés.

³⁴ Page 60 du DOO du SCoT Bassin Annecien

³⁵ Page 64 du DOO du SCoT Bassin Annecien

³⁶ Page 21 du PADD du PLUi Coeur des Bauges

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.

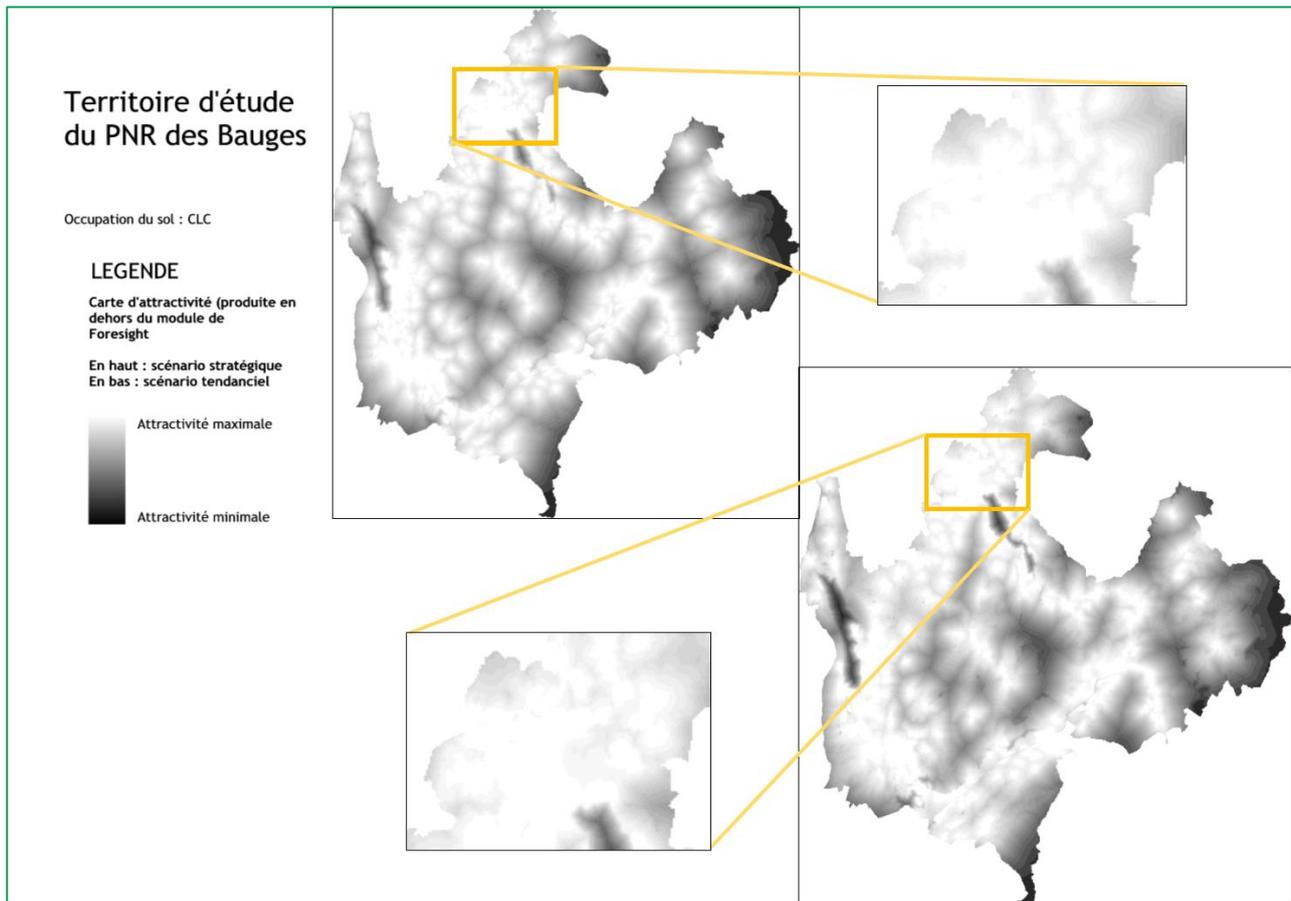


Figure 15 : Cartes d'attractivité produites en dehors du module dédié de FORESIGHT sur le territoire d'étude du PNR des Bauges (et zoom) pour les scénarios stratégiques et tendanciels

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 7 000 ha pour le scénario tendanciel et 8 000 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 2017³⁷
 - Spontaneous : 5,
 - New Spread Center : 8,
 - Road Influenced : 18,
 - Edge-Growth : 69,

³⁷ 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 : 8,
 - Edge-Growth : 90.

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 7 000 ha.

Pour la déclinaison du scénario stratégique, les chaînes de Markov ont également été utilisées pour limiter le développement urbain aux environs de 8 000 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 suivants :

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				

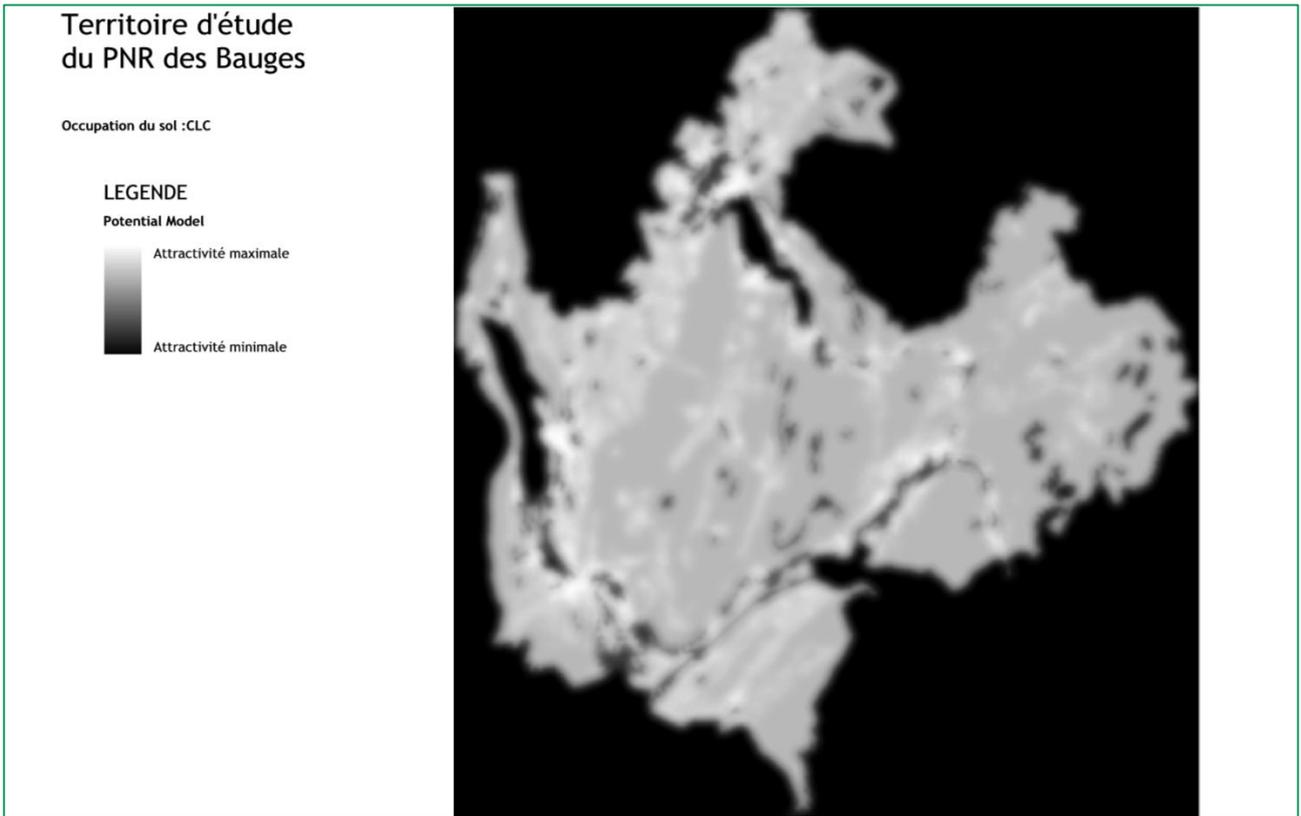


Figure 16 : Modèle de potentiel sur le territoire d'étude du PNR des Bauges

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)³⁸. 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.

³⁸ 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.

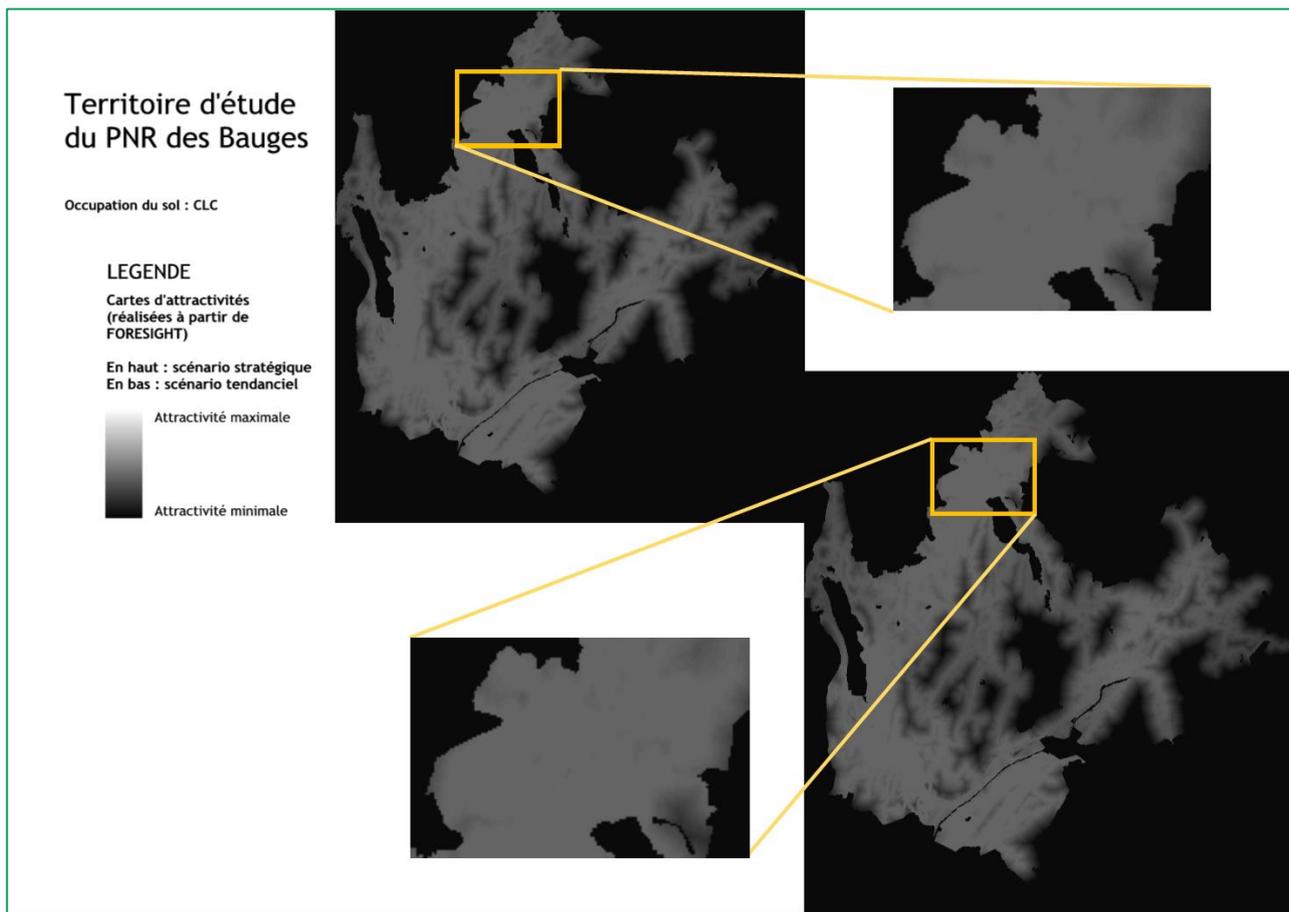


Figure 17 : Cartes d'attractivité produites à partir de FORESIGHT sur le territoire du PNR des Bauges (et zoom) pour les scénarios stratégiques et tendanciels

5.1.2 Expérimentation à partir de FORESIGHT

5.1.2.1 Les modélisations

Pour notre territoire d'étude, pour chacune de nos deux bases de données nous permettant de définir l'Initial Urban Map (CLC et OSCOM) 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.

5.1.2.1.1 À partir de la donnée CLC

L'urbanisation créée par FORESIGHT est de 7 000 ha pour le scénario tendanciel et de 8 000 ha pour le scénario stratégique.³⁹

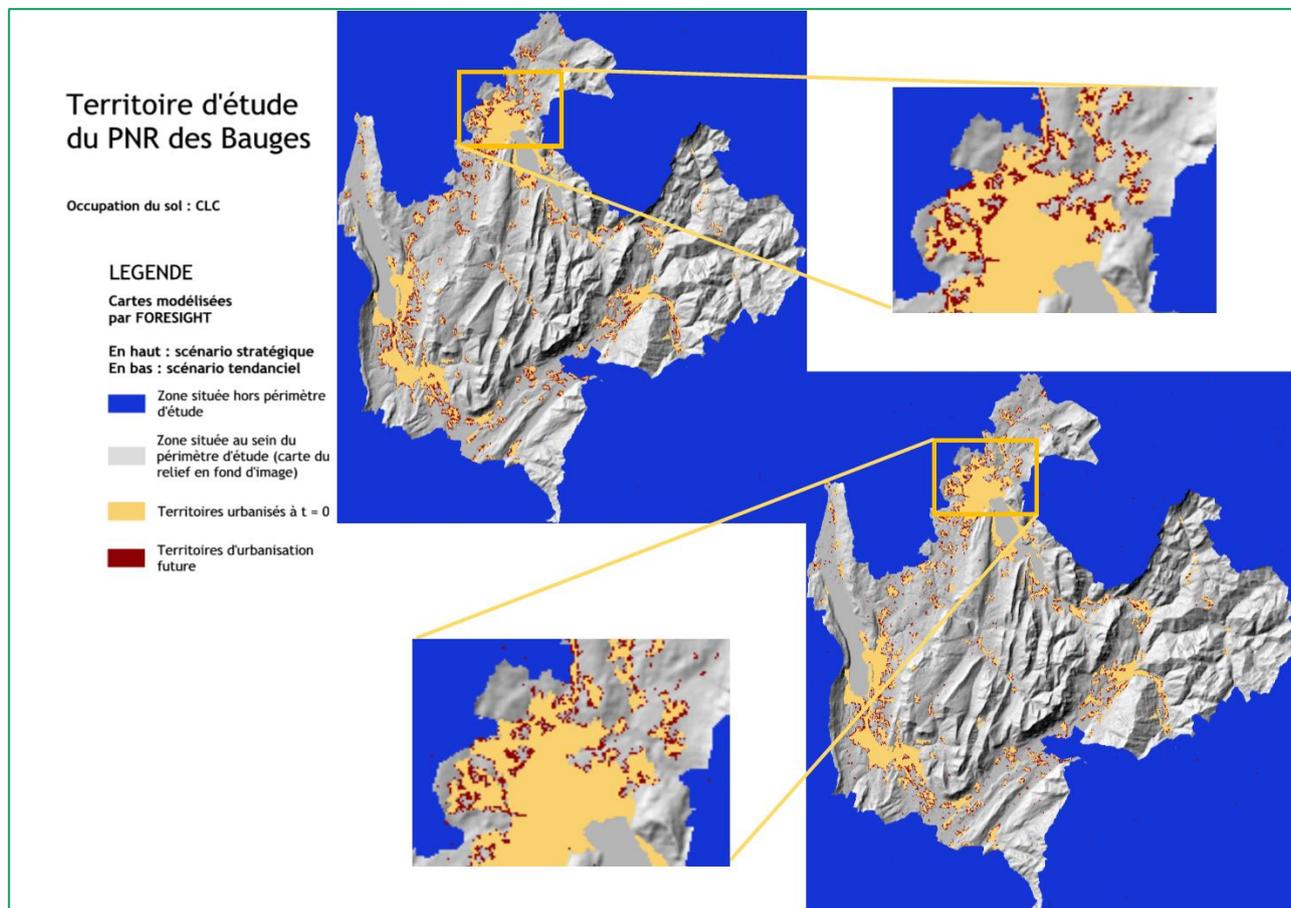


Figure 18 : Modélisations obtenues sur le territoire d'étude du PNR des Bauges à partir de la donnée CLC et pour les scénarios stratégiques et tendanciels

³⁹ L'explication des valeurs retenues est donnée au sein des deux rapports pour les territoires.

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

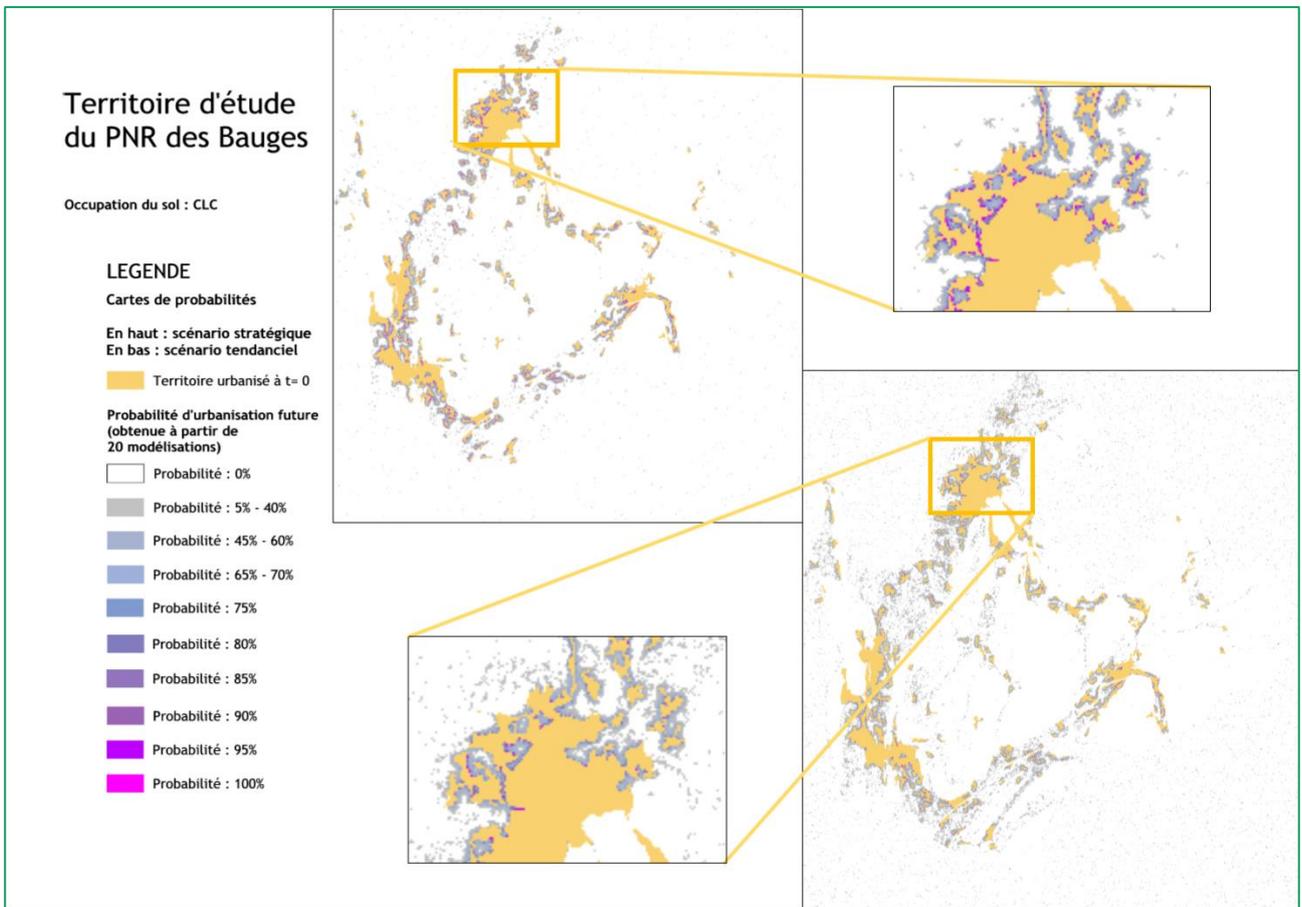


Figure 19 : Probabilités d'urbanisation obtenues à partir de 20 modélisations sur le territoire d'étude du PNR des Bauges à partir de la donnée CLC et pour les scénarios stratégiques et tendanciels

5.1.2.1.2 À partir de la donnée OSCOM

Voici à partir de la donnée OSCOM, les résultats obtenus.

L'urbanisation créée par FORESIGHT est de 7 000 ha pour le scénario tendanciel et de 8 000 ha pour le scénario stratégique.⁴⁰

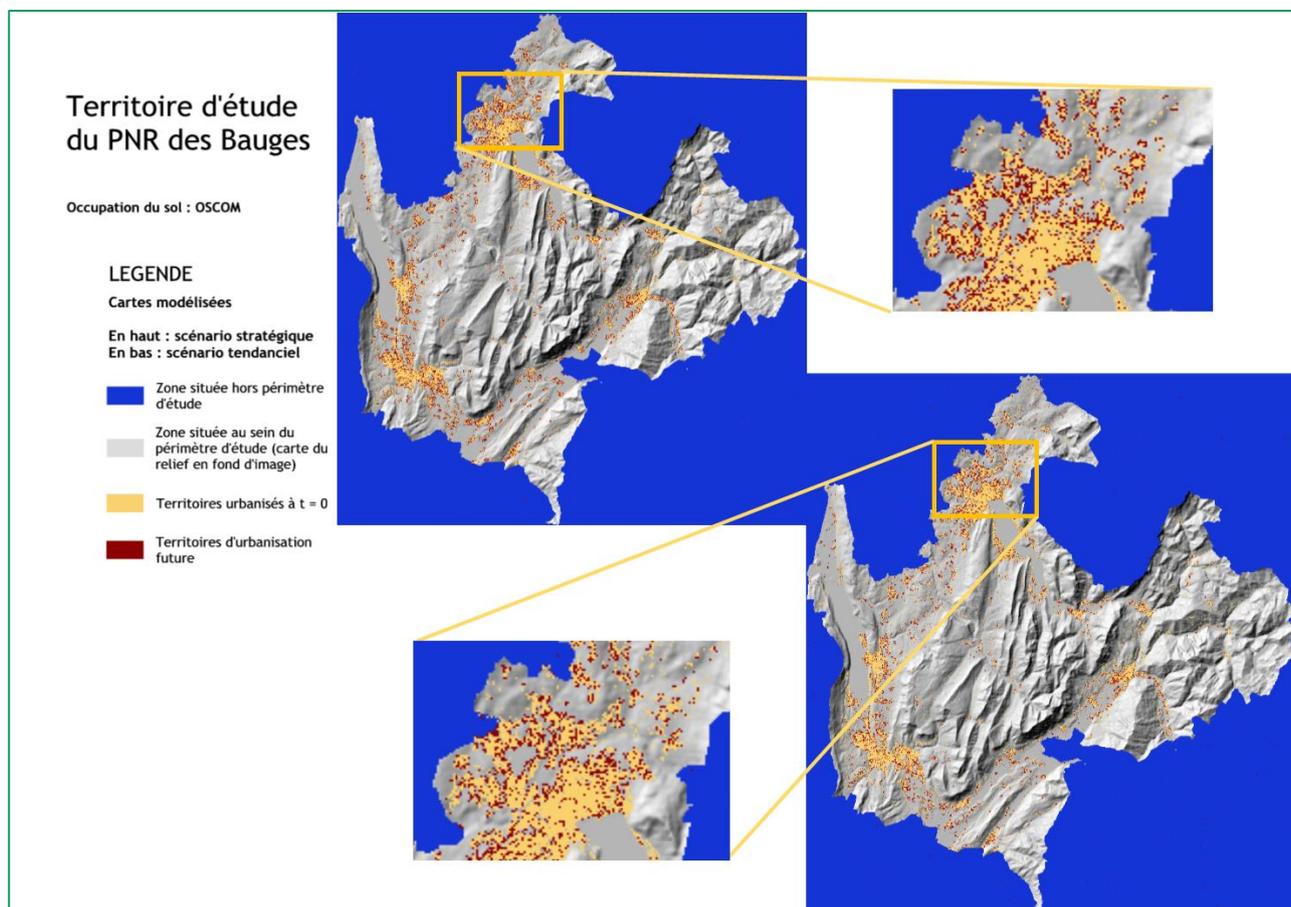


Figure 20 : Modélisations obtenues sur le territoire d'étude du PNR des Bauges à partir de la donnée OSCOM et pour les scénarios stratégiques et tendanciels

⁴⁰ L'explication des valeurs retenues est donnée au sein des deux rapports pour les territoires.

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

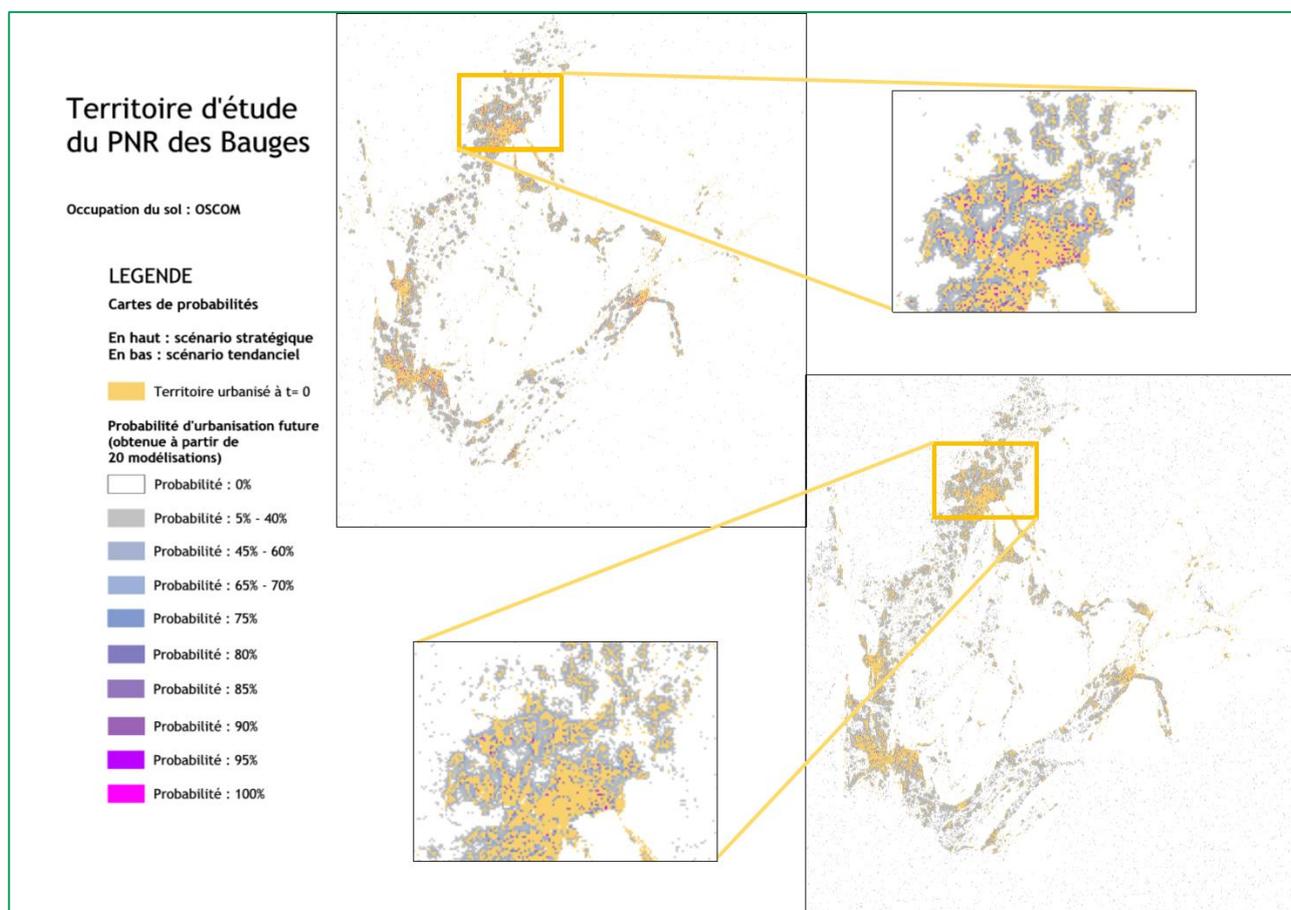


Figure 21 : Probabilités d'urbanisation obtenues à partir de 20 modélisations sur le territoire d'étude du PNR des Bauges à partir de la donnée OSCOM et pour les scénarios stratégiques et tendanciel

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.

Sur le territoire d'étude du PNR des Bauges, les modélisations sont réalisées à partir de CLC et OSCOM. Notre objectif est d'analyser les résultats obtenus pour voir comment la source de donnée impacte 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 où 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.
- L'influence de la base de données : sur le territoire d'étude du PNR des Bauges, on se rend compte que l'urbanisation initiale définie à partir d'OSCOM diffère de celle définie à partir de CLC notamment dans le découpage du territoire. Là où l'on a de grosses entités urbanisées au sein de CLC, on a des espaces urbanisés définis bien plus finement avec OSCOM (et malgré l'utilisation d'une maille de pixel de 100 m de côté). De plus, sur certains secteurs, peu urbanisés, OSCOM identifie des territoires urbanisés là où CLC n'en recense pas. Même si aucune analyse précise de ces différences n'a été faite dans le cadre de l'expérimentation actuelle, on peut penser que cette précision de l'information a un impact sur la modélisation, le paramètre de type Edge-Growth étant directement impacté par ces différences.

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.

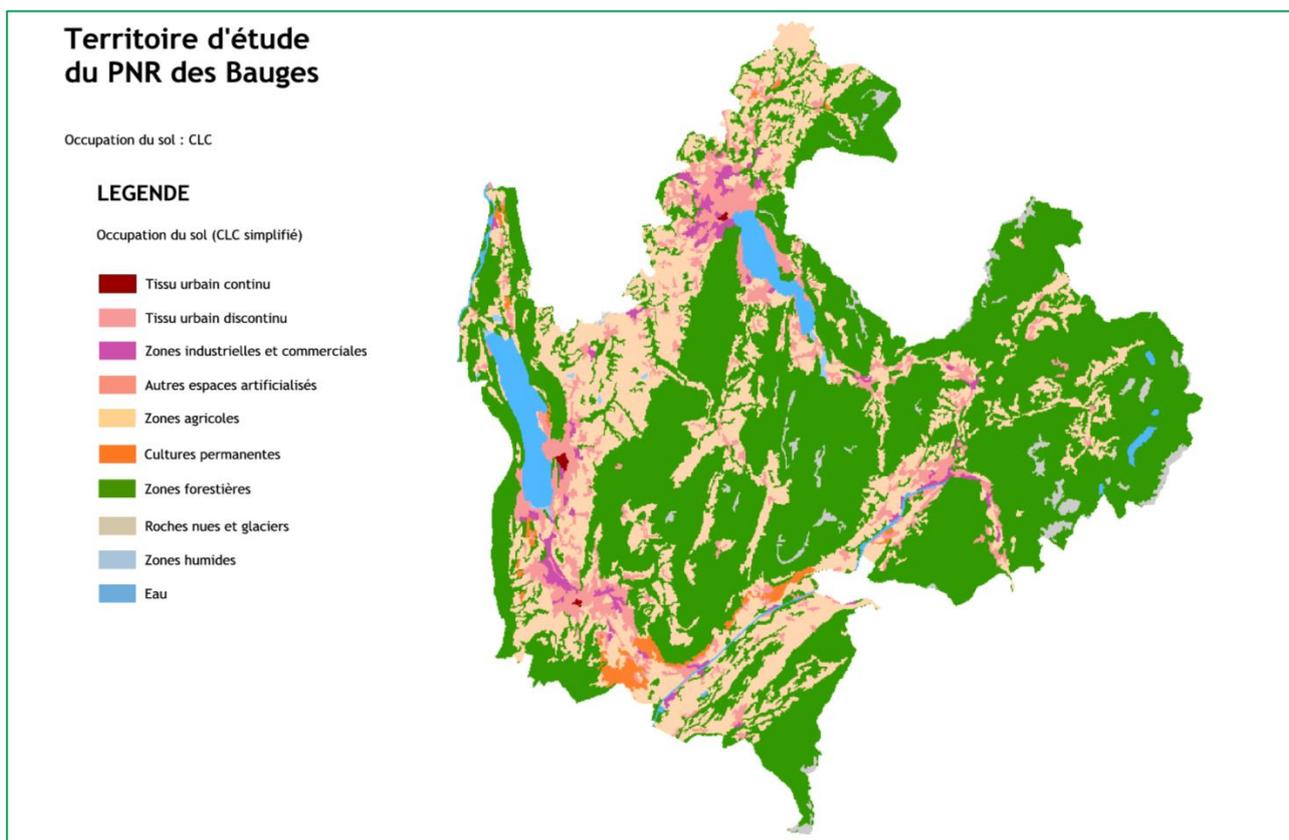


Figure 22 : Occupation du sol (CLC simplifié) en 2012 sur le territoire d'étude du PNR des Bauges

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 types d'occupation du sol suivants : 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

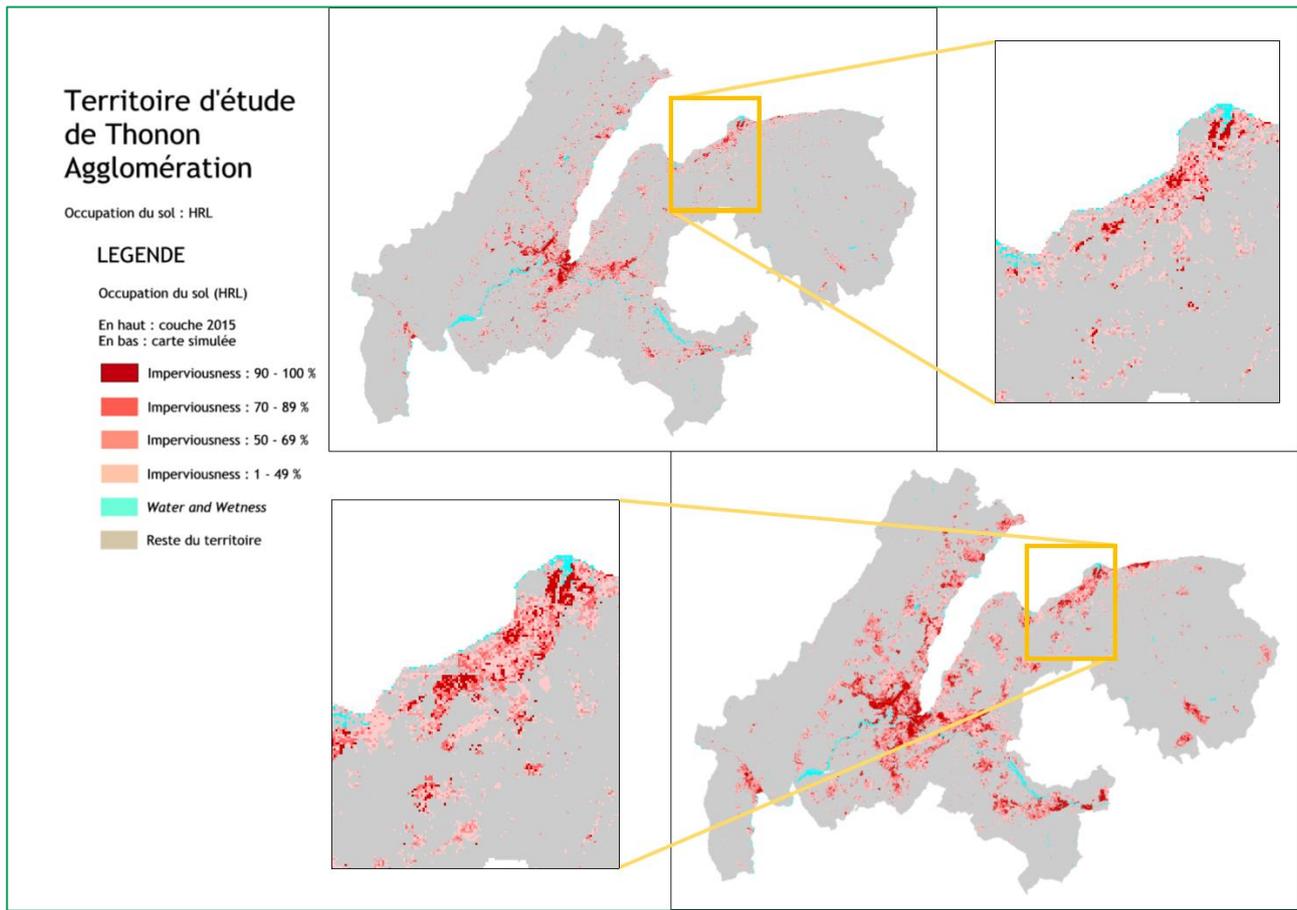


Figure 23 : Modélisation obtenue à partir de LUCSIM sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération et pour la base de donnée HRL

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 issus de FORESIGHT

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 n'est pas suffisamment différent entre nos deux scénarios sur le territoire d'étude du PNR des Bauges pour avoir un effet lisible sur les modélisations respectives de ces deux scénarios.

Néanmoins, il est nettement plus 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, auquel nous avons également ajouté le périmètre du PNR des Bauges. 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 pour nos deux bases de données et nos deux scénarios d'évolution.

5.2.2.1 Pour une modélisation

Territoire PNR BAUGES	CLC 2050			
	Stratégique		Tendanciel	
CC des Sources du Lac d'Annecy	393	4,96 %	348	5,19 %
CC Coeur de Savoie	1241	15,65 %	1058	15,79 %
CA du Lac du Bourget (Grand Lac)	1208	15,23 %	1045	15,59 %
CA du Grand Annecy	2672	33,69 %	2165	32,31 %
CA Chambéry Métropole-Coeur des Bauges	1306	16,47 %	1172	17,49 %
CA Arlysère	1110	14,00 %	913	13,62 %
PNR des Bauges	1712	21,59 %	1479	22,07 %
Grand territoire d'étude	7930	100,00 %	6701	100,00 %
Pixels créés en dehors du périmètre d'étude	77		287	
Somme des pixels créés	8007		6988	

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

Territoire PNR BAUGES	OSCOM 2050			
	Stratégique		Tendanciel	
CC des Sources du Lac d'Annecy	329	4,14 %	271	4,04 %
CC Coeur de Savoie	1079	13,59 %	896	13,35 %
CA du Lac du Bourget (Grand Lac)	1253	15,78 %	1104	16,45 %
CA du Grand Annecy	2818	35,48 %	2361	35,17 %
CA Chambéry Métropole-Coeur des Bauges	1533	19,30 %	1300	19,37 %
CA Arlysère	930	11,71 %	781	11,63 %
PNR des Bauges	1605	20,21 %	1310	19,51 %
Grand territoire d'étude	7942	100,00 %	6713	100,00 %
Pixels créés en dehors du périmètre d'étude	134		76	
Somme des pixels créés	8076		6789	

Tableau 2 : Nombres de pixels (et proportion) créés par EPCI pour chaque scénario à partir de la donnée OSCOM

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 sur la Communauté d'Agglomération du Grand Annecy et, dans une moindre mesure, sur la Communauté d'Agglomération Arlysère est plus importante dans le scénario stratégique que dans le tendanciel. On observe un effet inverse sur la Communauté d'Agglomération Chambéry Métropole-Coeur des Bauges et le PNR des Bauges.
- À partir de la donnée OSCOM, la répartition des pixels créés en fonction des scénarios est différente : la proportion de pixels créés sur la Communauté d'Agglomération du Grand Annecy et sur le PNR des Bauges est plus importante dans le scénario stratégique que dans le tendanciel. On observe un effet inverse sur la Communauté d'Agglomération du Lac du Bourget.

Cette première analyse, réalisée à partir d'une modélisation, semble distinguer les scénarios stratégiques et tendanciels au niveau de la répartition de l'étalement urbain par EPCI.

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

Cette première analyse souligne également un deuxième effet : l'impact de la base de donnée utilisée sur les résultats obtenus.

- Pour un scénario donné, les résultats obtenus pour CLC et OSCOM diffèrent, mais toujours de la même manière. Les différences entre les résultats pour chacune de ces bases vont toujours dans le même sens et ce, quel que soit le scénario. Ainsi, la quantité et la proportion de pixels créés à partir d'OSCOM est toujours plus importante, par rapport à cette même donnée à partir de CLC, sur la CA du Grand Annecy, la CA de Chambéry Métropole-Coeur-des-Bauges et la CA du Lac du Bourget. On obtient le résultat inverse sur les autres EPCI du territoire et le PNR des Bauges.
- Cet effet mériterait d'être analysé plus en détail. Première hypothèse, ce phénomène trouverait son explication dans la répartition de l'information sur le territoire qui n'est pas la même entre CLC et OSCOM.

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 BAUGES	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
CC des Sources du Lac d'Annecy	442	223	240	142	706	237	205	41
CC Coeur de Savoie	1893	572	626	498	4154	607	533	234
CA du Lac du Bourget (Grand Lac)	1650	643	646	454	3386	666	584	155
CA du Grand Annecy	3053	1241	1363	1033	6161	1300	1226	423
CA Chambéry Métropole-Coeur des Bauges	1591	665	679	467	3394	675	594	191
CA Arlysère	1183	585	573	456	4154	607	533	234
PNR des Bauges	2715	983	910	487	5796	984	733	178
Grand territoire d'étude	10878	3932	4138	3050	26016	4084	3659	1216
Proportion	49,45 %	17,87 %	18,81 %	13,86 %	74,38 %	11,68 %	10,46 %	3,48 %

Tableau 3 : Nombres de pixels en fonction de leur valeur par EPCI, pour chaque scénario et pour la base CLC

Territoire BAUGES	OSCOM 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
CC des Sources du Lac d'Annecy	651	293	177	30	901	257	96	8
CC Coeur de Savoie	2403	765	451	135	4573	680	322	42
CA du Lac du Bourget (Grand Lac)	2263	876	642	266	4001	817	486	96
CA du Grand Annecy	4458	1925	1599	650	7043	1773	1236	232
CA Chambéry Métropole-Coeur des Bauges	2301	957	746	513	3784	922	674	210
CA Arlysère	1661	732	497	237	2520	635	404	84
PNR des Bauges	3736	1295	718	183	6430	1110	450	43
Grand territoire d'étude	14747	5557	4119	1834	28652	5096	3223	672
Proportion	56,16 %	21,16 %	15,69 %	6,98 %	76,12 %	13,54 %	8,56 %	1,79 %

Tableau 4 : 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.

5.2.2.2.1 Comparaison des résultats pour les deux scénarios

De manière évidente, elle permet de distinguer les scénarios stratégiques et tendanciels. La proportion de pixels qui ont une forte probabilité d'être urbanisés est nettement supérieure pour le scénario stratégique que pour le scénario tendanciel. Ce constat est directement imputable 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. Ceci conduit inévitablement à la reproduction d'une urbanisation semblable d'une modélisation à l'autre et augmente donc la quantité de pixels aux probabilités élevées pour le scénario stratégique.

5.2.2.2.2 Comparaison des résultats pour les deux bases de données

Différence déjà soulignée, la donnée OSCOM étant plus dispersée sur le territoire alors cela induit, au niveau des modélisations, plus de différences entre chaque modélisation et par la même se traduit, au niveau de la carte des probabilités, par une proportion de pixels aux probabilités élevées plus faible pour la donnée OSCOM que pour la donnée CLC.

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.

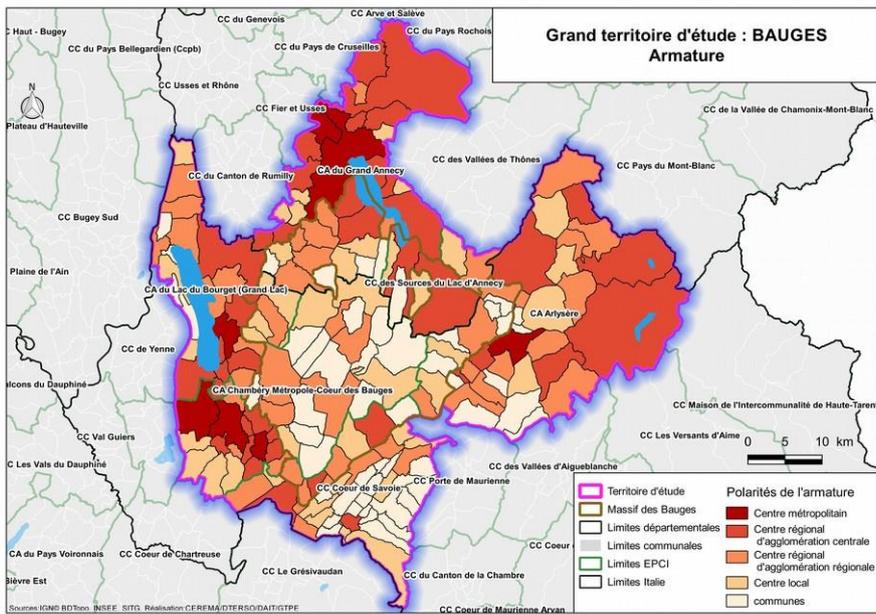


Figure 24 : Armature territoriale (nomenclature Cerema, identique pour les deux territoires d'études)

Territoire PNR BAUGES	CLC 2050			
	Stratégique		Tendancier	
Centres métropolitains	1377	17,36 %	1152	17,19 %
Centres régionaux d'agglomération centrale	2972	37,48 %	2479	36,99 %
Centres régionaux	2052	25,88 %	1702	25,40 %
Centres locaux	1170	14,75 %	995	14,85 %
Autres communes	359	4,53 %	375	5,60 %
Grand territoire d'étude	7930	100,00 %	6701	100,00 %
Pixels créés en dehors du périmètre d'étude	77		287	
Somme des pixels créés	8007		6988	

Tableau 5 : Nombres de pixels (et proportion) créés pour chaque niveau de l'armature territoriale et pour chaque scénario à partir de la donnée CLC

Territoire PNR BAUGES	OSCOM 2050			
	Stratégique		Tendanciel	
Centres métropolitains	2188	27,55 %	1871	27,87 %
Centres régionaux d'agglomération centrale	3123	39,32 %	2555	38,06 %
Centres régionaux	1481	18,65 %	1270	18,92 %
Centres locaux	814	10,25 %	735	10,95 %
Autres communes	336	4,23 %	282	4,20 %
Grand territoire d'étude	7942	100,00 %	6713	100,00 %
Pixels créés en dehors du périmètre d'étude	60		292	
Somme des pixels créés	8002		7005	

Tableau 6 : Nombres de pixels (et proportion) créés pour chaque niveau de l'armature territoriale et pour chaque scénario à partir de la donnée OSCOM

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 le niveau 2 (Centres régionaux d'agglomération centrale).
- À partir de la donnée OSCOM, la répartition des pixels créés en fonction des scénarios est différente : la proportion de pixels créés sur le niveau 2 est plus importante dans le scénario stratégique que dans le scénario tendanciel, l'inverse se produisant sur l'ensemble des autres niveaux de polarités.

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 au niveau du scénario stratégique se fait essentiellement ressentir pour le niveau 2 (Centres régionaux d'agglomération centrale).

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

Pour cette seconde analyse, on retrouve l'effet, souligné en première analyse, de l'impact de la base de données source sur la modélisation :

- Pour un scénario donné, les résultats obtenus pour CLC et OSCOM diffèrent. Ainsi, la quantité et la proportion de pixels créés à partir d'OSCOM est toujours plus importante, par rapport à cette même donnée à partir de CLC, sur les deux premiers niveaux de polarités. On obtient le résultat inverse pour les autres niveaux de polarités et les autres communes.

5.2.4 Synthèse de l'analyse

L'analyse réalisée sur le territoire d'étude du PNR des Bauges confirme l'existence d'un impact des choix que nous avons faits pour distinguer nos deux scénarios d'évolution du territoire. Si pour l'enveloppe de consommation foncière et les Patterns, les impacts identifiés sont, sommes toutes, équivalents quelle que soit la base d'occupation du sol utilisée, l'impact de la carte d'attractivité est plus subtil mais se retrouve assez bien dès lors que notre analyse a porté sur l'armature territoriale.

Nous avons, par ailleurs, identifié une différenciation de nos résultats en fonction de la base d'occupation du sol mobilisée.

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.

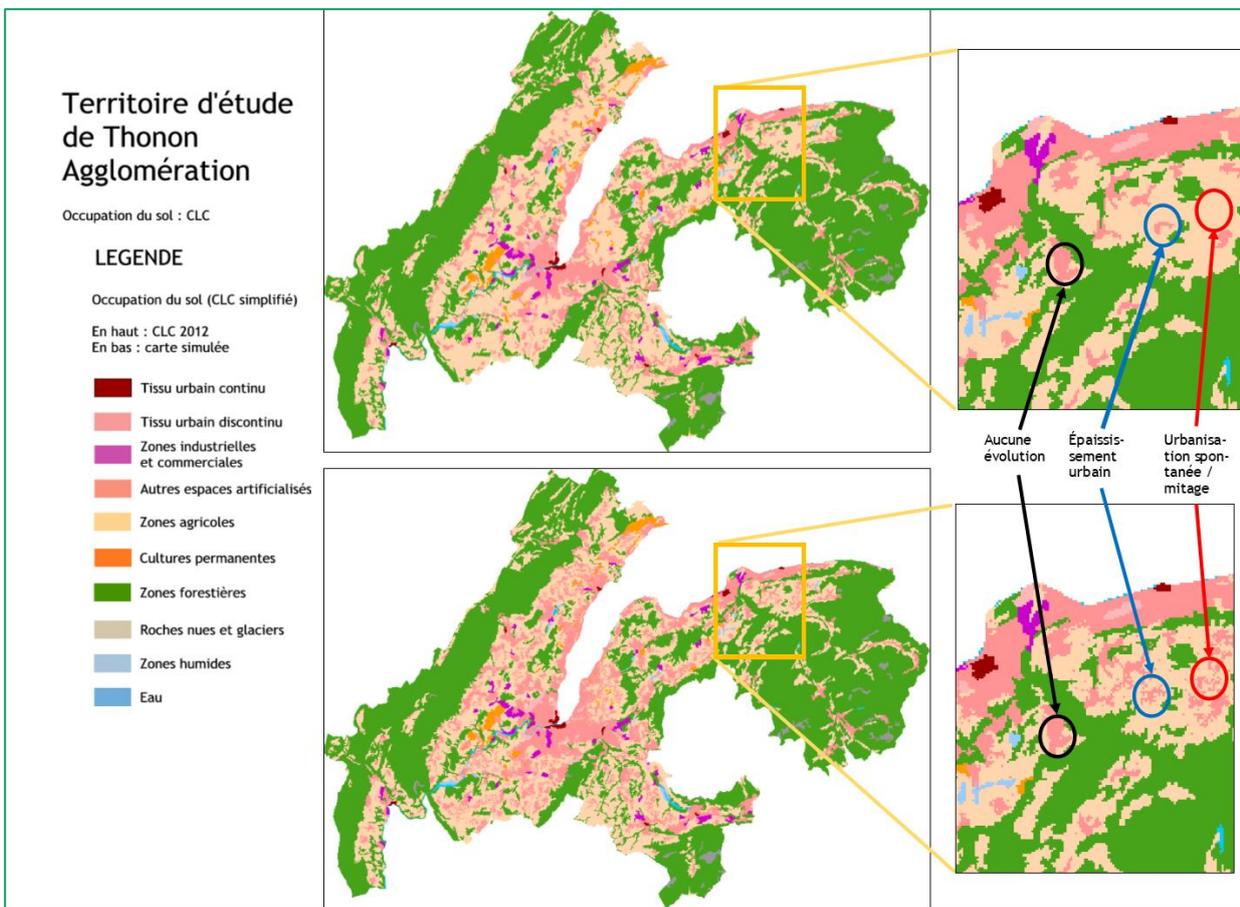


Figure 25 : Illustration sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération de phénomènes modélisés par LUCSIM (aucune évolution, épaissement urbain et urbanisation spontanée)

- 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 ».

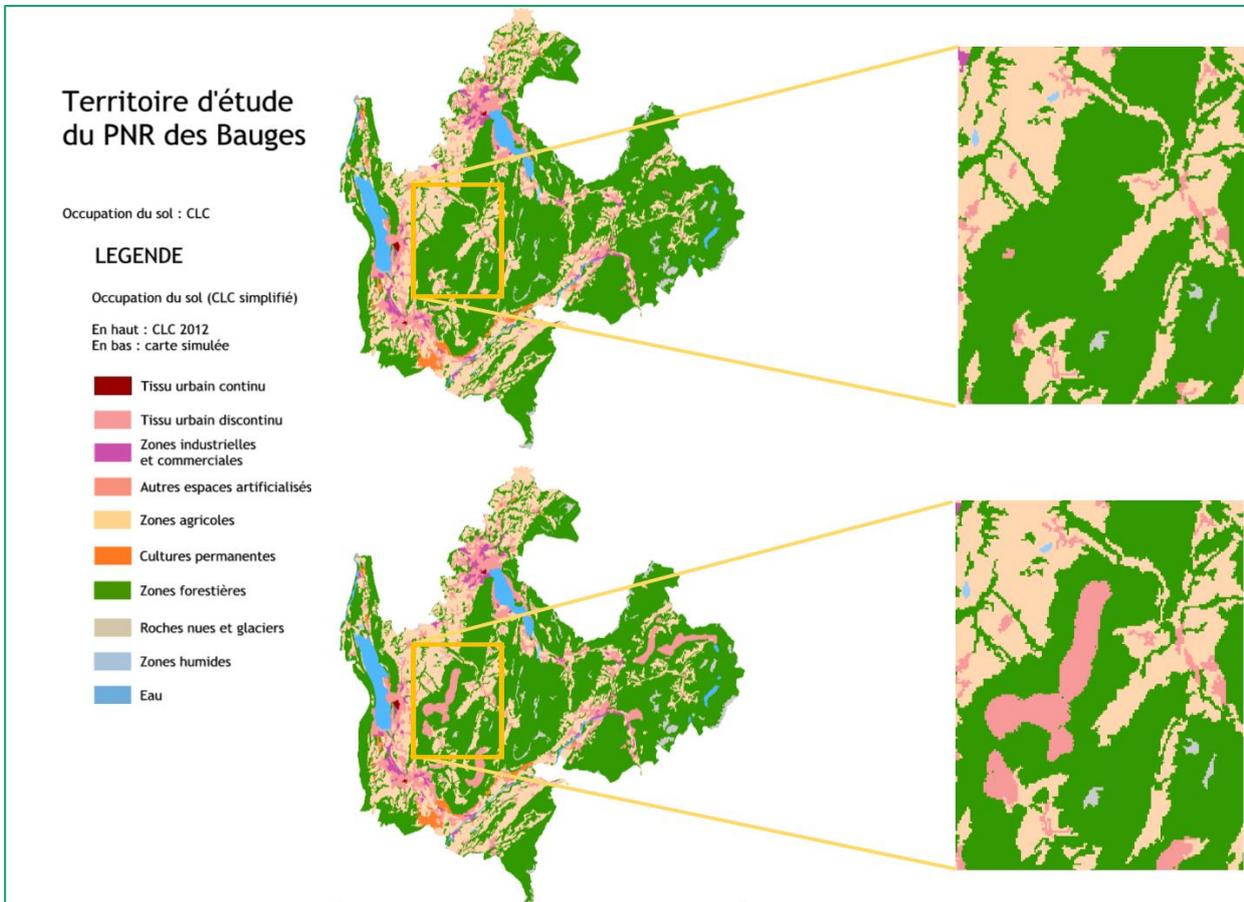


Figure 26 : Illustration sur le territoire d'étude du PNR des Bauges du phénomène du « serpent » modélisé par LUCSIM

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 » (cf. illustration ci-dessus).

Fixées à des seuils différents en fonction des modélisations de type tendancielle ou stratégique, 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'attractivité⁴¹. 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

⁴¹ 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.