

## Sommaire

---

<b>Sommaire</b> .....	2
<b>Liste de figures</b> .....	3
<b>Résumé</b> .....	3
<b>1. Introduction</b> .....	5
1.1. Surfaces terrestres : utilisation et couverture du sol .....	6
1.2. Intégration des services écosystémiques dans le milieu urbain .....	6
<b>2. Scénarios IPCC</b> .....	8
<b>3. Le Canton de Genève</b> .....	10
<b>4. Questions de recherche</b> .....	11
<b>5. Nature et stockage de carbone : présent et futur</b> .....	12
5.1. Evolution du couvert végétal genevois : NDVI .....	13
5.1.1. Méthodologie.....	13
5.1.2. Résultats .....	14
5.1.3. Discussion et recommandations à l'avenir.....	17
5.2. Génération des scénarios futurs.....	19
5.2.1. Méthodologie.....	20
5.2.3. Résultats .....	21
5.2.4. Discussion et recommandations à l'avenir.....	24
5.3. Stockage du carbone .....	25
5.3.2. Méthodologie.....	25
5.3.3. Résultats .....	27
5.3.4. Discussion.....	30
<b>6. Discussion générale</b> .....	31
<b>7. Conclusion</b> .....	32
<b>8. Bibliographie</b> .....	33
<b>9. Annexes</b> .....	36

## Résumé

---

Le territoire genevois subit une forte pression démographique et urbaine, menaçant les milieux naturels cantonaux ainsi que les services écosystémiques qu'ils offrent. A l'aide de l'outil InVEST et de la carte de Milieux Naturels fournie par le Conservatoire et Jardin Botaniques de Genève (CJB), ce travail évalue le stockage de carbone comme service écosystémique à travers l'étude de l'évolution du NDVI entre 1992 et 2011 et la création des scénarios futurs.

Les résultats montrent qu'actuellement, la surface forestière a légèrement diminué et que cela a des effets directs sur le stockage de carbone ainsi que sur le développement durable et la biodiversité du canton. Parmi les scénarios futurs, l'A1F implique une raréfaction de la végétation urbaine qui mène à une diminution du stockage de carbone et du NDVI augmentant l'îlot de chaleur en ville. Le scénario B2, illustrant une tendance contraire, favorise la présence de la végétation urbaine et les milieux naturels dont l'extension de la surface du cadastre forestier est soutenue. Ces deux phénomènes peuvent, toutefois, influencer sur l'économie et les dépenses sanitaires genevoises.

L'absence des espaces verts urbains, poumons et filtres d'air au sein de la ville, peut expliquer la distribution des températures et la non relation significative entre la température et le NDVI. Pour atténuer l'augmentation des surfaces bâties à l'avenir, scénario A1F, une de solutions durables est le développement et renforcement des toitures vertes tout en favorisant le stockage de carbone.

La cartographie et analyse de tous ces processus et phénomènes via InVEST offre comme principale avantage la facilité d'interprétation des résultats cartographiques par les autorités, par les experts non scientifiques et par la population en général.

## Liste de figures

---

**Figure 1** : Classification d'outils de cartographie. *World Resources Institute, 2008* ;

**Figure 2** : Caractéristiques résumées des quatre canevas narratifs du Rapport spécial d'IPCC sur les scénarios d'émissions (RSSE), publié en 2000. *IPCC, 2007* ;

**Figure 3** : Répartition des surfaces (km<sup>2</sup>) du canton de Genève selon le type, en 1980, 1992, 2004 et 2012. *OCSTAT, 2015* ;

**Figure 4** : NDVI du canton de Genève en 1992 (A) et en 2011 (B) ;

**Figure 5** : Evolution du NDVI entre 1992 et 2011;

**Figure 6** : Evolution du NDVI au sein des communes urbaines du canton genevois ;

**Figure 7** : Scénarios IPCC : CO<sub>2</sub> et température. IPCC, 2007 ;

**Figure 8** : Répartition des milieux naturels selon InVEST pour le scénario futur A1F1.;

**Figure 9** : Répartition des milieux naturels selon InVEST pour le scénario futur B2. ;

**Figure 10** : Répartition du carbone stocké par milieu naturel dans le territoire genevois d'après les résultats proportionnés par InVEST ;

**Figure 11** : Répartition du carbone stocké par milieu naturel dans le territoire genevois d'après les résultats proportionnés par InVEST pour les deux scénarios futurs.

# 1. Introduction

---

Le concept de service écosystémique naît et apparaît pour la première fois en 1970 dans le rapport *Man's Impact on the Global Climate: Assessment and Recommendations for Action*, ayant pour objectif d'adopter une vision globale des problèmes environnementaux et de mettre en évidence la dépendance entre l'être humain et les écosystèmes (SCEP, 1970). Ce fait survient lors de la période d'émergence de la prise de conscience internationale concernant les enjeux environnementaux.

Les services écosystémiques correspondent aux bénéfices retirés par l'homme des processus biologiques (MEA, 2005) pouvant ainsi apparaître dans la littérature avec d'autres dénominations telles que services écologiques ou services environnementaux. Selon le TEEB (2014), les « services fournis par les écosystèmes », sont en mesure de soutenir ou protéger le bien-être humain et sont classés en quatre catégories :

- Approvisionnement : catégorie comprenant les matériaux et énergies fournies par les écosystèmes telles que nourriture, bois eau et/ou autres ressources. Ces biens pourront être commercialisables après exploitation.
- Régulation : les écosystèmes fonctionnent comme régulateurs donc un exemple de service de régulation est la séquestration et stockage du carbone. Ceci induit un effet direct dans la composition de gaz de l'atmosphère et donc sur le changement climatique globale.
- Support : les services de cette catégorie sont les plus importants et leurs effets sur l'Homme sont soit indirects soit n'apparaissant que sur des longues périodes (décennies ou siècles). Le cycle de nutriments ou la maintenance de la biodiversité sont des services s'incluant dans ce critère.
- Culturel : ces services sont des biens non-matériels et non commercialisables d'ordre spirituel, religieux, etc.

Cette notion fait le sujet d'étude d'un nombre croissant des publications depuis les années 1990, ainsi bien que la problématique liée aux services écosystémiques ne soit pas encore très développée au niveau suisse, elle a beaucoup attiré l'attention au cours des dernières décennies au niveau international. Cela a impliqué l'essor de nouvelles initiatives et rapports dont les plus performantes au long de ce dernier temps sont le rapport du *Millenium Ecosystem Assesment* ou celui du Centre d'analyse stratégique français (Chevassus-au-louis, 2009), la démarche TEEB (*The Economics of Ecosystems and Biodiversity*), la plateforme IPBES (*Intergovernmental Platform on Biodiversity and ecosystem Services*) (Burkharda, 2012).

## **1.1. Surfaces terrestres : utilisation et couverture du sol**

Il y a déjà 12.000 ans que les êtres humains exercent un impact sur l'utilisation et la couverture des sols ainsi que sur la biodiversité. Ce phénomène s'est intensifié au cours de ces derniers 50 ans, percevant une augmentation des zones urbanisées et agricoles ce qui endommage les écosystèmes naturels et induit des effets climatiques directs de l'échelle locale à l'échelle globale (IPCC, 2007 ; Maes, 2013).

Différencier les concepts de couverture et utilisation du sol est indispensable pour bien comprendre les processus exerçant un effet sur les surfaces terrestres. De ce fait, la couverture du sol (« *Land cover* ») se définit comme l'état biophysique du couvert terrestre ; c'est le type de végétation, la présence d'eau, roches, etc. La conversion d'un milieu (de forêt à terrain agricole) ou une modification (densité d'arbres d'une forêt) sont des exemples de changements dans la couverture du sol. D'autre part, l'utilisation du sol (« *Land use* ») comprend à la fois la manière dont les caractéristiques biophysiques du sol sont manipulées par l'homme ainsi que l'intention qui sous-tend cette manipulation, le but pour lequel le terrain est utilisé.

Au niveau mondial, entre le 12-14 % du total des émissions des gaz à effet de serre d'origine anthropogénique provient des pratiques agricoles actuelles (US-EPA, 2006 ; IPCC, 2007). De plus, le changement dans la couverture et utilisation du sol, entre autres processus de changement, contribue à la réduction d'un 30-50% du réservoir de carbone du sol dans les zones tempérées, et ce pourcentage s'élève à un 50-75% dans les zones tropicales (Lal, 2008).

## **1.2. Intégration des services écosystémiques dans le milieu urbain**

La population mondiale actuelle de 7.2 milliards devrait augmenter au cours des dix prochaines années, pour atteindre 8.1 milliards en 2025 et 9.6 milliards en 2050 (ONU, 2013). L'aménagement urbain devient par conséquent un enjeu majeur de l'intégration des services écosystémiques en milieu urbain car ceux-ci peuvent structurer des projets d'aménagement visant à fournir les besoins de l'Homme en milieu urbain ainsi que de montrer les liens indissociables entre milieu urbain et services écosystémiques.

A nos jours, plusieurs projets faisant le lien service écosystémique-milieu urbain ont été déjà mis en place. Le projet SUPER (*Sustainable Urban Planning for Ecosystem services and Resilience*) évalue l'intégration du concept de service écosystémique dans la planification de l'espace urbain, afin d'améliorer la résilience en ce milieu et de construire un partenariat entre les urbanistes, les politiciens et les écologistes pour la bonne gouvernance et gestion des services écosystémiques (Colding, 2010). Un autre projet qui envisage le développement d'une planification urbaine plus durable est le conçu par l'Université de Helsinki sous le nom de ENSURE (*European Enhancing Sustainable Urban Development through Ecosystem Services*) (University of Helsinki, 2015) ; son principal but est de quantifier des indicateurs permettant de mesurer les impacts que peuvent produire une ville durable sur un nombre de services prioritaires.

Ainsi, les biens et services des écosystèmes, et le capital naturel qui les produit, fournissent d'importants apports directs et indirects aux économies nationales et au bien-être humain. De nombreuses tentatives ont été faites pour les évaluer. Au cours des dernières décennies,

des progrès notables ont été réalisés dans la mise au point de méthodes d'évaluation des services procurés par les écosystèmes forestiers et dans leur inclusion dans la comptabilité économique nationale (Wu, 2010). Bien que ces évaluations sont prises en compte par un nombre important des pays, en Suisse, de manière générale, n'est pas un sujet très répandu et, à Genève, en spécial, le sujet reste est méconnu par les autorités.

Le développement des projets, tels que les auparavant mentionnés s'appuient et sont notamment facilités par des outils d'aide à la décision. De ce fait, les décideurs obtiennent des indicateurs qui permettent des réalisations de comparaisons pour un vaste éventail des scénarios d'étude ainsi qu'à différentes échelles géographiques. La monétarisation est une autre solution qui permet d'attirer l'attention sur les écosystèmes et les services rendus en mettant en avant le capital naturel comme source de revenus environnementaux et sociétaux externalisés.

La cartographie des services écosystémiques s'envisage comme un outil efficace de sensibilisation, mais aussi d'élaboration et/ou de mise en œuvre des politiques publiques de protection des milieux naturels ; cependant, cet outil souffre encore de limitations (European Commission /Directorate General for the Environment, 2013 ; Dufour, 2014).

Selon Bagstad (2013), ces outils se classifient conformément l'objectif de leur utilisation et l'étape d'évaluation du service écosystémique à analyser : **ESR** ou **Co\$ting** s'emploient pour des évaluations rapides et pour l'identification des services, **LUCI** est utile lors de la mise en œuvre de projets dédiés à la conservation des services. Pour une utilisation plus générale sans valorisation **ARIES**, **EcoSerc** ou **SoIVES** sont les plus conseillés tandis que pour des évaluations économiques et spatiales se seront **EcoAIM**, **EcoMetrix**, **Ecosystem Valuation Toolkit**, **ESValue**, **NAIS** et/ou **INVEST** (Figure 1).

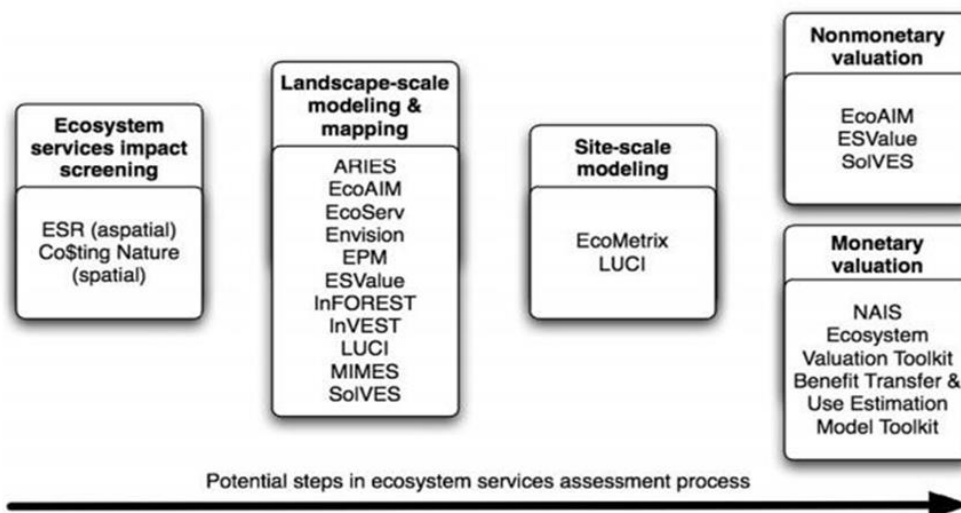


Figure 1. Classification d'outils de cartographie. Selon le *World Resources Institute* (2008), l'évaluation des services écosystémiques comprend 5 étapes : une première d'identification des services affectant la prise de décision, une deuxième qui trie l'ensemble des services identifiés dans la première, ensuite une analyse et finalement, une évaluation des impacts causés par les politiques développées et une identification des risques et opportunités liés aux services. La quatrième étape, facultative, tente d'attribuer des valeurs économiques aux services écosystémiques.

## 2. Scénarios IPCC

Autrefois, l'Homme a connu des variations climatiques naturelles mais ce qui fait la différence par rapport aux variations actuelles est la vitesse du réchauffement. Le réchauffement climatique en lui-même est un phénomène mais les activités d'origine anthropique telles que l'activité économique humaine, les émissions des gaz à effet de serre et d'aérosols, ou/et les changements de la couverture terrestre et l'utilisation du sol, favorisent l'accroissement de la vitesse du réchauffement. Ainsi, ceci induit des conséquences multiples et difficiles à cerner, dont une grande majorité à des effets irréversibles, aux échelles régionale et planétaire, à l'avenir (IPCC, 2007).

C'est dans le but d'analyser les changements climatiques possibles, leurs impacts et les solutions pour les atténuer, que l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)<sup>1</sup> a élaboré des scénarios futurs définis par quatre canevas, A1, A2, B1 et B2, décrivant les relations entre les sources qui conduisent aux émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols, et de leur évolution au cours du 21<sup>ème</sup> siècle à l'échelle régionale et globale.

Chaque canevas proportionne une famille, laquelle montre les différentes évolutions démographiques, sociales, économiques, technologiques et environnementales auxquelles le monde est soumis. En général, les scénarios combinent deux types de tendances, un ensemble qui varie entre les fortes implications environnementales ou économiques, et l'autre qui tend bien à augmenter la globalisation ou bien la régionalisation (Nakicenovic, 2000 ; IPCC, 2007). Voici les quatre familles :

- **A1** : présente un monde futur avec une croissance économique très rapide, une population croissante jusqu'à atteindre son maximum au milieu du 21<sup>ème</sup> siècle pour décliner par la suite, et une rapide introduction des efficaces et modernes technologies.
- **A2** : présente un monde futur très hétérogène dont la population ne cesse pas d'augmenter et le rythme de la croissance économique est plus lent par rapport aux autres scénarios. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales.
- **B1** : propose un monde convergent avec la même population globale que dans le scénario A1, mais avec des changements rapides dans les structures économiques, avec l'introduction des technologies propres et utilisant les ressources de manière efficiente. Cette famille vise à trouver des solutions mondiales pour une vers une viabilité économique et une équité mondiale mais sans des initiatives en ce qui concerne le climat.
- **B2** : cette dernière famille met l'accent sur des solutions locales au sujet des développements économique, social et environnemental, adaptées à une population toujours en augmentation. Les scénarios sont dirigés vers la protection de l'environnement et l'équité sociale.

<sup>1</sup> Cet organisme créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), est un organe intergouvernemental ouvert à tous les pays membres de ces deux organisations. En français, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).



En total 40 scénarios ont été développés à partir de six équipes de modélisation. L'ensemble des scénarios se compose des 6 groupes découlant des quatre familles principales : un groupe pour chacune des familles A2, B1 et B2 et trois groupes pour la famille A1, caractérisant des évolutions respectives des technologies énergétiques: A1F (intensité d'utilisation des combustibles fossiles), A1B (équilibre) et A1T (prédominance des combustibles non fossiles) (Nakicenovic, 2000 ; IPCC, 2007) (Figure 2).

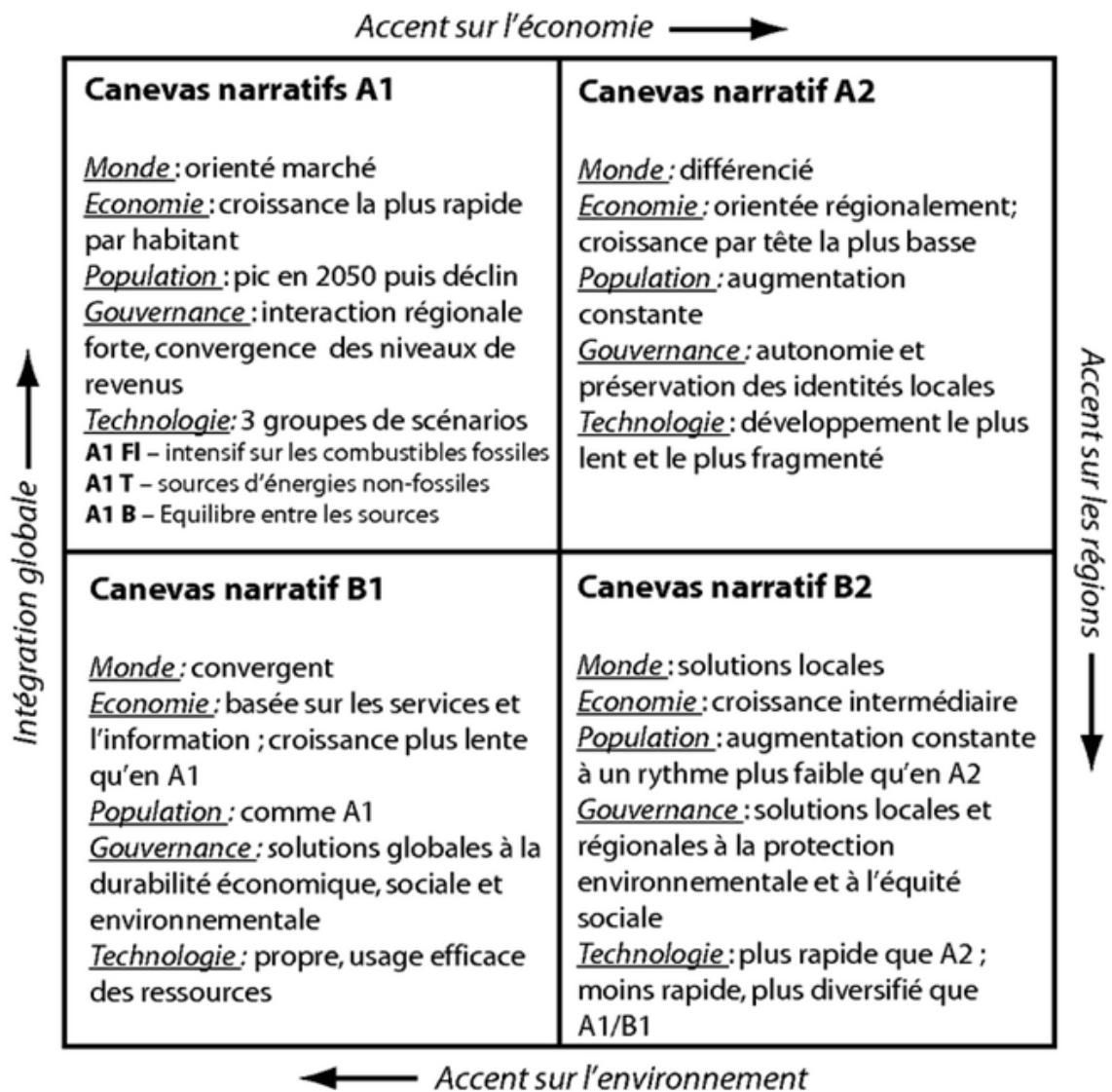


Figure 2. Caractéristiques résumées des quatre canevas narratifs du Rapport spécial d'IPCC sur les scénarios d'émissions (RSSE), publié en 2000. Ce rapport contient des scénarios des futures émissions de gaz à effet de serre accompagné de canevas narratifs sur les développements sociaux, économiques et technologiques (IPCC, 2007).



### 3. Le Canton de Genève

Le Canton de Genève situé à l'ouest de la Suisse, d'une surface de 282.5 km<sup>2</sup>, compte 469.433 habitants, en date du 31 décembre 2012, répartis dans les 45 communes qui composent le territoire. La croissance de la population du canton genevois s'est accélérée ces derniers ans tandis que le parc de logements s'est peu développé dans la dernière décennie (DIM, 2010). Selon les dernières projections démographiques de l'Observatoire statistique transfrontalier (OST), la population genevoise subit un accroissement d'entre 24% et 33%, donc en 2040 Genève compterait 618.000 habitants (de Weck, 2012).

A Genève, comme d'une manière générale dans le monde, la flore fait face à diverses pressions comme l'urbanisation croissante, les modifications des pratiques agricoles ou encore l'arrivée des espèces exotiques envahissantes. Les forêts, tant naturelles qu'artificielles, et les arbres disséminés à travers toute la municipalité, jouent un rôle décisif dans l'écologie, l'esthétique et le développement socio-économique. De même, les forêts sont riches en biodiversité et hébergent une grande variété d'espèces de faune et de flore.

Selon la figure 3, la surface forestière genevoise, privée et publique, est stable depuis 1990 avec 3200 hectares ne recouvrant que le 10% de la surface cantonale, un pourcentage faible par rapport à la moyenne suisse qui est de 29%. Néanmoins, la surface agricole recule d'un 9.5%, en 24 ans, n'occupant qu'un 37.8% du territoire genevois, soit 106.78 km<sup>2</sup> (OCSTAT, 2015).

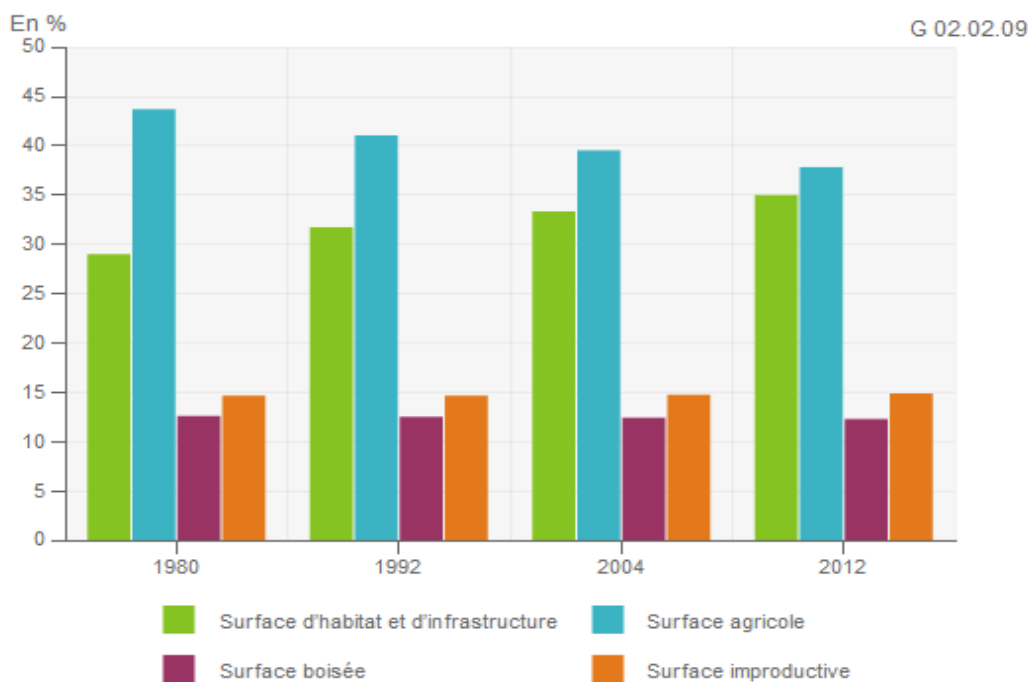


Figure 3. Répartition des surfaces (km<sup>2</sup>) du canton de Genève selon le type, en 1980, 1992, 2004 et 2012. Selon l'Office Cantonale de la Statistique (2015) la surface d'habitat et d'infrastructure a passé d'occuper un 29.0% du territoire en 1980 à 35.0% en 2012 ; par contre la surface agricole a diminué d'un 43.7% (1980) jusqu'à atteindre 37.8% en 2012. La surface boisée a évolué modérément au long des années comme la surface improductive.

## 4. Questions de recherche

---

La structure du rapport se divise en trois parties. D'abord, la partie « **Introduction** » qui comporte la définition, brève histoire et intégration dans le milieu urbain des services écosystémiques, la présentation des outils de cartographie ainsi que des scénarios IPCC, le cadre analytique du Canton de Genève et les trois questions de recherche. Ensuite, la partie « **Méthodologie** » comprend une présentation, les résultats et la discussion de chacune des démarches suivies : évolution du couvert végétal, génération des scénarios futurs et évaluation du stockage de carbone. La troisième partie est la « **Discussion générale et conclusion** ». Cette section discute les résultats obtenus lors des analyses réalisées et répond aux questions de recherche posées dans la première partie du rapport.

Le but principal de ce travail est d'analyser l'évolution du couvert végétal du canton genevois au fil des années ainsi que d'évaluer le stockage de carbone présent, selon la carte des milieux naturels fournie par le Conservatoire et Jardin Botaniques (CJB), et futur, selon les scénarios les plus extrêmes proposés par l'IPCC. Par ailleurs, les suivantes questions ont été abordées lors du travail :

- Au niveau cantonal, a-t-il fortement évolué le couvert végétal en termes de NDVI ? Et les espaces verts en ville ?
- Est-ce que les scénarios futurs fournis par InVEST sont-ils pertinents où par contre ils présentent des limitations ?
- A l'heure actuelle, quelle est la répartition du stockage de carbone comme service écosystémique ? Quel est l'avenir de ce service ?

## 5. Nature et stockage de carbone : passé, présent et futur

---

Les milieux naturels du canton genevois jouent un rôle très important et leur stabilité et maintien induit des conséquences directes à court et long terme pour la société. Les espaces verts et la végétation urbaine occupent une place importante dans les milieux urbains. Les espaces verts apportent des lieux de détente et de récréation ainsi la végétation urbaine contribue à la réduction de la pollution, « nettoie » l'air et l'eau et réduit l'îlot de chaleur urbaine en bénéfice de la population (Nowak, 2006 ; Long, 2012). De même, le stockage de carbone, comme service écosystémique, est en lien avec la surface boisée dont la végétation urbaine est incluse.

Le développement durable, la protection de la biodiversité et l'augmentation de la qualité de vie dans les villes sont des thèmes d'actualité qui mobilisent d'ailleurs le public, les gestionnaires et les pouvoirs publics. Or, l'investissement stratégique dans l'évaluation des services écosystémiques pourrait être pris en charge par les organismes fédéraux, les fondations philanthropiques, les groupes du secteur public ou privé afin de soutenir les prises de décisions basées sur les services écosystémiques.

Pour la cartographie, les données utilisées seront fournies par la Carte des milieux naturels du Canton de Genève (CJB), laquelle est issue d'une approche de modélisation, prédiction, système expert ainsi que des observations de terrain récentes ; le STIG (Système d'information du territoire genevois) offre toute une série des couches utiles lors des analyses :

- CAD\_Batiment\_Horsol
- CAD\_Commune
- CAD\_Limite\_Canton
- FFP\_Cadastre\_Foret
- GEO\_Lac
- OCS\_Pobatlog\_Commune
- SPD\_Espaces\_Verts
- SPD\_Inv\_Agricole
- Ortophoto Genève 1991
- Ortophoto Genève 2012

Concernant l'évaluation et l'évolution du stockage de carbone par les milieux naturels du canton, l'objectif est de tester l'outil InVEST. Celui-ci permet de cartographier, de quantifier et d'évaluer l'état actuel des services écosystémiques et les divers scénarios futurs à son développement future. Bien que des nombreux outils de cartographie soient à disposition, tels que InFOREST o CITYgreen, InVEST a l'avantage de ne pas demander une licence de « software » de Système d'Information Géographie (SIG) pour son emploi. De ce fait, InVEST est un outil « *Open Access* » téléchargeable directement depuis le site du « *Natural Capital Projet* » (Tallis, 2011).

## 5.1. Evolution du couvert végétal genevois : NDVI

La première démarche de cette étude est d'analyser et évaluer l'évolution du couvert genevois du territoire genevois entre 1992 et 2011. Pour se faire, l'indice choisi est le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), un des indices les plus robustes et utilisés lors des différentes études ayant par sujet l'analyse et évaluation de la végétation. Comme les autres indices de végétation, le NDVI est sensible à la présence de végétation verte. Malgré l'efficacité de ce paramètre à mesurer la croissance des plantes, déterminer les types de couvert végétal et contrôler la production de biomasse, sa capacité de minimisation de l'influence du sol et de l'atmosphère est relativement basse (Towers, 2009).

### 5.1.1. Méthodologie

D'abord, des images satellites de Genève pour de différentes périodes ont été choisies afin d'analyser et d'évaluer le changement du couvert végétal du canton de Genève. Pour se faire, le site *landcover.org* offre des nombreuses images satellitaires dont uniquement deux offrent une correcte visualisation du territoire. La première photo aérienne correspond au mois d'août 1992 (format TM) et la deuxième correspond au mois d'août 2011 (format ETM+), toutes les deux ayant une taille de 185 x 185 kilomètres et une résolution de 30 mètres. **Important** : toutes les couches ont été projetées dans le même système de coordonnées que les images satellites.

La procédure se continue par le calcul du NDVI, mesure de l'activité photosynthétique des plantes, pour chacune des images, dont la formule utilisée est la suivante :

$$\text{NDVI} = \frac{(IR - R)}{(IR + R)}$$

**IR**, intensité lumineuse en bande infrarouge, correspond au canal 4 tandis que **R**, intensité lumineuse en bande rouge, correspond au numéro 3. Pour afficher les résultats en une échelle allant de -1 à 1 au lieu de 0 à 255, la formule ci-dessus doit être modifiée (*Raster calculator*) :

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{FLOAT}(4) - \text{FLOAT}(3))}{(\text{FLOAT}(4) + \text{FLOAT}(3))}$$

Le processus offre comme résultats deux cartes (format raster) représentant le NDVI par mois et année (NDVI\_1992 / NDVI\_2011) ; étant donné que les images occupent une surface majeure que celle du canton genevois, quatre possibles démarches sont conçues afin d'afficher que la zone d'intérêt, en ce cas précis le canton de Genève :

- ✓ *Extract by polygon* : puisque le canton est un polygone irrégulier il n'est pas viable l'introduction de toutes les coordonnées géographiques.
- ✓ *Erase* : le résultat du NDVI (raster) n'est pas convertible en polygone donc cette option se refuse.
- ✓ *Clip* : le raster ne se découpe pas par la couche polygone CAD\_Communes.
- ✓ *Extract by mask* : est l'outil choisi, malgré la création des nouveaux artefacts sur la photo lors du processus. Le *mask* est la couche CAD\_Commune fournie par le SITG.

Après cette première procédure, il est possible de calculer la différence de NDVI sur chaque pixel des images grâce au *Raster calculator* selon le calcul:  $NDVI_{1992} - NDVI_{2011}$ . Un nouveau raster (Evolution NDVI) apparaît ayant un grand nombre de classes, lesquelles se reclassent qu'en deux catégories en déplaçant les bornes de l'histogramme du raster, dans le but de mieux interpréter les résultats et d'observer la perte et la variation du couvert végétal. Pour calculer la surface évoluée, un nouveau champ du type *Short Integer* et dénommé « Surface\_Ha » a été créé ; pour afficher la surface en hectares il ne reste plus qu'à chercher sur les *Statistics* de le dite champ.

Pour rendre la cartographie des changements visible sur *Google Earth*, le raster « Evolution NDVI », se reclasse (*Reclassification*) et se transforme en polygone, de cette manière il est même possible de calculer la surface ayant subis un changement. Une fois le polygone obtenu, dénommé « Evolution du couvert végétal », il est nécessaire d'extraire la zone comprenant le lac Léman afin de mieux afficher les résultats et visualiser que les surfaces terrestres. Pour ceci, d'abord s'extrait le « lac » à partir de la couche GEO\_Lac, en utilisant l'outil *Erase*. Finalement, ledit polygone se transforme en format KML.

### 5.1.2. Résultats

Le NDVI se classifie en 5 catégories ce qui facilite l'interprétation. Les zones ayant des valeurs inférieurs à 0 (rouge) correspondent bien à des couvert de sol artificielles ou bien à d'eau ; les zones oranges prennent de valeurs entre 0 et 0.2 donc des sols nu et/ou de la végétation morte ; la végétation dispersée et peu vigoureuse se colorie en jaune coïncidant avec des valeurs supérieurs à 0.2 et inférieurs à 0.4 ; le vert clair ( $0.4 < NDVI < 0.6$ ) reflète une végétation abondante et vigoureuse et le vert foncé, valeurs de NDVI supérieurs à 0.6, font référence à des zones de végétation très dense et vigoureuse.

En général, pour les deux cartes, les zones rouges ( $NDVI < 0$ ) correspondent essentiellement aux zones bâties et au sol nu. Des zones consacrées aux activités agricoles et viticoles ainsi qu'à la végétation urbaine montrent de valeurs supérieures de NDVI (couleur orange ou jaune) comme la prairie, un des milieux les plus importants du canton. Par contre, les milieux naturels tels que les forêts (riveraine et cordon, les buissons-roncier et les chênaies, colorés en vert, prennent des valeurs plus élevés grâce à leur composition floristique (espèces de flore). Les zones vertes foncées, peu représentatives, se localisent à l'intérieur de zones incluses dans la catégorie précédente. C'est-à-dire, à l'intérieur des surfaces avec un NDVI entre 0.4 et 0.6.

Selon la figure 4A, les emplacements à abondante végétation, vert clair, sont facilement reconnaissables et ils sont localisés dans différentes communes du canton. La vallon de l'Allondon, la Vallon de la Laire et/ou le Bois de Jussy sont inclus dans cette catégorie tandis que le Bois du Château (Vernier) et le Bois de Treulaz (Aire la Ville) correspondent à une dense végétation, couleur vert foncé. Les zones prenant des valeurs de NDVI moyen sont disséminées le long du territoire tandis que les valeurs les plus bas se concentrent davantage dans les communes urbaines, voir le noyau concernant la commune de Genève ou la zone de l'aéroport.



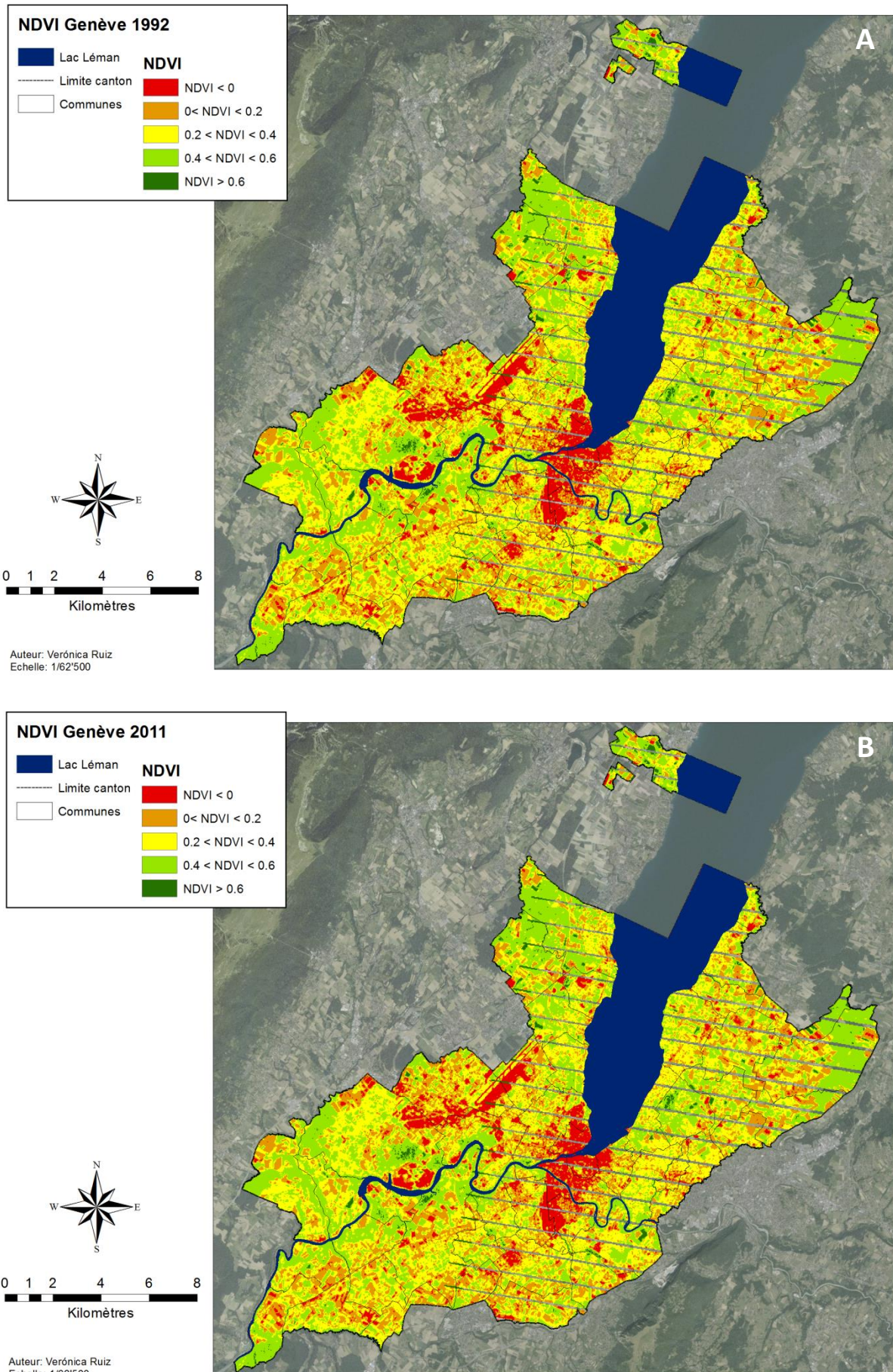


Figure 4. NDVI du canton de Genève en 1992 (A) et en 2011 (B). Les couverts artificiels (couleur rouge) ainsi que la végétation abondante et vigoureuse (couleur vert clair) ressortent le mieux d'après l'image dans les deux années.



La situation en 2011 a peu changé en termes de NDVI par rapport à celle du 1992. Le seul phénomène observable est un léger assombrissement (jaune à orange ; orange à rouge) des zones frontalières ponctuelles des communes comme Bardonnex, Laconnex ou Thônex (Figure 4B). Au fil des années, le NDVI présente des légères variations tant pour la perte comme pour le développement du couvert végétal, voir la figure 5 qui expose la couche « Evolution NDVI ».

De même, les zones incorporées dans le cadastre forestier et l'inventaire agricole suivent une tendance semblable car leurs surfaces ont diminués au fil des années tout en favorisant, entre autres, le développement des zones improductives. Les espaces verts, qui englobent les espaces verts, espaces ouverts et les espaces sportifs accessibles au public, présentent le pourcentage le plus élevé en ce qui concerne le NDVI. La plupart des surfaces liées à cette catégorie ont vu transformé leurs valeurs de NDVI.

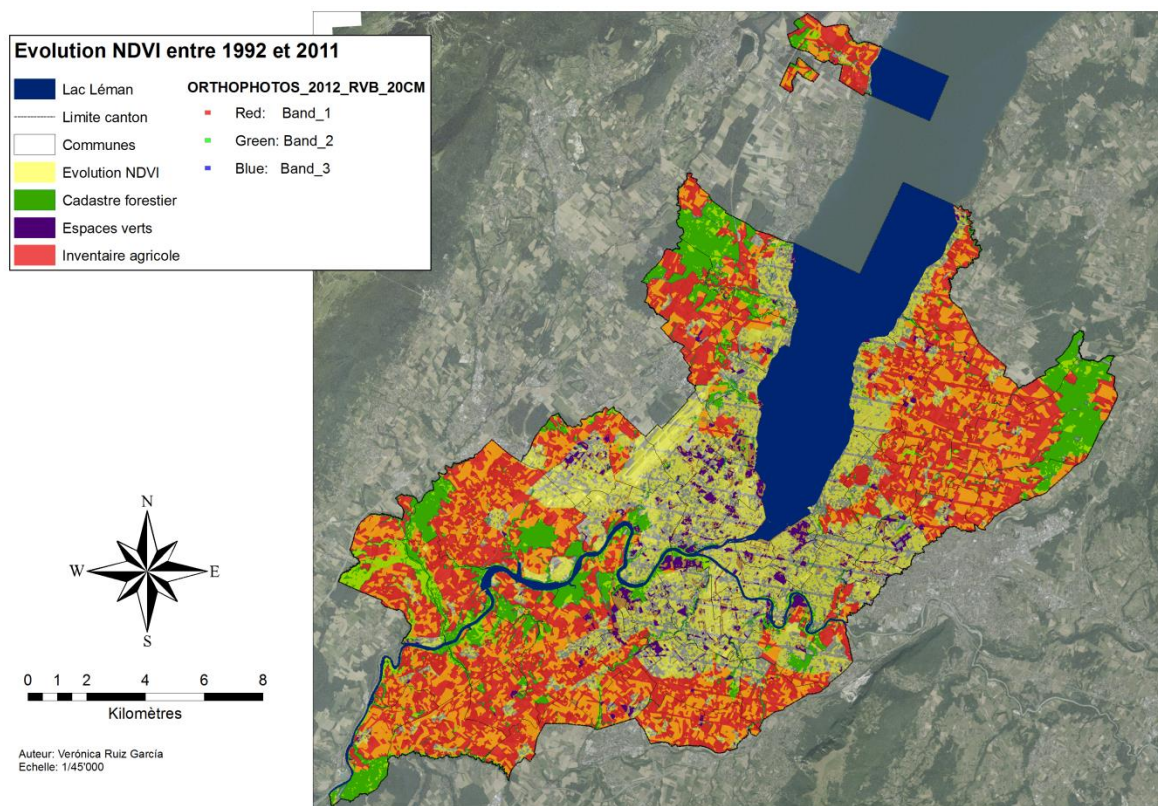


Figure 5. Evolution du NDVI entre 1992 et 2011. Les zones jaunes montrent un changement dans le NDVI entre les deux années étudiées et elles sont fractionnées et disséminées par tout le territoire. Les changements ont eu lieu essentiellement dans les zones, actuellement, bâties et destinées aux cultures agricoles. Le cadastre forestier a subi un pourcentage des changements infime par rapport au reste des zones.

Selon la figure 6, les espaces verts se concentrent davantage dans les communes urbaines, lesquelles sont fortement bâties et concentrent une grande partie de la population. Malgré la solide présence des espaces verts ceux-ci ont, particulièrement, évolué en termes de NDVI. Les conséquences sur la population, sur le développement durable ainsi que sur l'environnement genevois se traitent dans les chapitres à venir.



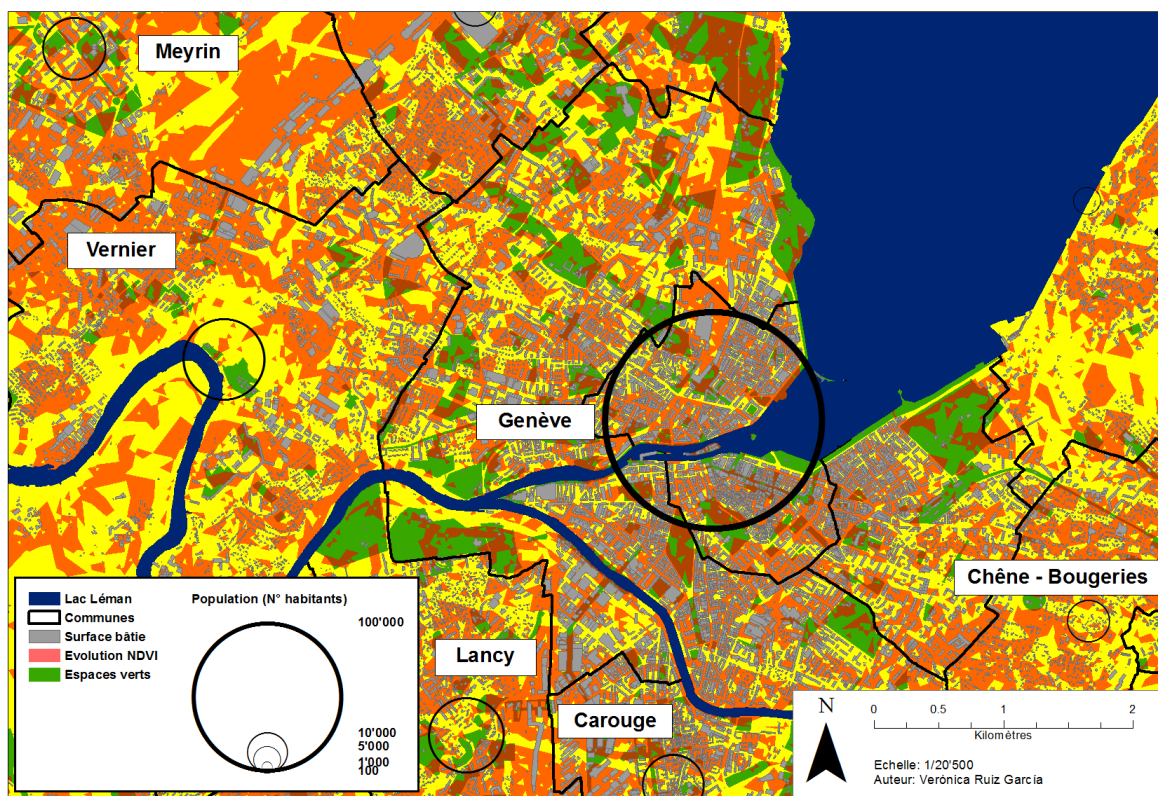


Figure 6. Evolution du NDVI au sein des communes urbaines du canton genevois. Les espaces verts, coloriés en vert, illustrent une modification de leur NDVI, qui s’affiche sur la carte par un couleur orange. De même, les communes ayant un nombre élevé d’habitant concentrent d’avantage des espaces urbains, mais ceux-ci modifiés au fil des années comme auparavant mentionné.

L’annexe 1 explique à une échelle plus fine la situation du NDVI en 2011 comparée à l’évolution de cet indice dans les 9 années écoulées depuis 1992. Cette image se concentre d’avantage dans des communes plutôt agricoles ayant aussi une forte activité viticole, comme Dardagny, Russin et/ou Avully.

Au sujet des résultats sur *Google Earth*, ils permettent aux utilisateurs de faire une étude et visualisation itérative des résultats depuis divers angles de vue (Annexe 2). Ces derniers apportent une vision supplémentaire de l’étude de l’évolution du couvert végétal genevois. Les cartes présentées précédemment restent, toutefois, d’une portée fondamentale pour l’interprétation des résultats.

### 5.1.3. Discussion et recommandations à l’avenir

Selon la LAT<sup>2</sup> et la LFo<sup>3</sup>, la zone des bois et forêts devrait être identique à la surface et l’aire forestière ne doit pas être diminuée. De ce fait, la surface forestière genevoise, environ 3200 ha est stable depuis 1990 ; par contre, d’autres surfaces boisées telles que bosquets, haies et arbres sur des surfaces agricoles en perdent 99 hectares (Figure 5).

En générale, les résultats suggèrent qu’il n’y a pas d’évolution significative au niveau de la quantité de la biomasse verte entre 1992 et 2011 d’après les analyses de télédétection et

<sup>2</sup> LAT, Loi fédérale sur l’aménagement du territoire du 22 juin 1979 (Etat le 1<sup>er</sup> mai 2014)

<sup>3</sup> LFo, Loi fédérale sur les forêts du 4 octobre 1991 (Etat le 1<sup>er</sup> juillet 2013)

traitement des images satellites. Il ne s'apprécie pas ni une défoliation significative ni une densification et augmentation de la forêt, malgré les politiques de conservation de la nature et de la forêt mises en place ces dernières années dans le canton genevois.

Les chênes, les robiniers, les hêtres ou les frênes sont des espèces d'arbres composant les forêts genevoises. En conséquence, la composition caducifoliée de les dites forêts favorise des valeurs plus élevées pendant la période estivale, comme illustré dans la figure 4. Pour cette première démarche, les photos à disposition sont du mois d'août donc pour à l'avenir, il serait intéressant d'analyser des images des différentes saisons.

Au sujet de la végétation urbaine et les espaces verts publics, ils présentent des valeurs du NDVI élevées par rapport aux milieux avoisinants ce qui révèle l'importance de la végétation en ville comme poumon et purificateur d'air. Les fonctions principales de la nature en ville aident à diminuer l'effet d'îlot de chaleur. L'évolution du couvert végétale dépendra uniquement et exclusivement de l'intérêt des autorités à préserver la végétation déjà présente, à créer des nouveaux espaces verts et à reboiser les zones qui ont été abandonnés là où avant existait une culture agricole (Sarricolea, 2008).

Rapport-Gratuit.com

## 5.2. Génération des scénarios futurs

Quelles sont les conséquences du changement climatique ? Nature ou urbanisation : quel est l'avenir du Canton de Genève ? Le couvert végétal genevois tend à diminuer ? Quel est l'avenir en termes de stockage de carbone du canton genevois ? Des questions se posent au sujet de l'avenir de la Terre, en général, et des milieux naturels, en spécial, dès là l'importance de cette deuxième démarche relative à la génération des scénarios futurs pour le territoire genevois.

Actuellement, un éventail des outils sont à disposition dans le but de créer des nouveaux scénarios territoriaux selon les besoins et intérêts des utilisateurs :

- **Metronamica** : outil privé développé par RISKS BV. Son objectif principal est d'explorer les effets des options politiques alternatives sur la qualité de l'environnement socio-économique et physique via la modélisation spatiale des différentes utilisations du sol. Ensuite, les résultats obtenus s'appliquent dans le but de stimuler et faciliter la sensibilisation, l'apprentissage, et la discussion préalables à la prise de décisions appropriées (RISKS BV, 2005) ;
- **Spring**: software open source alternative à Metronamica qui a été développé par l'*Image Processing Division (DPI) du Brazil's National Institute for Space Research (INPE)*. Cet outil vise à intégrer des données en mode vector et raster dans un environnement unique ainsi qu'à élaborer des scénarios à l'aide de ces données et des images satellite (SPRING, 1996) ;
- **IDRISI Land Change Modeler**: *Clark Labs (Clark University)* a créé cet outil innovateur et payant focalisé dans l'aménagement du territoire et l'aide à la décision. Avec un système automatisé, il simplifie les complexités de l'analyse du changement, la gestion des ressources et l'évaluation des habitats fournissant des solutions par la création des scénarios selon les changements dans l'utilisation du sol (McKenzie, 2012) ;
- **InVEST** : est une famille d'outils gratuits et open source, développée par le NATCAP, qui cartographie, mesure et valorise les biens et les services offerts par la nature. Cet outil est disponible gratuitement, depuis 2008, et peut être consulté et utilisé librement par les utilisateurs et intéressés par ce type d'analyse (Tallis, 2011).

Grâce à tous ces avantages et la facile interprétation qu'offrent ses résultats, InVEST est l'outil utilisé lors de cette deuxième démarche qui concentre dans la génération des scénarios futurs concernant le territoire genevois. De plus, les résultats aideront lors de processus de prise de décisions politiques et sociales ainsi qu'à savoir où et combien il faut investir pour générer des opportunités commerciales contribuant à la durabilité future (Tallis, 2011). En outre, il est possible d'intégrer à l'analyse des scénarios de changements climatiques à venir, afin que les impacts sur les services écosystémiques soient mesurés dans le long terme.

Une fois l'outil choisi, il ne reste qu'à définir les scénarios futurs à développer. A ce sujet, les deux scénarios les plus extrêmes, A1F et B2, proposés par l'IPCC ont été les élus par la nature de ses caractéristiques (IPCC, 2007) (Figure 7).

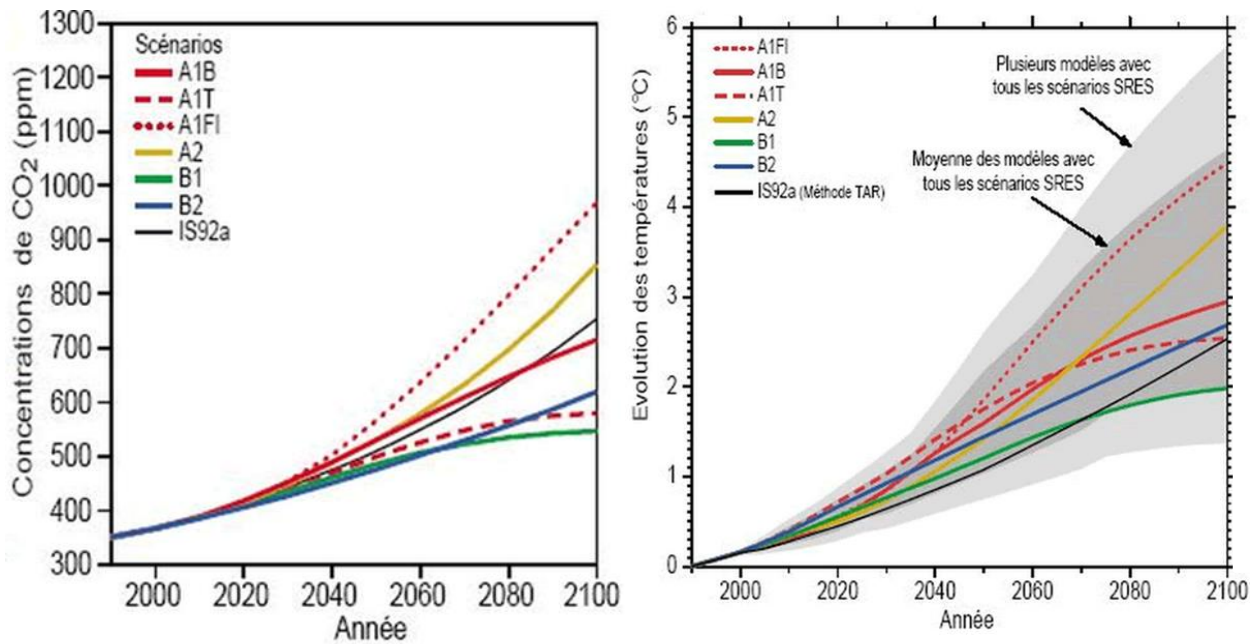


Figure 7. Scénarios IPCC : CO<sub>2</sub> et température. La partie gauche de l'image montre la concentration du CO<sub>2</sub> (ppm) et la partie droite l'évolution des températures pour chacun des scénarios futurs proposés par l'IPCC (IPCC, 2007).

### 5.2.1. Méthodologie

D'abord il est nécessaire d'installer la version téléchargeable d'InVEST 3.1.0 qui se trouve dans le site du Natural Capital Projet. Etant donné que cette version pose de problèmes lors de certaines analyses, un développeur d'InVEST a gentiment fourni une autre version. Donc, le lien ci-dessous est le correct afin d'éviter des possibles contraintes :

→ [http://data.naturalcapitalandresilienceplatform.org/nightly-build/InVEST\\_dev178\\_3\\_1\\_0b1\[3f0d4933d62f\]\\_x86\\_Setup.exe](http://data.naturalcapitalandresilienceplatform.org/nightly-build/InVEST_dev178_3_1_0b1[3f0d4933d62f]_x86_Setup.exe)

#### 5.2.1.1. Inputs

InVEST nécessite comme inputs une carte d'utilisation du sol actuelle, en mode raster ; un fichier Excel « Transition », pour les possibles changements spatiales du territoire, et un autre Excel « Priority », pour la priorité d'affichage des pixels selon le milieu naturel.

**A. Carte d'utilisation du sol :** le CJB a fourni pour ce travail sa carte des milieux naturels du canton de Genève (polygone) ainsi qu'un fichier Excel contenant des informations et des codes. D'abord, via *Join* la dite carte se lie au fichier Excel par le champ « CODE\_MILIEU ». Ensuite, la carte se rasterise (*Polygone to raster*) selon le champ « MILIEU » en utilisant une taille de pixel de 5 x 5 mètres car la conversion directe est très grossière visuellement. Finalement, il est nécessaire d'éliminer les artefacts apparus lors du processus précédent dû au poids important du raster.

Pour se faire, différentes voies sont possibles bien *Boundary clean*, *Majority filter* ou bien *Mask*. Grosso modo, les deux derniers outils n'éliminent que les artefacts hors canton et les résultats obtenus sont très grossiers à cause du phénomène de voisinage des pixels. Par



contre, *Boundary clean*, lise les bords et élimine les artefacts, à exception d'une ligne produite par la présence de deux pixels encadrés dans la catégorie « pas de données » (Annexe 3).

**B. Excel « Transition »** : cette table montre la probabilité de changement pour chacun des milieux naturels dans une échelle de valeurs de 0, pas de changement, à 10, haute probabilité de changement. De même, d'autres informations complémentaires sont utiles pour le correct déroulement de cette deuxième démarche de l'étude (Annexes 4 et 5):

- ✓ Percent change : quel pourcentage de surface, de 0 à 100, change par milieu (au cas où l'utilisateur ne veut pas spécifier du pourcentage, 0 est la valeur de référence) ;
- ✓ Area change : surface du changement du milieu en hectares ;
- ✓ Priority : les valeurs plus hautes s'appliquent aux milieux représentés par un majeur nombre des pixels ;
- ✓ Proximity : distance (mètres) au dès la de laquelle le processus de changement s'arrête ;
- ✓ Patch ha : surface minimale qu'occupe un milieu.

**C. Excel « Priority »** : cet input est optionnel ; son significat est le même que le champ Priority de la table précédente (Annexes 6 et 7). Une large bibliographie ainsi que des cartes comme celle du Plan Directeur Cantonal 2030 ont été consultées dans le but de remplir de manière objective ces inputs. **Important** : pour éviter des problèmes lors de l'analyse, il est convenable de tout remplir selon la Guide InVEST pour l'Utilisateur (Tallis, 2011).

#### **5.2.2.2. Développement du processus**

Pour la génération des scénarios, en mode raster, tous les inputs ont été ajoutés dans le module « *Scenario Generator* » d'InVEST. Ce processus se répète deux, une première pour le scénario A1F1 et une autre pour le B2. **Important** : la surface occupée par type de milieu se calcule en multipliant le nombre de pixels du milieu (*Count*) par la taille du pixel (25 m<sup>2</sup>) et pas avec la fonction *Calculate Geometry*, car les résultats sont en mode raster.

#### **5.2.3. Résultats**

Le scénario A1F1 (Figure 8) illustre une diminution de milieux naturels, voir la chênaie ou les forêts, ainsi que de la végétation urbaine, et il place dans un premier plan les surfaces bâties et les grandes cultures. Par contre, la nature, en générale, et les forêts et la végétation urbaine, en spécial, sont valorisées dans le scénario B2 comme attendu (Figure 9).

Les grandes cultures occupent actuellement 65.67 km<sup>2</sup> (6567 ha) soit le 23.25 % du territoire genevois. Selon le scénario A1F, ce milieu se développera jusqu'à atteindre une surface de 8567 ha mais il diminuera d'environ 27% sa surface dans le scénario B2, 4816 ha en total. Or, des milieux comme la chênaie ou la végétation urbaine ne suivent pas la même tendance. La surface de la chênaie au niveau cantonal passe de 2259 ha (B2) à 1190 ha (A1F1), de même la végétation est favorisée d'après le scénario B2, occupant une aire de 3583 ha, et défavorisée pour le scénario A1F, ne régressant que le 5.86% du territoire cantonal.

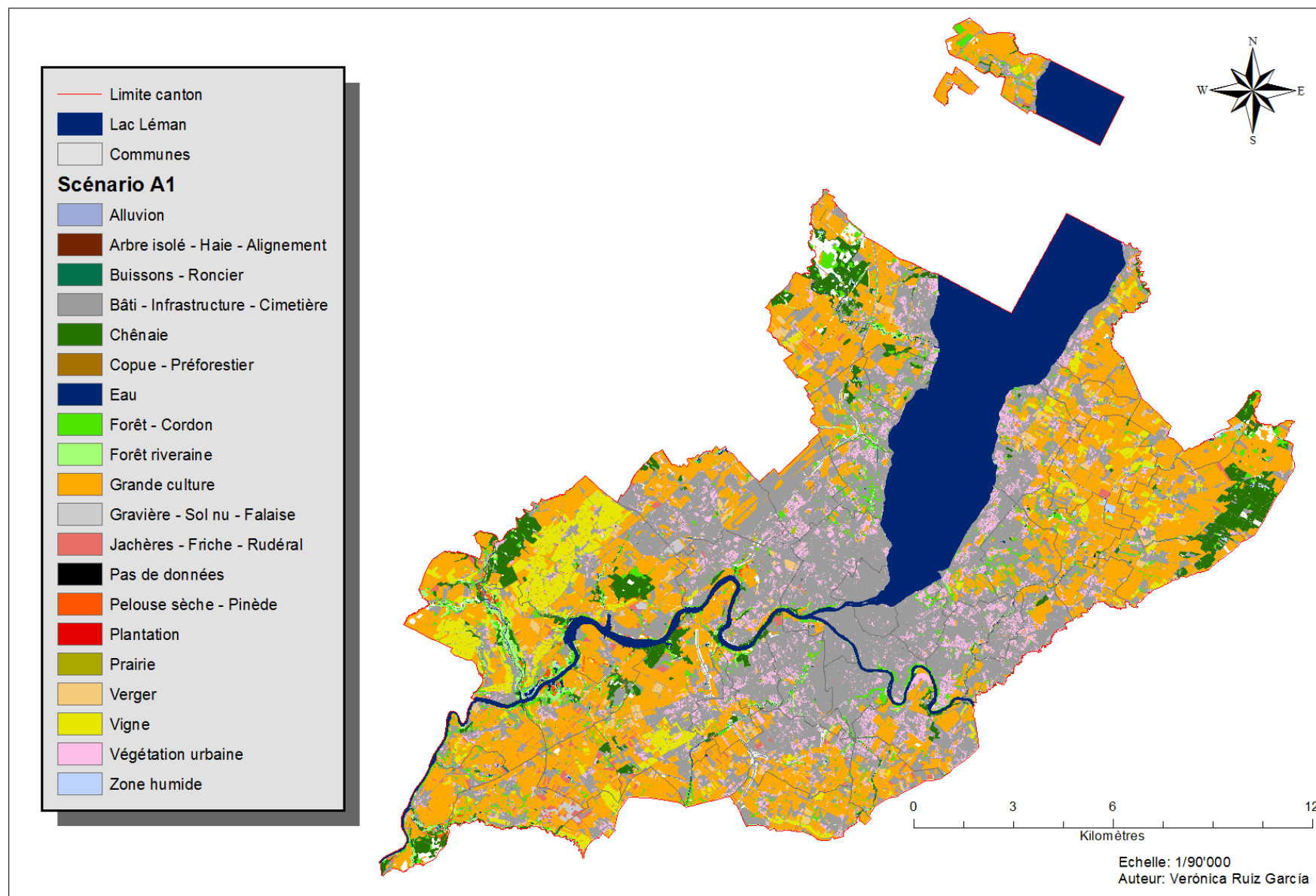


Figure 8. Répartition des milieux naturels selon InVEST pour le scénario futur A1F.

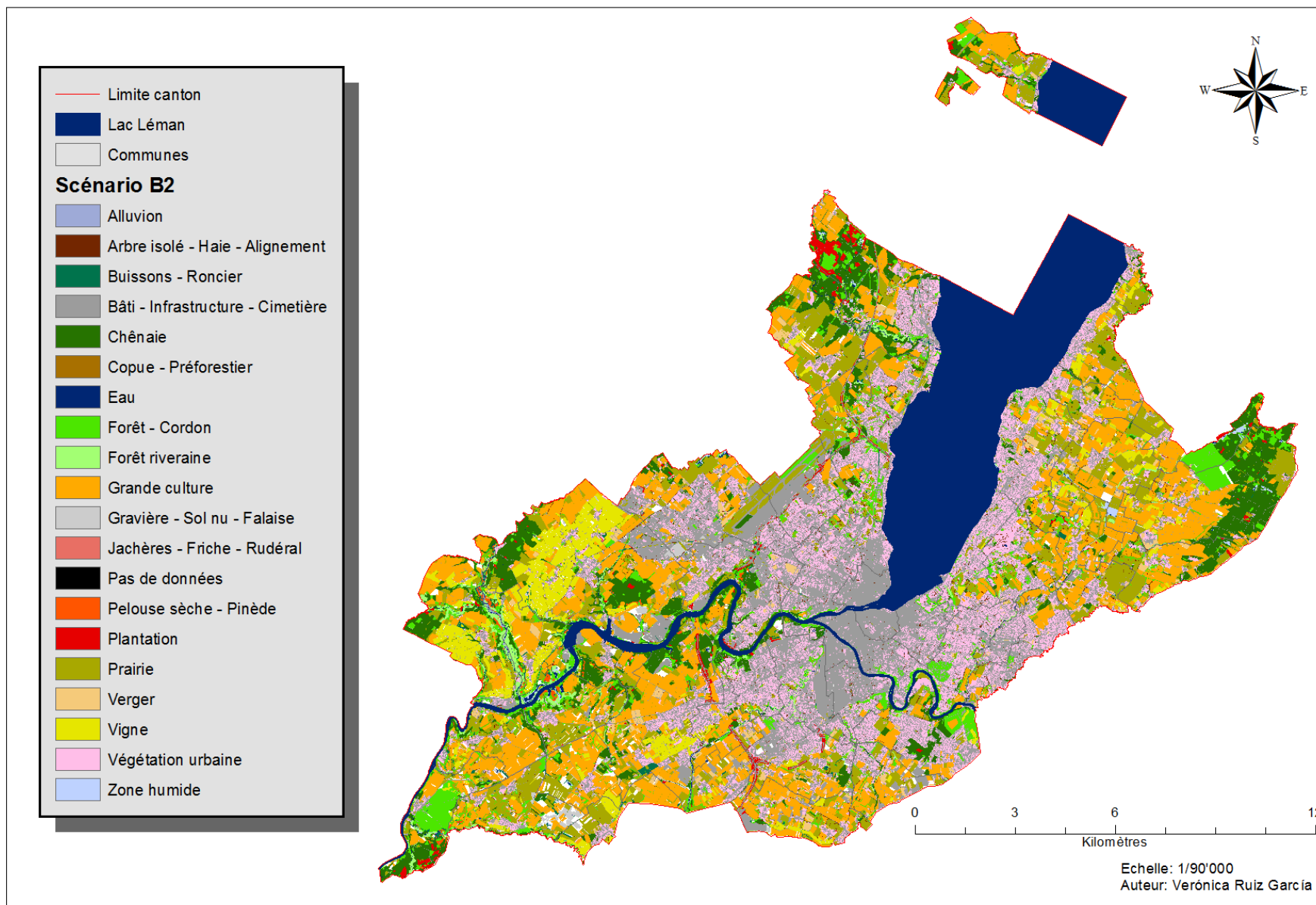


Figure 9. Répartition des milieux naturels selon InVEST pour le scénario futur B2.



---

#### 5.2.4. Discussion et recommandations à l'avenir

Les cartes obtenues sont réalistes et illustratives. Lorsque Genève continue à suivre ses politiques de conservation et protection de la Nature et du Paysage ainsi que des milieux naturels, et à maintenir stable la surface bâtie, la distribution des milieux serait semblable à celle obtenue par InVEST pour le scénario B2.

Malgré les résultats, InVEST diminue la surface agricole. L'outil ne prend pas en compte qu'à Genève, comme pour le reste de cantons suisses, il existe des surfaces dénommées d'assolement (SDA). Celles-ci ont été créées, comme instrument fédéral, afin d'assurer l'approvisionnement du pays en cas de crise et chaque canton doit respecter un quota.

L'augmentation de la population, de la consommation d'énergies et de la surface bâtie impliquent forcément un changement des milieux naturels et de la végétation, et ce phénomène se reflète dans les résultats pour le scénario A1F. La surface bâtie reste moyennement stable mais elle peut être densifiée entraînant une augmentation de l'îlot de chaleur en ville, favorisé par la diminution de la végétation urbaine. D'autres aspects tels que la pression démographique, l'effet transfrontalier et l'augmentation de l'urbanisation pour accomplir les besoins d'une population croissante et du manque de logements.

La forte utilisation des énergies fossiles augmente la concentration de carbone, donc les plantes devront leur activité photosynthétique et l'augmentation de la surface bâtie et des grandes cultures induira des changements au niveau du NDVI. Le lien entre les trois démarches (NDVI, scénarios et stockage du carbone) sera expliqué, une fois toutes les analyses soient terminées.

Au même temps, cette deuxième démarche a procuré un important nombre de contraintes et limitations malgré la facilité d'utilisation du module « *Scenario Generator* » d'InVEST. La première est la limitation du nombre de catégories des milieux ou habitats de la carte d'utilisation du sol, InVEST n'accepte que 20 ou moins catégories. La carte du CJB offre la possibilité de travailler leur carte en 2 versions, une à 32 classes et autre à 20 classes des milieux naturels. Malgré cette avantage, cette analyse s'est déroulé d'après la carte à moins catégories par conséquent les résultats sont moins précis en termes écologiques.

InVEST ne tient pas en compte les valeurs négatives du pourcentage de changement des milieux, c'est-à-dire que seulement les milieux qui augmentent leur surface seront pris en considération lors de la création des milieux. Bien évidemment, cette limitation provoque l'extension des milieux (pourcentages positifs) en réduisant directement la taille des milieux avoisinants. Finalement, cette analyse est utile que pour des changements futurs à court terme.

Cette démarche exploratoire, dans le domaine de la création des scénarios futurs, reste basique donc pour les travaux à venir d'autres facteurs pourraient être contemplés dans le but d'obtenir des résultats plus éclairants.

### 5.3. Stockage du carbone

Le service de séquestration du carbone présente de forts enjeux puisque la végétation des écosystèmes terrestres stocke plus de carbone que l'atmosphère, et ce particulièrement dans les forêts tropicales (Silver, 2000). Les végétaux absorbent ainsi une partie du dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère pour assurer leur activité photosynthétique. Ce processus de séquestration est de mieux en mieux appréhendé, comme en témoigne la multiplication des dispositifs internationaux visant à protéger les espaces considérés comme des puits de carbone, notamment les régions forestières afin que celles-ci n'en deviennent pas des sources. De fait, la question du stock de carbone dans la végétation est souvent traitée dans les études scientifiques (Brown, 2002). Les représentations cartographiques associées, bien que plus rares, se multiplient également, d'autant que des dispositifs internationaux tels que REDD (*Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation*) en préconisent le développement.

Actuellement, plusieurs outils sont mis à disposition des utilisateurs, ARIES ou Econometrix, mais InVEST est l'utilisé pour cette dernière démarche. Le module d'InVEST concerné par le stockage de carbone est capable d'estimer la valeur nette de carbone stocké selon le milieu naturel ou habitat. L'objectif de cette troisième analyse est de connaître quelle est la répartition du carbone stocké dans le territoire genevois à présent et au futur et leur évolution, ainsi que de tester la précision d'InVEST.

#### 5.3.2. Méthodologie

La plupart des approches utilisent l'occupation du sol : typologie de l'occupation des sols spatialisée par télédétection (Ponce-Hernández, 2007) et inventaires forestiers (Fukuda, 2012). Mais pour ce cas d'étude l'évaluation et analyse se fit d'après la carte e milieux naturels du CJB en vue de renforcer son potentiel. Les données relevées in situ constituent la variable à expliquer, et les données obtenues par télédétection sont des variables explicatives. Pour cette analyse, ont été récoltées de la bibliographie car Genève manque d'une base de données concernant le sujet de stockage de carbone.

##### 5.3.2.2. Inputs

- A. Carte utilisation sol : il s'utilise à nouveau la carte des milieux naturels du CJB avec une résolution de 5 mètres et une vingtaine de catégories des milieux. **Important** : année de la carte, 2015.
- B. Carte d'utilisation future : les deux cartes obtenues, A1F et B2, lors de la deuxième démarche « Génération des scénarios futurs » sont les utilisées. Donc l'analyse de stockage de carbone se répète deux fois. **Important** : années de cartes, 2030.
- C. Excel « Carbone » : contenant les informations par rapport aux quantités de carbone stocké ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) dans les 4 réservoirs principaux : biomasse aérienne, biomasse souterraine, sol et matière organique morte (Annexe 8).

Il y plusieurs sources possibles pour obtenir les informations sur les quantités de carbone stockées. Une des sources est la récolte de données à partir des estimations fournis par des

études faites sur le terrain ; un autre est l'extraction de données provenant des analyses faites dans des habitats particuliers ou des régions spécifiques ; et le moyen le plus fiable est d'utiliser les informations publiées par des organismes ou institutions. L'IPCC fournit des données fiables du carbone stocké pour différentes régions de la planète. Nonobstant, dans la littérature des données plus précises concentrées dans la zone d'étude peuvent se trouver. Parfois, elles ne sont pas précises de la région mais il faut les rapporter au climat, comme la FAO qui fournit des informations par écorégions. Par exemple pour le carbone stocké dans la biomasse aérienne ( $c_{above}$ ), la FAO offre des chiffres liés au stockage dans les forêts et les plantations au niveau continent. Enfin, nous ne traitons généralement pas au-dessus du matériel herbacée au sol comme un réservoir de carbone (par exemple, les cultures herbe, des fleurs, non-ligneuses). Notre hypothèse de travail est que ce matériel ne représente pas une source potentielle de stockage à long terme comme la biomasse ligneuse, la biomasse souterraine, et le sol. Matériau herbacée en général recycle son carbone trop rapidement.

Pour le carbone stocké dans la biomasse souterraine ( $c_{below}$ ), plusieurs études ont compilé des estimations pour cette biomasse ou ratios racine-à-shooting pour différents types d'habitats. Parmi les sources d'information se trouvent l'IPCC et les travaux de Garrastazú (2015). Les données pour le carbone stocké au sol et dans la matière morte ( $c_{soil}$ ) s'extraitent directement d'InVEST (Tallis, 2011).

Si des informations sur certains réservoirs ne sont pas disponibles, il est possible bien d'estimer la quantité de carbone à partir des données appartenant à d'autres réservoirs, ou bien de négliger les valeurs manquantes en laissant toutes les valeurs pour ce réservoir à 0 (Tallis, 2011). Si les données pour un réservoir ne sont pas disponibles, puis le stockage du carbone sera sous-estimé. Dans de nombreux cas, les données sont limitées et il peut être difficile de déterminer la quantité précise de carbone dans les différents réservoirs. Pour tenir compte de ces limitations de données, le modèle effectuée avec des incertitudes ce qui donne comme résultats des estimations de la quantité totale de carbone dans un milieu naturel ou habitat.

### **5.3.2.3. Développement du processus**

InVEST propose deux types d'analyse, avec ou sans incertitudes. Dans de nombreux cas les données sont limitées et le processus de détermination de la quantité de carbone stocké dans les différents réservoirs n'est pas précis. Pour accueillir ces limitations de données, le modèle effectuée éventuellement analyse de l'incertitude. La modélisation de ce troisième service écosystémique dans le canton genevois présente ces difficultés et donc la procédure se fait incluant des contingences.

La procédure de cette troisième modélisation est la suivante : le modèle agrège le carbone de chacun des réservoirs fournissant une estimation du stockage du carbone total pour chaque pixel en particulier et pour l'ensemble du paysage en général. D'abord, si les données sont  $Mg \cdot ha^{-1}$  de  $CO_2$  stocké alors il faut multiplier la valeur par 0.2727 pour le convertir en  $Mg \cdot ha^{-1}$  de carbone stocké. Après l'agrégation de carbone stocké dans tous les réservoirs InVEST réalise une moyenne du carbone total stocké par milieu. Finalement, la valeur obtenue se multiplie par un facteur de conversion afin de mieux interpréter les résultats et donc les résultats s'expriment en  $Mg/100 m^2$ . L'exemple ci-dessous, explique la procédure à suivre pour la catégorie «Chênaie » :

$$272 \text{ Mg*ha}^{-1} / 4 = 68 \text{ Mg*ha}^{-1} \times 0.01 = 0.68 \text{ Mg/m}^2$$

### 5.3.3. Résultats

InVEST offre trois types résultats sous forme de raster : une carte de répartition de carbone stocké actuelle (Figure 10), une carte(2) pour le carbone stocké selon le type de scénario futur (Figures 11) et une dernière (2) illustrant l'évolution du stockage au fil des années (Annexes 9 – 10).

Pour la carte ayant pour source les données « réelles » les zones à haut degré de stockage du carbone se représentent par la couleur orange foncée et se correspondent avec les zones forestières et boisées. Les Combes-Chapuis (Collex Bossy –Versoix), le vallon de l'Allondon et de la Laire, ainsi que les zones forestières localisées dans les communes de Gy et Jussy sont de référents de stockage du carbone au niveau cantonale. Les milieux naturels liés à ces endroits s'incluent majoritairement dans la catégorie forêt : hêtraies, chênaies dans ces plusieurs types, ou forêt cordon.

De même toute la végétation urbaine présente dans le canton affiche des valeurs élevées et proches du maximum  $0.68 \text{ Mg}/100\text{m}^2$ . Des emplacements qui présentent cette tendance sont le Parc de Bastions, le Parc des Eaux Vives (prairies de fauches et plusieurs variétés arboricoles) et des zones de prairie au bord de l'Arve et du Rhône, en plein cœur du canton (Figure 10). Ensuite, les couleurs jaunes indiquent un niveau moyen de stockage du carbone par rapport à la valeur totale fournit par InVEST. Ces zones sont disséminées par toute la surface genevoise et se correspondent principalement avec les vergers et les coupes-lisière-forestier. Les milieux à bas niveau de stockage prennent de tonalités vertes ou bleues.

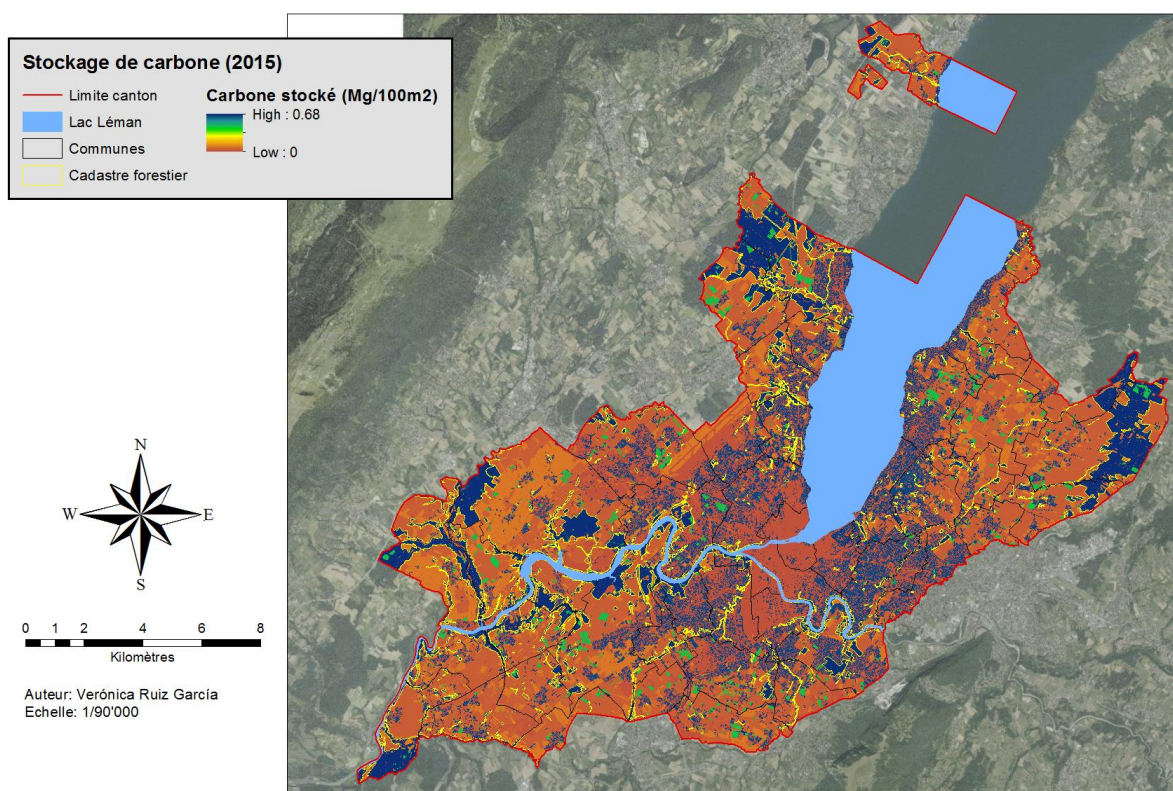


Figure 10. Répartition du carbone stocké par milieu naturel dans le territoire genevois d'après les résultats proportionnés par InVEST.



Grosso modo toutes les zones urbanisées et les grandes cultures présentent les valeurs les plus bas par rapport au stockage de carbone, pouvant atteindre des valeurs proches de 0 ou nulles.

La quantité moyenne de carbone stocké reste inamovible parmi les trois situations : présent, scénario A1F et scénario B2. Selon la figure 11A, la proportion des surfaces incluses dans le cadastre forestier diminuent par conséquent le stockage de carbone aussi, et la même tendance se reproduit pour la végétation urbaine. En général, la carte se teint de couleur orange, dans ses différentes tonalités, ce qui indique des niveaux moyens vers faibles de stockage de carbone.

En contrepartie, la figure 11B décrit la situation opposée. Les surfaces forestières et la végétation urbaine prévalent dans l'ensemble de la carte, par sa couleur, mais elles ne dépassent pas la surface occupée par les pratiques agricoles. De même de nouvelles zones ayant un niveau de stockage élevé apparaissent, toujours aux alentours des milieux les plus végétalisés. Ce phénomène est visible dans la zone de la Vallon de la Laire, là où une nouvelle aire (couleur bleu) apparaît stockant en moyenne  $0.68 \text{ Mg/m}^2$ .

Au sujet de l'évolution du stockage de carbone entre les années 2015 et 2030 les résultats sont facilement interprétables. Pour le scénario A1F, plus le territoire devient rouge plus de carbone se déstocke des réservoirs et il part vers l'atmosphère. Les zones ayant subis cet effet se concentrent davantage dans les communes urbaines et dans les limites frontalières du canton. Cela implique des conséquences qui seront expliquées et développées dans le chapitre « Discussion et recommandations à l'avenir ». Pour le scénario B2, les zones plus rouges stockent plus de carbone donc la tendance opposée au scénario A1F.

**Important :** pour tous les deux résultats concernant l'évolution de le stockage de carbone, les zones à hautes valeurs positives et négatives sont celles ayant subis des changements dans leur utilisation du sol.

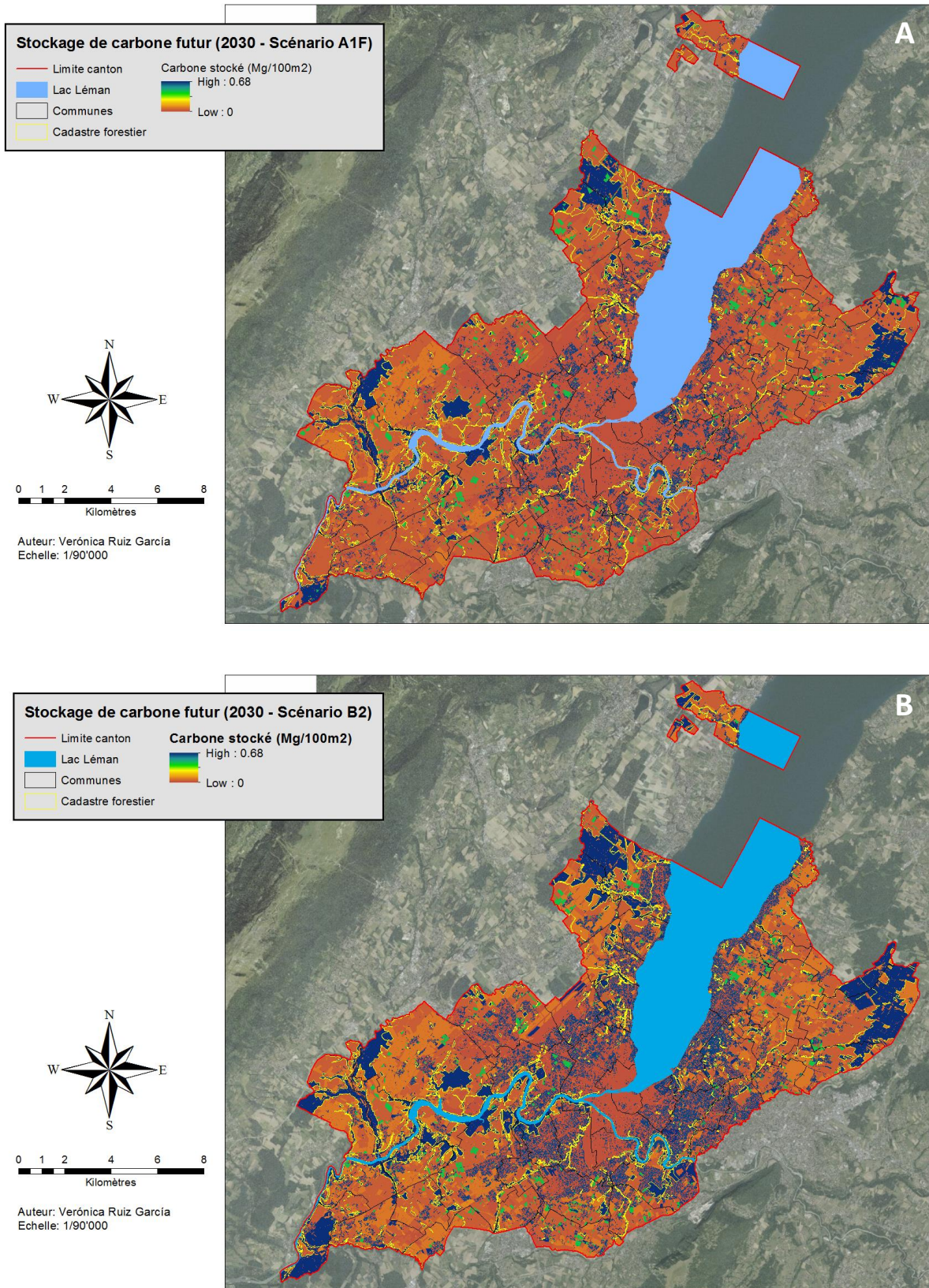


Figure 11. Répartition du carbone stocké par milieu naturel dans le territoire genevois d'après les résultats proportionnés par InVEST pour les deux scénarios futurs. La partie supérieure de l'image (11A) reflète la distribution pour le scénario A1F et la partie inférieure (11B) la répartition pour un scénario futur de type B2.

#### 5.3.4. Discussion et recommandations à l'avenir

En général, les résultats obtenus lors de cette dernière se correspondent aux attentes. Dans une situation type A1F, le carbone sera déstocké des différents milieux par conséquent une augmentation de la température est d'atteindre. Ceci mènera vers un accroissement de l'îlot de chaleur surtout dans les communes composant la ville de Genève, c'est-à-dire celles plus urbanisées. De même, la raréfaction des surfaces boisées et végétalisées induira une baisse du NDVI.

Pour un scénario type B2, la végétation se répand en favorisant le stockage de carbone essentiellement dans la biomasse aérienne. Cette situation est plus positive pour la population que le scénario précédant car la végétation augmente son activité photosynthétique de sorte que ses fonctions de poumon et purificateur d'air sont potentiellement plus performantes.

L'analyse du stockage du carbone est relativement facile. Néanmoins, les futurs utilisateurs doivent faire attention car l'outil fait, parfois, un changement dans l'ordre et la valeur du « lucode » lors de la création de la carte rastérisée contenant les valeurs de carbone stocké. Donc les valeurs obtenues ne se correspondent avec le milieu respectif. Pour le résoudre, il est nécessaire de changer simplement les données de la matrice (Excel) pour que tout corresponde avec la table d'attributs du raster (Heavenrich, 2012).

La teneur du sol en carbone dépend des principaux facteurs à long terme de la formation du sol, mais elle peut être fortement modifiée, dégradée ou améliorée par les changements d'utilisation du sol et la gestion du sol. Lors de l'évaluation des stocks de carbone dans le sol, on ne tient pas compte de la matière organique au-dessus de la surface du sol. Pour les sols cultivés, cela signifie que les restes des plantes ou des cultures ne sont pas considérés ; pourtant les résidus des cultures sont très importants dans l'industrie agricole

Par contre, quand des scénarios futurs sont créés, InVEST ne tient pas en compte la dynamique naturelle. Par exemple, si des arbres dans une forêt meurent la plupart du carbone stocké dans la biomasse aérienne est transformée en matière organique morte. Donc il existe un flux de carbone d'un réservoir à un autre.

En ce qui concerne les données du carbone stocké dans les différents réservoirs, elles sont issues, principalement, de la FAO et de la base de données d'InVEST. Donc pour les travaux à venir, il serait indispensable de faire de mesures directes in situ à Genève afin d'obtenir de résultats plus précis. Les travaux de Brown (2002), Baredo (2012), ou Garrastazú (2015) expliquent des méthodes à utiliser pour quantifier le carbone stocké par type de réservoir.



## 6. Discussion générale

---

Ce travail révèle l'importance des milieux naturels, en général, et plus particulièrement de la végétation urbaine. La quantification du carbone stocké par les arbres, facilite la compréhension de comment les forêts urbaines compensent les émissions des gaz à effet de serre et mitigent les effets du changement climatique. Or, nombreuses fonctions environnementales des arbres peuvent être classées comme des services écosystémiques, car elles bénéficient aux humains (MEA, 2005).

Les arbres situés dans les rues, les parcs et les jardins, approvisionnent les villes d'un nombre important des services écosystémiques. Notamment, l'élimination des polluants atmosphériques (Nowak, 2006), la réduction des îlots de chaleur<sup>4</sup> urbains (Akbari, 2001) ou la compensation des émissions de carbone grâce au stockage de carbone sont des bénéfices fournis par la végétation urbaine. A l'avenir, d'autres outils, comme i-tree, pourraient s'utiliser pour approfondir dans le sujet des arbres en ville (Dale, 2013).

L'occupation du sol semble être un bon indicateur des variations dans le stock de carbone de la biomasse végétale puisque celui-ci est sensible à l'occupation et la mise en valeur des sols. Malgré tout, il peut être envisagé que d'autres facteurs puissent intervenir dans les variations du taux de carbone stocké. Dans les travaux à venir, il faudrait faire des travaux pour mesurer in situ la quantité de carbone stocké par le biais des algorithmes. Un des travaux que les décideurs peuvent prendre comme exemple est le réalisé par Dufour (2014).

InVEST n'inclus pas dans ses calculs l'importance de la dynamique des écosystèmes, et donc, c'est la principale limitation qui présente son analyse du stockage de carbone. Les forêts recyclent le carbone constamment (photosynthèse et décomposition) ce qui favorise la fluctuation des niveaux de carbone stocké dans les différents réservoirs ; l'échelle temporelle de changements varie selon les espèces, les perturbations et conditions des habitats, la gestion et l'aménagement du sol.

Pour les travaux à venir, il serait intéressant de consulter des travaux déjà mis en œuvre comme celui de Concetti (2014) sur la région de la Lombardie en Italie. De cette manière, Genève pourrait créer une base de données actualisée et si l'Etat genevois se focalise sur le niveau communal, des paiements pour les services écosystémiques (PES) des « récompenses » ou subventions pourraient être mises en place. De ce fait, les communes seront persuadées et/ou encouragées à poursuivre avec les politiques de conservation et maintien de la Nature comme avec d'autres formalités.

---

<sup>4</sup> « Dans les grandes agglomérations, l'extension des zones bâties et les rejets de pollution atmosphérique engendrent des modifications locales du bilan d'énergie. L'apparition d'un îlot de chaleur urbain (ICU), sorte de dôme d'air plus chaud couvrant la ville, est la manifestation climatique la plus concrète de la présence et des activités de la ville. L'ICU est la résultante d'un ensemble de facteurs, parfois antagonistes, agissant à différentes échelles. Ses caractères reflètent la multitude des combinaisons possibles entre les conditions climatiques régionales, le contexte saisonnier, les caractéristiques propres à chaque ville (cadre physique, forme et densité du bâti, nature des matériaux de construction, activités industrielles...) et la diversité des types de temps. De ce fait, chaque agglomération possède sa propre identité thermique, elle-même très variable dans l'espace comme dans le temps » (Cantat, 2004 p.2).

## 7. Conclusion

---

En conclusion, malgré les différentes incertitudes et erreurs liés à la technique utilisée ainsi qu'au manque de données, cette étude permet une bonne contextualisation de l'évaluation du NDVI et du stockage de carbone basée sur l'outil InVEST. Afin d'améliorer les travaux à venir dans ce domaine, une récolte plus approfondie et précise de données est nécessaire pour mener les analyses à bien.

De plus, la création d'une base de données genevoise ouverte aux chercheurs dans le but de faciliter le partage et modification de données ainsi que la mise à jour de celles-ci est recommandable. Egalement, il faudrait multiplier le nombre d'études à réaliser à l'aide de cet outil pour comparer des résultats et des possibles scénarios. D'après ce travail, les questions de recherche peuvent se répondre :

- Au niveau cantonal, a-t-il fortement évolué le couvert végétal en termes de NDVI ? Et les espaces verts en ville ? Non, les surfaces forestières et boisées n'ont pas subi un changement extrême en termes de NDVI même si polygone « Evolution NDVI » est répandu le long du territoire. Les variations au sein de ce polygone sont relatives. Par contre, la plupart des espaces verts ont évolué au fil des années selon deux tendances : améliorant ou dégradant la qualité de la végétation qui les comporte.
- Est-ce que les scénarios futurs fournis par InVEST sont-ils pertinents où par contre ils présentent des limitations ? Ils sont réalistes mais InVEST ne prend pas en compte toutes les limitations auparavant mentionnées donc les résultats pourraient s'améliorer.
- A l'heure actuelle, quelle est la répartition du stockage de carbone comme service écosystémique ? Quel est l'avenir de ce service ? Le stockage du carbone n'est pas égalitaire sur le territoire genevois car selon les résultats les communes plutôt urbaines stockent, en moyenne, davantage plus de carbone que les communes agricoles. Comme attendu le scénario A1F favorise le déstockage de carbone dû à la raréfaction de la végétation, et le scénario B2 montre une tendance opposée.

## 8. Bibliographie

---

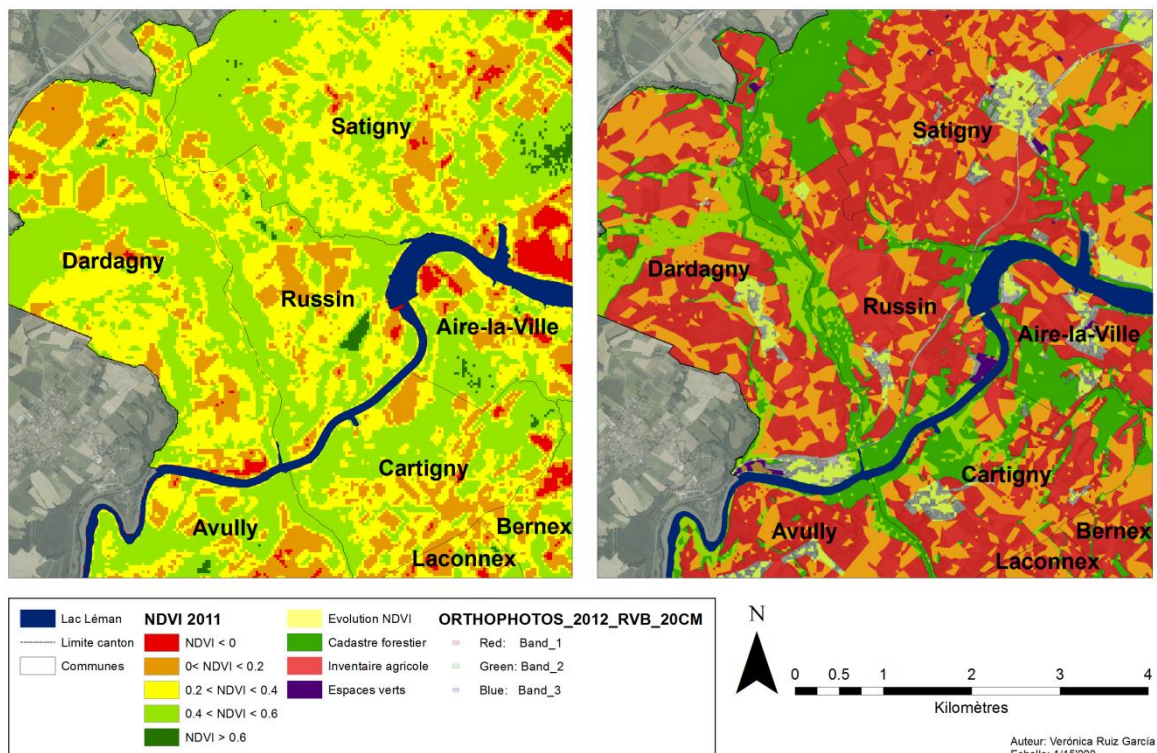
- Akbari H., Pomerantz M., Taha H., 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Journal of Solar Energy* 70(3): 295-310.
- Bagstad K.J., Semmens D., Waage S., Winthrop R., 2013. A comparative assessment of decision support tools for ecosystem services qualification and valuation, *Ecosystem Services* 5:e27-e39.
- Baredo J.I., San Miguel J., Caudullo G., Busetto L., 2012. A European map of living forest biomass and carbon stock, European Commission 14 pp.
- Brown S., 2002. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution* 116:363 – 372.
- Burkharda B., de Groot R., Costanza R., Seppelt R., Jørgensene S.E., Potschinf M., 2012. Solutions for sustaining natural capital and ecosystem services, *Ecological Indicators* 21:1–6.
- Cantat O., 2004. L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois. Environnement, aménagement, société* 191:75-102.
- Chevassus-au-Louis B., Salles J.M, Pujol J.L. (Eds), 2009. Conseil d'analyse stratégique, Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes. Paris, La Documentation française 376 pp.
- Colding J., 2010. Super: Sustainable urban planning for ecosystem services and resilience. *Urban-NET Research Anthology* 35-40.
- Concetti B., 2014. Identify and evaluate the ecosystem services provided by UPF in Progetto EMoNFUr (LIFE+ 10 ENV/IT/399)". EMoNFUr, establishing a monitoring network to assess lowland forest and urban plantation in Lombardy and urban forest in Slovenia 212-268.
- Dale M., 2013. Evaluation of methods for quantifying carbon storage of urban trees in New Zealand. Unpublished manuscript.
- de Weck J., 2012. Grand Genève: un million d'habitants en 2018. *Tribune de Genève*, le 4 octobre 2012.
- DIM, 2010. État de Genève, Département de l'intérieur et de la mobilité, 2010. Nature dans le Canton de Genève, bilan de 10 ans d'actions et perspectives 142 pp.
- Dufour S., Arnaul de Sartre X., Castro-Larrañaga M., Le Cle'ch S., Oswald J., 2014. Cartographie, services écosystémiques et gestion environnementale: entre neutralité technicienne et outil d'empowerment, dans Dufour S., Arnaul de Sartre X., Castro-Larrañaga M., Le Cle'ch S., Oswald J. (dir.), *Political ecology des services écosystémiques*, Bruxelles, PIE Peter Lang 225-245.

- European Commission / Directorate General for the Environment, 2013, Mapping and assessment of ecosystems and their services an analytical framework for ecosystem assessments under action 5 of the EU biodiversity strategy to 2020: discussion paper - final, April 2013, Luxembourg, Publications Office.
- Fukuda M., Iehara T., Matsumoto M., 2012. Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan. *Forest Ecology and Management* 184:1-16.
- Garrastazú M.C., Mendoça S.D., Horokoski T.T., Cardoso D.J., Rosot M., Nimmo E.R., Lacerda A., 2015. Carbon sequestration and riparian zones : Assesing the impacts of chancing regulatory practices in Southern Brazil. *Land Use Policy* 42:329-339.
- Heavenrich H., Nachman L., Noe R., 2012. Valuing the ecosystem services of low-input, high diversity prairie as a biofuel feedstock in southern Minnesota. *Environmental Studies* 38 pp.
- IPCC, 2007. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Lal R., 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 304:1623-1627.
- Lal R., 2008. Soil carbon stocks under present and future climate with specific reference to European ecoregions. *Nutr. Cycling Agroecosyst* 81:113–127.
- Long N., Tonini B, 2012. Les espaces urbains: étude exploratoire des pratiques et du ressenti des usagers. *VertigO - la revue électronique* 12(2):1-19.
- MAES, Mapping and Assessment of Ecosystem and their services, 2013. MAES: An analytical framework for ecosystem assessments under Action 5 of the EU Biodiversity Strategy to 2020, European Commission.
- McKenzie E., 2012. ESPA Models to Scenarios Workshop: Developing Scenarios to Assess Ecosystem Service Trade-offs Tools and Case Studies. NATCAP 1-24.
- Millenium Ecosystems Assessment, 2005. Living beyond our means: Natural assets and human well-being, Millennium Ecosystem Assessment, Island Press, Washington, DC.
- Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grübler A., Jung, T.Y., Kram T., La Rovere E.L., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Raihi K., Roehrl A., Rogner H-H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., Dadi Z., 2000. Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 599 pp.
- Nowak D. J., Crane D. E., Stevens J. C., 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening* 4:115-123.

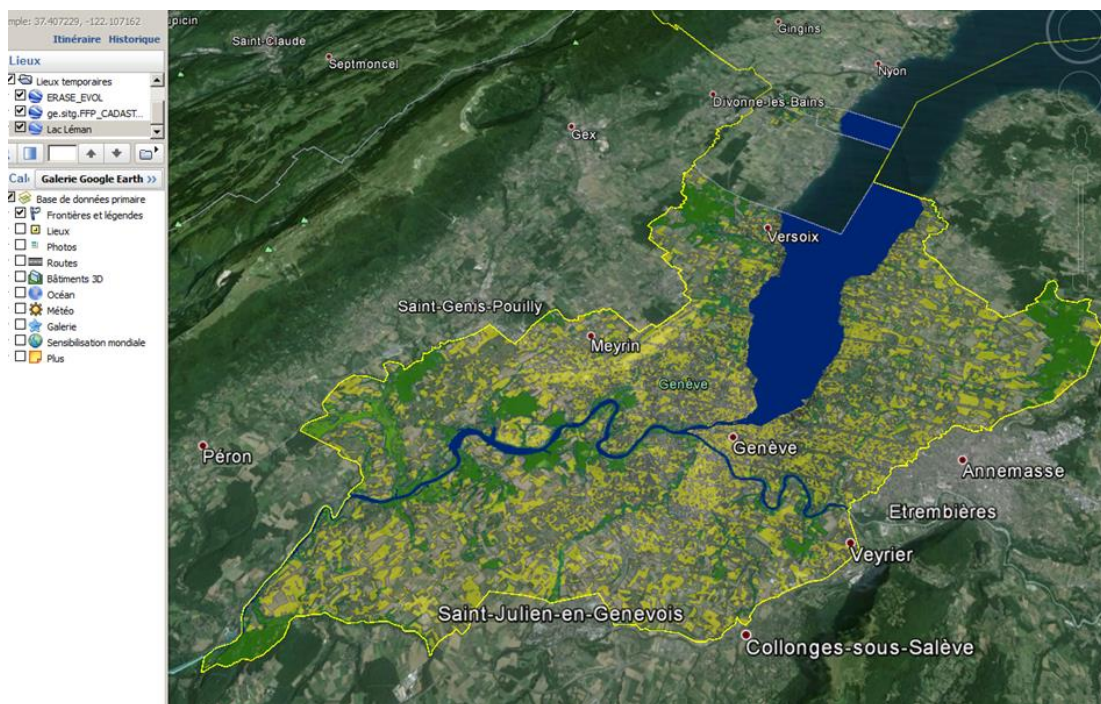
- OCSTAT, 2015. Office Cantonale de le Statistique, Genève : [www.ge.ch/statistique](http://www.ge.ch/statistique) [Consulté en Février 2015]
- ONU, 2013. World Population Prospects : The 2012 Revision. Department of Economic and Social Affairs, United Nations Organisation Nations Unies 50 pp.
- Ponce-Hernández R., 2007. A Modelling Framework for Addressing the Synergies between Global Conventions through Land Use Changes: Carbon Sequestration, Biodiversity Conservation, Prevention of Land Degradation and Food Security in Agricultural and Forested Lands in Developing Countries. FEEM Working Paper No. 30.2007.
- RISKS BV, 2005. Metronamica :A dynamic spatial land use model. Research Institute for Knowledge Systems, Maastricht, The Netherlands 17 pp.
- Sarricolea P., Aliste E., Castro P., Escobedo C., 2008. Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología* 8:71-84.
- SCEP, 1970. Man's Impact on the Global Climate: Assessment and Recommendations for Action. Report of the Study of Critical Environmental Problem (SCEP). Cambridge, The Massachusetts Institut of Technology, USA 319 pp.
- SPRING, 1996. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Camara G., Souza R.C.M., Freitas U.M., Garrido J. Computers & Graphics* 20(3):395-403.
- Tallis, H.T., Ricketts T., Guerry A.D., Nelson E., Ennaanay D., Wolny S., Olwero N., Vigerstol K., Pennington D., Mendoza G., Aukema J., Foster J., Forrest J., Cameron D., Lonsdorf E., Kennedy C., Verutes G., Kim C.K., Guannel G., Papenfus M., Toft J., Marsik M., Bernhardt J., Wood S.A., Sharp R., 2011. InVEST 2.1 beta User's Guide. Stanford University.
- TEEB, 2014. The Economics of Ecosystem and Biodiversity: [www.teebweb.org](http://www.teebweb.org) [Consulté en Février 2015].
- Towers P.C., 2009. Mapeo de la variabilidad de vid con NDVI. *Agrisat* 1-22.
- University of Helsinki, 2015. Urban Ecosystem Research Group: [www.helsinki.fi/urbanecosystems/research/enhancingsustainable.htm](http://www.helsinki.fi/urbanecosystems/research/enhancingsustainable.htm) [Consulté en Mars 2015]
- US-EPA, 2006. Global Anthropogenic non-CO2 greenhouse gas emissions: 1990–2020. Washington, DC, United States Environmental Protection Agency, EPA 430-R-06-003, June 2006.
- WRI, World Ressources Institute, 2008. Ecosystem Services: A guide for decisions makers by Ranganathan J., Raudsepp-Hearne C., Lucas N., Irwin F., Zurek M., Bennet K., Ash N., West P.
- Wu S., Hou Y., Yuan G., 2010. Evaluation des biens et services de l'écosystème forestier et du capital forestier naturel de l amunicipalité de Beijing, Chine. *Unasylnva* 61:1-9.



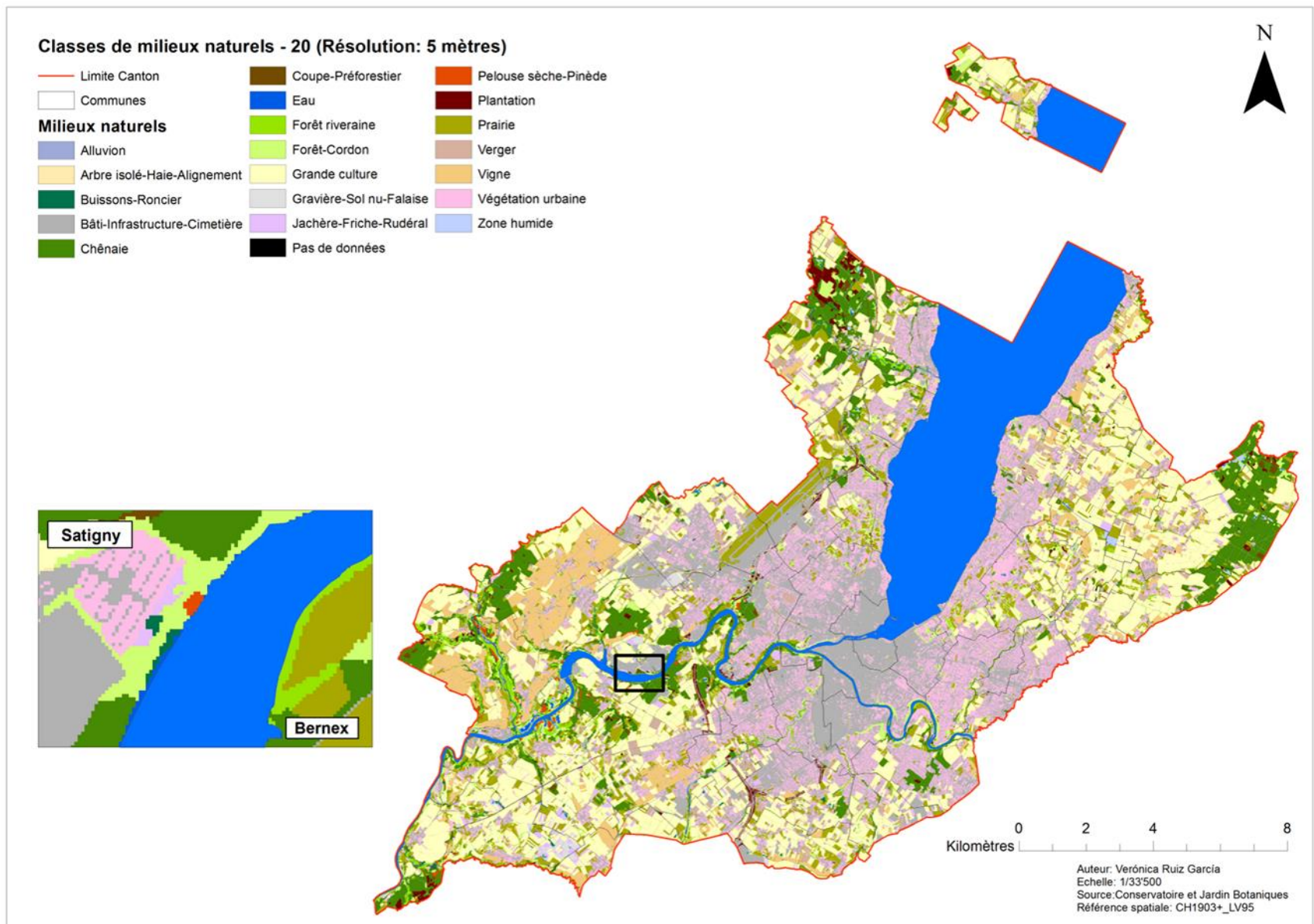
## 9. Annexes



Annexe 1. Situation du NDVI en 2011 comparée à l'évolution de cet indice dans les 9 années écoulées depuis 1992



Annexe 2. Image Google Earth. Avec ce logiciel, il est possible de visualiser toutes les couches créées sur ArcGIS depuis un autre point de vue en utilisant un fond de carte interactif et actuel et pas une orthophoto en mode raster.



Annexe 3. Carte des milieux naturels du CJB à 20 classes et une résolution de 5 mètres.



Id	Name																					Pourcentage Change	Area Change	Priority	Proximity	Patch ha
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					
1	Eau	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0
2	Bati infrastructure cimetiére	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3500	0.4	1500	0
3	Arbre isole haie	0	5	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Zone humide	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0
5	Buissons roncier	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0
6	Prairie	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0	1000
7	Graviere sol nu	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0.01	0	0
8	Vegetation urbaine	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0
9	Alluvion	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0.02	0	0
10	Verger	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0
11	Jacheres	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0
12	Grande culture	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2000	0.2	1250	0
13	Pelouse seche pinede	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	-35	0	0.01	0	0
14	Foret cordon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0
15	Plantation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0
16	Foret riveraine	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0
17	Coupe preforestier	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0
18	Chenaie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	-15	0	0.015	0	1000
19	Vigne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0
20	Pas de donnees	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0

Annexe 4. Table « TRANSITION » pour le scénario A1F.

<b>Id</b>	<b>Name</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>Percentage Change</b>	<b>Area Change</b>	<b>Priority</b>	<b>Proximity</b>	<b>Patch ha</b>	
<b>1</b>	Eau	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	
<b>2</b>	Bati infrastructure cimetiére	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0	0	
<b>3</b>	Arbre isole haie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0
<b>4</b>	Zone humide	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	
<b>5</b>	Buissons roncier	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.03	0	0
<b>6</b>	Prairie	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	2	0	0	0	0	1500	0.2	1000	1000
<b>7</b>	Graviere sol nu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	
<b>8</b>	Vegetation urbaine	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	
<b>9</b>	Alluvion	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	
<b>10</b>	Verger	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	
<b>11</b>	Jacheres	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	
<b>12</b>	Grande culture	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	10000	
<b>13</b>	Pelouse seche pinede	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	
<b>14</b>	Foret cordon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500	0.15	1000	0	
<b>15</b>	Plantation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0	
<b>16</b>	Foret riveraine	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	
<b>17</b>	Coupe preforestier	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	3	0	0	0	0	0.07	0	0	
<b>18</b>	Chenaie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0.1	1000	1000	
<b>19</b>	Vigne	0	0	0	0	5	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0	
<b>20</b>	Pas de donnees	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	

Annexe 5. Table « TRANSITION » pour le scénario B2.

Id	NAME	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	PRIORITY
1	Eau	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05
2	Bati infrastructure cimetiére	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2
3	Arbre isole haie	1	0.3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02
4	Zone humide	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
5	Buissons roncier	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02
6	Prairie	1	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06
7	Graviere sol nu	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02
8	Vegetation urbaine	1	0.2	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.07
9	Alluvion	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03
10	Verger	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03
11	Jacheres	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04
12	Grande culture	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09
13	Pelouse seche pinede	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0.05
14	Foret cordon	1	0.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0.05
15	Plantation	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0.05
16	Foret riveraine	1	0.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	1	1	0	0	0	0	0.05
17	Coupe preforestier	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.2	1	1	0	0	0	0.05
18	Chenaie	1	0.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0.05
19	Vigne	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.06
20	Pas de donnees	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.0001

Annexe 6. Table « PRIORITY » pour le scénario A1F.

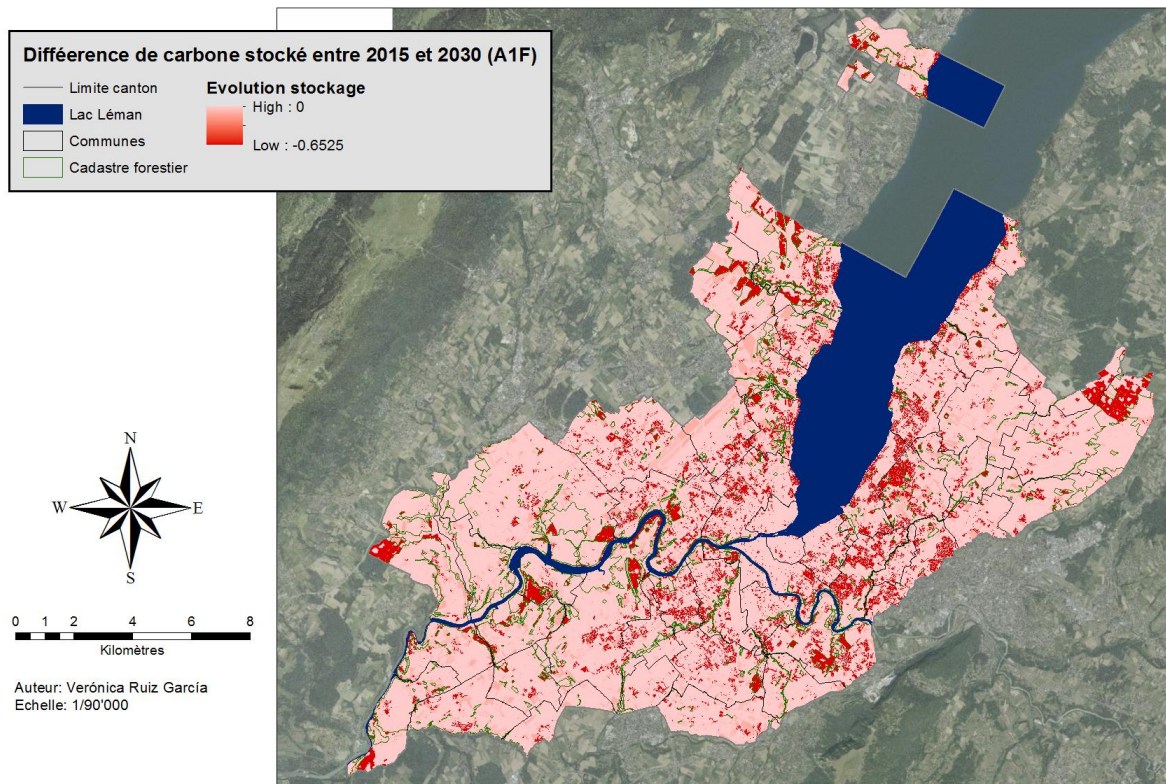
Id	NAME	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	PRIORITY
1	Eau	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05
2	Bati infrastructure cimetiére	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.15
3	Arbre isole haie	1	0.25	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03
4	Zone humide	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
5	Buissons roncier	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03
6	Prairie	1	1.25	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2
7	Graviere sol nu	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
8	Vegetation urbaine	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
9	Alluvion	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02
10	Verger	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02
11	Jacheres	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02
12	Grande culture	1	0.75	1	1	1	0.75	1	0.75	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1
13	Pelouse seche pinede	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0.02
14	Foret cordon	1	0.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.5	1	1	0	0	0	0	0	0	0.15
15	Plantation	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0.03
16	Foret riveraine	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	1	1	0	0	0	0	0.02
17	Coupe preforestier	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.15	1	1	0	0	0	0.07
18	Chenaie	1	1.25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.25	1	1	1	1	1	1	0	0	0.1
19	Vigne	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.03
20	Pas de donnees	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.001

Annexe 7. Table « PRIORITY » pour le scénario B2.

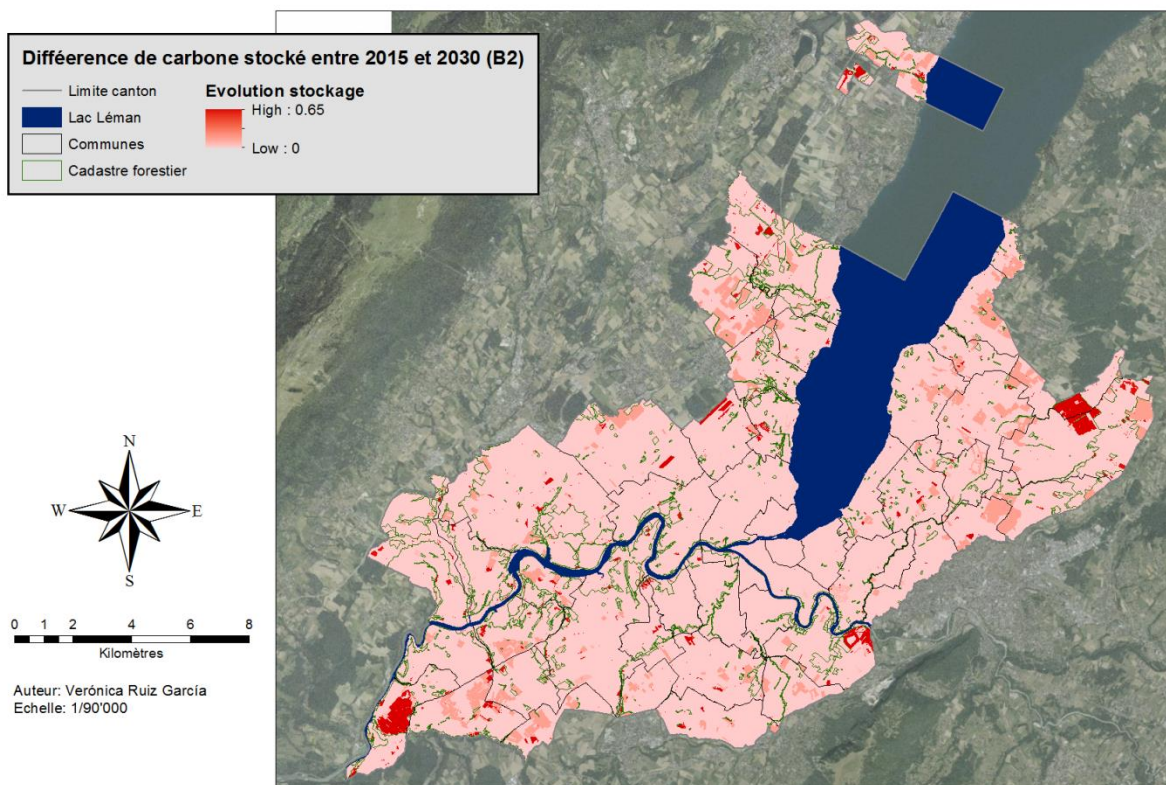


C_above	C_below	C_soil	C_dead	lucode	LULC_Name
0	0	0	0	1	Eau
0	0	0	0	2	Bati infrastructure cimetiére
6	6	20	2	3	Arbre isole haie
10	5	20	0	4	Zone humide
8	8	25	3	5	Buissons roncier
6	6	20	2	6	Prairie
0	0	0	0	7	Graviere sol nu
135	50	75	1	8	Vegetation urbaine
0	0	25	0	9	Alluvion
49	33	86	15.5	10	Verger
1	1	10	0	11	Jacheres
1	1	10	0	12	Grande culture
6	6	20	2	13	Pelouse seche pinede
88	59	96	29	14	Foret cordon
88	59	96	29	15	Plantation
88	59	96	29	16	Foret riveraine
49	33	86	15.5	17	Coupe preforestier
88	59	96	29	18	Chenaie
8	5	20	0	19	Vigne
0	0	0	0	20	Pas de donnees

Annexe 8. Table « CARBONE » nécessaire pour la modélisation du stockage du carbone.



Annexe 9. Evolution du stockage de carbone entre les années 2015 et 2030 pour un scénario futur de type A1F.



Annexe 10. Evolution du stockage de carbone entre les années 2015 et 2030 pour un scénario futur de type B2.