

**Interreg**

Alpine Space



EUROPEAN UNION

# ASTUS

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

### Rapport méthodologique

Deliverable D.T2.2.4



Novembre 2018



rsa:SPACE



Landeshauptstadt München

UNIVERSITÉ Grenoble Alpes



SIR  
SALZBURGER INSTITUT FÜR  
RAUMORDNUNG & WOHNFEN

Technical  
University  
of Munich

TUM

RÉGION  
BOURGOGNE  
FRANCHE  
COMTE



Unione  
Nazionale  
Comuni Comunità  
Etni  
Montani  
UNCEM  
Delegazione Piemontese



**Auvergne-  
Rhône-Alpes**  
La Région

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

## Table des matières

1	Introduction.....	3
2	Présentation des logiciels retenus.....	4
2.1	Choix d'un type de logiciel de modélisation.....	4
2.2	Présentation des deux modèles retenus.....	5
2.2.1	FOREcasting Scenarios for cities using GeographiC daTa/FORESIGHT.....	5
2.2.2	Land Use Cellular Automata Simulation/LUCSIM.....	22
3	Programme d'étude – « Ce que nous avons prévu de faire ».....	34
3.1	Cadrage du programme.....	34
3.2	Stratégie d'expérimentation.....	35
3.2.1	À partir de FORESIGHT.....	35
3.2.2	À partir de LUCSIM.....	36
4	Retour d'expérience – « Ce que nous avons réussi à faire ».....	37
4.1	Création d'une carte d'attractivité.....	37
4.1.1	Préparation de la carte d'attractivité.....	37
4.1.2	Intégration de la carte d'attractivité dans FORESIGHT.....	39
4.1.3	Intégration de la carte d'attractivité dans LUCSIM.....	40
4.2	Expérimentation à partir de FORESIGHT.....	41
4.2.1	Préparation des données.....	41
4.2.2	La maille de modélisation.....	42
4.2.3	L'enveloppe de consommation d'espace.....	43
4.2.4	Estimation des Patterns des scénarios tendanciels et stratégiques.....	43
4.2.5	Les modélisations.....	44
4.2.6	Les résultats.....	45
4.2.7	L'analyse des résultats.....	48
4.3	Expérimentation à partir de LUCSIM.....	50
4.3.1	Préparation des couches de l'occupation du sol.....	50
4.3.2	Modéliser à partir de LUCSIM.....	53
5	Quels résultats et quels retours sur les logiciels de modélisation ?.....	62
5.1	Modéliser avec FORESIGHT.....	62
5.2	Modéliser avec LUCSIM.....	64

# 1 Introduction

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

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

Il a également été produit un rapport pour chacun des territoires d'expérimentation dans lequel est plus détaillée la partie résultat.

## 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 en 2017 a permis d'identifier deux grands types d'outils de modélisation qui pourraient être utilisés dans le cadre du projet ASTUS aux regards des résultats qu'ils donnent en termes d'évaluation des phénomènes d'étalement urbain ou d'évolution de l'occupation du sol :

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

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

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

---

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

## 2.2 Présentation des deux modèles retenus

### 2.2.1 FOREcasting Scenarios for cities using GeographiC daTa/FORESIGHT

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

Tableau 1 : caractéristiques et objectifs de FORESIGHT

Extraits du manuel d'utilisateur de FORESIGHT :

- This model was developed to simulate urban sprawl of a city based on a predefined qualitative scenarios (narratives). It was developed by the laboratory UMR 5602 GEODE CNRS-UT2J within the project ACCLIMAT (adaptation to climate change of the Toulouse urban area). The general framework we refer to optimally use this model (a scenario-based approach) is presented by Houet & al (2010, 2016).
- The model is based on the existing model SLEUTH (Clarke et al 1997, Clarke and Gaydos 1998), widely tested and acknowledged by the scientific community. SLEUTH model is a program developed in C language running under UNIX operating system and using standard gnu C compiler (gcc). Model and source codes are freely available (cf. Gigalopolis Project).
- Unlike SLEUTH, FORESIGHT incorporates an additional spatial parameter, assimilated to an attractiveness' factor in this example, and is not path-dependent and require pre-defined (co-constructed for instance) scenarios. This version was compiled and encapsulated for non-expert end-users, running under Windows operating system using JAVA®.
- FORESIGHT inherits from the SLEUTH (Clarke et al 1997, Clarke and Gaydos 1998) and SLEUTH (Houet et al. 2016) models and is specifically dedicated for long-term scenario-based urban planning studies.

Le manuel de l'utilisateur de FORESIGHT est bien renseigné et permet d'apporter des précisions tant sur le fonctionnement pratique de l'outil que sur son fonctionnement théorique ainsi que certaines subtilités du paramétrage du logiciel. Nous nous sommes largement appuyés sur ce guide pour construire le rapport méthodologique ci-dessous tout en apportant notre retour d'expérience sur l'expérimentation menée.

### 2.2.1.1 Principe de fonctionnement

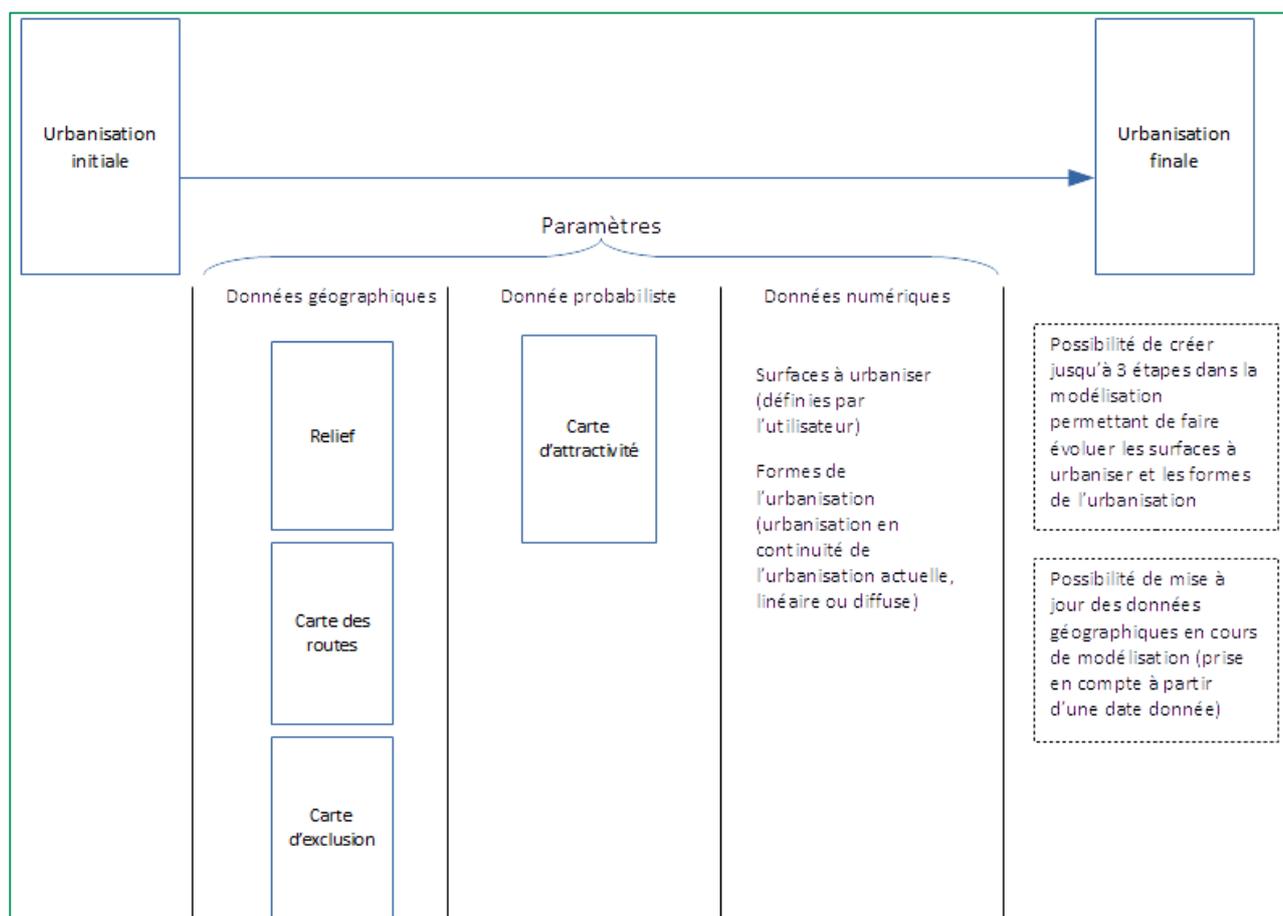


Figure 1 : Schéma de fonctionnement du logiciel FORESIGHT

### 2.2.1.2 Interface

L'interface de FORESIGHT permet d'accéder à 6 onglets :

- *Pre-processing* : permet de préparer les données images requises pour la simulation,
- *Attractiveness generation* : propose une méthode pour préparer simplement une carte d'attractivité,
- *Initial Settings* : permet de s'assurer de l'existence (dans le dossier adéquat) des données images requises,
- *Scenario parameters* : permet d'indiquer les paramètres numériques de la simulation comme l'échéance de la modélisation ou les formes de l'étalement urbain,
- *Land management strategies* : permet de mettre à jour certaines données cartographiques en cours de modélisation,
- *Output* : permet de lancer la simulation.

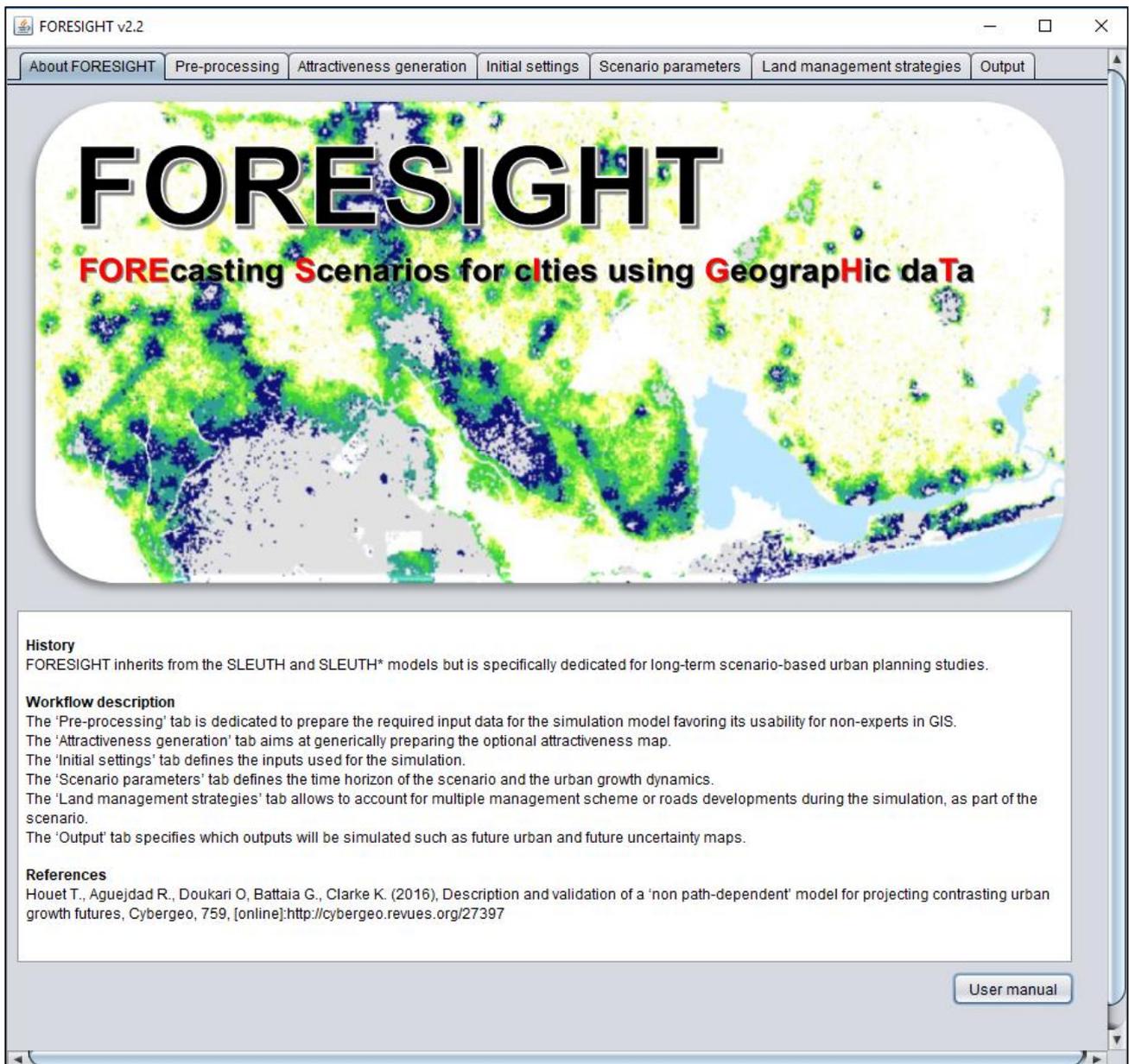


Figure 2 : Interface de FORESIGHT

### 2.2.1.3 Onglet Pre-processing

#### 2.2.1.3.1 Principe de fonctionnement de l'onglet Pre-processing

FORESIGHT dispose d'un module de pré-traitement permettant de préparer les données géographiques d'entrées. En respectant le format des données ainsi générées (\*.GIF), il est théoriquement possible de ne pas utiliser ce module.

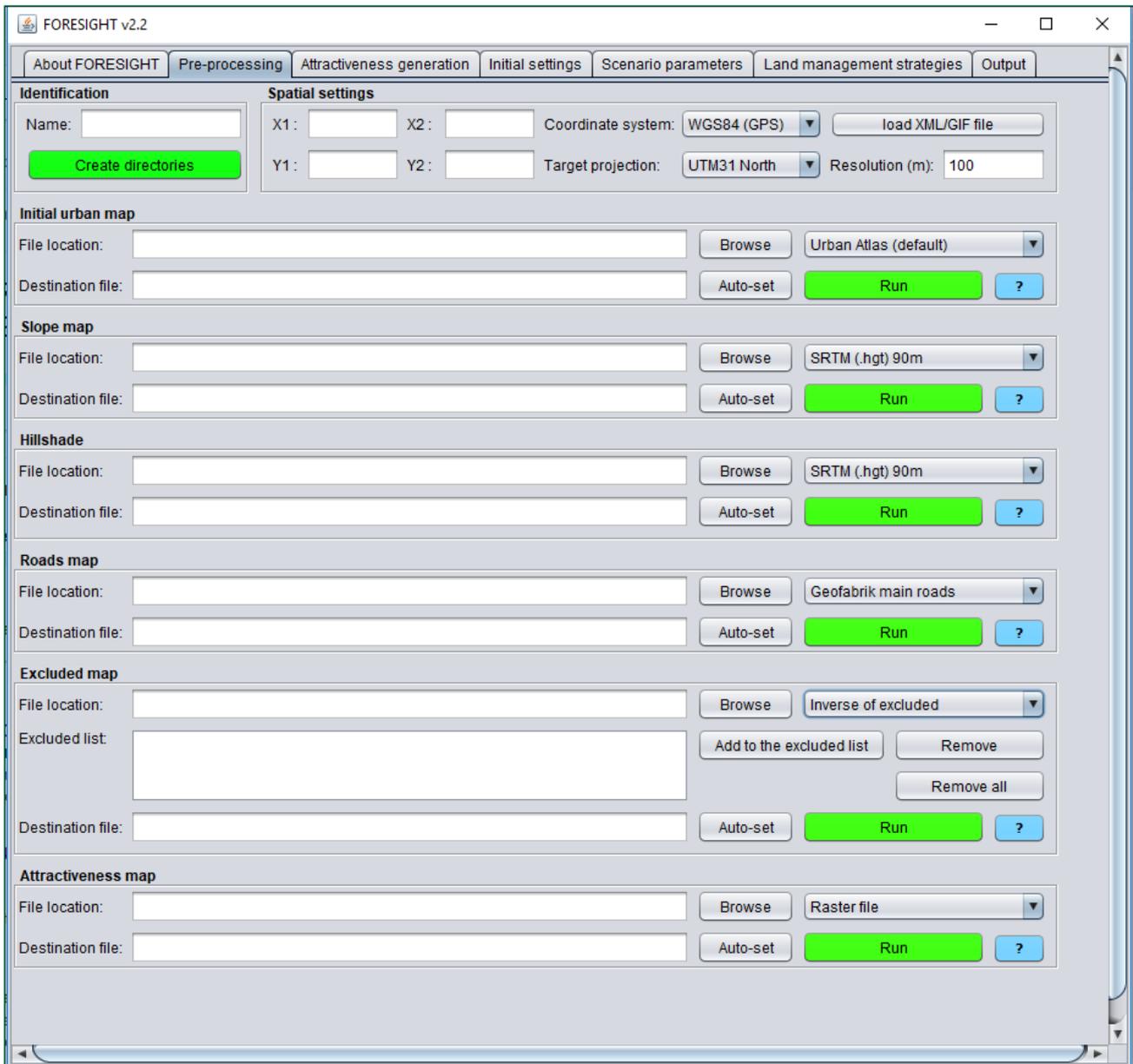


Figure 3 : Interface de Foresight

Étape primordiale pour pouvoir utiliser le logiciel FORESIGHT, il est important créer un répertoire de travail au sein duquel le logiciel va implémenter les données nécessaires à la modélisation ainsi que les résultats de la modélisation.

La création du répertoire (à la racine du dossier dans lequel est placé FORESIGHT) s'accompagne de la création de deux dossiers, *Input* rassemblant toutes les données images d'entrées nécessaires à la modélisation et *Output* rassemblant l'ensemble des images produites dans le cadre d'une simulation. Si l'on relance une nouvelle modélisation sans modifier le nom du répertoire alors toutes les données antérieures seront écrasées par les nouvelles données. Il est plus prudent, de stocker les données créées dans un autre dossier si l'on veut revenir dessus.

Dans le même onglet, il faut renseigner le cadre *Spatial Settings* à partir des coordonnées géographiques de la zone d'étude (*Xmin*, *Ymin* et *Xmax* et *Ymax*). Il est important de préciser le système de coordonnées dans lequel sont fournies les données d'entrées ainsi que celui de la « projection cible », faisant référence à la projection à utiliser pour faire correspondre les données et générer des cartes de l'étalement urbain. Les projections possibles admissibles en entrées sont le WGS84, le Lambert 93 et l'UTM31 North, les deux derniers étant également disponibles pour le système de coordonnées de la « projection cible ».

La résolution du modèle est demandée. Cette résolution fixe la taille des pixels pour la lecture des données d'entrées. Elle est théoriquement indépendante de la modélisation. Si l'on utilise une résolution supérieure à la qualité de la donnée d'entrée, la donnée sera alors simplifiée.

Par défaut, le logiciel prévoit une maille de 100 m de côté (soit un pixel de 1 ha).

L'étape suivante du pré-traitement consiste à générer chacune des cartes demandées en entrée par le simulateur.

Pour chaque carte, un fichier source est demandé. Une fois le fichier sélectionné, un nom de fichier de sortie par défaut est défini. Modifier le nom de sortie peut notamment être utile pour générer, par exemple, une nouvelle version, mise à jour, d'un fichier d'entrée que l'on utilisera ensuite dans l'onglet *Land management strategies*. La fonction *Auto-set* permet de retrouver le nom par défaut.

Attention : seul un fichier dont le nom sera celui fixé par défaut pourra être reconnu par le logiciel pour la modélisation à venir.

La fonction *Run*, permet de générer le fichier (en format \*.gif) dans le dossier *Input*.

### 2.2.1.3.2 Initial Urban Map

À partir de différentes sources possibles, le logiciel cherche à générer une carte de l'urbanisation initiale, sans précision sur ce que signifie l'urbanisation, cela peut être les espaces artificialisés (à partir de Corine Land Cover ou de l'Urban Atlas par exemple) ou la tache urbaine, quelle que soit la méthode utilisée pour la définir. Cette carte initiale de l'urbanisation est générée depuis un fichier SIG de type vectoriel (format \*.shp) à partir de trois sources possibles :

- Corine Land Cover
- Urban Atlas
- My Own File

FORESIGHT reconnaît les données brutes (sans traitement préalable) issues de Corine Land Cover ou de l'Urban Atlas et sait en extraire l'information nécessaire à la construction de cette carte de l'urbanisation initiale, soit en sélectionnant par défaut toutes les classes rassemblées au sein des espaces artificialisés (premier niveau de nomenclature) soit en laissant l'utilisateur sélectionner les occupations du sol qu'il souhaite intégrer à cette carte.

Pour utiliser une autre source, il est nécessaire de procéder à un pré-traitement sous SIG. Il suffit pour cela de créer, à partir d'un fichier source, une couche vectorielle ayant un champ numérique à deux valeurs, 0 ou 1 où les valeurs 1 représentent le tissu urbain que l'on souhaite intégrer à la carte *Initial Urban Map*.

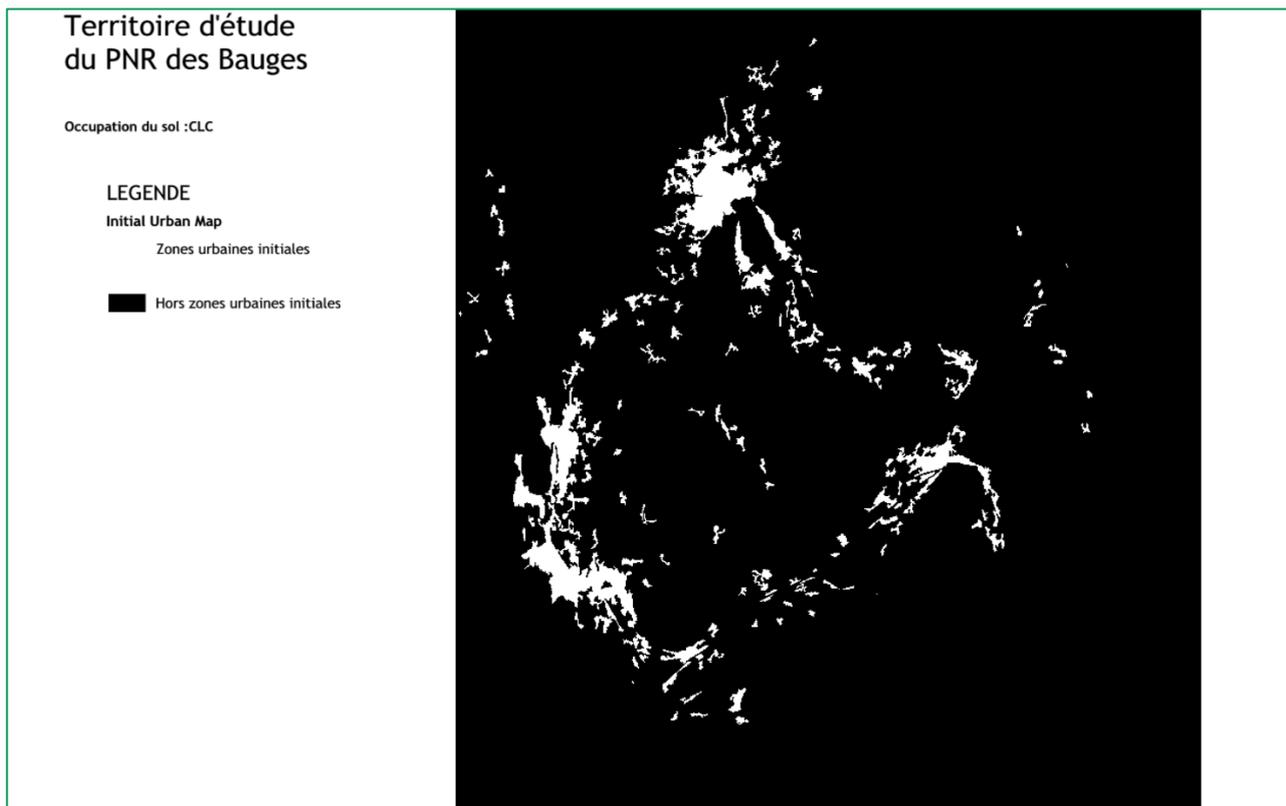


Figure 4 : Initial Urban Map calculée à partir de la donnée CLC sur le territoire du PNR des Bauges

### 2.2.1.3.3 Slope Map et Hillshade

Le logiciel cherche à générer une carte du relief et un fond de carte.

Ces cartes peuvent être générées à partir de n'importe quel Modèle numérique de terrain (MNT) et, par défaut, le logiciel utilise cette même source pour les générer toutes les deux.

Ces cartes sont générées depuis des fichiers raster à partir de sources diverses :

- Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (format \*.hgt)
- IGN data
- EPSG given.

Ces sources doivent utiliser une projection en Lambert 93 pour être assimilées par le logiciel.

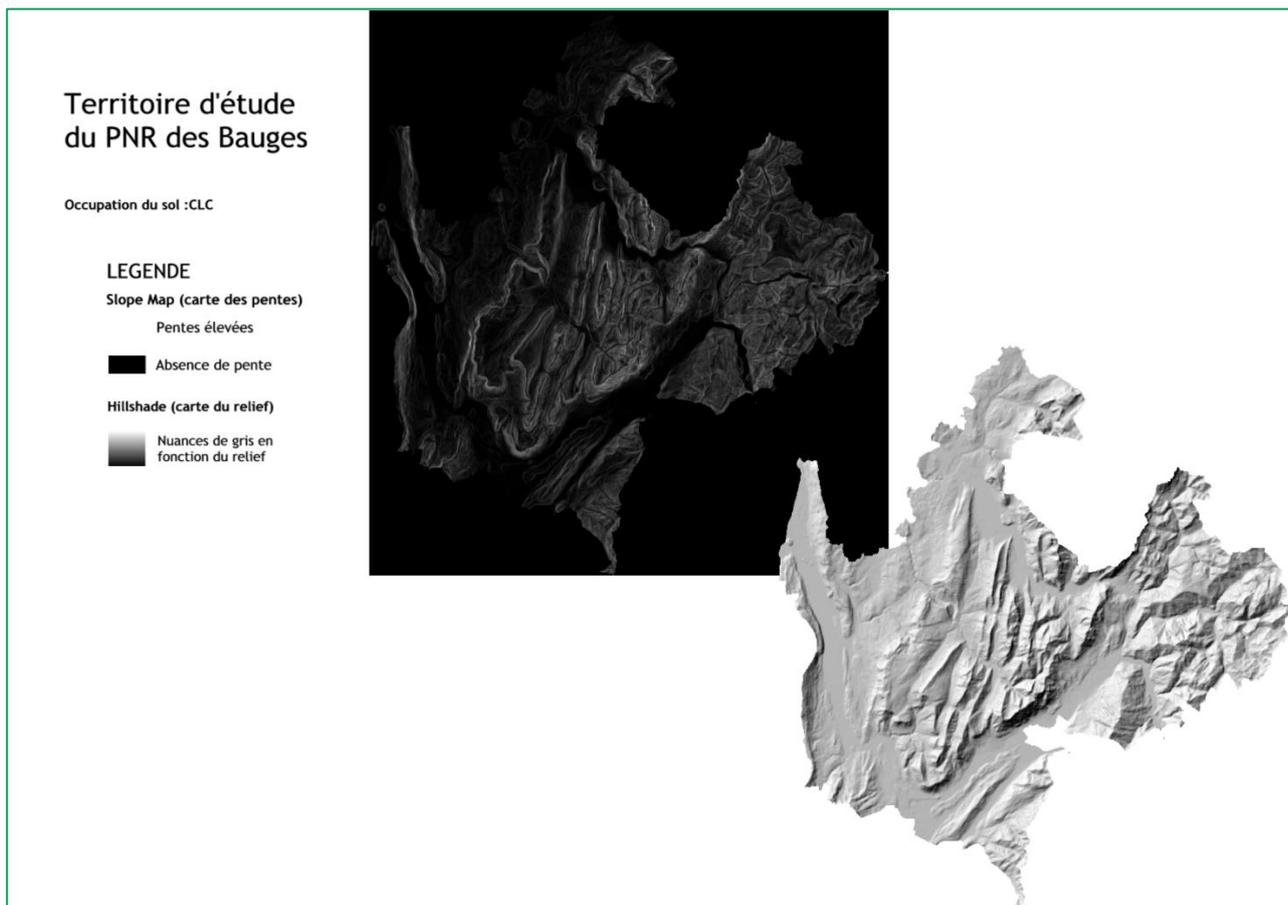


Figure 5 : Slope map (en haut) et Hillshade (en bas) calculées à partir de la donnée EU-DEM sur le territoire du PNR des Bauges

Quelques subtilités :

- Un fichier \*.hgt, même non issu de SRTM, peut être reconnu en sélectionnant la première option.
- La source EPSG given permet d'intégrer n'importe quel fichier raster et n'importe quel MNT.
- Il est possible de laisser le fond de carte vide (option Blank).

#### 2.2.1.3.4 Roads Map

Intitulée carte des routes, cette carte est notamment utilisée par FORESIGHT pour modéliser de l'urbanisation linéaire. Le type de réseau (principal, secondaire, etc.) que l'on souhaite intégrer à cette carte est laissé au choix de l'utilisateur et doit nous interroger sur l'influence réelle du réseau sur l'étalement urbain et en particulier l'étalement urbain linéaire.

Pour construire la carte des routes, le logiciel prévoit par défaut de traiter la donnée OpenStreetMap (OSM). Les données OSM sont disponibles pour chaque région sur le serveur de téléchargement gratuit de Geofabrik<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> <http://download.geofabrik.de/>

### Attention

Il semblerait que la table d'attribut d'OSM ait évolué depuis la conception du logiciel FORESIGHT et la donnée la plus récente n'est alors plus reconnue par FORESIGHT. Pour contourner ce problème, il faut que la classification des routes (autoroutes, réseau primaire, secondaire, etc.) soit affichée dans une colonne intitulée TYPE et il suffit pour cela de renommer la colonne intitulée désormais FCLASSE.

Pour construire cette carte, FORESIGHT permet de sélectionner les principaux axes (*main roads*) tels que *Motorway*, *Trunk* et *Primary* ou, pour les compléter, les routes secondaires (*Secondary*) et/ou tertiaires (*Tertiary*). Il est également possible à l'utilisateur de faire sa propre sélection parmi les différents types d'axes.

Pour construire cette carte à partir de toute autre source, il est nécessaire, au préalable, de créer une couche vectorielle (uniquement des lignes) ayant un champ numérique à deux valeurs, 0 ou 1 où les valeurs 1 représentent le réseau routier que l'on souhaite prendre en compte.

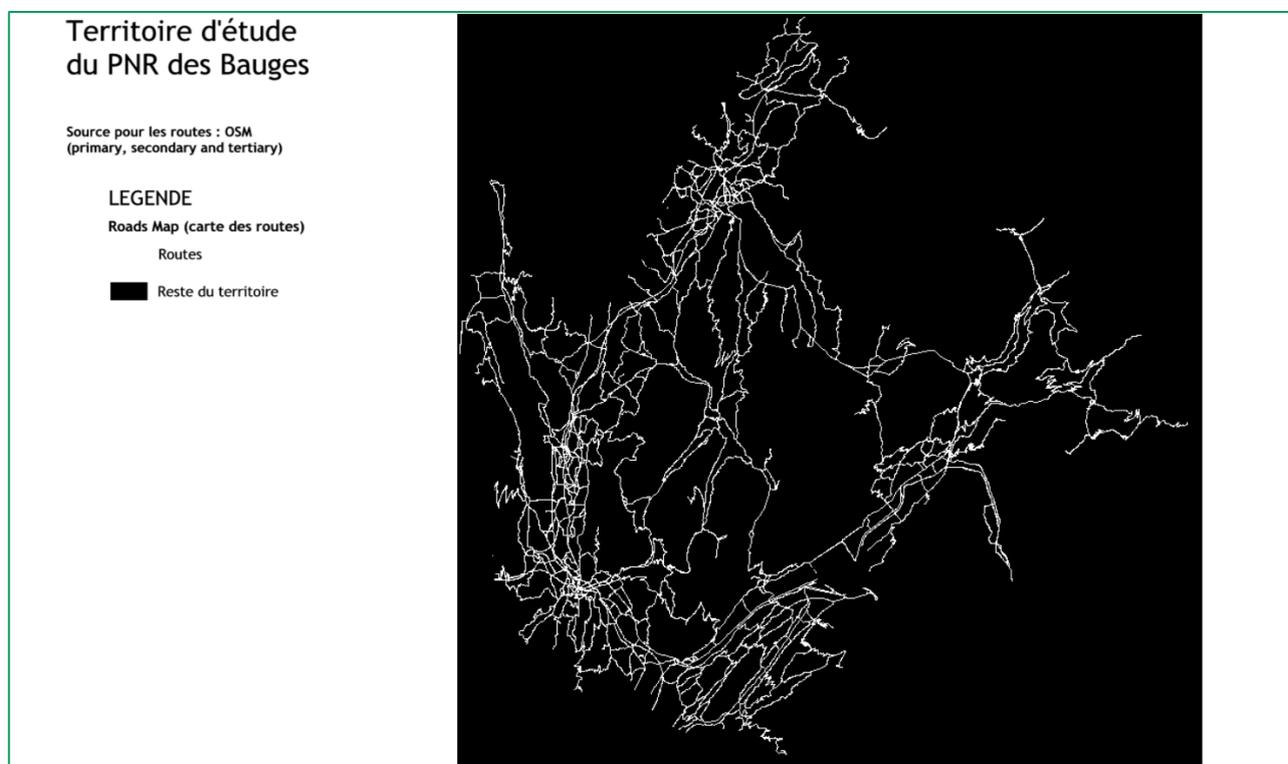


Figure 6 : Roads map (carte des routes) calculée à partir de la donnée OSM (routes du réseau primary, secondary et tertiary) sur le territoire d'étude du PNR des Bauges

#### 2.2.1.3.5 Excluded Map

La carte d'exclusion doit être conçue comme étant la carte des secteurs sur lesquels FORESIGHT ne pourra pas créer de nouveaux pixels d'urbanisation. Elle peut être utilisée notamment pour délimiter le territoire d'étude, donc la zone en dehors de laquelle aucune urbanisation n'est possible, ou les zones en eau ou encore tout autre type de zonage spécifique comme les zones inondables ou un zonage de protection si l'on considère que celui-ci est suffisamment restrictif pour exclure toute urbanisation sur toute la durée de la modélisation, etc.

Cette carte est générée en superposant autant de couche que souhaité. Plusieurs fichiers vectoriels (uniquement des polygones) peuvent être ajoutés à la liste *Excluded*. Le logiciel prévoit également un mode *Inverse of excluded* qui peut être utilisé notamment pour restreindre la modélisation au seul territoire d'étude. Attention cependant, puisqu'il n'est pas possible de combiner à partir de FORESIGHT ces deux modes. Il est conseillé et possible de préparer au préalable une couche unique comportant toutes les zones que l'on souhaite exclure de la modélisation.

#### 2.2.1.3.6 Attractiveness Map

Dernière carte de l'onglet pre-processing, la carte d'attractivité fournit au logiciel une information probabiliste qui permet d'influer sur la génération de nouveaux pixels d'urbanisation. FORESIGHT dispose d'un module spécifique permettant de créer cette carte à partir d'une méthode générique (cf. ci-dessous).

L'utilisateur peut produire cette carte d'attractivité par ses propres moyens (format \*.tif) et l'intégrer ensuite via ce module de pré-traitement. Il suffit pour cela que le raster produit soit codé en nuance de gris avec des valeurs entières comprises entre 0 (exclue) et 100 (maximum d'attractivité).

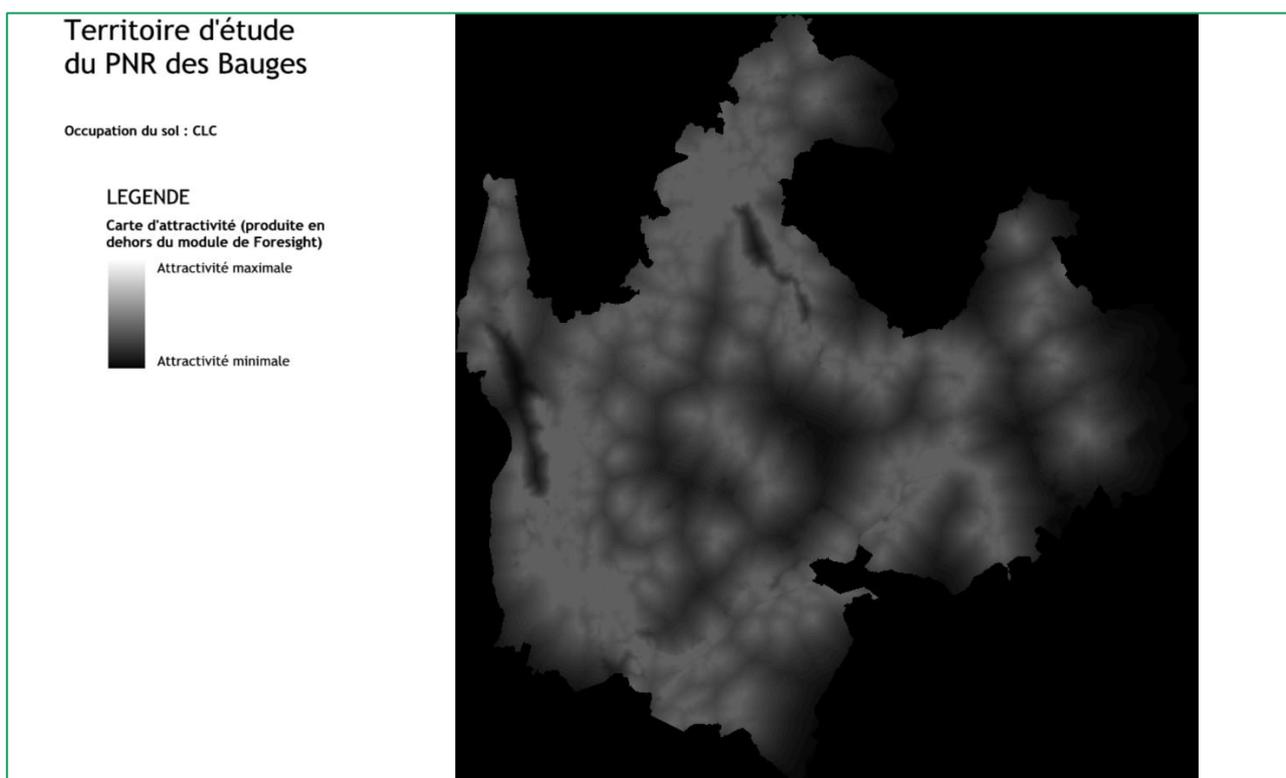


Figure 7 : Carte d'attractivité produite à partir de la donnée CLC pour le scénario stratégique et sur le territoire du PNR des Bauges

#### Attention

Nous avons expérimenté cette possibilité mais qu'à ce jour nous n'avons pas réussi à faire reconnaître notre carte d'attractivité par le logiciel FORESIGHT<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> À la suite de nouveaux tests, il a été possible d'intégrer une de nos cartes d'attractivité au sein de FORESIGHT. L'intégration par l'intermédiaire de l'onglet *Pre-processing* n'a définitivement pas fonctionné. Il a été, en revanche, possible de générer directement le fichier \*.gif d'une de nos cartes d'attractivité via ArcGIS (en faisant en sorte que la résolution et l'emprise soient strictement

### 2.2.1.4 Attractiveness generation

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 un niveau du « coût » de l'urbanisation en tout point du territoire.

Figure 8 : Interface de FORESIGHT

Dans FORESIGHT, le module, permettant d'établir la carte d'attractivité, prend en compte :

- L'occupation du sol (sources : Corine Land Cover ou Urban Atlas) : pour chaque classe d'occupation du sol un coefficient de friction peut être défini.
  - Inverse de la notion d'attractivité, le coefficient de friction essaie de traduire la notion de « coût » évoquée ci-dessus, autrement dit la « résistance » d'un type d'occupation du sol à l'implantation de l'urbanisation ;
- Le réseau routier (source : OpenStreetMap) : 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 centres : le module peut prendre en compte un réseau de points ou de polygones comme point de départ pour évaluer le coût de l'urbanisation de tous les pixels du territoire.

Le coût de traversée de chaque type d'utilisation du sol et de chaque type de route peut être défini. N'importe quelle valeur peut être donnée de 0 (aucun coût pour traverser le pixel) à 255. Les valeurs égales ou supérieures à 255 et les valeurs négatives sont traitées comme un domaine inaccessible. Il est à noter que la génération d'attractivité depuis ce module implique une procédure spécifique qui vise à détecter les surfaces exclues pour en faire des frontières naturelles.

---

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.

Pour produire cette carte, le module utilise les mêmes sources mobilisées au niveau de l'onglet *Pre-processing* : l'Urban Atlas et les données Corine Land Cover pour la carte d'occupation du sol, OpenStreetMap pour les routes et un fichier shapefile fourni par l'utilisateur pour la carte des centres. Chaque pixel correspondant à un centre aura une valeur de déplacement égale à 0 et donc une attractivité égale à 100 %. Des valeurs par défaut sont proposées (mode par défaut) pour définir le coût d'un pixel de route ou d'occupation du sol. En fonction de la source de données choisie, un mode avancé permet de définir manuellement le coût de traversée de chaque pixel de route et d'utilisation du sol disponible (liste courte ou liste complète).

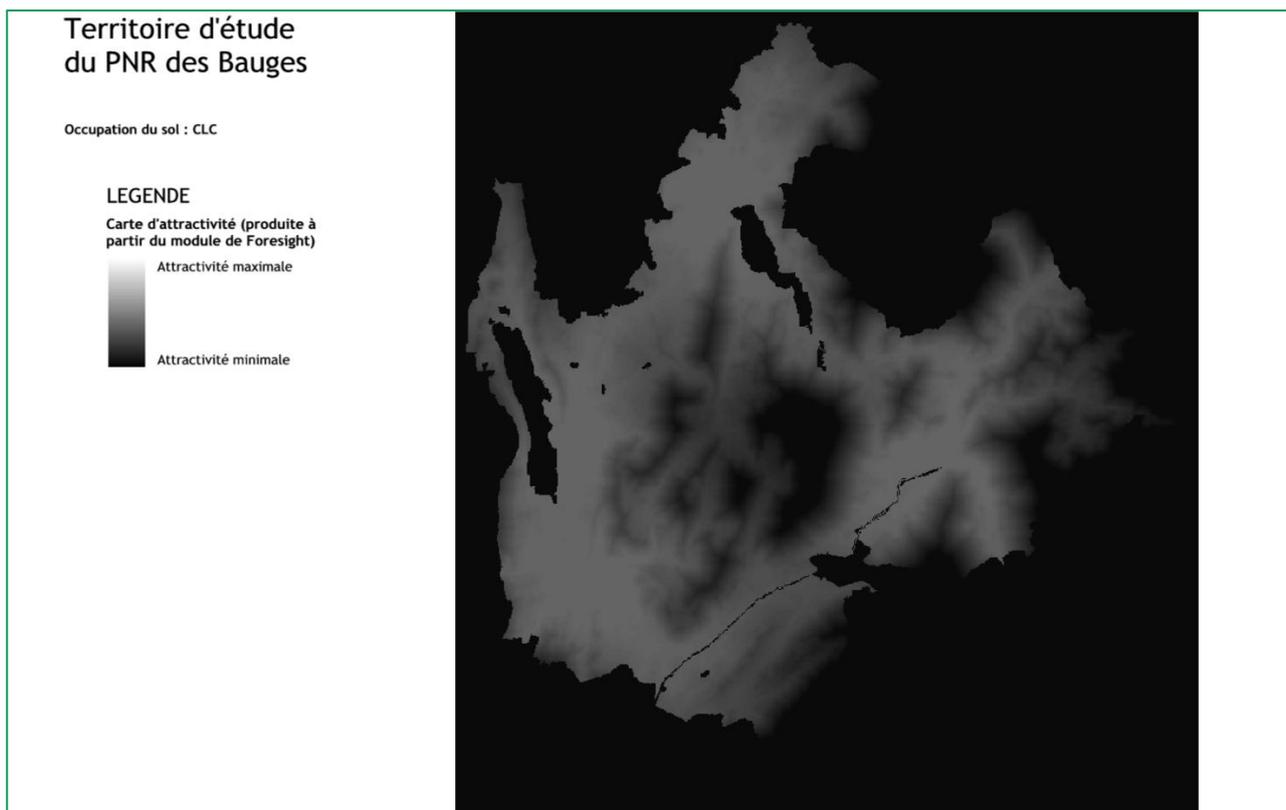


Figure 9 : Carte d'attractivité produite à partir du module dédié de Foresight (occupation du sol à partir de CLC, routes à partir d'OSM) pour le scénario stratégique et sur le territoire d'étude du PNR des Bauges

D'un point de vue théorique, la carte des coûts simulés présente des valeurs allant de 0 (centres) jusqu'à des valeurs potentiellement illimitées en fonction de la taille de la zone d'étude. En revanche, la carte d'attractivité ne contient que des valeurs allant de 0 (attractivité nulle) à 100 (attractivité maximale). Pour générer à partir de la carte des coûts, la carte d'attractivité, le logiciel dispose de trois paramètres complémentaires (*Set global parameters*) ;

- *Minimal attractiveness* : valeur fixée par l'utilisateur, l'attractivité du pixel le plus éloigné est réglé sur la valeur minimale d'attractivité.
- *Quantile to min.* : fixe un pourcentage de pixels dont les valeurs sont les plus faibles pour l'ensemble de la carte des coûts pour lesquels la valeur d'attractivité sera fixée au niveau de l'attractivité minimum (*minimal attractiveness*)
- *Quantile to max.* : fixe un pourcentage de pixels dont les valeurs sont les plus élevées pour l'ensemble de la carte des coûts pour lesquels la valeur d'attractivité sera fixée au niveau maximum, soit 100 % d'attractivité.

Pour l'ensemble des pixels dont la valeur n'est pas directement définie par les paramètres ci-dessus, ces derniers ont une valeur d'attractivité située entre l'attractivité minimum et 100 qui répartit les pixels selon une fonction linéaire (schéma explicatif au sein du guide d'utilisateur).

#### 2.2.1.5 Initial settings

Une fois que les données prêtes à alimenter le modèle ont été générées, que ce soit via les onglets *Pre-processing* ou *Attractiveness generation* et disponible au bon format dans le dossier *Input* au sein de notre répertoire de travail, alors nous pouvons confirmer leur disponibilité au sein de l'onglet *Initial Settings*. Cet onglet a pour but de définir les données cartographiques d'entrée à utiliser pour réaliser une simulation et permet d'avoir un aperçu des différentes cartes mobilisées (*Preview*).

Il est tout à fait possible d'aller chercher les données cartographiques dans d'autres dossiers si l'on souhaite par exemple ré-exploiter des informations déjà produites par ailleurs. Il faut savoir que dans le cadre de la simulation, toutes les données d'entrées seront copiées à nouveau dans le dossier *Input* du répertoire d'étude, et ce sans écraser les données déjà présentes produites via les précédents onglets. On trouvera ensuite au sein du dossier *Output* toutes les données simulées.

#### 2.2.1.6 Scenario parameters et Land management strategies

FORESIGHT est conçu comme un outil d'aide à la représentation spatiale d'une démarche de prospective. Pour cela, le logiciel ne dispose pas, à la différence de l'outil SLEUTH dont il est issu, de fonctionnement tendanciel ou automatique. Dans l'onglet *Scenario parameters*, c'est l'utilisateur qui fixe :

- La durée du scénario ;
- L'enveloppe de consommation d'espace (en hectares) ;
- Les formes de l'étalement urbain qui sont entièrement déterminées par 4 « pattern »<sup>44</sup> (données numériques dont la somme doit être de 100 %) :
  - Phénomène d'urbanisation spontanée,
  - Phénomène de création de nouvelles centralités / concentration à partir desquelles un nouveau phénomène d'étalement urbain peut débuter,
  - Phénomène d'urbanisation linéaire,
  - Phénomène d'urbanisation de proximité, en continuité de l'urbanisation existante.

---

<sup>44</sup> Le guide d'utilisateur de FORESIGHT fournit une définition détaillée de chacun de ces paramètres

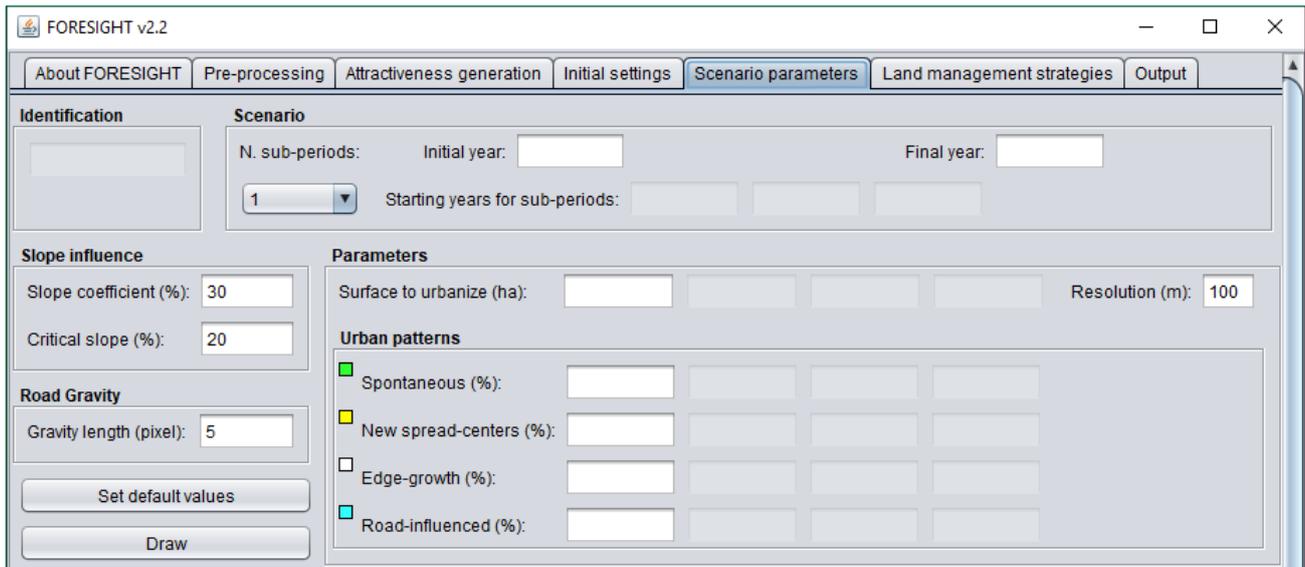


Figure 10 : Interface de FORESIGHT

L'utilisateur peut également définir jusqu'à trois sous-périodes au sein de la modélisation, ces sous-périodes permettant de prendre en compte une évolution dans le temps des formes de l'étalement urbain ainsi que de l'enveloppe de consommation d'espace.

Veuillez noter que la résolution doit être définie ici dans le cas où les données d'entrée ont été préparées précédemment avec une résolution différente de celle que l'on souhaite pour la modélisation. Par défaut, le logiciel prévoit une maille de 100 m de côté (soit un pixel de 1 ha). N'importe quelle valeur entière est acceptée par le logiciel mais, selon le guide d'utilisateur, seules des valeurs comprises entre 50 m et 200 m sont réellement acceptables d'un point de vue théorique, se situer en deçà étant largement discutable. Pour ces raisons, nous avons retenu la maille de modélisation par défaut, à 100 mètres côtés.

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 (pour plus de précision, se référer au manuel d'utilisateur de FORESIGHT). Pour ces paramètres, FORESIGHT fixe des valeurs par défaut que nous n'avons pas modifiées dans le cadre de notre expérimentation.

### Pour aller plus loin : land management strategies

FORESIGHT permet, dans l'onglet *Land management strategies*, de modifier certaines données cartographiques du scénario. En effet, lorsque l'on cherche à établir un scénario d'évolution du territoire, il peut être intéressant de mettre à jour certaines informations géographiques comme, par exemple, la carte des routes pour la prise en compte d'une nouvelle infrastructure et la carte d'attractivité du territoire pour la prise en compte de cette même modification d'infrastructure. Dans cet onglet l'utilisateur est libre de mettre à jour la carte des routes, la carte d'exclusion et la carte d'attractivité pour une prise en compte dans la modélisation à la date qu'il souhaite et a priori autant de fois que nécessaire.

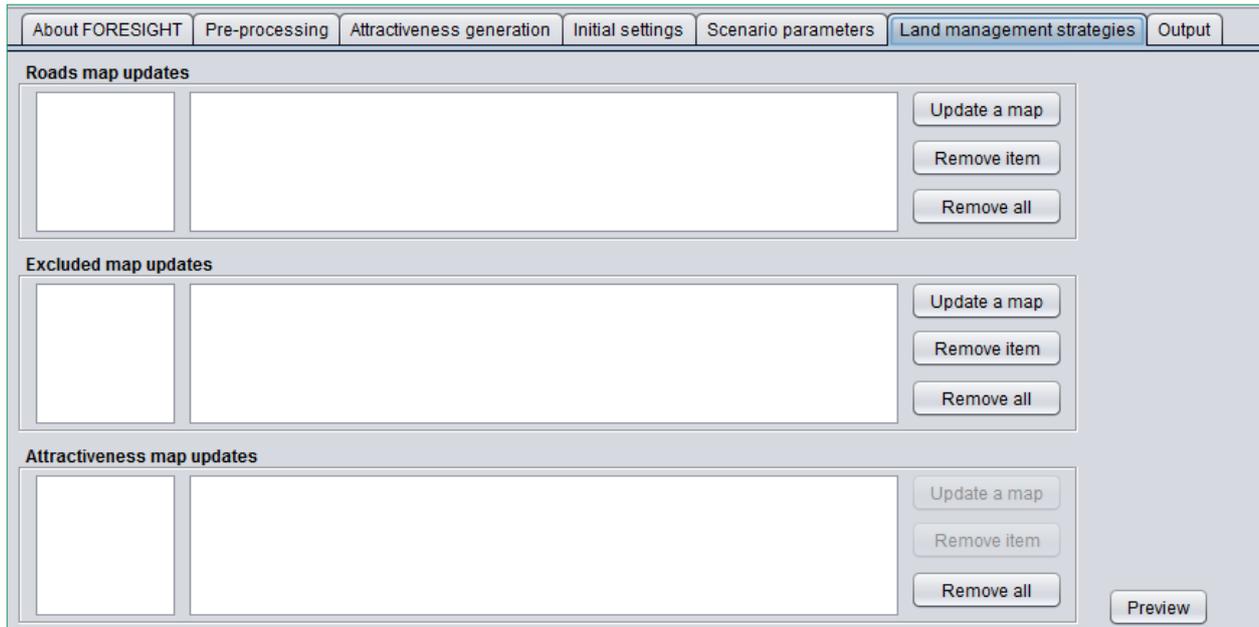


Figure 11: Interface de FORESIGHT

Pour être intégrées par FORESIGHT, ces cartes doivent être formatées sur le modèle des données d'entrées (\*.GIF). Si l'on procède à une mise à jour de ces données sous SIG, il est alors tout à fait possible d'utiliser l'onglet *Pre-processing* pour préparer les images \*.GIF pour les intégrer ici. Le logiciel créera alors, dans le dossier *Input*, une copie de ces informations formatées pour être prise en compte par le module de modélisation. Simple remarque complémentaire, l'information mise à jour doit correspondre à la couche complète mise à jour, c'est-à-dire que pour la mise à jour de la carte des routes, il faut bien soumettre au logiciel une carte de l'ensemble du réseau routier auquel on a ajouté la nouvelle infrastructure à prendre en compte.

Dans le cadre de notre expérimentation de FORESIGHT, nous n'avons pas exploité les possibilités offertes dans l'onglet *Land management strategies*.

### 2.2.1.7 Données de sortie (Output)

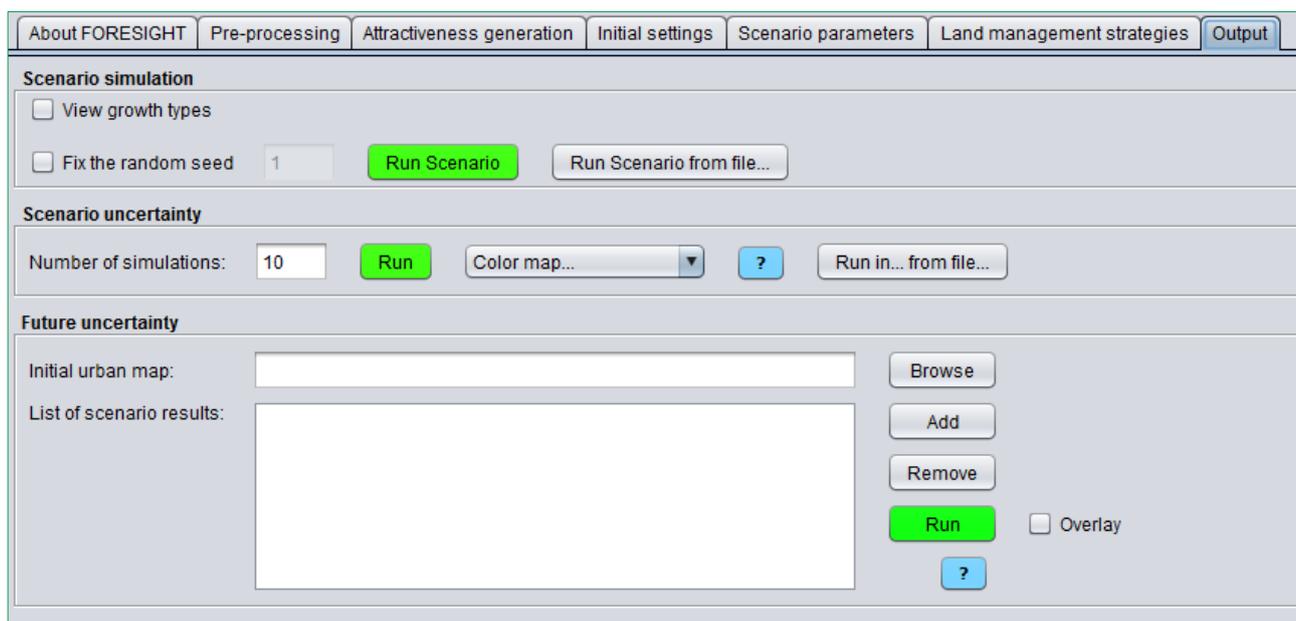


Figure 12 : Interface de FORESIGHT

Pour un scénario donné, FORESIGHT réalise (*Run scenario*), sur toute la période de la modélisation, une carte pour chaque année faisant apparaître à chaque fois les nouveaux pixels d'urbanisation. Le logiciel fournit également une image de synthèse du scénario faisant apparaître l'ensemble des pixels urbanisés sur toute la durée du scénario ainsi qu'une carte cumulant l'ensemble de l'urbanisation (initiale + simulée).

En cochant l'option *View growth types*, le logiciel génère, en plus, des cartes permettant de différencier pour chaque année les pixels créés à partir des différents *Patterns* fixés dans l'onglet *Scenario parameters*.

Par défaut, chaque modélisation est différente de la précédente (simulation aléatoire). L'option *Fix the random seed*, permet d'exécuter toujours la même simulation<sup>5</sup>.

Dans le cadre *Scenario uncertainty*, il est possible de réaliser à la chaîne plusieurs modélisations à partir d'un même scénario. Le résultat, disponible dans un nouveau dossier au sein du répertoire de travail (*Future uncertainty*), propose autant de cartes que de modélisations demandées avec pour chacune la représentation de l'urbanisation cumulée (initiale + simulée).

<sup>5</sup> Plus de précisions sont fournies dans le manuel d'utilisateur de FORESIGHT

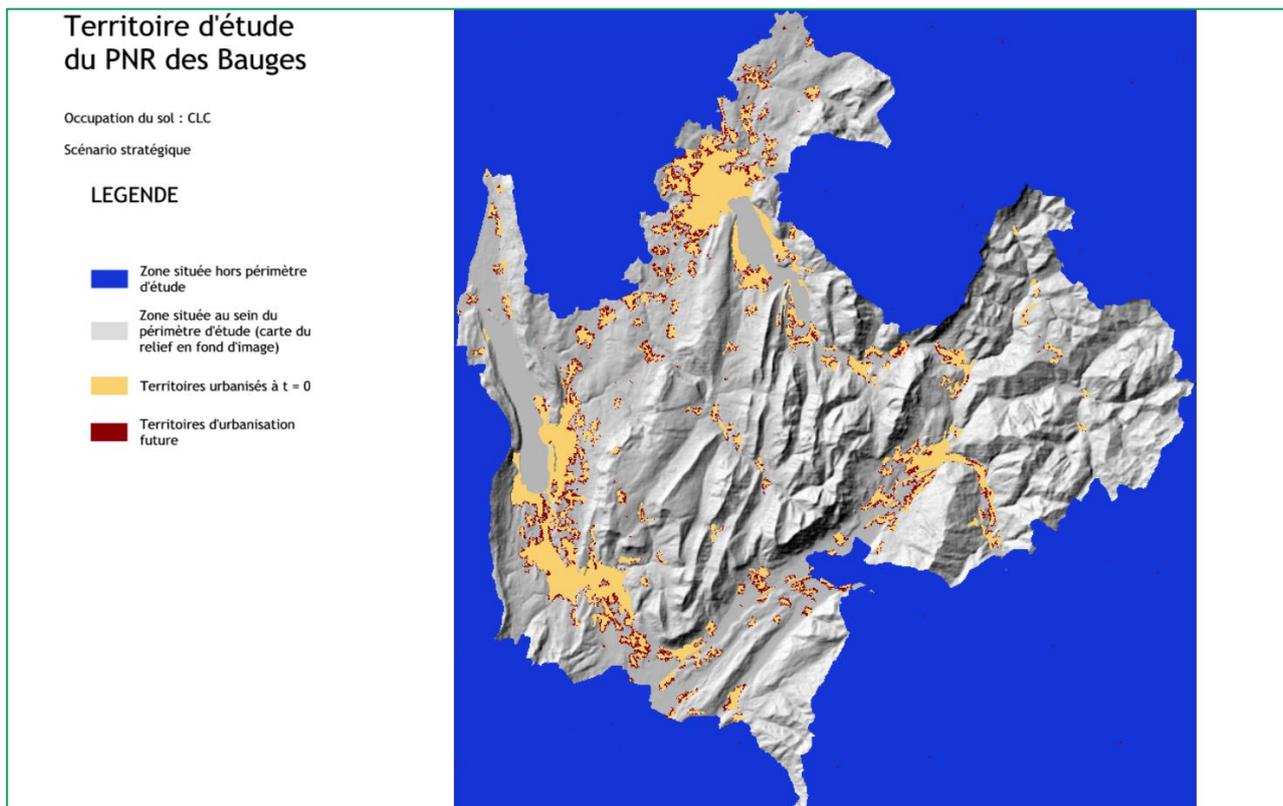


Figure 13 : Modélisation jusqu'en 2050 de l'étalement urbain sur le territoire d'étude du PNR des Bauges (scénario stratégique, occupation du sol CLC)

Il est important ici, avant de parler des fonctionnalités du dernier cadre *Future uncertainty*, de souligner et de rappeler que le logiciel FORESIGHT génère un étalement urbain influencé par tous les paramètres que nous lui avons donnés mais néanmoins créé de manière aléatoire. Il n'y a pas forcément de réponse aux questions suivantes : Pourquoi tel pixel a été urbanisé sur le territoire ? Pourquoi celui-là et pas son voisin ?

Afin d'éviter cette analyse « pixel par pixel », le cadre *Future uncertainty* permet d'avoir une approche plus probabiliste de la modélisation. Pour utiliser cette option, il faut fournir plusieurs données d'entrées :

- La carte de l'urbanisation initiale : au format \*.gif, cette image est celle que l'on peut retrouver dans les dossiers *Input*, *Output* ou *Future uncertainty*
- Plusieurs cartes de l'urbanisation cumulée pour un ou plusieurs scénarios : au format \*.gif, ces cartes sont issues des dossiers *Output* (*cumulate\_urban.gif*) ou *Future uncertainty* (*cumulate\_0.gif*, *cumulate\_1.gif*, etc.).

À partir de ces 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. Comme indiqué ci-dessus, il est intéressant de souligner que 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.

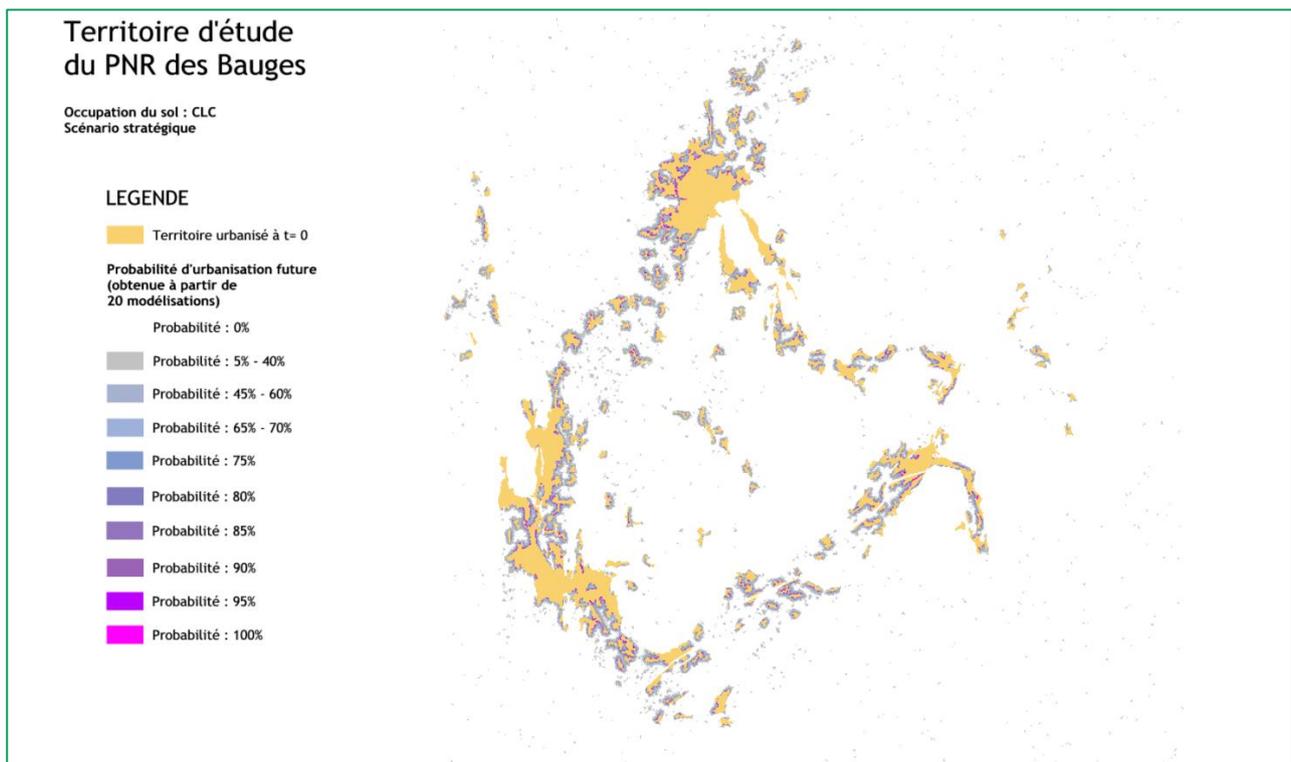


Figure 14 : Probabilité d'urbanisation obtenue à partir de 20 modélisations pour le territoire d'étude du PNR des Bauges (scénario stratégique, occupation du sol CLC)

## 2.2.2 Land Use Cellular Automata Simulation/LUCSIM

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

Tableau 2 : caractéristiques et objectifs de LUCSIM

Extrait de l'aide utilisateur de LUCSIM :

- « Le projet a pour but de fournir aux utilisateurs un outil permettant la simulation de l'évolution urbaine par automate cellulaire, pour comprendre les dynamiques spatiales. Ce logiciel est un environnement de développement de simulation d'automates cellulaires. Plus particulièrement, il a été conçu pour simuler le développement urbain à partir d'une image représentant l'occupation du sol (bâtiment, forêt, route, etc.) et de règles de transition des différents états d'occupation du sol. »

### 2.2.2.1 Principe de fonctionnement

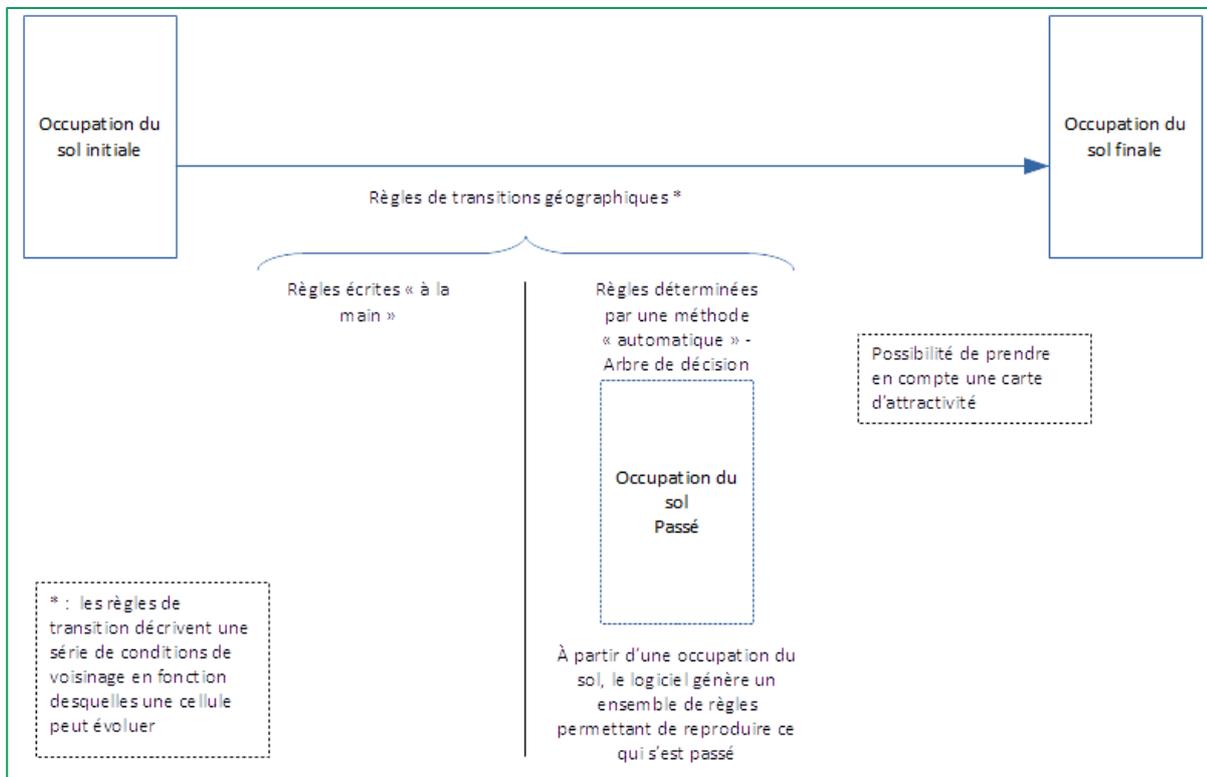


Figure 15 : Schéma de fonctionnement du logiciel LUCSIM

### 2.2.2.2 Interface

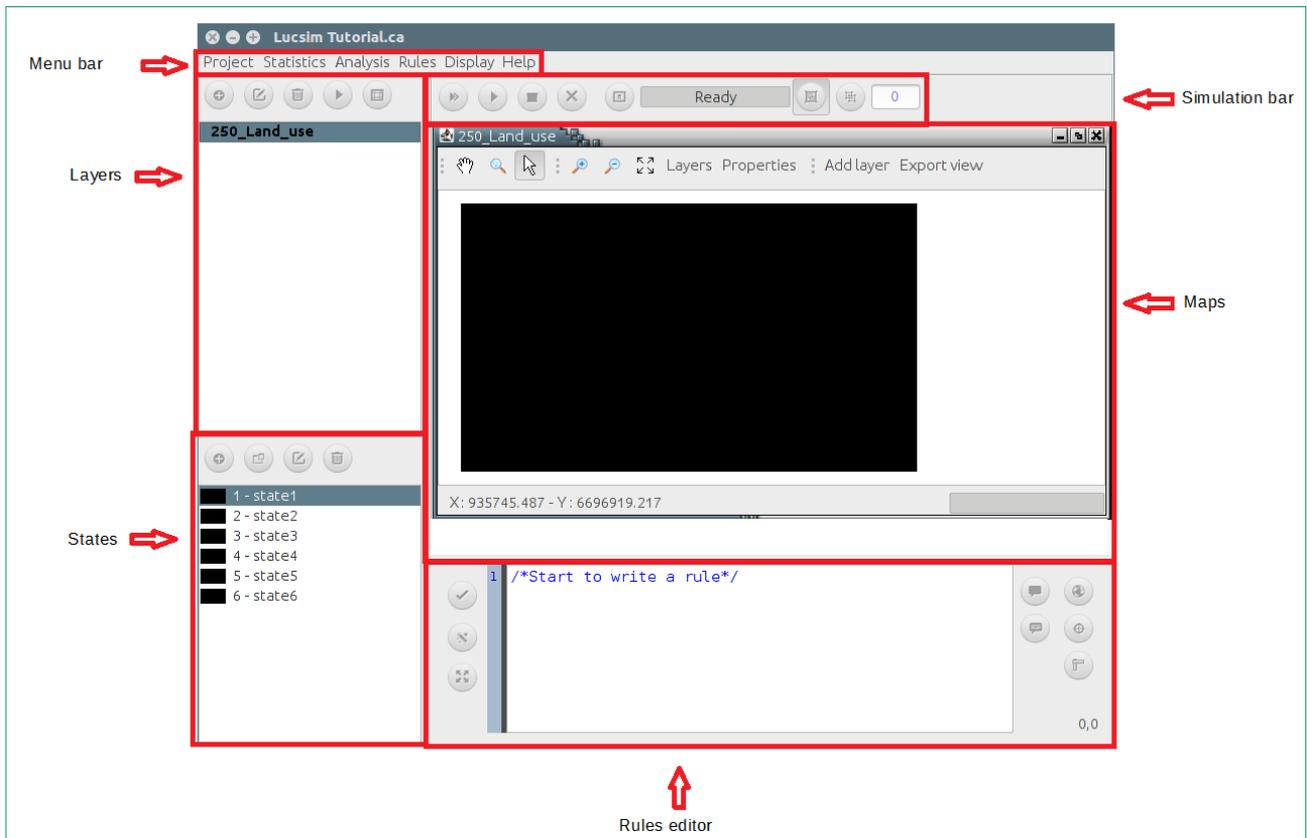


Figure 16 : Interface de LUCSIM

Codé en java, LUCSIM ne fonctionne, pour l'instant, qu'avec la version 8 de *Java Runtime Environment* (JRE).

### 2.2.2.3 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.

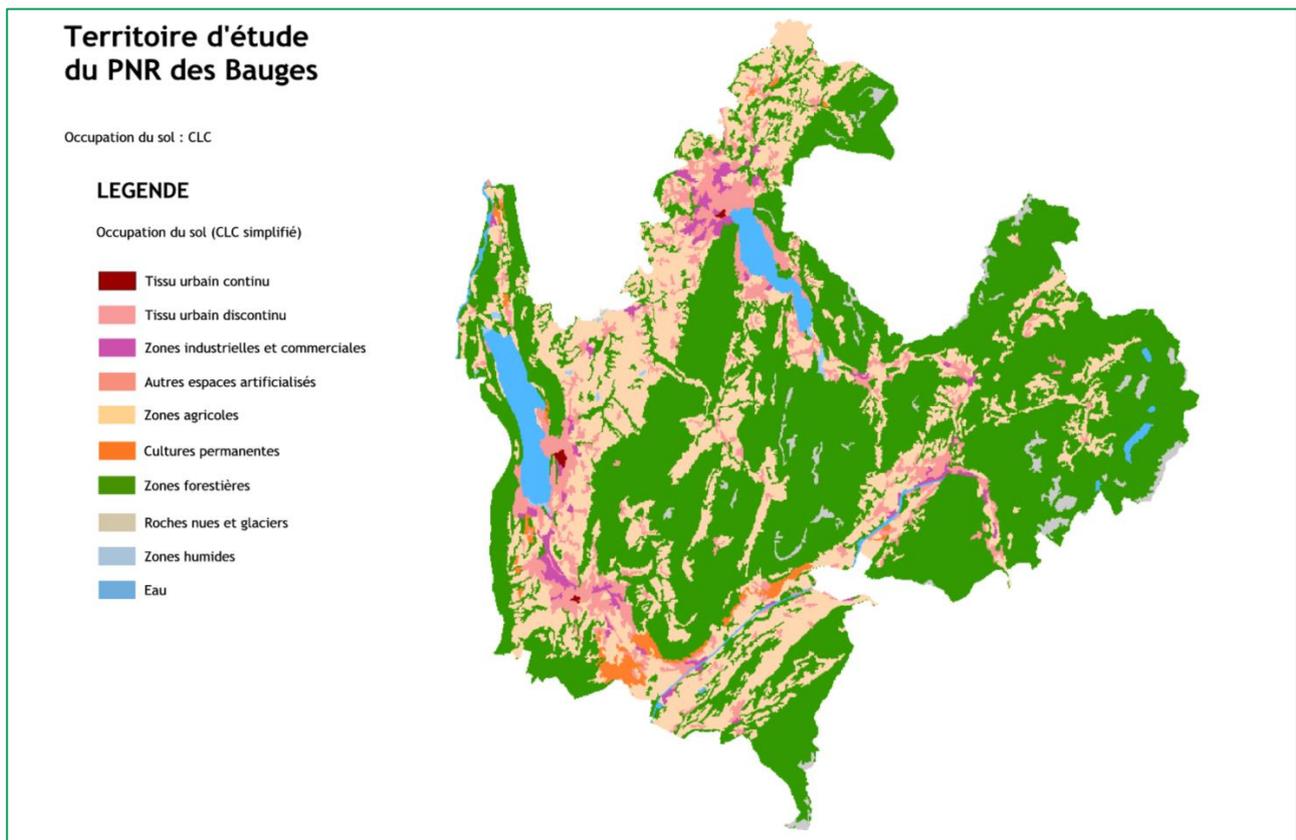


Figure 17 : Occupation du sol (CLC simplifié) en 2012 sur le territoire d'étude du PNR des Bauges

Pour pouvoir créer un projet dans LUCSIM, il y a différents types de données d'entrées que l'on peut utiliser. Elles n'ont pas toutes les mêmes informations à apporter au logiciel.

LUCSIM distingue des couches raster qu'il va utiliser pour l'automate cellulaire, couches qui vont lui servir à faire les modélisations et dénommées « *State layer* », des autres couches raster qui peuvent lui servir, par exemple, à calibrer les règles de transition. La première carte intégrée est d'office intégrée comme étant une *State layer* et servira de point de départ pour la modélisation. Lors de l'intégration d'une nouvelle couche raster au logiciel, LUCSIM demande donc à l'utilisateur s'il s'agit ou non d'une *State layer*.

Les images \*.tif peuvent être ajoutées au projet en cliquant sur *New project* depuis l'interface initiale ou sur *Add layer to the list* depuis le cadre *Layers*. Pour être assimilées par le logiciel chaque pixel de l'image doit être caractérisé par un entier naturel compris entre 0 et 255. Dans les couches raster, la valeur 255 est comprise comme du NoData.

Lorsque l'on souhaite intégrer une deuxième *State layer*, il faut veiller à :

- La valeur des pixels de chaque couche : il faut que les pixels soient codés de manière identique à la carte initiale, pour que le logiciel puisse identifier les différents types d'occupation du sol ;
- L'alignement de deux couches : il faut que les couches soient alignées, c'est-à-dire que chacun des pixels d'une couche soit superposable avec ceux de la deuxième couche.

Attention, si une occupation du sol existe au sein d'un des deux millésimes mais pas dans l'autre, alors, pour le logiciel, cela signifie qu'il s'agit d'une apparition (ou disparition).

Une fois intégrée, l'image apparaît dans le cadre *Maps* ainsi que toutes les catégories d'occupation du sol dans le cadre *States*. Il est alors possible de renommer ces différentes catégories et de modifier leurs couleurs (double-clic ou *Modify state*).

Par ailleurs, il est possible d'ajouter de nouvelles images toujours au format \*.tif. Ce sont des couches qui ne contiennent pas les différentes classes d'occupation du sol, mais d'autres types d'informations comme une carte d'exclusion ou bien une *Suitability map* (carte d'attractivité) ou d'autres informations comme le réseau routier (version raster). Ces couches peuvent notamment être utilisées pour calibrer les règles de transitions mais pas pour exécuter des simulations.

Nous avons essayé d'intégrer nos propres cartes d'attractivité (*Suitability Map*) au logiciel. Pour être exploitable la *Suitability map* devrait, a priori, être calibrée sur la carte produite par le modèle de potentiel (*Potential model*, voir ci-dessous), c'est-à-dire une carte pour laquelle les valeurs les plus élevées (sans limite a priori) sont les plus attractives et inversement (zéro correspond à un pixel sans aucune attractivité).

Cette carte d'attractivité peut être intégrée comme couche supplémentaire au sein de l'arbre de décision, ce qui peut avoir un impact sur le calcul des règles de transition ou peut être appliquée comme contrainte à la modélisation via le menu *Rules/Set constraints*. Cette contrainte ajoute une condition supplémentaire dans toutes les règles de transition relative à la valeur minimale au sein de cette carte en dessous de laquelle le logiciel ne pourra donc pas aller modifier l'occupation du sol. Cette valeur minimale est obtenue par échantillonnage.

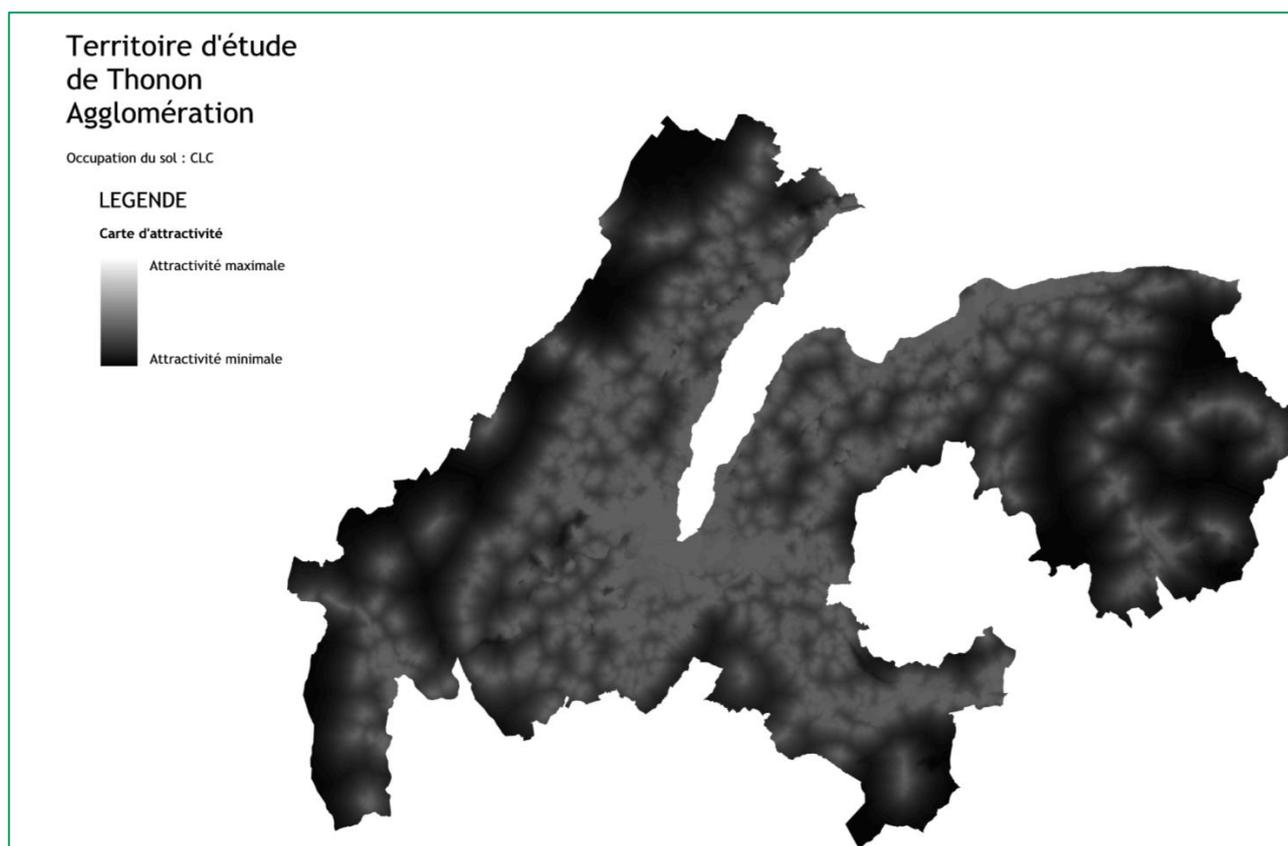


Figure 18 : Carte d'attractivité produite à partir de CLC pour le scénario stratégique sur le territoire de Thonon Agglomération

### Pour aller plus loin

Des fichiers vectoriels (format \*.SHP) peuvent également être ajoutés dans LUCSIM. Ils sont alors utilisés pour afficher des informations géographiques supplémentaires sur les couches du projet. Néanmoins, aucun traitement ne peut être réalisé à partir de ces couches.

Pour ajouter ces couches vectorielles, il faut cliquer sur *Add Layers* depuis la fenêtre *Maps*. Une fois la couche intégrée, il est alors possible d'en modifier l'affichage (symboles, couleurs, etc.) depuis le cadre en haut à gauche nommé *Layers*, en faisant un clic droit.

Cette fonctionnalité n'a pas été testée dans le cadre de notre expérimentation.

## 2.2.2.4 Analyser les informations des différentes couches raster

Il est possible sous LUCSIM de créer des données statistiques à partir des images rasters intégrées. Sous LUCSIM, nous avons plusieurs types d'outils statistiques qui traitent les images rasters :

- Graphique synthétique. Depuis le menu *Display/Graph*, on peut afficher un graphique récapitulatif du nombre de cellules pour chaque état de l'occupation du sol (exemple : camembert, histogramme, etc.). Le graphique peut être exporté au format \*.png ou \*.csv.
- Layer comparison (Matrix comparison). Depuis le menu *Statistics/Layers comparison*, il est possible de réaliser des matrices de comparaison entre les différentes *State layer* intégrées à LUCSIM, voire avec une des images « simulées » par le logiciel. Une matrice de comparaison permet de quantifier les changements intervenus entre deux images de références : pour chaque état d'une première image, la matrice donne le détail des valeurs prises par ces pixels dans une deuxième image qui sert de comparaison. Nous pouvons exporter l'image en format CSV ou copier le contenu du tableau directement au sein d'un tableur.

### Pour aller plus loin

Pour des analyses statistiques plus approfondies, il est possible d'utiliser l'outil *Statistics/Neighborhood extraction* qui a pour objectif d'aider l'utilisateur à obtenir un aperçu du voisinage entourant les cellules qui ont subi une transition spécifique.

Cette fonctionnalité n'a pas été testée dans le cadre de notre expérimentation.

## 2.2.2.5 Contraintes

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 (*Suitability Map*),
- 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 deux dates données.

Ces contraintes sont applicables à la modélisation via le menu *Rules/Set constraints*. À noter, si cette option est activée alors il n'est plus possible de modifier les règles inscrites au sein du cadre *Rules Editor*.

### 2.2.2.5.1 Potential model

Le modèle de potentiel permet d'analyser les possibilités d'expansion d'une utilisation du sol selon les concepts d'interaction spatiale, il équivaut à l'intégration d'une carte d'attractivité. Le calcul d'un modèle de potentiel se fait à partir du menu *Analyse*. L'outil demande à l'utilisateur d'affecter un poids à chaque type d'occupation du sol, les poids les plus élevés correspondant à une attractivité plus importante.

Une fois produit, le modèle de potentiel peut être intégré comme couche supplémentaire au sein de l'arbre de décision, ce qui peut avoir un impact sur le calcul des règles de transition ou peut être appliqué comme contrainte à la modélisation via le menu *Rules/Set constraints*. Cette contrainte ajoute une condition supplémentaire dans toutes les règles de transition relative à la valeur minimale au sein de cette carte en dessous de laquelle le logiciel ne pourra donc pas aller modifier l'occupation du sol. Cette valeur minimale est obtenue par échantillonnage.

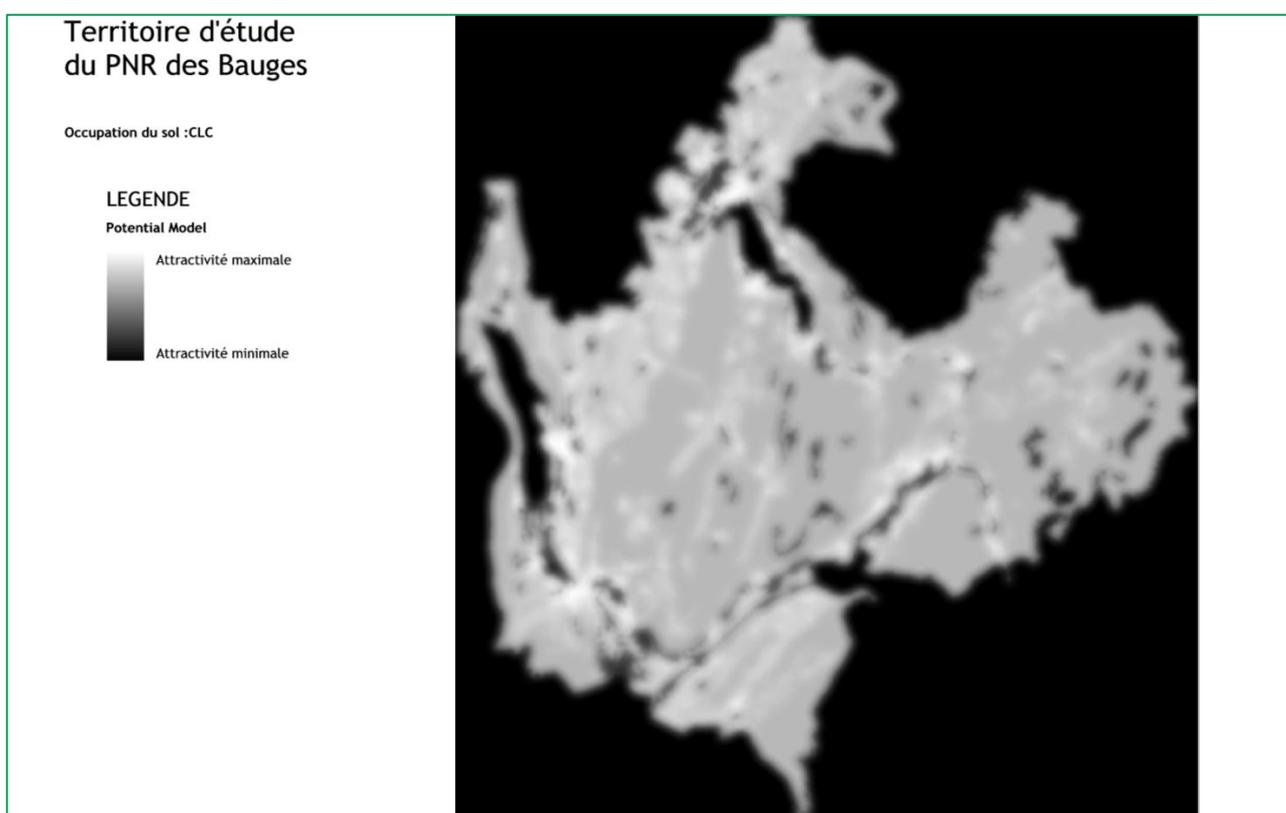


Figure 19 : Modèle de potentiel sur le territoire d'étude du PNR des Bauges

### 2.2.2.5.2 Markov Chains

Les chaînes de Markov sont un moyen de contraindre la simulation sur la quantité de changement pouvant intervenir dans le temps. Appliquée aux règles de transition, la simulation de l'automate cellulaire s'arrête si le nombre de cellules d'un ou plusieurs états prédits par le processus markovien est atteint.

Pour utiliser cette fonction, il faut, outre deux couches distinctes dans le temps de l'occupation du sol, calculer la chaîne de Markov via le menu *Analyse/Markov chains*. Dans la boîte de dialogue, une matrice de transition est automatiquement calculée lorsque les couches *Initial layer* et *Final layer* sont choisies. Cette matrice contient la probabilité de transition (pour une cellule d'utilisation des terres) d'un état à un autre

(une probabilité nulle signifie que la transition est impossible) dans une étape de simulation, telle qu'observée entre la couche initiale et la couche finale.

En utilisant l'option *Matrix power*, il est possible d'élever cette matrice à la puissance souhaitée, traduisant par la même la reconduction, un certain nombre de fois, des changements observés entre les deux couches de référence.

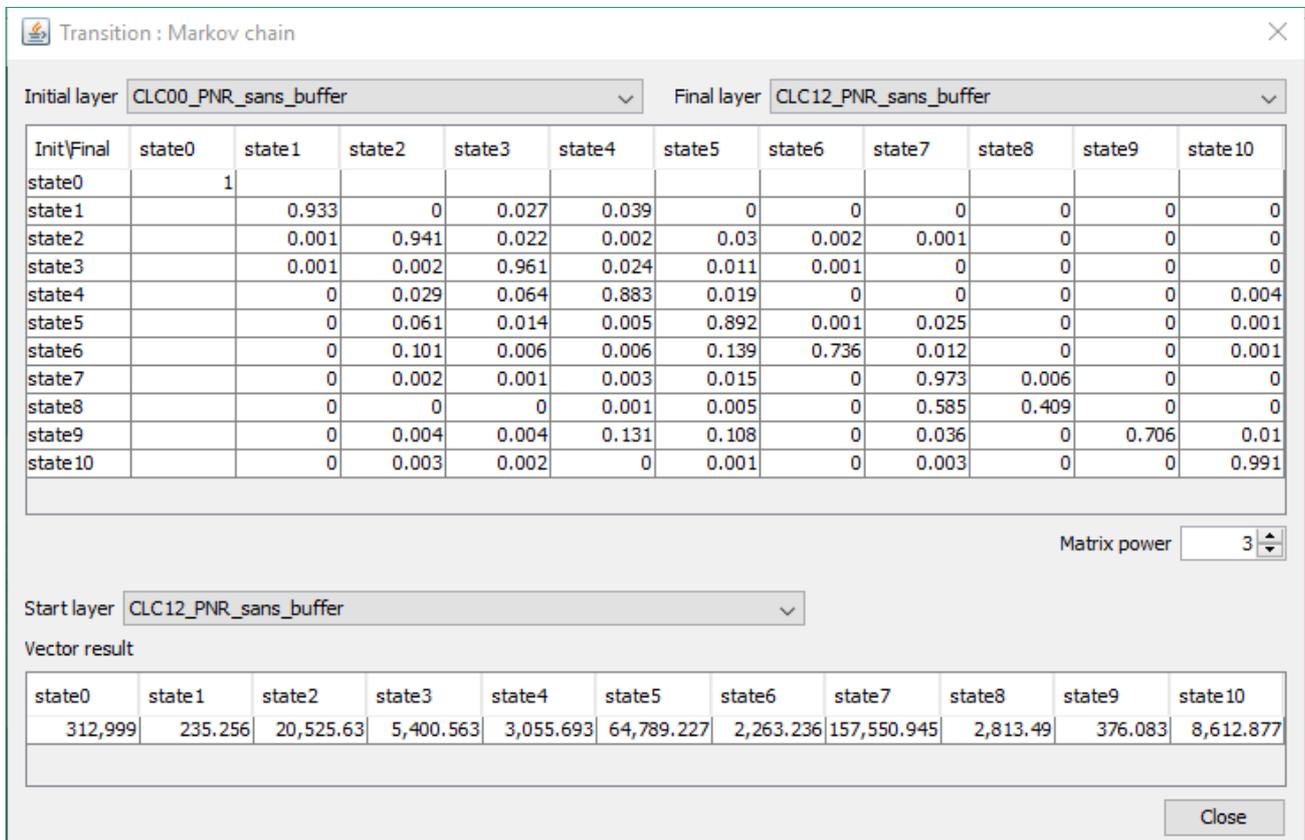


Figure 20 : Interface de LUCSIM

Pour rendre applicable ces probabilités de transition, il faut ensuite les intégrer comme contrainte à la modélisation (menu *Rules/Set constraints*) ce qui rajoute une condition à l'ensemble des règles de transition relative à la quantité maximum de cellule pouvant être atteinte pour un état donné (en utilisant la fonction *nbCell*).

### 2.2.2.6 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. Le logiciel dispose d'un module pour aider à la création de ces règles.

L'édition des règles est basée sur une syntaxe complexe spécialement conçue pour LUCSIM. Fondamentalement, cette syntaxe exige de définir un état de départ et un état d'arrivée, une fonction de transition associée à deux paramètres (une utilisation du sol et une distance en pixels), une condition exprimée en pourcentage d'utilisation du sol ou en nombre de cellules. Pour une règle, plusieurs conditions peuvent être combinées avec des opérateurs logiques (et, ou...)<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Aide du logiciel LUCSIM

Les règles ainsi produites reposent sur des considérations géographiques et s'appliquent de la manière suivante :

- En tout point du territoire, le logiciel va vérifier si une règle peut ou non s'appliquer, c'est-à-dire si un pixel d'un premier type d'occupation du sol peut évoluer vers un second type d'occupation du sol,
- Pour une règle donnée, le logiciel va vérifier chaque condition,
- Chaque condition repose sur la comptabilisation du nombre (ou de la proportion) de pixel d'un type d'occupation du sol à comparer à une valeur donnée (inférieur, inférieur ou égale, égale, supérieur ou égale, supérieur),
- Pour une règle donnée, si toutes les conditions sont remplies alors le pixel évolue.

### Pour aller plus loin

Les règles de transition peuvent être écrites à la main dans le cadre *Rules editor* avec l'appui ou non de l'outil *Rules generator* disponible dans ce cadre ou générées de manière « automatique » à l'aide d'un arbre de décision depuis le menu *Rules/Creation/Decision tree*.

Cette fonctionnalité n'a pas été testée dans le cadre de notre expérimentation du logiciel LUCSIM.

#### 2.2.2.6.1 Arbre de décision

Le logiciel 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. Les règles ainsi créées sont ensuite modifiables à la main.

Pour pouvoir utiliser l'arbre de décision, il est nécessaire de disposer de 2 cartes pour déterminer l'évolution passée de l'occupation du sol et extrapoler son devenir. Le menu *Rules/Creation/Decision tree* fait apparaître une boîte de dialogue au sein de laquelle il est nécessaire de paramétrer l'arbre de décision avant de lancer son calcul. En sélectionnant *Set Parameters*, nous faisons apparaître la boîte de dialogue ci-dessous.

The screenshot shows the 'Data extraction' dialog box with the following parameters:

- Layers:** First layer: CLC12\_PNR\_sans\_buffer, Second layer: CLC00\_PNR\_sans\_buffer
- Additional layers:** Extract data from: Attractivness\_centroide\_tendanciel\_PNR\_
- State:** Target state: state0
- Function:** Function to use: hbCellCir, Ring:
- Neighborhood radius:** Start radius: 1, End radius: 10, Step: 1
- Weight:** Weight: 1.0, Radio buttons for 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5

Figure 21 : Interface de LUCSIM

De gauche à droite et de haut en bas :

- *Layers* : il faut sélectionner dans la liste déroulante les deux couches de référence, *First Layer* correspond au millésime le plus récent.
- *Additional Layers* : il est possible de sélectionner différentes couches raster qui ne sont pas les couches de référence de l'occupation du sol et qui possèdent a priori une information ayant une influence sur les modifications étant intervenues en matière d'occupation du sol, comme une carte d'exclusion, une *Suitability map* (carte d'attractivité) ou le modèle de potentiel calculé par le logiciel.
- *State* : il faut sélectionner au sein d'un menu déroulant, le type d'occupation du sol pour lequel l'arbre de décision va être calculé.
- *Function* : il faut définir le type de fonction de transition que l'arbre de décision va mobiliser pour écrire les règles de transition. La condition est exprimée en nombre de cellules comprises dans un cercle (*nbCellCir*) ou dans un carré (*nbCellSq*).
- *Neighborhood radius* : il faut définir le voisinage au sein duquel, pour l'occupation du sol qui nous intéresse, l'arbre de décision va, à partir d'un décompte des différents types d'occupation du sol présent dans ce voisinage, calculer les règles de transition.
- *Weight* : ce dernier cadre, lorsque l'option est activée, permet de renforcer le poids des changements intervenus entre les deux couches de référence. En activant cette fonction, on indique à l'arbre de décision de surévaluer la quantité des changements intervenus ce qui permet, a priori mais sans garantie, d'améliorer la précision des règles générées. L'expérience acquise à l'université de Bourgogne-Franche-Comté tend à indiquer qu'il vaut mieux activer cette fonction que l'on obtient de meilleures simulations avec un ratio inférieur à 1.

Dès que les différents paramètres ont été intégrés, il suffit de fermer cette boîte de dialogue et de lancer le calcul de l'arbre de décision (*Start*).

Le résultat obtenu est la boîte de dialogue suivante :

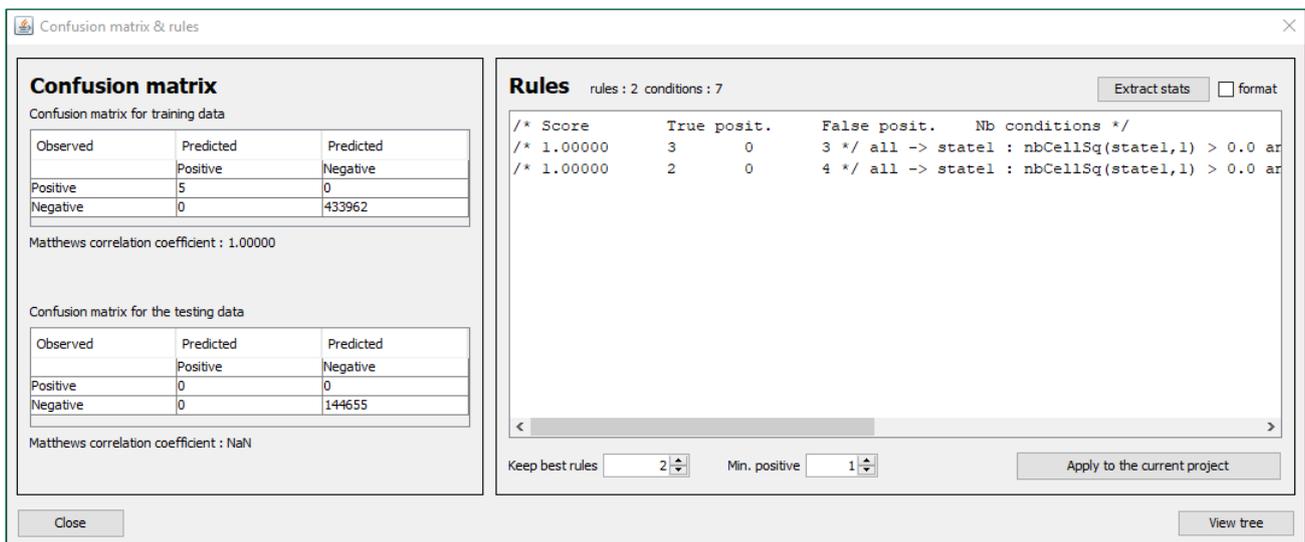


Figure 22 : Interface de LUCSIM

Au sein de cette boîte de dialogue, on retrouve l'ensemble des règles définies par l'arbre de décision ainsi que les informations suivantes :

- *Confusion Matrix*: cette matrice permet de comparer les résultats obtenus par la modélisation à la réalité en prenant comme point de départ la couche la plus ancienne. À partir de cette couche, le logiciel réalise une simulation de l'évolution du type d'occupation du sol que l'on étudie à partir des règles qu'il a identifiées et compare les résultats ainsi obtenus à la couche la plus récente. Le coefficient de corrélation de Matthews, calculé par le logiciel, est un indicateur de la qualité de la modélisation ainsi réalisée, plus ce dernier est élevé plus la simulation est proche de la réalité.
- *Rules* : la boîte de dialogue fait apparaître les règles calculées par l'arbre de décision.
- Le bouton *Apply to the current project* permet d'intégrer les règles ainsi générées au sein du cadre *Rules Editor*. En réalisant un copier-coller depuis ce cadre, il est alors possible de sauvegarder ces règles, par exemple à l'aide de l'application « bloc-note ». Cette manipulation est notamment intéressante, si l'on souhaite réaliser l'arbre de décision sur une nouvelle catégorie d'occupation du sol, car alors aucune information n'est conservée par le logiciel (*Apply to the current project* supprime automatiquement toutes les règles inscrites dans le cadre *Rules Editor*).

#### Pour aller plus loin

Il est possible de faire varier le nombre de règles retenues (*Keep best rules*) à la baisse (puis de revenir au nombre initial si souhaité). Cette manipulation a une action directe sur le coefficient de Matthews, qui est recalculé de manière automatique, et, parfois, ce coefficient est plus élevé si l'on conserve moins de règles. Il est conseillé alors de conserver le nombre de règles permettant de maximiser le coefficient de Matthews.

Il est possible de conserver les règles qui permettent d'obtenir un nombre minimum de pixels prédit correspondant aux pixels observés en jouant sur le paramètre Min. positive. Comme ci-dessus, l'objectif demeure de maximiser le coefficient de Matthews.

Il est possible d'afficher l'arbre de décision (*View Tree*) qui apparaît alors dans une nouvelle fenêtre. Un clic-droit permet de sélectionner un mode d'affichage (centré sur le premier nœud, adapté à l'écran, automatique). L'arbre de décision pouvant être particulièrement complexe, il peut être nécessaire de zoomer sur tout ou partie de l'arbre. Pour cela, il faut utiliser la touche Maj et réaliser un cadre sur le secteur choisi à l'aide de la souris en maintenant un clic-gauche. L'analyse de l'arbre de décision est particulièrement complexe mais peut permettre de mieux comprendre les règles générées puisque cela fait apparaître toutes les conditions utilisées mais également l'ordre dans lequel elles sont mobilisées, c'est-à-dire que plus on se situe vers le haut de l'arbre de décision, plus on retrouve les conditions « clivantes », qui ont structuré le plus les règles générées par l'arbre de décision.

Si l'on souhaite utiliser le logiciel en mode « automatique », il n'est pas forcément nécessaire de vérifier le contenu des règles, d'autant que cela peut rapidement devenir très complexe. Néanmoins, voici quelques points d'attention :

- En raison de son mode de fonctionnement, l'arbre de décision peut être amené à générer des règles faisant évoluer des catégories d'occupation du sol qui ne le devraient pas car l'analyse est réalisée pixel par pixel et de très léger décalage (de forme, d'alignement, etc.) peuvent signifier pour lui une évolution de l'occupation du sol qu'il peut alors chercher à reproduire ;
- Les règles peuvent potentiellement faire intervenir toutes les catégories d'occupation du sol, fixant pour chacune d'elles des conditions selon lesquelles certains pixels vont évoluer, or cela peut, légitimement, n'avoir aucun sens en termes d'organisation spatiale.

La qualité des règles générées est difficilement estimable, mais il faut bien comprendre que l'arbre de décision ne cherche, dans l'absolu, qu'à reproduire toutes les variations intervenues au sein d'un type d'occupation du sol, entre nos deux couches de référence et en fonction des paramètres de voisinages définis par l'utilisateur (*Neighborhood Radius*). De plus, il est important de souligner que les règles définies par un arbre de décision n'utiliseront qu'un seul type de fonction (*nbCellCir* ou *nbCellSq*). Établir les règles à la main offre de ce point de vue beaucoup plus de liberté.

### 2.2.2.7 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 géographiques nécessaires ne sont plus remplies sur l'ensemble du territoire),
- Parce qu'on lui a appliqué certaines limitations, par l'exploitation des chaînes de Markov par exemple, sur les quantités d'évolutions possibles.

#### 2.2.2.7.1 Créer des Simulations

La barre de simulation peut être utilisée intuitivement comme un lecteur MP3 pour lancer la simulation, avec de gauche à droite :

- En continu (jusqu'à l'arrêt de la modélisation)
- Pas à pas
- Stop
- Remise à zéro
- Barre de progression de la simulation pour chaque étape (un compteur est incrémenté à droite)
- Mode synchrone
- Mode asynchrone.

Il existe deux modes de fonctionnement de l'automate : Synchrone et Asynchrone. En mode synchrone, toutes les cellules sont exécutées en même temps. « La couche est figée, on exécute toutes les cellules indépendamment, puis on les rassemble ». Il ne peut pas y avoir d'interaction entre cellules dans la même étape de simulation. Au contraire du mode asynchrone, dont les cellules s'exécutent une par une. Celles-ci pourront donc s'influencer entre elles au fur et à mesure de l'exécution.

À noter que si l'on souhaite utiliser la contrainte des chaînes de Markov, il faut utiliser le logiciel en mode synchrone, l'option asynchrone pouvant conduire au dépassement des seuils que l'on cherche à atteindre avec les chaînes de Markov.

### 2.2.2.7.2 Les simulations

Les cartes de simulations peuvent être exportées sous deux formats (\*.png et \*.svg) dans l'onglet *Export View*.

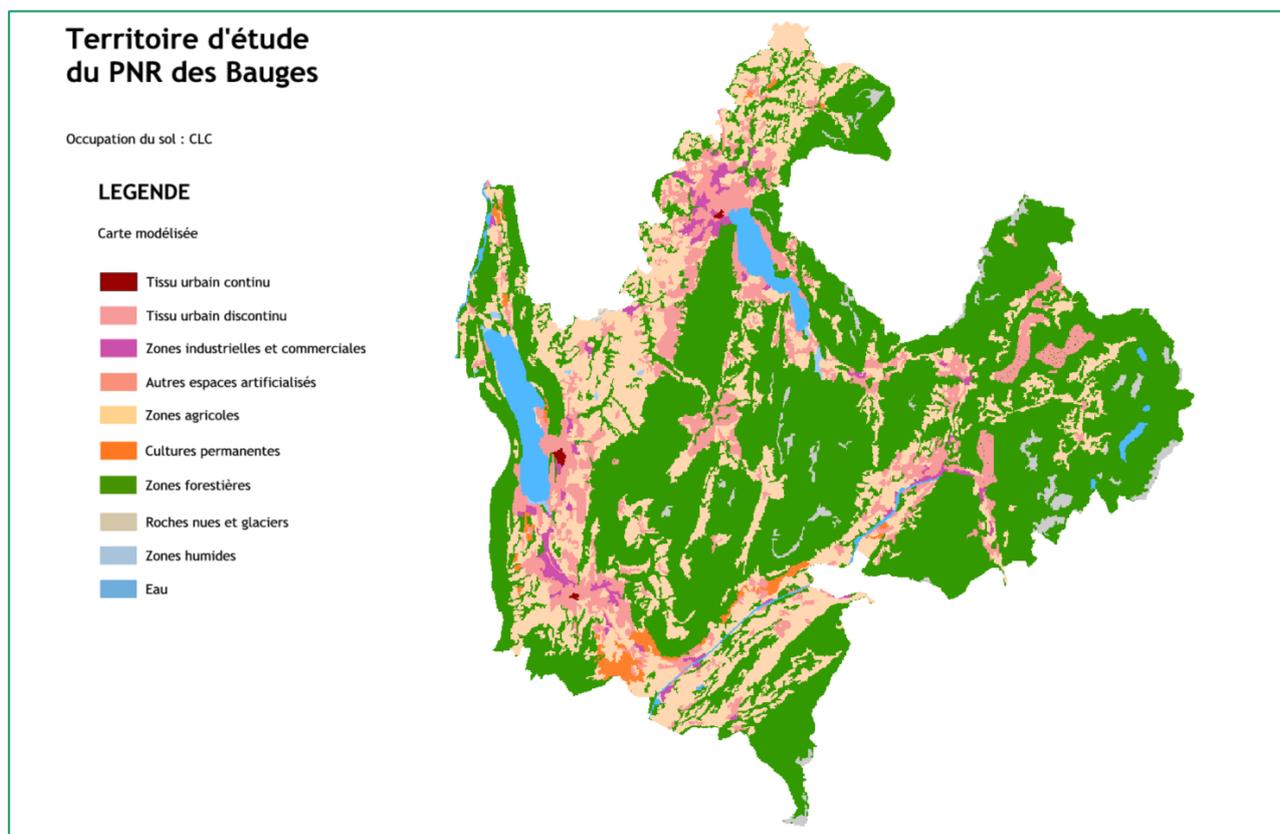


Figure 23 : Carte modélisée à partir de la donnée CLC simplifiée, avec prise en compte de la carte d'attractivité stratégique et pour une recherche des règles dans un rayon de 30 pixels

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

### 3.2.2 À partir de LUCSIM

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

- L'écriture des règles « à la main » nécessiterait un partage important entre le territoire et le Cerema pour convenir des règles que l'on souhaiterait modéliser. Ce travail ne pouvant pas être mené dans le cadre du projet ASTUS, on privilégiera l'utilisation du logiciel en mode « automatique ».
- Exploitation de différentes bases de données pour l'occupation du sol sachant que l'utilisation en mode « automatique » du logiciel impose que l'on dispose a minima d'au moins deux millésimes :
  - Corine Land Cover, millésimes 2000 et 2012, résolution spatiale de 100 m,
  - High Resolution Layers (HRL), résolution spatiale de 20 m,
    - Produite par le programme européen Copernicus (fournisseur de la donnée CLC), cette donnée est disponible en 4 couches raster (espaces artificialisés, forêts, prairies, zones humides et surfaces en eau) avec un niveau de définition largement supérieur à celui de CLC. Pour les espaces artificialisés, il existe plusieurs millésimes (2006, 2009, 2012 et 2015) alors qu'il n'en existe qu'un seul pour toutes les autres occupations du sol (2015)<sup>7</sup>.
  - Theïa
    - Theïa diffuse une base d'occupation du sol à l'échelle de toute la France à partir de données satellitaires, Landsat 5 pour les millésimes 2009, 2010, 2011 et 2014 et Landsat 8 et Sentinelle 2 pour 2016 et 2017. Pour cette dernière, le niveau de résolution est de 10 m (30 m pour Landsat 5) et la couche est établie sur la base d'une nomenclature en 17 catégories<sup>8</sup>.
- Modélisation d'un scénario « tendanciel » calculé par le logiciel et d'un scénario « stratégique » adapté du scénario stratégique décliné pour FORESIGHT :
  - Le scénario « tendanciel » exploiterait le mode « automatique » du logiciel LUCSIM au sein duquel on viendrait contraindre la modélisation par une chaîne de Markov dimensionnée sur l'enveloppe d'étalement urbain du scénario tendanciel établi pour FORESIGHT.

Le scénario « stratégique » exploiterait également le mode « automatique » du logiciel LUCSIM au sein duquel on viendrait contraindre la modélisation par une chaîne de Markov dimensionnée sur l'enveloppe d'étalement urbain du scénario stratégique établi pour FORESIGHT et par la carte d'attractivité établie pour ce même scénario. Incertain de la prise en compte de notre carte d'attractivité par le modèle, le *Potential Model* sera également utilisé pour adapter notre scénario stratégique au logiciel LUCSIM.

---

<sup>7</sup> Le millésime 2012 a, depuis, été publié sur le site Internet de Copernicus le 21 juin 2018.

<sup>8</sup> Les données 2016 et 2017 sont disponibles depuis juin 2018 au double format raster et vecteur.

## 4 Retour d'expérience – « Ce que nous avons réussi à faire »

### 4.1 Création d'une carte d'attractivité

#### 4.1.1 Préparation 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 la conception de notre carte de friction, nous sommes partis du millésime 2012 de CLC, ce dernier nous permettant, par sélection des objets selon la nomenclature, de distinguer différents espaces auxquels nous avons ainsi pu affecter différentes valeurs de frictions.

#### Pour aller plus loin

Dans la mesure où ces couches sont manipulées au sein d'un SIG, il aurait été alors possible d'exploiter d'autres informations pour mieux distinguer encore les valeurs de frictions des différents espaces sur le territoire :

- Si l'on dispose des documents d'urbanisme, on pourrait alors affecter des coefficients de frictions très faibles aux zones à urbaniser de ces documents,
- Si l'on dispose d'une couche des servitudes d'utilité publique, des différents zonages de protection des espaces naturels ou de la trame verte et bleue d'un territoire, il est alors possible d'affecter des coefficients de frictions spécifiques à ces espaces.

À noter, concernant le niveau de définition de la donnée d'entrée pour le calcul de la carte d'attractivité que ce dernier n'a, a priori, que peu d'impact sur le résultat final. En effet, compte-tenu du fonctionnement de l'algorithme coût-distance utilisé pour établir cette carte d'attractivité par nos propres moyens ou à partir du module dédié de FORESIGHT, nous avons un certain effet de lissage de l'information.

Souhaitant pouvoir affecter des valeurs différentes aux espaces artificialisés au niveau de chaque commune du territoire, nous avons préalablement procédé à un redécoupage de la base CLC selon les périmètres des communes.

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.

#### **Pour aller plus loin**

La lecture des documents stratégiques, nous pousserait, pour améliorer la précision de la carte d'attractivité, à prendre en compte d'autres éléments importants comme les Trames Vertes et Bleues ou la définition d'espaces agricoles plus stratégiques et mieux protégés dans ces divers documents, mais cela n'a pu être mis en œuvre dans le cadre de notre expérimentation. Nous avons, par exemple, envisagé de le moduler en fonction du niveau de protection de ces différents espaces du territoire au sein des documents stratégiques, mais il s'avère que ce principe est complexe à mettre en œuvre :

- Il faudrait s'accorder au préalable sur la valeur du niveau de protection réellement mis en place par nos différents documents stratégiques,
- Il faudrait ensuite constituer une couche d'occupation du sol préalable tenant compte de tous les espaces définis par ces documents (définition des éléments constitutifs de la TVB, etc.).

Nous avons mis en œuvre ces principes et conçu ensuite la carte d'attractivité en utilisant l'outil de calcul coût-distance disponible au sein d'ArcGIS. Deux cartes d'attractivités (scénario tendanciel et stratégique) ont ainsi été produites.

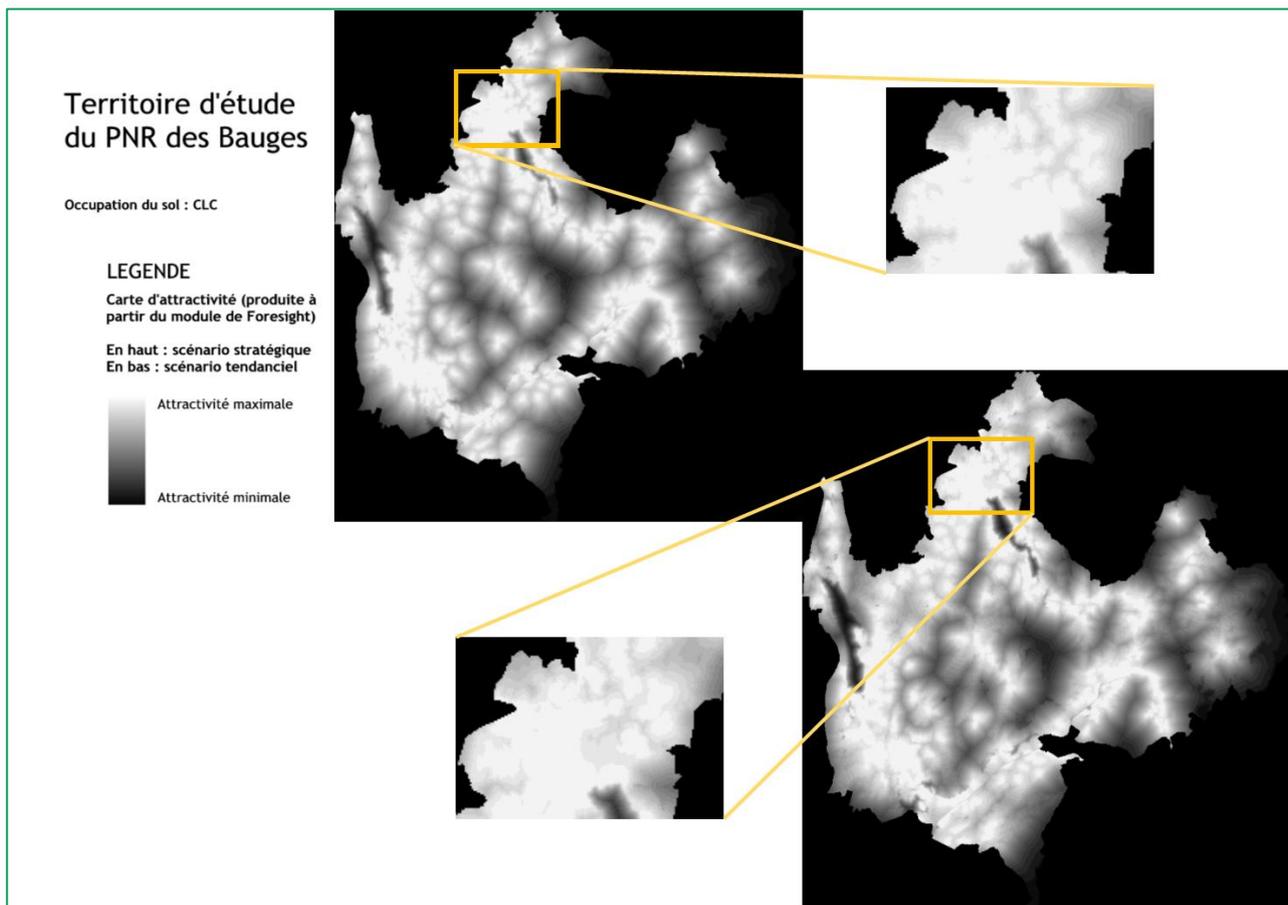


Figure 24 : Cartes d'attractivité produites en dehors du module dédié de FORESIGHT sur le territoire du PNR des Bauges (et zoom) pour les scénarios stratégiques et tendancielles

#### 4.1.2 Intégration de la carte d'attractivité dans FORESIGHT

Une fois nos différentes cartes d'attractivité préparées, nous avons souhaité les intégrer à nos données d'entrées au sein de FORESIGHT mais cela n'a pu aboutir malgré l'existence, dans son module de pré-traitement (onglet *Pre-processing*), d'un outil de transformation d'une donnée raster en fichier source exploitable par le logiciel<sup>9</sup>. Aucune solution n'ayant été trouvée dans les temps du WP2, nous avons adapté notre méthode en utilisant le module dédié du logiciel FORESIGHT pour produire nos cartes d'attractivités.

Cela n'a pas eu d'impact sur les espaces non artificialisés. En revanche pour les espaces artificialisés, il n'était alors plus possible de distinguer ces espaces entre eux que ce soit en fonction des dynamiques démographiques ou de l'armature urbaine. Nous avons alors introduit une nouvelle différence entre nos deux cartes d'attractivité, « tendanciel » et « stratégique » en utilisant deux couches distinctes pour définir les points à partir desquels l'algorithme de coût-distance se développe et est estimé le « coût » de l'urbanisation en tout point de notre territoire. Ainsi, pour établir la carte d'attractivité du scénario tendanciel,

<sup>9</sup> À la suite de nouveaux tests, il a été possible d'intégrer une de nos cartes d'attractivité au sein de FORESIGHT. L'intégration par l'intermédiaire de l'onglet *Pre-processing* n'a définitivement pas fonctionné. Il a été, en revanche, possible de générer directement le fichier \*.gif d'une de nos cartes d'attractivité via ArcGIS (en faisant en sorte que la résolution et l'emprise soient strictement identiques aux fichiers générés par FORESIGHT dans le dossier *Input* pour la donnée *Initial Urban Map* par exemple). Ce fichier a été ensuite copié au sein d'un dossier *Input* d'une modélisation, a été reconnu par le logiciel (*Preview dans l'onglet Initial Settings*) et a permis ensuite de générer une modélisation tenant compte de notre propre carte d'attractivité.

nous avons positionné nos « points » sur les communes ayant les dynamiques démographiques les plus importantes et, pour le scénario stratégique, sur les communes principales de l'armature urbaine. Sans obtenir un résultat strictement identique à partir de ce traitement à celui obtenu par nos soins, nous avons alors quelque chose d'approchant qui nous a permis de poursuivre notre expérimentation du logiciel FORESIGHT.

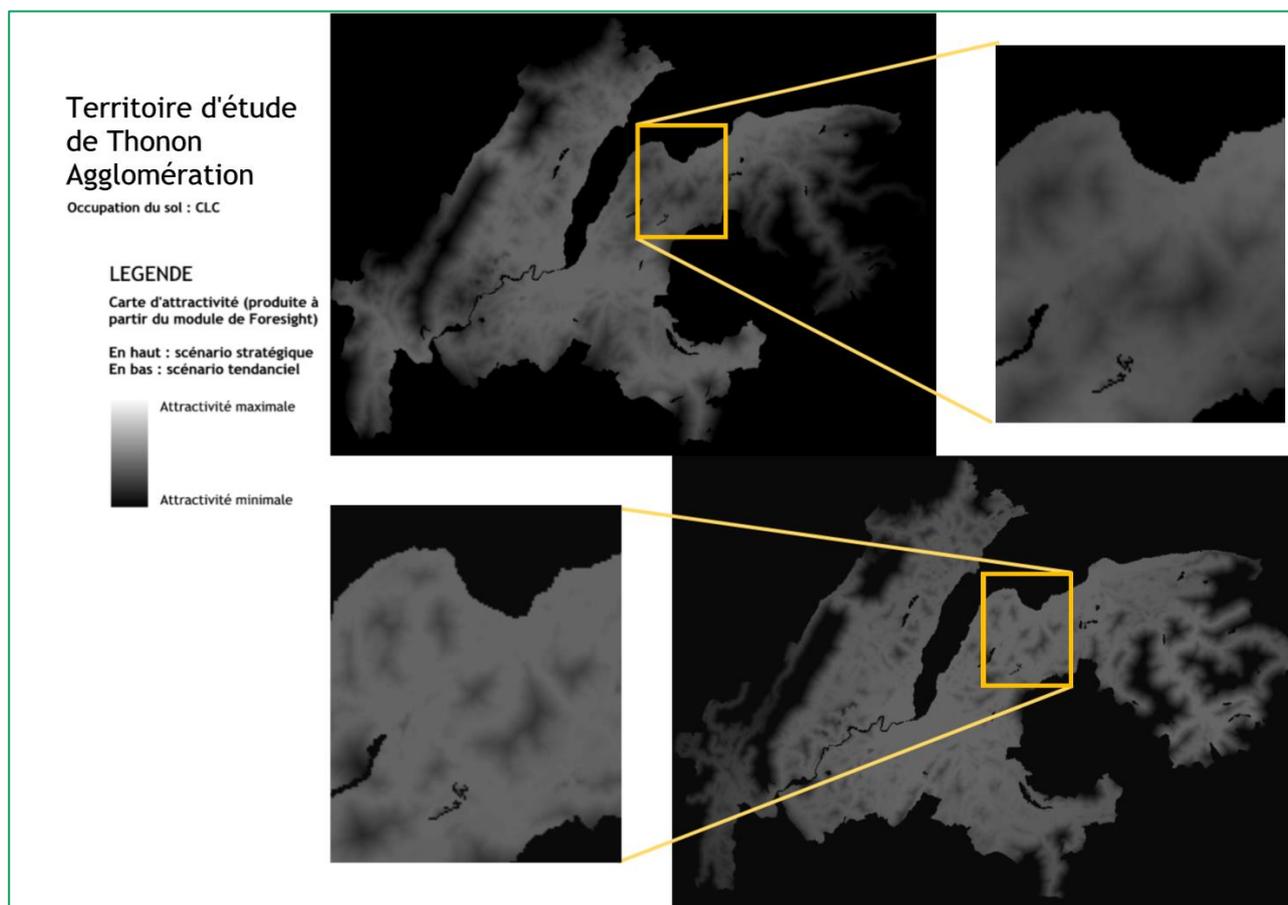


Figure 25 : Cartes d'attractivité produites à partir de FORESIGHT sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération (et zoom) pour les scénarios stratégiques et tendanciels

#### 4.1.3 Intégration de la carte d'attractivité dans LUCSIM

Nous avons intégré la carte d'attractivité du scénario stratégique au logiciel afin d'influer sur la modélisation. Reconnue par le logiciel LUCSIM, notre carte d'attractivité a été utilisée à la fois comme :

- Couche d'information complémentaire pour la définition des règles au sein de l'arbre de décision,
- Contrainte (comme pour le modèle de potentiel proposé par le logiciel) pour la simulation.

Incertain de l'impact de cette carte sur nos modélisations, nous avons également exploité le modèle de potentiel disponible au sein de LUCSIM.

Il s'avère qu'un impact de notre carte d'attractivité a parfois pu être identifié au niveau de la formulation des règles par l'arbre de décision mais c'est essentiellement sur la modélisation elle-même que cet impact a pu se faire ressentir.

## 4.2 Expérimentation à partir de FORESIGHT

### 4.2.1 Préparation des données

#### 4.2.1.1 Le niveau de définition de la donnée d'entrée

L'expérimentation a été réalisée en utilisant une taille de pixel pour la création des données d'entrées de 100 m de côté, valeur par défaut inscrite dans FORESIGHT, en raison notamment du niveau de définition des données sources pour les cartes *Hillshade* et *Slope Map*.

Lors de l'intégration de la donnée OSCOM sur le territoire d'étude du PNR des Bauges, d'une résolution plus fine, la question s'est alors posée d'utiliser une maille de traitement identique sous FORESIGHT. Pour la raison exposée ci-dessus, nous avons maintenu une taille de pixel de 100 mètres de côté, ce qui a eu pour impact direct de diminuer la précision de la donnée OSCOM.

#### 4.2.1.2 Initial Urban Map à partir de Corine Land Cover et OSCOM

Pour l'expérimentation de FORESIGHT, il n'existait pas a priori de complexité particulière pour exploiter CLC. Nous avons donc utilisé le millésime 2012 de cette donnée pour obtenir la carte *Initial Urban Map* en sélectionnant l'ensemble des espaces artificialisés selon la nomenclature de CLC.

Pour la base OSCOM, nous avons utilisé l'option de FORESIGHT permettant d'intégrer des données particulières. Nous avons donc préparé en amont la couche vectorielle en créant un champ numérique au sein duquel nous avons affecté la valeur 1 à tous les espaces classés artificialisés dans la nomenclature d'OSCOM et 0 pour toutes les autres occupations du sol. Subtilité supplémentaire, OSCOM intègre dans sa définition des espaces artificialisés l'ensemble du réseau routier. Nous avons alors décidé de restreindre les espaces artificialisés de la base OSCOM à la tache urbaine que nous avons établie par ailleurs à partir de la BD Topo de l'IGN.

OSCOM a pu être exploitée sur le territoire d'étude du PNR des Bauges. En revanche, non disponible sur la partie suisse du territoire d'étude de Thonon Agglomération et ne disposant pas d'une couche d'occupation du sol équivalente à OSCOM côté Suisse, seule la modélisation à partir de CLC a pu être réalisée sur ce site pilote.

Malgré le retraitement de la donnée OSCOM effectué par FORESIGHT (augmentation de la taille des pixels), on remarque que la précision de la donnée d'origine est en partie conservée et s'avère effectivement plus détaillée que la donnée CLC.

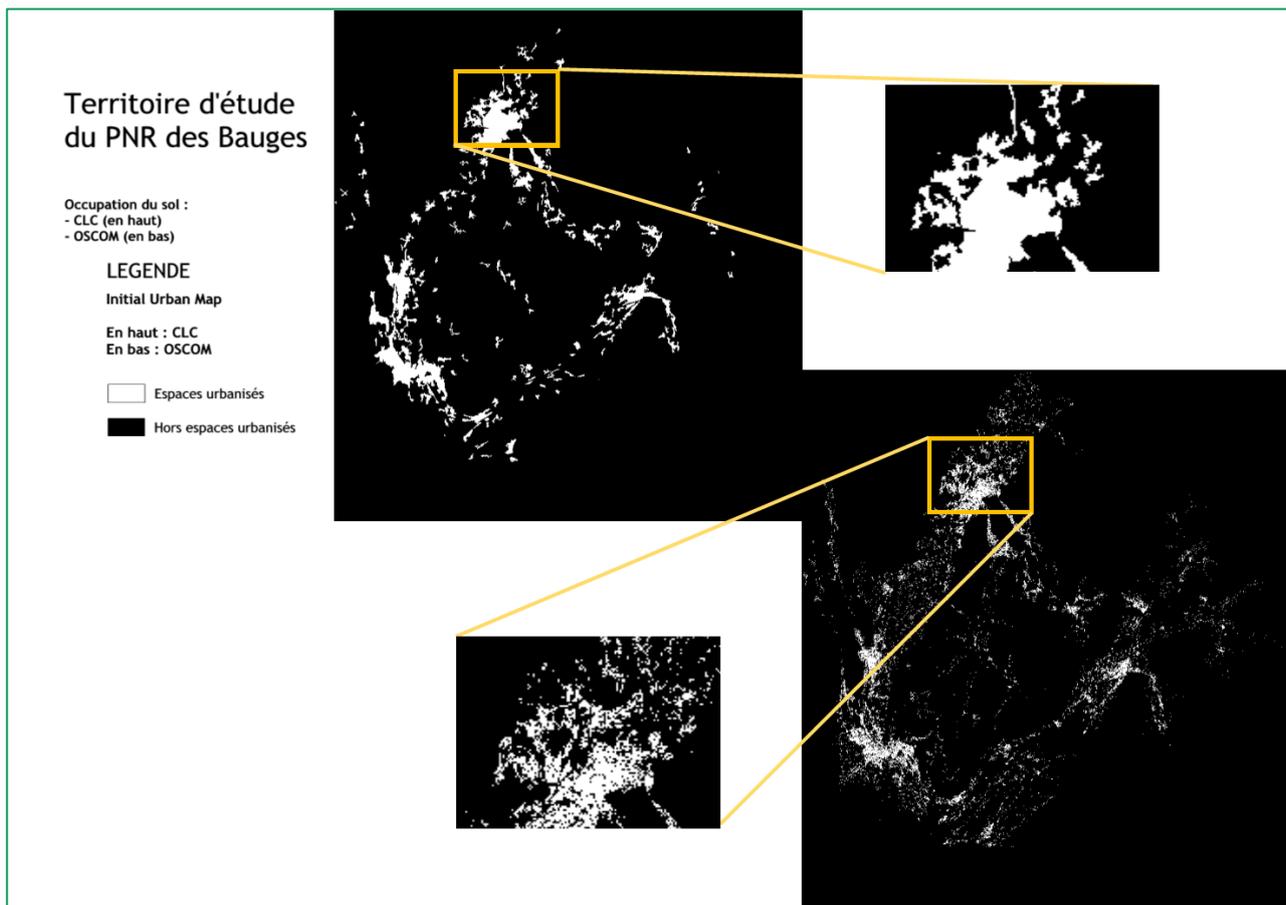


Figure 26: Initial Urban Map générées sur le territoire d'étude du PNR des Bauges à partir de CLC (en haut) et OSCOM (en bas)

#### 4.2.1.3 Slope Map et Hillshade à partir de EU-DEM

Pour la création de ces deux cartes, nous avons utilisé la donnée EU-DEM, fournie par le programme européen Copernicus. Il s'agit d'un modèle numérique de terrain (MNT) disponible pour l'ensemble des pays de l'Union Européenne. Il s'agit d'un produit hybride basé sur les données SRTM et ASTER-GDEM. Disponible sous forme de dalles raster au format \*.hgt, notre territoire d'étude se trouvait à cheval sur deux dalles qu'il a fallu au préalable regrouper sous SIG, que ce soit en les fusionnant ou en créant, plus simplement, un seul raster virtuel à partir de ces deux dalles. Le format de ces dalles, identique à celui de la donnée SRTM, permet une intégration directe sous FORESIGHT.

#### 4.2.2 La maille de modélisation

Définie par défaut dans FORESIGHT à 100 mètres, nous avons maintenu ce paramètre quelle que soit la modélisation réalisée. Nous justifions ce choix au regard de la cohérence avec la donnée d'entrée, créée avec un niveau de précision identique. Comme rappelé dans le détail de fonctionnement du logiciel FORESIGHT, l'inventeur du logiciel conseille de se limiter à des modélisations à partir de mailles allant de 50 à 200 mètres de côté.

### 4.2.3 L'enveloppe de consommation d'espace

Cette enveloppe a été définie pour le scénario tendanciel par simple reconduction de la consommation d'espace observée à partir de CLC entre les millésimes 2000 et 2012.

L'exploitation du millésime 2006 est source d'interrogation dans la mesure où pour nos deux territoires d'études très peu de modifications des espaces artificialisés sont intervenues entre 2006 et 2012, en comparaison notamment avec la période 2000-2006. Or sur des périodes équivalentes, l'évolution que l'on observe de la tache urbaine, calculée par nos soins sur la partie française de nos territoires d'études, ne corrobore pas cette diminution brusque de la consommation d'espace.

En comparaison avec le rythme d'évolution de la population sur des périodes équivalentes, qui se maintient dans le temps, cela soulève une autre interrogation, qui, elle aussi nous conduit à ne pas conserver les résultats du millésime 2006. Cette diminution brusque de la consommation d'espace entre 2006 et 2012 par rapport à la période précédente, n'est possible que si l'on a une réelle modification de la manière d'urbaniser et de consommer le foncier. Or, ce ne semble pas être le cas.

Pour le scénario stratégique, nous avons identifié le rythme de consommation d'espace prévu par chacun de nos documents stratégiques sur leur propre période d'action et, de manière arbitraire, par simple reconduction nous avons alors déterminé l'enveloppe de consommation d'espace pour le scénario stratégique<sup>10</sup>.

### 4.2.4 Estimation des Patterns des scénarios tendanciel et stratégiques

Afin de pouvoir distinguer nos deux scénarios, « tendanciel » et « stratégique », nous utilisons des *Patterns* différents permettant de distinguer les formes de l'étalement urbain qui vont être ainsi générées par FORESIGHT.

Sur les conseils de l'université de Rennes, nous avons essayé d'établir une méthode, relativement simple, pour déterminer les *Patterns* du scénario tendanciel en s'appuyant sur l'analyse des tendances passées. Nous avons déployé notre méthode, non pas à partir de la donnée CLC mais d'une donnée tache urbaine calculée par nos soins à partir de la BD Topo. Nous possédons pour cette base de deux millésimes, 2008 et 2017.

Notre méthode se décline comme suit :

- À partir de la tache urbaine 2008 :
  - Création d'une zone tampon autour des principales entités de la tache urbaine :

La création de la zone tampon doit nous permettre de distinguer les phénomènes de mitages (*patterns Spontaneous* et *New spread center*) de ceux qui se déroulent à proximité des espaces déjà urbanisés (*patterns Edge-growth* et *Road influenced*).

Néanmoins, le phénomène de mitage ne peut pas réellement se faire au milieu de nulle part. Si nous avons pris l'intégralité de la tache urbaine 2008 à laquelle nous aurions appliqué une zone tampon, alors l'intégralité de l'urbanisation créée entre 2008 et 2017 se serait située dans cette zone tampon. Or, il nous a semblé important de distinguer une forme de mitage, qui ne se fait peut-être pas au milieu de nulle part mais autour de toutes petites entités urbaines (fermes, petits groupements d'habitations, petits hameaux, etc.) d'autres phénomènes, bien plus majoritaires, autour des principales entités urbaines. C'est ce qui nous a conduit à mener une expérimentation en sélectionnant uniquement les zones de plus d'un hectare. Nous avons ensuite appliqué une zone tampon fixe de 100 mètres.

---

<sup>10</sup> Les valeurs détaillées sont fournies au sein des deux rapports pour les territoires.

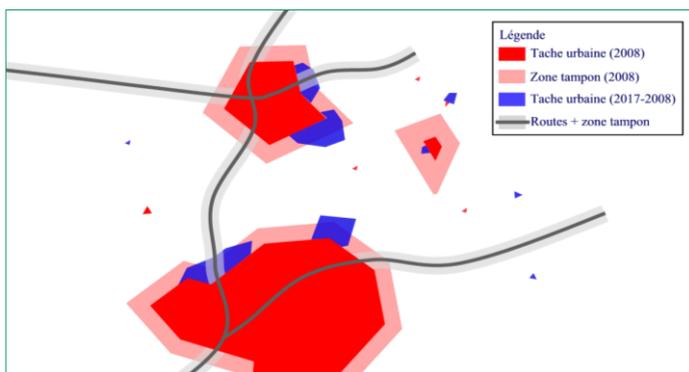


Figure 27 : zone tampon autour de la tache urbaine

- À partir de la différence entre la tache urbaine 2017 et 2008 :
  - En dehors des zones tampons décrites ci-dessus :
    - Détermination du pattern *Spontaneous* : sélection des plus petites entités (expérimentation avec des entités de moins de 5 000 m<sup>2</sup>) ;
    - Détermination du pattern *New Spread Center* : sélection des plus grandes entités ;
  - Au sein des zones tampons décrites ci-dessus :
    - Détermination du pattern *Road influenced* : sélection des entités au sein d'une zone tampon autour du réseau routier. Il est important de s'interroger sur le phénomène *Road influenced*, d'urbanisation linéaire, que l'on cherche à décrire. En effet, si l'on considère la totalité du réseau routier, alors la quasi-intégralité de l'urbanisation créée entre 2017 et 2008 se situe à proximité de ce réseau. Pour ne pas surévaluer ce pattern, nous nous sommes limités au seul réseau primaire auquel nous avons appliqué une zone tampon de 500 mètres.
    - Détermination du pattern *Edge-Growth* : par déduction, nous avons affecté toutes les entités restantes (au sein des zones tampons calculées depuis la tache urbaine 2008) à ce pattern.

Nous avons ensuite procédé au calcul du rapport des surfaces de chacun de nos ensembles sur la totalité des surfaces créées entre 2008 et 2017, nous donnant ainsi une indication sur la valeur de nos patterns.

Pour fixer ensuite les patterns de notre scénario stratégique, nous avons réduit de manière significative tous les phénomènes de mitage en renforçant par ailleurs le phénomène *Edge-Growth*, les documents stratégiques indiquant, tous, leur volonté de lutter contre les phénomènes d'urbanisations linéaires ou de mitage et ayant tendance à conforter les principales entités urbaines déjà existantes<sup>11</sup>.

#### 4.2.5 Les modélisations

Pour chacun de nos deux territoires, 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 à partir de l'option disponible au sein de l'onglet *Output*,
- 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.

<sup>11</sup> Les valeurs détaillées sont fournies au sein des deux rapports pour les territoires.

## 4.2.6 Les résultats

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.

### 4.2.6.1 Illustrations sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération

L'urbanisation créée par FORESIGHT est de 15 500 ha pour le scénario tendanciel et de 9 000 ha pour le scénario stratégique<sup>12</sup>.

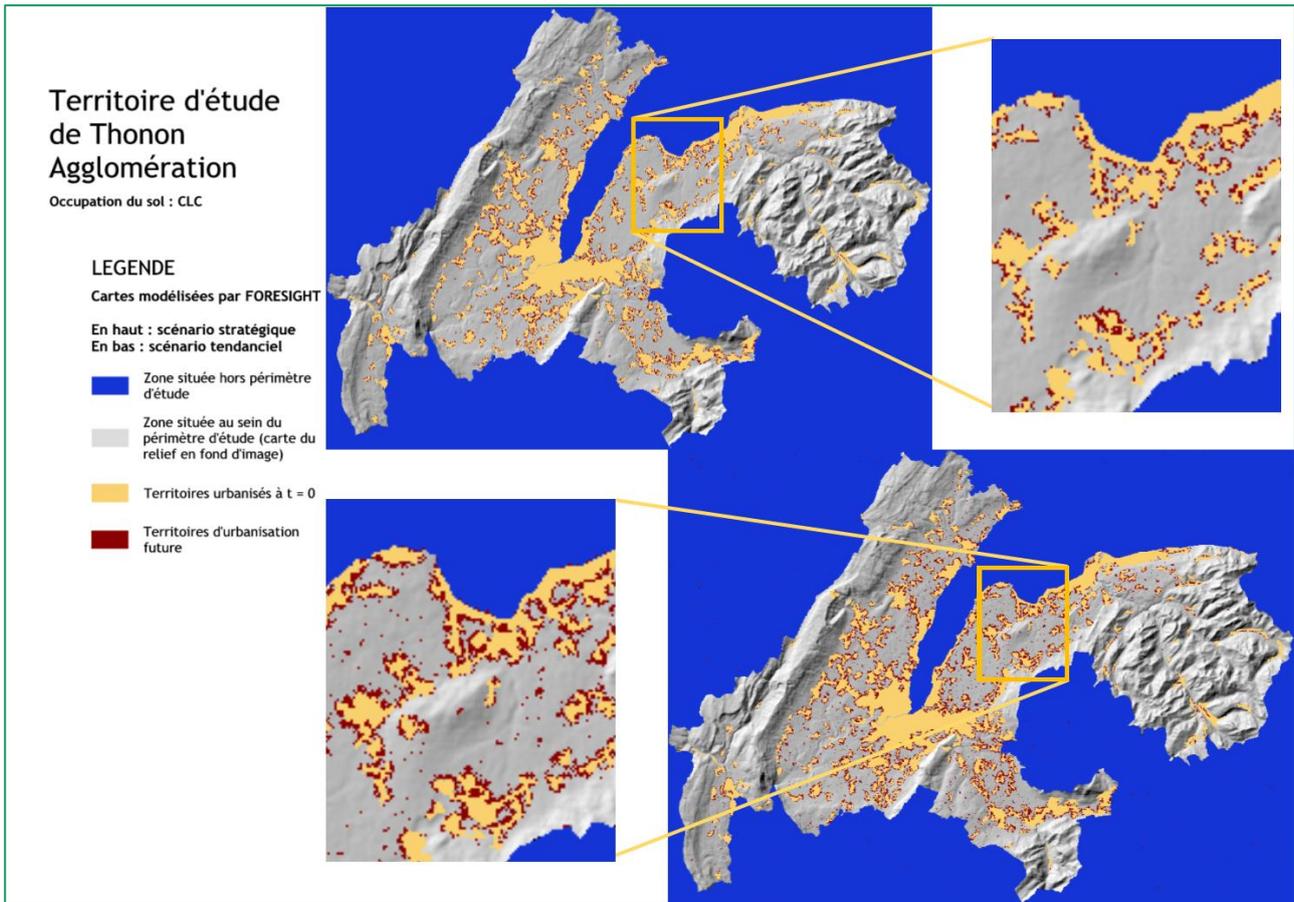


Figure 28 : Modélisations obtenues sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération à partir de la donnée CLC et pour les scénarios stratégiques et tendanciels

<sup>12</sup> 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.

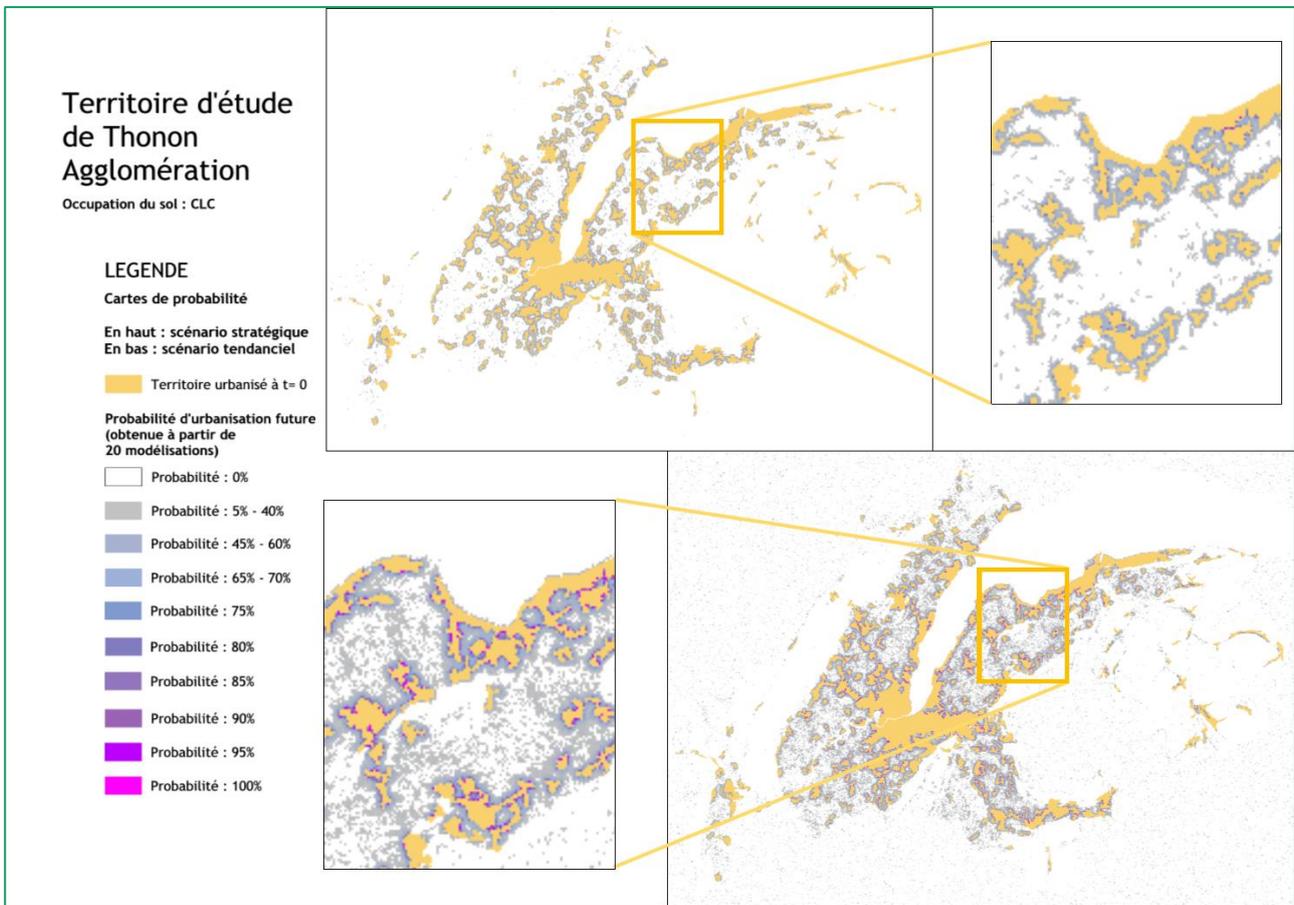


Figure 29 : Probabilités d'urbanisation obtenues à partir de 20 modélisations sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération à partir de la donnée CLC et pour les scénarios stratégiques et tendanciels

#### 4.2.6.2 Illustrations sur le territoire d'étude du PNR des Bauges

L'urbanisation créée par FORESIGHT est de 7 000 ha pour le scénario tendanciel et de 8 000 ha pour le scénario stratégique<sup>13</sup>.

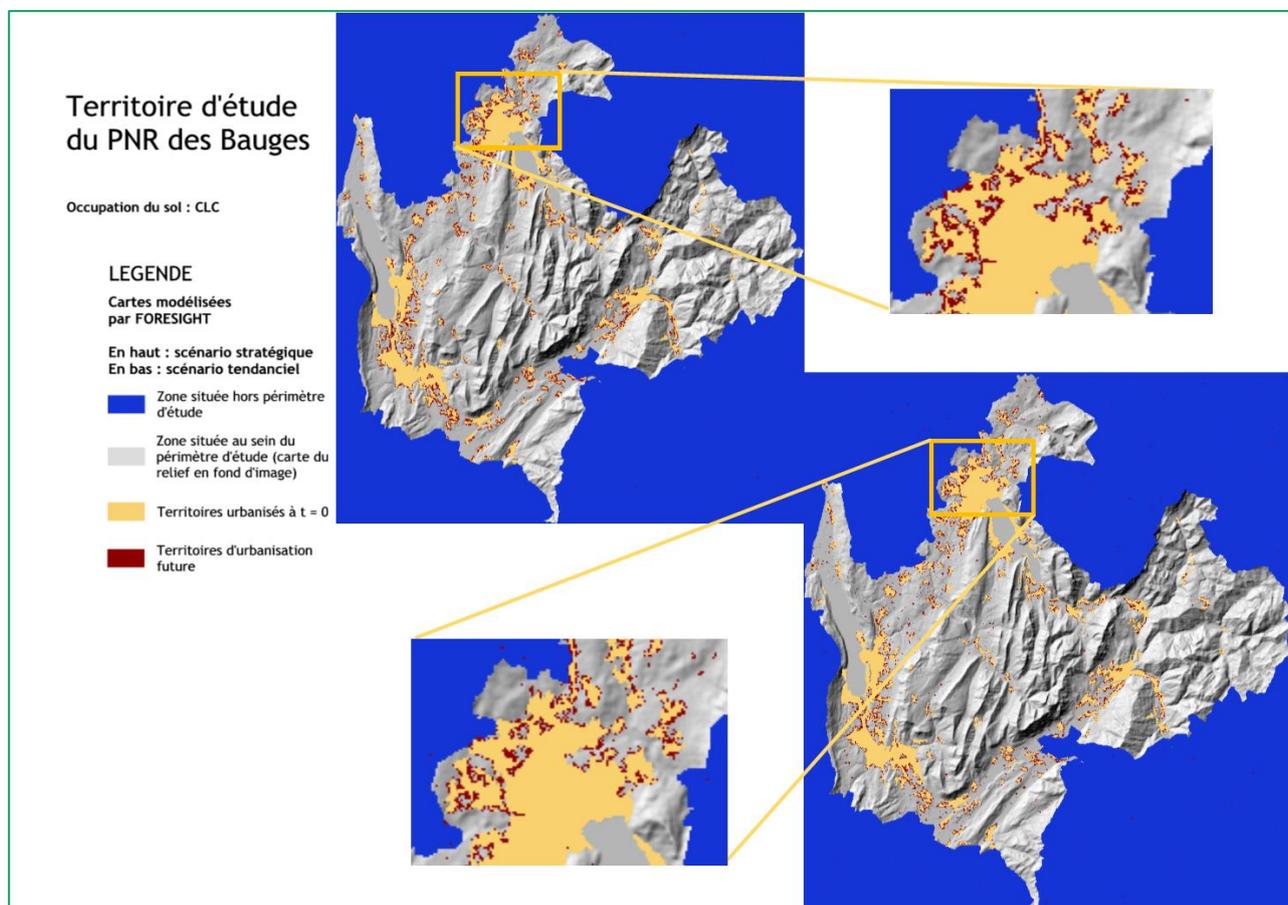


Figure 30 : Modélisations obtenues sur le territoire d'étude du PNR des Bauges à partir de la donnée CLC et pour les scénarios stratégiques et tendanciels

<sup>13</sup> 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.

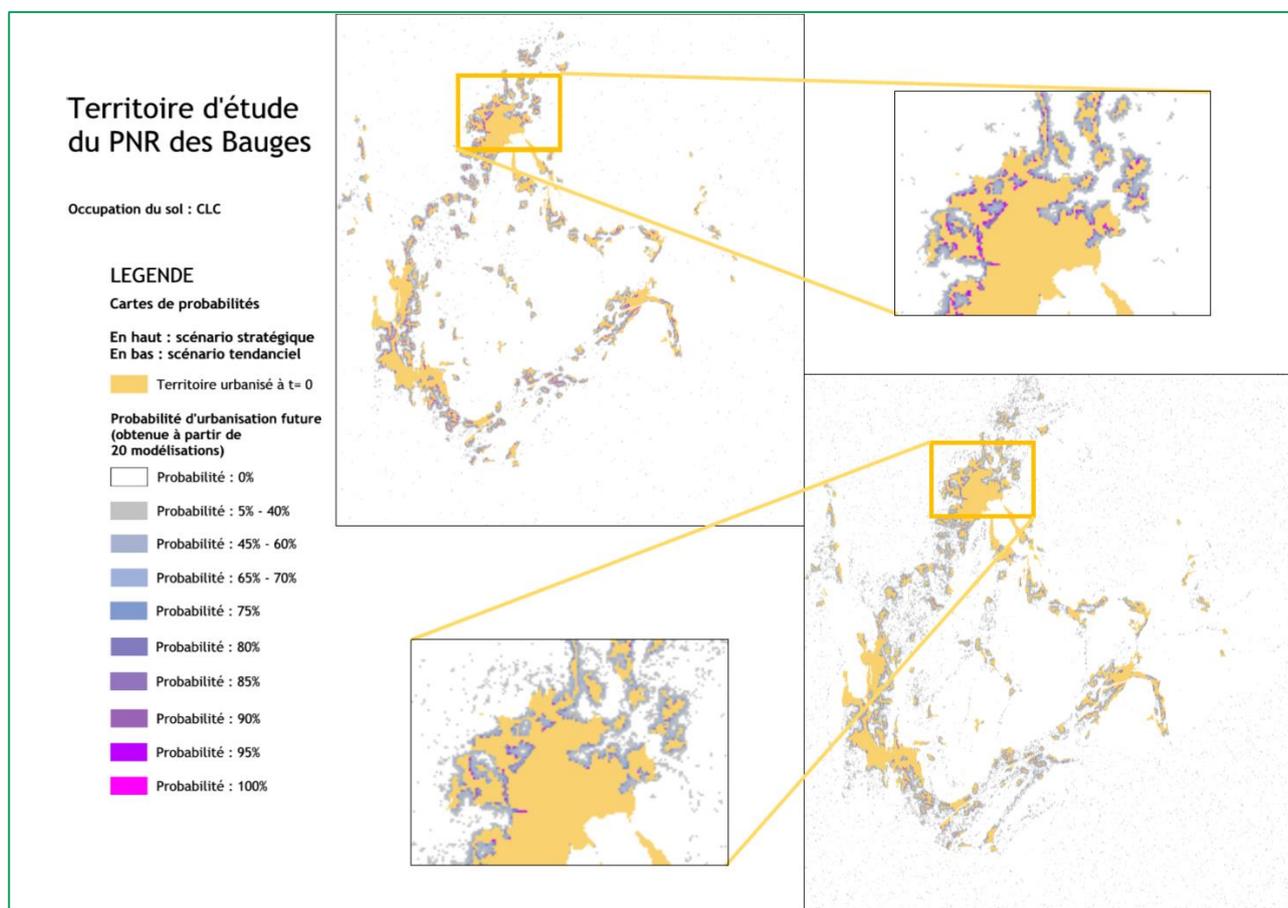


Figure 31 : Probabilités d'urbanisation obtenues à partir de 20 modélisations sur le territoire d'étude du PNR des Bauges à partir de la donnée CLC et pour les scénarios stratégiques et tendanciels

## 4.2.7 L'analyse des résultats

### 4.2.7.1 Analyse des cartes modélisées

Pour l'analyse des cartes ainsi produites à partir de FORESIGHT, chacune de ces données étant au format \*.gif, elles doivent être géolocalisées pour être analysée au sein d'un SIG.

Notre stratégie d'analyse repose ensuite sur un décompte des différents types de pixels en fonction de différents prismes territoriaux.

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 cartes selon deux prismes territoriaux :

- Sur la base du découpage par intercommunalité
- Sur la base de l'armature territoriale définie par 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.

#### 4.2.7.2 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 (combler progressivement 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.

## 4.3 Expérimentation à partir de LUCSIM

### 4.3.1 Préparation des couches de l'occupation du sol

#### 4.3.1.1 Pour Corine Land Cover, réduction du nombre de catégorie d'occupation du sol

Pour l'expérimentation du logiciel LUCSIM, nous avons utilisé la base CLC qui permet de distinguer jusqu'à 44 types d'occupation du sol au troisième niveau de sa nomenclature.

Le niveau de détail de CLC interroge sur la nature des règles que l'outil pourrait créer à partir de l'arbre de décision. De notre point de vue, la grande variété de la nomenclature de CLC aurait pour effet de rendre extrêmement spécifique et détaillée chaque règle construite par l'arbre de décision (pour qu'une cellule évolue, il faudra tant de cellules de chaque occupation du sol). Or, il y a ainsi un risque non négligeable de rendre inapplicable cette règle, ou de la rendre applicable sur une partie seulement du territoire et ceci sans aucune raison a priori.

Sur les conseils de l'université de Bourgogne-Franche-Comté, nous avons donc volontairement limité le nombre de catégorie d'occupation du sol pour chacune des différentes bases que nous souhaitions utilisées. Nous avons, pour cela, créé un champ numérique au sein duquel nous avons simplifié la nomenclature de CLC en 10 postes.

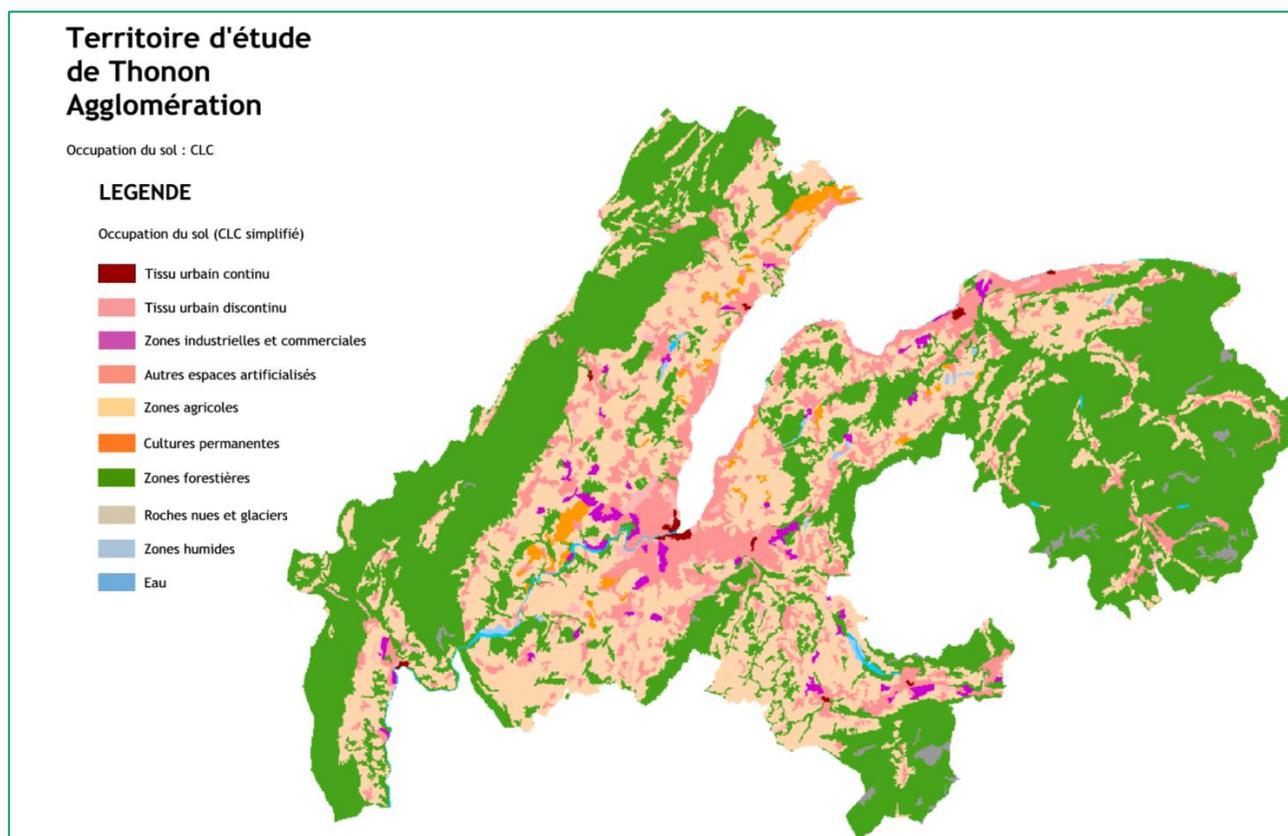


Figure 32 : Occupation du sol (CLC simplifié) en 2012 sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération

#### 4.3.1.2 Pour High Resolution Layer, la question de la complétude de l'information

Pour l'expérimentation de LUCSIM, nous avons utilisé la base High Resolution Layers (HRL) diffusée par le programme européen Copernicus. Cette base met à disposition 4 couches raster (« *Imperviousness* », « *Forest* », « *Grassland* », « *Water and Wetness* »). Pour les espaces artificialisés, il existe plusieurs millésimes (2006, 2009, 2012 et 2015) alors qu'il n'en existe qu'un seul pour toutes les autres occupations du sol (2015)<sup>14</sup>.

Les informations disponibles au sein de ces différentes couches rasters sont de différentes sortes :

- *Imperviousness* : la valeur des pixels correspond à un niveau d'imperméabilité du sol entre 1 et 100 %,
- *Forests* : la valeur des pixels permet de distinguer les forêts à dominantes de feuillus ou de conifères dès que la forêt occupe plus de 10 % de l'espace considéré,
- *Grassland* : la valeur des pixels est unique,
- *Water and Wetness* : la valeur des pixels distingue 4 catégories, (1) permanent water, (2) temporary water, (3) permanent wetness and (4) temporary wetness.

Pour 2015, nous disposons des 4 couches de la donnée HRL mais l'assemblage de ces informations ne fournit pas pour autant une couche d'occupation du sol recouvrant l'intégralité du territoire. En effet, ces couches ne fournissent notamment pas d'information sur les reliefs trop important ou sur les « zones d'ombres » (obtenues par analyse automatique des images satellitaires, certains espaces sont situés dans l'ombre et n'ont donc pas été caractérisés). Pour 2006, nous ne disposons que de la couche *Imperviousness* pour la donnée HRL.

Nous avons alors fait le choix de travailler uniquement à partir de la donnée *Imperviousness* pour 2006 et 2015 (complétée par la couche *Water and Wetness* de 2015 pour éviter une évolution non souhaitable de ces espaces). Nous avons également simplifié la donnée *Imperviousness* en créant 4 catégories d'occupation du sol en fonction du niveau d'imperméabilité du sol (1-49 %, 50-69 %, 70-89 % et 90-100%).

Néanmoins travailler uniquement à partir de la couche *Imperviousness* fait que les règles générées par l'arbre de décision ne sont alors dépendantes que de cette unique couche, sans aucune autre considération géographique.

---

<sup>14</sup> Le millésime 2012 a depuis été publié sur le site Internet de Copernicus à la fin du premier semestre 2018.

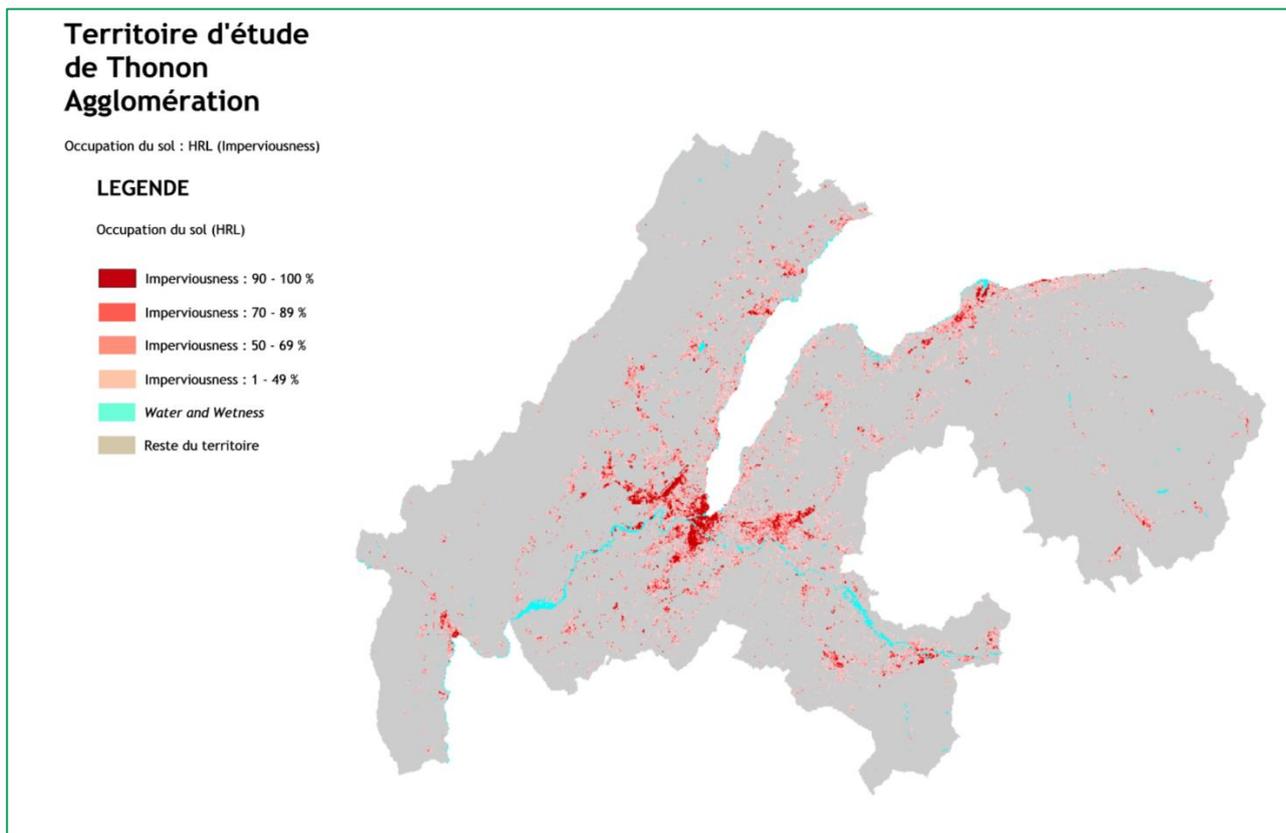


Figure 33 : Couche Imperviousness d'HRL (2015) sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération

#### 4.3.1.3 Pour Théïa, le choix de deux millésimes

Pour la donnée Theïa, possédant une nomenclature en 17 postes, nous n'avons pas réalisé de pré-traitement sur la donnée raster d'origine.

Néanmoins, s'est posée la question du choix des millésimes.

L'évolution technique due à l'utilisation d'un nouveau satellite dès le millésime 2016 rend impossible la comparaison des millésimes antérieurs à cette date à ceux disponible par la suite (différence de taille de pixel). Ne disposant que deux millésimes en 2016 et 2017, très rapprochés, il a été estimé non pertinent d'utiliser ces deux couches.

Le choix s'est donc reporté sur les millésimes compris entre 2009 et 2014, mais il a été impossible de télécharger depuis le site de diffusion de cette donnée géographique le millésime 2014. Pour cette raison, nous avons donc retenu les millésimes 2009 et 2011.

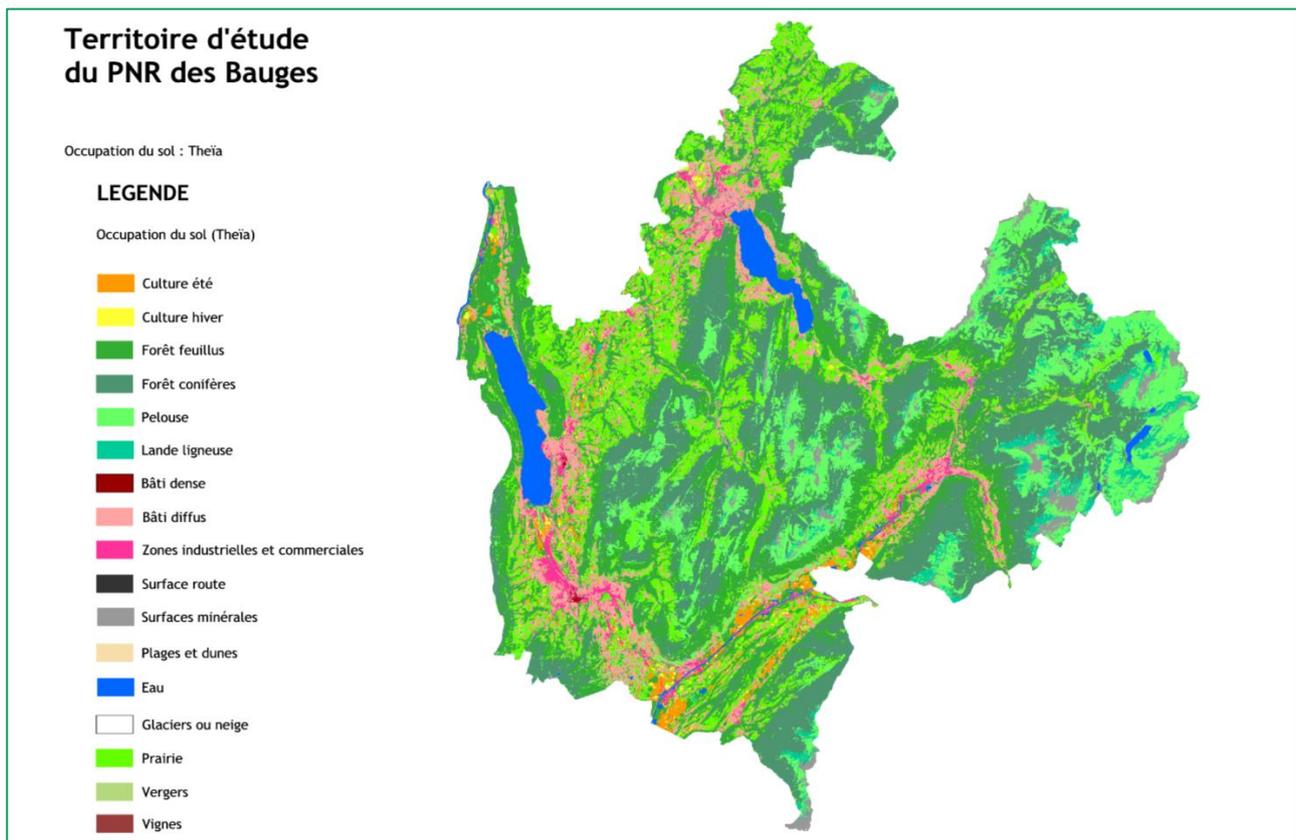


Figure 34 : Occupation du sol à partir de Theia sur le périmètre d'étude du PNR des Bauges

### 4.3.2 Modéliser à partir de LUCSIM

#### 4.3.2.1 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 de la nomenclature simplifiée détaillée ci-dessus.

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*) :

- 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 tendanciel. 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 le type d'occupation du sol suivant : *Eau, Zones Humides, Espaces urbains continus, Zones industrielles et commerciales, Autres espaces artificialisés*, en estimant que ces règles produiraient des effets non souhaités.

#### 4.3.2.2 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 obtenu de résultat.

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.

#### 4.3.2.3 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.

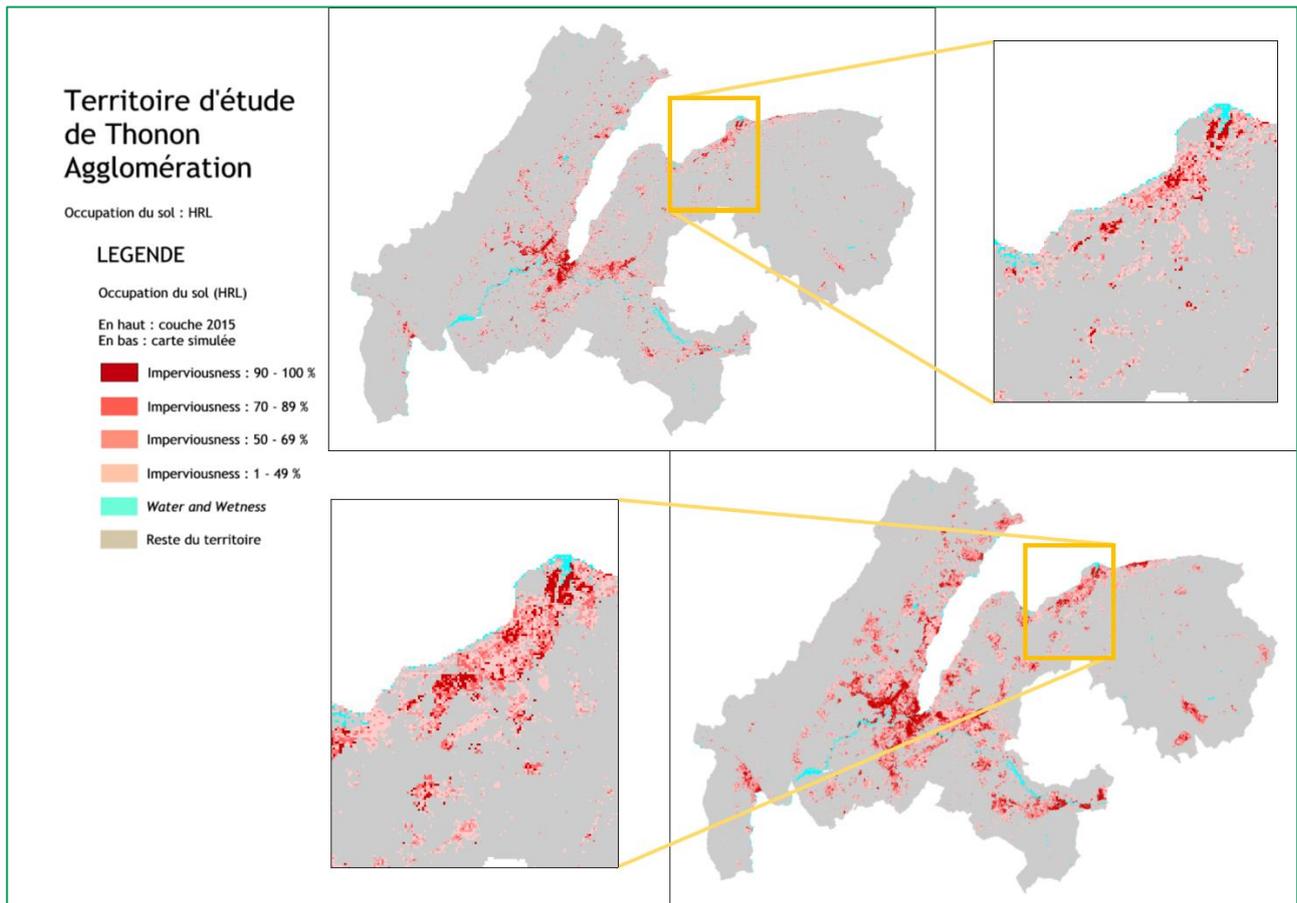


Figure 35 : Modélisation obtenue à partir de LUCSIM sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération et pour la base de donnée HRL

#### 4.3.2.4 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. D'un fonctionnement théorique très simple, LUCSIM s'est avéré assez complexe à appréhender et les modélisations obtenues mériteraient d'être étudiées bien plus finement que nous n'avons pu le faire.

##### 4.3.2.4.1 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 longs : beaucoup de paramètres vont avoir un impact sur le temps de traitement nécessaire à l'arbre de décision pour identifier les règles de transition. Ces paramètres concernent la maille de définition des couches d'occupation du sol, le nombre de types d'occupation du sol ainsi que la manière dont va se faire l'apprentissage (paramètres internes à l'arbre de décision). Cet impact est tel que nous n'avons pas pu réaliser de modélisations à partir de nos données les plus fines (HRL ou Theïa).
- Au niveau de l'arbre de décision, 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*.

- À l'issue de l'arbre de décision, les règles de transition mériteraient de faire l'objet d'une analyse détaillée :
  - Le nombre de règles obtenues varie de quelques-unes à plusieurs centaines et pour chacune le nombre de conditions varie d'une dizaine à près d'une quarantaine pour les plus complexes. Sans analyse détaillée, il est impossible de comprendre les phénomènes qu'elles essaient de reproduire.
  - L'arbre de décision étant un traitement purement statistique, il peut avoir pour impact de trouver des règles de transition qui n'ont aucun sens « réel » et peuvent être jugées inapplicables. Pour éviter des phénomènes non souhaités et dans le cadre de notre expérimentation à partir de la donnée CLC sur le type d'occupation du sol Tissu urbain discontinu, nous avons éliminé toutes les règles de transition impliquant des évolutions des espaces en eau et des autres espaces urbanisés/artificialisés en Tissu urbain discontinu.
- 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 :
  - Ce type de contrainte rajoute une condition au sein de toutes les règles de transition faisant en sorte que les évolutions n'interviennent qu'à partir d'un certain niveau d'attractivité. Les résultats obtenus sont différents avec ou sans Suitability Map, mais, sans analyse plus approfondie, il n'est pas possible de détailler son impact.
- Au niveau de la modélisation, 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.
- Au niveau de la modélisation, les temps de traitement peuvent être long : ce temps est impacté par la taille du territoire d'étude mais également par trois paramètres :
  - Le nombre d'itération : nous avons réalisé des modélisations en continu, c'est-à-dire que le logiciel applique au territoire l'ensemble des règles de transition et répète cette étape jusqu'à atteindre le niveau de la contrainte de la chaîne de Markov ou car aucune évolution n'est encore possible à partir des règles de transition fournies. Ce nombre d'itération a ainsi varié entre quelques étapes jusqu'à plus d'une centaine, avec un impact direct sur le temps de la modélisation.
  - Le nombre de règles de transition : appliquées à chaque itération de la modélisation, plus leur nombre est élevé, plus la modélisation peut prendre de temps. À noter qu'à chaque itération, toutes les règles peuvent ne pas être applicables (ou seulement sur un très petit nombre de pixels) car les conditions géographiques requises ne peuvent pas être remplies mais cela oblige quand même l'outil à vérifier chaque règle à chaque étape.
  - La complexité des règles des transitions : cette complexité dépend notamment du nombre de condition qui doivent être vérifiées mais également de la taille du secteur géographique au sein duquel s'applique la condition. À noter que ce secteur d'analyse, c'est-à-dire la taille du secteur au sein duquel l'outil va compter les différents type d'occupation du sol pour vérifier s'ils permettent ou non de remplir les différentes conditions de la règle, est spécifique à chaque condition et est forcément inférieur ou égale au secteur fixé dans le paramètre *Neighborhood Radius* (secteur d'apprentissage) de l'arbre de décision.

#### 4.3.2.4.2 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 minime 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 : l'ensemble des règles ne trouvent pas à s'appliquer sur certains territoires, en milieu naturel mais également sur certaines franges des territoires urbains. Ce résultat pose question dans la mesure où il s'agit là d'un effet sans fondement, collatéral de la manière que nous avons eu de formuler les règles à partir de l'arbre de décision.
- 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 :
  - On peut observer sur certains espaces des phénomènes d'épaississement urbain ou de développement plus ou moins linéaire, sans pour autant avoir de simples effets « taches d'huile ».
  - On peut observer des phénomènes d'urbanisation spontanée ou de bascule : au milieu des espaces agricoles (quasi-exclusivement) de nouveaux secteurs d'urbanisation peuvent apparaître et se développer ensuite, parfois ce sont des zones étendues qui deviennent, d'un coup, urbanisées, car une ou plusieurs règles trouvent à s'appliquer de manière importante sur cet espace.

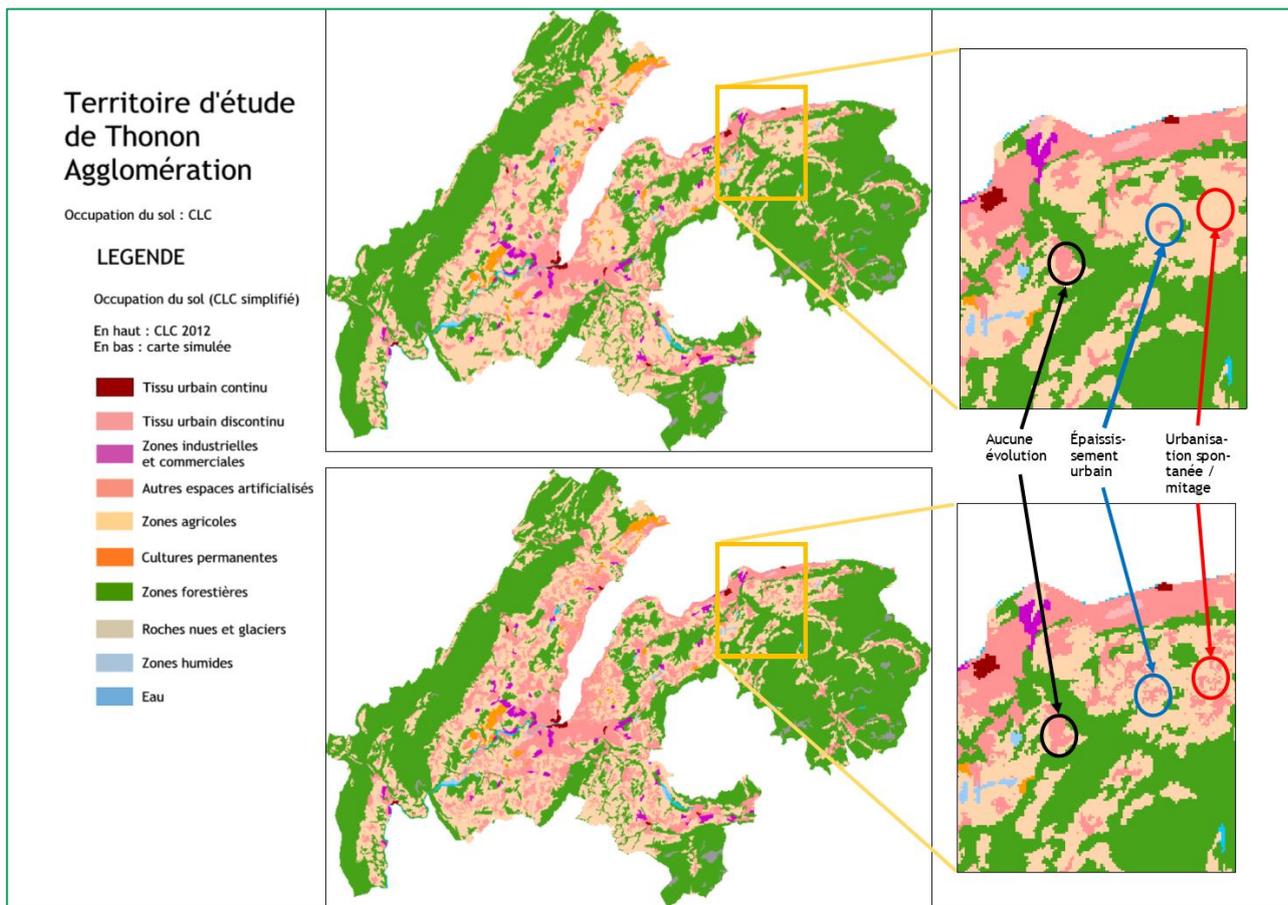


Figure 36 : Illustration sur le territoire d'étude de Thonon Agglomération de phénomènes modélisés par LUCSIM (aucune évolution, épaissement urbain et urbanisation spontanée)

- 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 ».

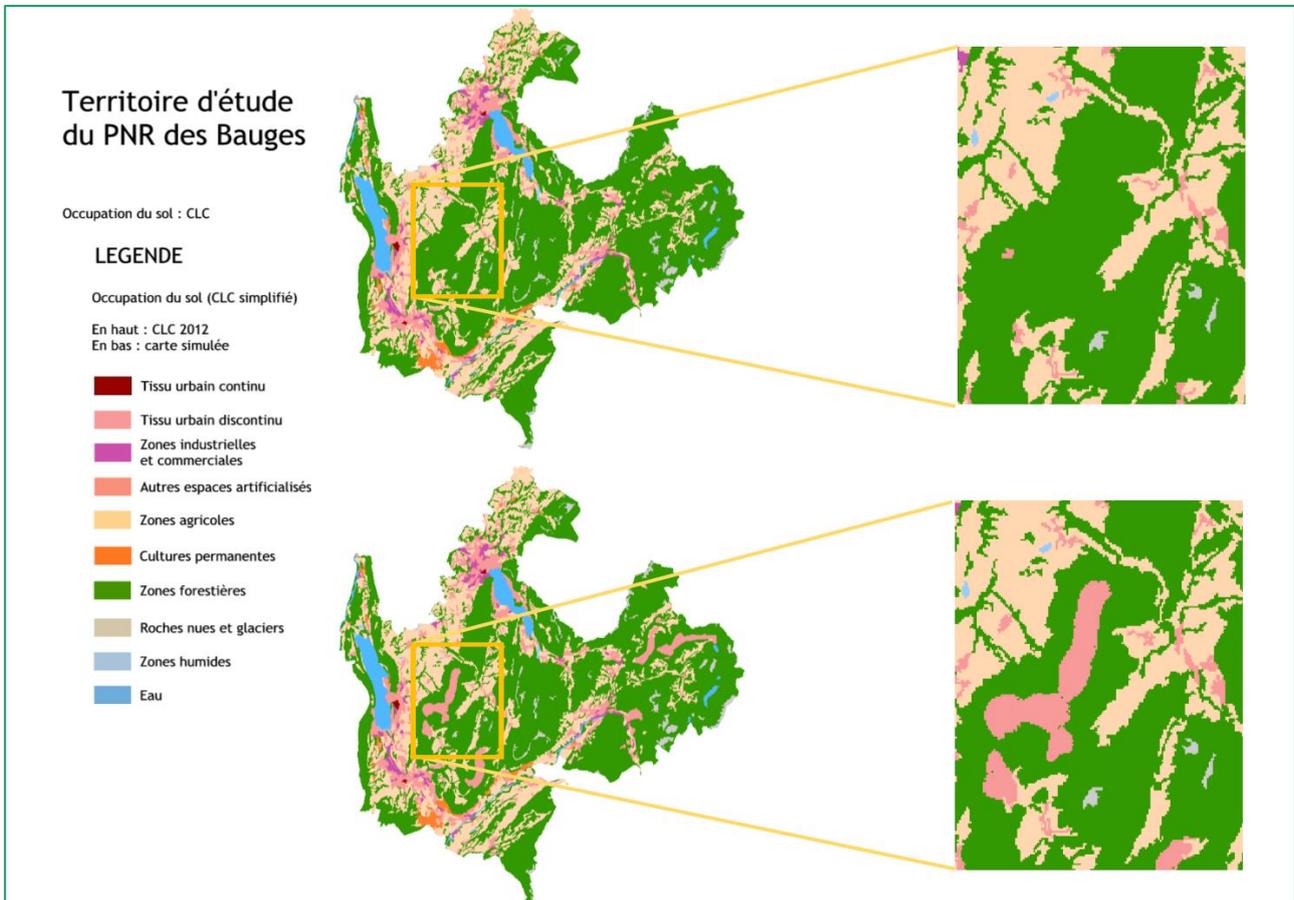


Figure 37 : Illustration sur le territoire d'étude du PNR des Bauges du phénomène du « serpent » modélisé par LUCSIM

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 ».
- 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.

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

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

### 5.1 Modéliser avec FORESIGHT

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*).

#### Prise en main du logiciel

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.

#### Principe de fonctionnement du logiciel

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.).

#### Préparation et intégration des données dans le logiciel

La préparation des données grâce au module de pré-traitement se fait simplement. La préparation d'une carte d'attractivité grâce au module dédié se fait tout aussi simplement.

Si aucune difficulté n'a été rencontrée pour intégrer nos deux bases qui se distinguaient notamment dans la précision de l'information, il faut 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'avons pas de couche unifiée sur l'ensemble de notre territoire d'occupation du sol plus précise que CLC. En outre, aucune évolution n'étant prévue pour ce logiciel, toute évolution future des bases de données pourrait s'avérer problématique<sup>15</sup>.

La carte d'attractivité permet d'intégrer une grande subtilité au niveau de la modélisation (ajustement de l'attractivité en fonction du niveau de protection du territoire, de l'orientation que l'on souhaite donner à l'urbanisation, etc.). Toutefois, il ne nous pas été possible d'expérimenter l'intégration de nos propres cartes d'attractivité<sup>16</sup>. Une solution alternative a pu être trouvée 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.

---

<sup>15</sup> Le module de pré-traitement des données pourrait devenir inopérant en cas d'évolution des bases de données dans les futurs millésimes. Pour éviter cette difficulté, il est théoriquement possible d'intégrer directement nos données dans le module de modélisation (sans passer par le module de pré-traitement) mais nous n'avons pas testé cette option.

<sup>16</sup> À la suite de nouveaux tests, il a été possible d'intégrer une de nos cartes d'attractivité au sein de FORESIGHT. L'intégration par l'intermédiaire de l'onglet *Pre-processing* n'a définitivement pas fonctionné. Il a été, en revanche, possible de générer directement le fichier \*.gif d'une de nos cartes d'attractivité via ArcGIS (en faisant en sorte que la résolution et l'emprise soient strictement identiques aux fichiers générés par FORESIGHT dans le dossier *Input* pour la donnée *Initial Urban Map* par exemple). Ce fichier a été ensuite copié au sein d'un dossier *Input* d'une modélisation, a été reconnu par le logiciel (*Preview dans l'onglet Initial Settings*) et a permis ensuite de générer une modélisation tenant compte de notre propre carte d'attractivité.

## Analyse des résultats obtenus

Le logiciel fournit des cartes d'étalement urbain, un résultat qui peut être qualifié de simpliste (aucune caractérisation de phénomènes de densification) mais dont l'analyse est aisée. Compte-tenu du caractère « automatique » du logiciel et d'une part substantielle d'aléatoire, il ne faut pas chercher à utiliser cet outil en dehors des conditions dans lesquelles il est pertinent. Il n'est, notamment, pas pertinent de vouloir :

- Analyser les résultats à une maille trop fine (infra-communale, voire communale),
- Modéliser l'étalement urbain à partir de pixels trop petits,
- Modéliser des scénarios ayant des différences trop subtiles ou microscopiques.

L'outil doit, en outre, s'intégrer dans une démarche prospective, avec une volonté de représenter différents scénarios d'évolution du territoire, car le logiciel n'a d'intérêt qu'en comparant diverses évolutions possibles du territoire.

Toutefois, la possibilité de réaliser rapidement plusieurs modélisations et de les agréger en une donnée probabiliste (plus pertinente par rapport aux phénomènes aléatoires introduits par le logiciel) est un véritable atout pour le logiciel.

L'analyse, notamment visuelle, des résultats souligne l'impact des paramètres enveloppes foncières et des 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.

## Conclusions

**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 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 tout ou partie des informations géographiques du territoire, ce qui permet de faire assez simplement le lien avec les documents de planification du territoire. Toutefois, 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 : il donne à voir l'impact que pourrait avoir l'étalement urbain, 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.

## 5.2 Modéliser avec LUCSIM

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.

### Prise en main du logiciel

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

### Principe de fonctionnement du logiciel

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, le fonctionnement en mode « tout automatique » de LUCSIM n'est pas explicite.

### Préparation et intégration des données dans le logiciel

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.

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<sup>17</sup>. À noter également que le nombre de règles générées par l'arbre de décision a un impact sur la modélisation à venir.

---

<sup>17</sup> 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.

## Analyse des résultats obtenus

Par une simple étude des règles de transition obtenues par arbre de décision et par une analyse visuelle des modélisations obtenues, nous pouvons 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.

Enfin, les évolutions engendrées par les modélisations sur le territoire sont loin d'être uniformes :

- 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.

## Conclusions

**Compte-tenu de ces résultats, nous ne sommes pas en mesure de tirer une conclusion quant à la capacité de LUCSIM à pouvoir être utilisé comme outil d'aide à la décision.**

Par certains aspects, LUCSIM présente toutefois de véritables atouts :

- LUCSIM peut permettre de faire évoluer concomitamment différents types d'occupation du sol et serait donc en capacité de modéliser certains phénomènes de densification.
- LUCSIM doit également 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 d'avoir pu tester concrètement ces possibilités.