

Projet de Fin d'Études (PFE) 2023-2024

Les services écosystémiques et l'atténuation du changement climatique dans la planification urbaine

Les services écosystémiques et atténuation du changement climatique dans la planification urbaine:

Comment, à l'aide de méthodes et d'outils
d'identification existants, systématiser l'intégration
des services écosystémiques des milieux urbains dans
la planification urbaine pour promouvoir la résilience
face au changement climatique ?

Directrice de recherche :
Séraphine Grellier

Auteure :
Charlotte Hickman

2023-2024

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur de cette recherche a signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais tout d'abord remercier ma tutrice professionnelle, Vinciane Leduc, qui m'a accueillie et rigoureusement accompagnée sur ces cinq derniers mois, que ce soit en entreprise ou pour mon Projet de Fin d'Etudes. Merci pour ta patience et tes explications claires et toutes les remarques que tu as pu me faire, je n'en serais jamais arrivée là sans ton aide. J'attends avec impatience ces prochains mois en entreprise et de pouvoir en apprendre le plus possible à tes côtés. J'aimerais aussi remercier ma tutrice pédagogique, Séraphine Grellier, pour son accompagnement sur ses deux dernières années d'études, mon premier Projet de Fin d'Etudes, les ateliers ADAGE et ce deuxième Projet de Fin d'Etudes. C'était un véritable plaisir de t'avoir en professeur, merci pour la patience, les savoirs et les conseils que tu m'as apporté (ainsi que les belles discussions en Auvergne et en dehors). Merci aussi à Julie Gasparini d'avoir été une présence réconfortante à Polytech Tours ces trois dernières années, tu apportes une confiance et un bien-être à tous les étudiants qui te rencontrent et il est important que tu le saches. Merci également à toute l'équipe enseignante et administrative de Polytech' Tours pour les connaissances et enseignements que vous avez apporté ces dernières années.

Je veux transmettre mes remerciements également à mes proches, mes parents Angela et Shaun, mon frère Kieran ; même si un pays nous sépare, je n'en serais jamais arrivée à ce stade sans votre présence, vos conseils (au sujet du travail, de l'organisation et la vie), votre amour et votre patience depuis le début. Vous m'avez calmée dans mon stress, motivée quand cela semblait impossible et portée dans les moments les plus durs. Au même titre, un grand merci à Baptiste, merci de m'avoir écouté quand ça n'allait pas, de m'avoir donné tes conseils sur les études et sur QGIS, tu m'as aidé au quotidien, que ce soit pour les rendus ou la vie en générale, grâce à toi, je me sens enfin bien chez moi, j'ai réussi à me créer un espace propice à la concentration et l'élévation de soi. Sans oublier que sans toi, je n'aurais pas pu aller chercher mon chat, Kaz, qui m'a tellement apporté de sérénité et de joie en cette dernière ligne droite de mes études.

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION	10
II. MATERIEL ET METHODES	16
1. METHODE DE RECHERCHE DES OUTILS ET CHOIX DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES	16
2. QUATRE OUTILS POTENTIELS A APPLIQUER EN MILIEU URBAIN	16
ARIES :	16
TESSA :	17
INVEST :	18
REGREEN :	18
3. CRITERES DE HIERARCHISATION DES OUTILS	19
4. L'AUXERROIS, UN CONTEXTE IDEAL POUR UNE ETUDE DE CAS	20
III. RESULTATS	23
1. APPLICATION DES QUATRE OUTILS A L'AUXERROIS	23
ARIES :	23
TESSA :	25
INVEST :	29
REGREEN :	30
2. TABLEAU DE HIERARCHISATION DES OUTILS EN FONCTION DES CRITERES	34
IV. DISCUSSION	35
1. REVUE DES OUTILS : LE CHOIX ENTRE ACCESSIBILITE ET CREDIBILITE	35
2. LA PERTINENCE REELLE DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES EN MILIEU URBAIN	36
3. TRADUCTION REGLEMENTAIRE	37
V. VERS UNE PLANIFICATION TERRITORIALE PLUS ACTIVE CONTRE LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE : SYNTHESE ET PERSPECTIVES	40
1. UNE SYSTEMATISATION POTENTIELLE MAIS QUI MANQUE D'ACCESSIBILITE	40
2. PERSPECTIVES D'EVOLUTIONS : UNE VERITABLE CONCENTRATION SUR LES MILIEUX URBAINS EN DEHORS DES METROPOLES	40
VI. ANNEXES	42
VII. BIBLIOGRAPHIE	47

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Pourcentage de la population française vivant en milieu urbain de 2005 à 2022 (Statista 2023) ..10	10
Figure 2 : Composition de l'armature verte urbaine (ADEUS, 2013)12	12
Figure 3 : Estimation du stock de carbone dans les 30 premiers centimètres de sol en fonction du type de milieu (Source : CEREMA, GIS Sol).....13	13
Figure 4 : Processus de résilience urbaine en fonction des services écosystémiques et de la planification urbaine (McPhearson et al., 2015).....13	13
Figure 5 : : Pourcentage d'intégration des différents services écosystémiques dans les différents documents de planification (Cortinovis & Geneletti, 2018).....14	14
Figure 6 : Occupation du sol de la CA de l'Auxerrois (gauche) et le site urbain choisi pour l'étude (droite) ..21	21
Figure 7 : Quantité de carbone stocké par la végétation au sein du site d'études (en tonnes) (Source : QGIS, ARIES FOR SEEA).....23	23
Figure 8 : Quantité de carbone stocké dans le sol au sien du site d'études en tonnes (Source : QGIS, ARIES FOR SEEA)23	23
Figure 9 : Masse de carbone organique stocké au sein du site d'études (en tonnes) (Source : QGIS, ARIES FOR SEEA).....24	24
Figure 10 : Type de milieux stockant plus de 267 tonnes de carbone (Sources : QGIS, ARIES FOR SEEA, Théia)24	24
Figure 11 : Mesures des surfaces herbacées (jaune) et arborées (vert) sur Google Earth26	26
Figure 12 : Répartition des scores de biodiversité sur le site d'études (Sources : CarHab 2023, BDForêt 2018, BDTopo 2023, CA de l'Auxerrois)31	31
Figure 13 : Répartition des scores de l'enjeu changement climatique sur le site d'études (Source : TRI Auxerre, DREAL, TRIBU surchauffe urbaine).....33	33
Figure 14 : Etapes de l'évaluation environnementale d'un PLUi (Source : Vinciane Leduc, Cittanova)37	37
Tableau 1 : Pondération des critères pour l'évaluation de la pertinence de l'outil.....20	20
Tableau 2 : Répartition du type d'occupation du sol de de la zone urbaine (en %) (Source : OSO_Théïa 2022, GroupStats)21	21
Tableau 3 : Simplification de la répartition de l'occupation du sol (Source : OSO Théïa, 2022).....22	22
Tableau 4 : Surface et proportion des deux milieux identifiés sur le site : les prairies sont les milieux ouverts ras et les forêts tempérées sont les milieux arborés26	26
Tableau 5 : Calcul du carbone stocké par la biomasse vivante aérienne par milieu.....27	27
Tableau 6 : Calcul du carbone stocké par la biomasse souterraine par milieu.....27	27
Tableau 7 : Calcul du carbone organique stocké par les sols minéraux.....28	28
Tableau 8 : Somme du carbone stocké par milieu28	28

Tableau 9 : Attribution des scores aux milieux naturels du site d'études	30
Tableau 10 : Scores attribués en fonction du coefficient de rafraîchissement urbain	32
Tableau 11 : Attribution des scores en fonction des risques d'inondation et de ruissellement	32
Tableau 12 : Tableau de hiérarchisation des outils en fonction des critères cités	34
Annexe 1: Arbre décisionnel CLIMAT 1	42
Annexe 2 : Arbre décisionnel CLIMAT 2	42
Annexe 3 : Arbre décisionnel CLIMAT 3	43
Annexe 4: Arbre décisionnel CLIMAT 4	43
Annexe 5: Arbre décisionnel CLIMAT 5	44
Annexe 6: Arbre décisionnel CLIMAT 6	44
Annexe 7: Arbre décisionnel CLIMAT 7	45
Annexe 8: Arbre décisionnel CLIMAT 8	45
Annexe 9: Arbre décisionnel CLIMAT 9	46
Annexe 10: Arbre décisionnel CLIMAT 10	46

I. Introduction

Aujourd'hui, le changement climatique est au cœur de toutes les décisions publiques. Rien qu'en France, 18 % des communes souffrent d'un fort niveau d'exposition au changement climatique, ce qui peut mener à des îlots de chaleur, avec une augmentation de moyenne de 4 degrés Celsius dans les milieux fortement artificialisés (Agence d'urbanisme de la région nantaise, 2021), ainsi qu'une croissance des fréquences de catastrophes naturelles, à petite ou grande échelle (sécheresses, inondations...) (CEREMA, 2022). Le changement climatique d'origine anthropique a un large impact sur divers domaines, dont l'accès à l'eau et la nourriture, l'économie, la société et la santé humaine. Selon l'ONU, les villes constituent moins de 2% de la surface terrestre, mais contiennent 56% de la population mondiale et produisent plus de 60% des émissions de gaz à effets de serre (GES) mondiales. Les émissions de GES dues aux variations d'occupation du sol représentent 22% des émissions nettes mondiales, donc la moitié proviennent des émissions de CO₂, principalement lié à la déforestation (Intergovernmental Panel On Climate Change, 2023). L'urbanisation, processus de développement et d'extension des villes (Meyer-Grandbastien, 2019), cause l'augmentation de la densité de population urbaine mondiale, avec une croissance persistante en France passant de 78,5% en 2010 à 79,2% en 2017(Insee, 2020) atteignant 81,51% en 2022 (fig.1)

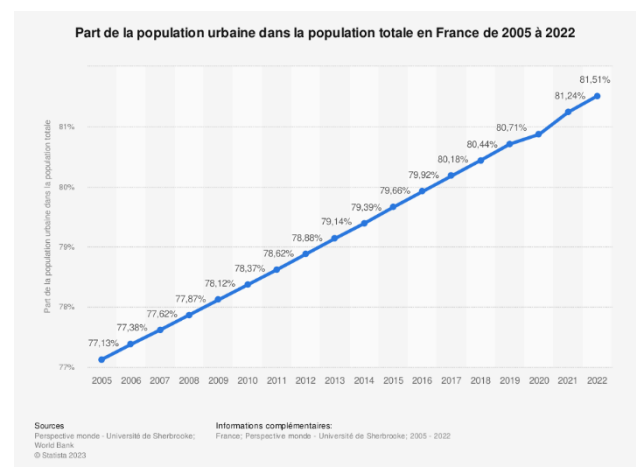


Figure 1 : Pourcentage de la population française vivant en milieu urbain de 2005 à 2022 (Statista 2023)

La définition d'un écosystème est l'ensemble des êtres vivants coexistant dans un même habitat, avec de multiples interactions. Les écosystèmes peuvent être naturels, semi-naturels et urbains. L'écosystème urbain est une mosaïque d'habitats, comprenant principalement des zones résidentielles, industrielles et commerciales, auxquelles sont associées des réseaux de transport et des espaces verts (Chaurand, 2017). L'artificialisation du sol, les îlots de chaleur, l'imperméabilité des surfaces ainsi qu'un taux de pollution plus élevé font partie des caractéristiques de cet écosystème (Chaurand, 2017).

Les milieux urbains font partie des 5 milieux clés de transition pour limiter le changement climatique (Intergovernmental Panel On Climate Change, 2023). Le cadre urbain est un environnement primordial dans l'atténuation des effets du changement climatique et se place au centre des actions à prendre (Kyprianou et al., 2023). En France, ils sont la source principale de pollution, consommant 75% des ressources et produisant 78% des émissions de GES (Meyer-Grandbastien, 2019). De plus, ils produisent des pollutions lumineuses et sonores qui perturbent plusieurs cycles naturels d'espèces floristiques et faunistiques. L'artificialisation des sols, entraînant leur imperméabilisation, caractéristique principale de l'urbanisation, perturbe le régime de l'eau par exemple, rendant les villes plus vulnérables faces aux risques d'inondations, de ruissellement ainsi qu'au transfert de polluants (Meyer-Grandbastien, 2019).

Un lien se crée entre la nature et la société, entre écosystème naturel et urbain, par les services écosystémiques. Les services écosystémiques sont les services *gratuits* que la nature et la biodiversité apportent aux humains, permettant la vie et le bon fonctionnement de la société. Il s'agit de "l'ensemble des conditions et des processus à travers lesquels les écosystèmes naturels ainsi que les espèces qui s'y trouvent

soutiennent la vie humaine” (Selmi, 2014). En 2005, le Millenium Ecosystem Assessment définit quatre catégories de services écosystémiques : les services d’approvisionnement, les services de régulation, les services de soutien et les services culturels. Les services d’approvisionnement consistent en l’alimentation, l’eau, les plantes comestibles. Les services de régulation sont des fonctions qui permettent de contrôler ou de réguler la qualité de l’air, la qualité du sol ainsi que la santé humaine. Les services culturels correspondent à tous les apports de la nature à l’homme (en dehors de ses besoins primordiaux), les plaisirs quotidiens, dont le divertissement, l’esthétique paysagère, des significations spirituelles ainsi que des bénéfices psychologiques (Haase et al., 2014).

Les services écosystémiques jouent donc un rôle primordial dans le bien-être de l’homme en ville, même s’ils ne sont pas toujours mentionnés de manière explicite. Les services écosystémiques ont également un lien étroit avec le changement climatique. La 6ème synthèse du GIEC cite les systèmes urbains comme critiques afin d’atteindre des grandes réductions d’émissions et pour propulser le développement de résilience climatique et ceci à travers la planification urbaine intégrant les infrastructures physiques, sociales et naturelles (Intergovernmental Panel On Climate Change, 2023). Les variations de température, les émissions de GES et bien plus ont un impact sur les écosystèmes naturels, la faune et flore, ce qui perturbe et altère les dynamiques et structures de ces derniers. D’après l’étude des impacts du changement climatique sur la biodiversité et les écosystèmes de Weiskopf et al., (2020), les variations des précipitations et l’augmentation de la température impactent l’accès à l’eau potable, à l’eau pour l’agriculture, diminuant la capacité d’approvisionnement des espaces agricoles. Le stockage de carbone peut également être affecté par les émissions de GES : bien que la surface forestière mondiale ait augmenté depuis les années 2000, la capacité de stockage des nouveaux espaces forestiers n’est pas nécessairement compensatrice de la perte des arbres et forêts anciennes. De plus, la présence croissante d’azote peut augmenter les risques d’eutrophisation des milieux aquatiques. La perturbation des milieux naturels et la fonte des glaciers peut encourager le développement et la répartition d’organismes et de maladies infectieuses dangereuses pour les humains. L’impact sur la santé des humains est aussi démontré par les conséquences néfastes sur la santé mentale des humains, voire une perte économique avec la perte d’emplois ou d’opportunités touristiques suite à la disparition des espaces verts.

Les services écosystémiques peuvent être analysés à trois niveaux : analyse biophysique, analyse économique et analyse socioculturelle.

Les critères de l’analyse biophysique, ou de la valeur écologique d’un site, implique la résilience, la robustesse et l’intégrité de ces écosystèmes afin d’atteindre une durabilité assurée. L’analyse socioculturelle observe l’équité, l’impact de la nature sur la santé humaine, l’importance culturelle de certains sites ainsi que le développement social (espaces de jeux, parcs...). Enfin, l’analyse économique passe par les valeurs apportées, tels que les apports directs, par le commerce et les apports indirects, par la réduction ou l’évitement de certains frais grâce à la présence de ces sites.

Les services écosystémiques sont de plus en plus étudiés comme outil et levier de planification territoriale, et ont la capacité d’aider à la décision sur trois niveaux : conceptuel, stratégique et instrumental. (Cortinovis & Geneletti, 2018) La planification territoriale est un processus par lequel différents acteurs cherchent à définir et organiser un territoire (l’utilisation des sols et des ressources) afin de créer un espace fonctionnel et durable, qui répond aux besoins des communautés, tout en prenant en compte les facteurs socio-économiques et environnementaux locaux.

La planification territoriale joue un rôle important pour les efforts de réduction du changement climatique, car elle peut se faire à une échelle locale avec plusieurs acteurs, ce qui augmente la qualité des actions mises en œuvre. Les accords de Paris soulignent les co-bénéfices dans la réduction du changement climatique, mais ce concept est encore très peu traduit de manière réglementaire et dans la planification urbaine, mais il est

indiqué dans la 6^{ème} synthèse du GIEC que « une planification inclusive et itérative ainsi que l'investissement dans les décisions quotidiennes de l'infrastructure urbaine peut augmenter la capacité d'adaptation des espaces urbains et ruraux de manière significative *confiance élevée* » (Intergovernmental Panel On Climate Change, 2023).

Suite à la loi Grenelle 1 en 2009, la Trame Verte et Bleue, est mise en place, puis elle est développée en 2010, avec la loi Grenelle 2 avec l'élaboration des Schémas Régionaux de Cohérence Ecologique (SRCE) et leur prise en compte dans les documents de planification des collectivités en vue de préserver et restaurer les continuités écologiques et la biodiversité. La Trame Verte et Bleue avait pour objectif de se détacher des lois de conservation de la nature précédentes, qui se concentraient sur les habitats et les espèces rares. S'y trouvent notamment les Arrêtés Préfectoraux de Protection de Biotope, en 1977, les Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique de type 1 et 2, en 1982 et 1983 ainsi que les sites Natura 2000, en 1992, des milieux naturels sensibles identifiés par l'Etat. La Trame Verte et Bleue se traduit par une cartographie des aspects fonctionnels des milieux naturels (les continuités écologiques, avec des corridors et des réservoirs de biodiversité) en premier lieu, nationale, qui se décline en cartographies régionales (SRCE) intégrées dans les SRADDET. Enfin, les différents Schémas de Cohérence Territoriaux et Plan Locaux d'Urbanisme intercommunaux en font une déclinaison plus locale (départementale et intercommunale).

La Trame Verte et Bleue est fondée sur le principe de l'écologie du paysage, qui reprend l'influence des structures et dynamiques paysagères sur les processus écologiques, et la fragmentation du paysage en une mosaïque d'habitats naturels (réservoirs de biodiversité), d'habitats artificialisés perturbateurs et de corridors permettant les continuités écologiques.

La dénomination "d'Armature Verte et Bleue"(ADEUS, 2013) peu présente dans la littérature, encapsule le principe de l'adaptation de la TVB en milieu urbain, en intégrant les services écosystémiques dans le concept de la TVB et ses continuités écologiques. *"C'est en valorisant la proximité de la nature en ville qu'elle fait exister la TVB urbaine. Elle cherche à valoriser le rôle du citoyen en tant qu'usager (bénéficiaire) et garant (responsable) de la mise en œuvre de la TVB en milieu urbain"* (ADEUS, 2013).

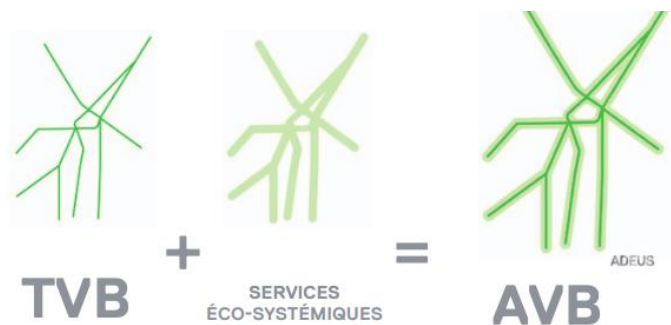


Figure 2 : Composition de l'armature verte urbaine (ADEUS, 2013)

Le SRADDET (Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité des Territoires) est un document de planification qui définit les objectifs à l'échelle régionale sur divers domaines, mais notamment en matière de lutte contre le changement climatique, l'air, la protection et restauration de la biodiversité ainsi que la gestion économe de l'espace et la lutte contre l'artificialisation des sols. Le SRADDET intègre la majeure partie du Schéma Régional du Climat, de l'Air et de l'Energie (SRCAE) afin de répondre aux enjeux air, climat et énergie. Ces objectifs portent ainsi sur l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, la lutte contre la pollution atmosphérique, la rénovation énergétique et le développement des énergies renouvelables et des énergies de récupération, notamment l'énergie éolienne et biomasse. Les objectifs et règles générales du SRADDET, seuls éléments opposables, s'impose sur un autre document dédié au climat, le Plan Climat Air Energie (PCAET) .

Le service écosystémique du stockage et de la séquestration du carbone correspond à la capacité d'un écosystème de capter le dioxyde de carbone de l'atmosphère et de le maintenir sur une période donnée, sites qui deviennent ainsi des puits de carbone. A l'échelle nationale de la France, une Stratégie Nationale

Bas-Carbone (SNBC) a été mise en place en 2015 et révisée en 2019, suite à l'élaboration de la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) du 17 août 2015. Afin de compléter la SNBC, le Plan Nationale d'Adaptation au changement climatique (PNACC) est mis en place, un document qui exprime la stratégies spécifiques au volet « adaptation au changement climatique » en cohérence avec le SRADDET et les PCAET en termes d'articulation territoriale. Parmi les secteurs à enjeu du SNBC se trouvent l'urbanisme et l'aménagement : " limiter l'artificialisation des sols et développer des formes urbaines résilientes et économes en carbone" (ecologie.gouv.fr) à cause de l'impact de ces derniers, notamment sur la capacité de stockage de carbone dans les sols. La séquestration du carbone représente un axe majeur de l'objectif de neutralité de carbone à l'horizon 2050 du Plan Climat (CEREMA).

La capacité de stockage de carbone d'un site varie en fonction de son milieu, les forêts et les prairies constituent les meilleurs puits de carbone, et les sols artificialisés sont très variables (fig. 3). Identifier la capacité de stockage d'un site en milieu urbain constitue ainsi un enjeu important dans l'identification de sites à préserver en milieux urbains.

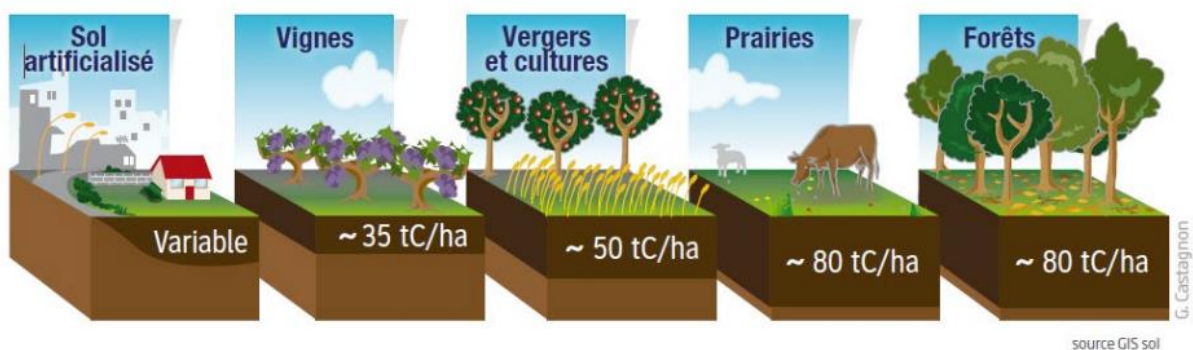


Figure 3 : Estimation du stock de carbone dans les 30 premiers centimètres de sol en fonction du type de milieu (Source : CEREMA, GIS Sol)

Ce service influe la fonction de plusieurs autres services, tels que la régulation du climat (l'effet d'îlot de chaleur urbaine), la qualité de l'air, il peut jouer sur la prévention des risques, en limitant l'érosion des sols, ainsi que sur la Trame Verte et Bleue en mettant en œuvre des actions de préservation et restauration des espaces naturels agricoles et forestiers (CEREMA).

La meilleure solution pour lutter contre le changement climatique est de promouvoir la résilience urbaine (fig.4) La résilience est l'habileté d'un système de revenir à un état stable après une perturbation ou une série de perturbations. Chercher une résilience urbaine est la recherche d'un milieu urbain capable de soutenir les stress climatiques, anthropiques, écologiques et de se remettre en état sans grande intervention humaine. Dans le cas des stress climatiques, ces derniers peuvent être des perturbations plus ou moins fortes, chroniques ou ponctuelles et peuvent être de nature écologique ou socio-économiques (Bush & Doyon, 2019). Selon McPhearson et al., (2015), l'intégration explicite des services écosystémiques dans la planification urbaine serait cruciale afin d'assurer la durabilité et la résilience d'une ville.

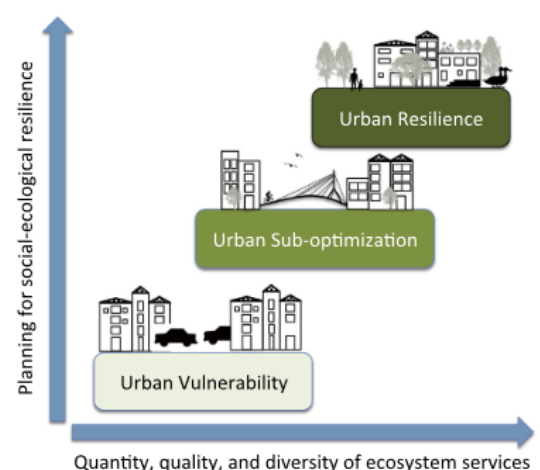


Fig. 1. Urban resilience can be fostered by incorporating urban ES in planning, design and management of urban social-ecological systems. A social-ecological approach for cities is critical to safeguard a resilient supply of ES in the long-term to ensure urban human well-being (Schwenius et al., 2014; Elmqvist et al., 2014). However, safeguarding urban ES requires recognizing and incorporating the

Figure 4 : Processus de résilience urbaine en fonction des services écosystémiques et de la planification urbaine (McPhearson et al., 2015).

Plusieurs chercheurs ont démontré des manques dans les études, notamment au niveau des services écosystémiques. Les services écosystémiques les moins étudiés sont surtout les services d'approvisionnement, la gestion des déchets et la pollinisation (Haase et al., 2014) (Veerkamp et al., 2021). La pollinisation est souvent mise de côté, alors qu'elle contribue de manière directe aux services d'approvisionnement pour le développement et la production des cultures, mais aussi aux services de soutien, par le maintien de la biodiversité et même les services culturels apportés par la flore sauvage et le jardinage, par exemple (Peh et al., 2013).

Le potentiel multifonctionnel des espaces verts et des services écosystémiques est encore trop peu évalué et pris en compte. Dans un cadre urbain, c'est-à-dire à petite échelle, il est indispensable de chercher des espaces donnant plusieurs services écosystémiques afin d'optimiser l'usage de l'espace. Les espaces ne sont pas homogènes, qu'ils soient naturels, semi-naturels ou artificiels, ainsi, cette identification de "bouquets de fonction" (Chaurand, 2017), à partir des multi fonctionnalités naturelles des écosystèmes permet une optimisation de l'espace, idéal pour les milieux urbains. Cela se lie à l'étude de l'échelle parcellaire, également manquante (Haase et al., 2014), qui est clé pour évaluer la durabilité et la résilience efficacement (Dizdaroglu, 2015). Un manque de consensus sur les méthodes d'évaluation et les outils quelle que soit l'échelle est remarqué, surtout à petite échelle (Veerkamp et al., 2021) (Dizdaroglu, 2015). Cette absence de consensus pour les méthodes d'évaluation se traduit également par un manque de méthodologie de prise en compte des services écosystémiques pour les urbanistes dans la planification territoriale (fig.5) (Kyprianou et al., 2023).

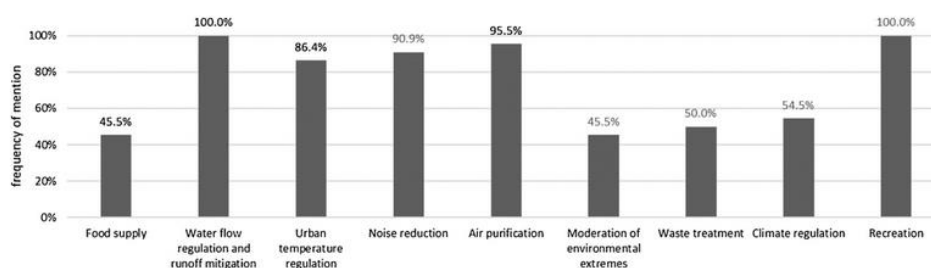


Fig. 1. Breadth score indicator measuring the inclusion of urban ES in at least one component of plans.

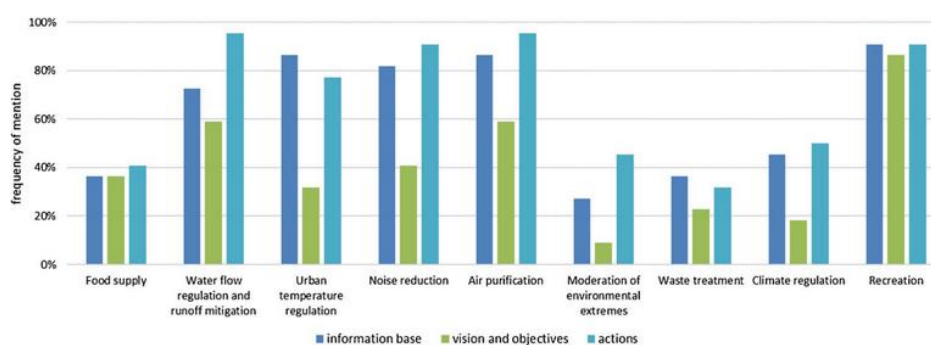


Fig. 2. Breadth score indicator measuring the inclusion of urban ES in the three plan components.

Figure 5 : : Pourcentage d'intégration des différents services écosystémiques dans les différents documents de planification (Cortinovis & Geneletti, 2018).

Peu de travaux de recherche semble s'être penchés sur les usagers réels et les apports pratiques des évaluations de la biodiversité et des services écosystémiques, soit du fait que les chercheurs accordent peu d'attention à cet enjeu, soit du fait d'une sous-utilisation de ces méthodologies. L'analyse critique de ces nouveaux outils et des changements dans les modalités de gestion de la biodiversité et des services écosystémiques qu'ils engendrent semble peu développée au regard des enjeux qu'il représente.

Une revue des études sur les services écosystémiques apportées par les infrastructures vertes et bleues urbaines, a identifié le besoin de développer et choisir des méthodes d'évaluation qui compare l'efficacité de

ces infrastructures ainsi que la multifonctionnalité de ces infrastructures et potentiels échanges (évaluation intégrant plusieurs services écosystémiques en considérant leurs impacts positifs et négatifs) (Veerkamp et al., 2021). Dans le cas des évaluations environnementales, références et bases des documents de planification, les pièces à fournir sont très réglementées, et demandent à minima trois types de documents : un état initial de l'environnement (EIE), la construction du projet d'un territoire sur 15 à 20 ans (Projet d'Aménagement et de Développement Durable - PADD) ainsi que des pièces réglementaires prescriptives, passant par des Orientations d'Aménagement et de Programmation (OAP) et des règlements écrits et graphiques (*Guide de l'évaluation environnementale - Fiche 4 : Le cahier des charges de l'évaluation environnementale*). Ces derniers seront détaillés et expliqués dans la partie 4.1 Traduction réglementaire de la Discussion.

Les méthodologies existantes sur les évaluations environnementales proposent des questions à se poser pour analyser les incidences liées aux enjeux environnementaux (fiche 12 : Questions à se poser pour l'analyse des incidences), seule une catégorie de questions n'est pas sujet aux espèces ou sites protégés/remarquables : « Préserver, développer, réguler l'accès à la nature et aux espaces verts : Quelle place est réservée à la nature dans les zones urbaines et à urbaniser ? Avec quelles exigences de contribution à la biodiversité ? à l'adaptation au changement climatique », mais cette catégorie reste néanmoins vague.

Ainsi, il est clair que identifier les services écosystémiques est un enjeu fort pour un aménagement urbain durable et viable, et leur connaissance peut préciser l'analyse d'une évaluation environnementale et la pertinence d'un état initial de l'environnement. En traduisant les services écosystémiques d'un milieu et leurs impacts sur les habitants, ces derniers pourraient être plus pris en compte par les citoyens, et encourager leur protection. La quantification et la qualification des services écosystémiques pourraient faire office de résumé des fonctions des espaces et être un facteur clé dans la prise décisionnelle de la part des acteurs dans l'aménagement urbain (Dameron, 2018).

Cette étude cherche à identifier des outils et des méthodes d'identification des services écosystémiques en milieux urbains qui permettraient l'intégration généralisée de ces derniers dans les documents de planification afin de promouvoir une résilience urbaine face au changement climatique. Pour ce faire, quatre outils vont être appliqués à une zone urbaine délimitée de la Communauté d'Agglomérations de l'Auxerrois afin d'en évaluer leur pertinence dans le cadre d'un PLUi à l'aide d'une analyse multicritères de ces derniers, suivi par une discussion de leur pertinence et ce que cela peut impliquer pour l'intégration des services écosystémiques dans les documents de planification et leur impact sur la résilience urbaine face au changement climatique.

Cette recherche s'est faite par le biais d'une étude bibliographique, à trois objectifs :

- Identifier les services écosystémiques pertinents à étudier
- Identifier les critères nécessaires afin d'atteindre mon objectif
- Recenser les outils et méthodes existants en fonction de ces services et critères

II. Matériel et Méthodes

1. Méthode de recherche des outils et choix des services écosystémiques

La recherche bibliographique des outils s'est faite sur des banques de données open access, telles que : Google Scholar, ScienceDirect, Thèses.fr, Researchgate et Open Edition Journals. Les recherches ont été effectuées en anglais et en français, avec différentes combinaisons de mots clés "changement climatique", "milieu urbain", "services écosystémiques", "résilience", "outils", "méthodes" et "indicateurs", ainsi que toute variable synonyme de ces termes (par exemple, "ville" pour "milieu urbain").

Une première liste d'outils et de méthodes a été faite après lecture des articles ressortis. La première liste d'outils et de méthodes était composée du modèle intégré multi-échelle pour les services écosystémiques (MIMES) (Boumans et al., 2015), la cartographie exhaustive des services écosystémiques à l'aide des infrastructures écologiques PROSPER, (Perschke et al., 2023), le processus de hiérarchie analytique pour la cartographie des services écosystémiques (Rovai et al., 2023), Urban InVEST (Sharp et al., 2020), la boîte à outils pour l'évaluation des services écosystémiques sur le terrain TESSA (Peh et al., 2013), l'intelligence artificielle pour les services écosystémiques ARIES (Villa et al., 2014), et la méthodologie de renaturation des villes du projet REGREEN (Deboeuf de Los Rios et al., 2022).

Ils ont ensuite été triés en fonction de leur applicabilité à l'échelle urbaine moyenne, soit la Communauté d'Agglomérations de l'Auxerrois. L'échelle intercommunale est intéressante à étudier car ces derniers n'ont pas nécessairement autant de moyens que les grandes métropoles, mais continuent néanmoins à se développer. Ceci nous permet d'étudier l'application de ces outils et indicateurs pour les documents de planification tels que les PLUi.

Cette étude de cas s'appuie principalement sur les services écosystémiques de régulation du climat. Ce choix a été fait en raison de l'accessibilité des données brutes; les données portant sur le stockage de carbone, les îlots de chaleur et les types de milieux présents sont beaucoup mieux recensées, et certaines données ont été transmises directement par la communauté d'agglomérations. Le service écosystémique du stockage et de la séquestration du carbone a été choisi pour l'application de certains outils (ARIES et TESSA, explicités plus loin), qui constitue un des quatre piliers de la construction des écosystèmes à l'atténuation du changement climatique en raison de son impact sur le cycle de carbone (CEREMA).

2. Quatre outils potentiels à appliquer en milieu urbain

ARIES :

Intelligence Artificielle pour les Services Écosystémiques (Artificial Intelligence for Ecosystem Services - ARIES) est une interface de cartographie interactive permettant cartographier différentes variables de services écosystémiques sur le monde entier. Son objectif est de quantifier les services écosystémiques et leurs dynamiques complexes, avec une représentation simplifiée (Villa et al., 2014). ARIES définit les bénéfices des services écosystémiques comme l'ensemble des processus qui relient un groupe bénéficiaire à un (ou plusieurs) écosystèmes spécifiques à travers un flux spatio-temporel défini. ARIES s'est lié avec les Nations Unies pour créer ARIES for SEEA (System of Environmental Economic Accounting) et propose actuellement l'observation de quatre services écosystémiques :

- Approvisionnement des cultures : contribution des écosystèmes

- Approvisionnement des cultures : contribution de la pollinisation
- Régulation du climat global : stockage de carbone
- Régulation des sédiments : contrôle de l'érosion des sols

Ils présentent ces données sous unités physiques et monétaires.

Chaque service écosystémique représenté est constitué de sous couches spécifiques à différentes recherches. Dans le cadre de cette étude, la quantité de carbone stockée par la végétation rase, la quantité de carbone stockée par le sol, le total des services de régulation du climat apportés par les écosystèmes (en tonnes de C stocké début 2012 et en 2018 ainsi que la différence entre ces années) ont été analysées. Les données sont observables sous forme de tableaux simplifiés par catégorie ou bien en format cartographique maillé sur le territoire.

- Le stockage de carbone par la végétation est calculé en additionnant le carbone stocké par la biomasse aérienne et souterraine. Pour ce faire, ils se basent sur le type de couverture du sol, les régions éco floristiques (classification FAO), le type de région continentale, la présence de forêts frontalières et les derniers incendies.
- Le stockage de carbone dans le sol correspond aux données extraites de SoilGrids (ISRIC — World Soil Information) sur la quantité de carbone stocké dans les 200 cm de sol de surface.
- La masse de carbone organique est la somme de ces deux premières couches pour représenter le carbone total stocké sur la parcelle.

Les données sont visualisées sur l'interface ARIES for SEEA, et ont ensuite été téléchargées sous forme de fichiers TIFF et Raster. Une fois importées dans QGIS, elles sont polygonisées afin d'en sortir une couche vecteur, donnant accès à une table d'attributs et une légende plus précise. Une fois ces étapes suivies, les données sont interprétables sous forme graphique et numérique.

TESSA :

TESSA est une boîte à outils simplifiée à destination d'utilisation par les non-spécialistes. Cet outil se présente sous forme de checklist, avec des arbres décisionnels et des étapes à suivre en fonction du site et du service écosystémique étudiés. Les méthodes proposées sont extraites et adaptées des méthodes de niveau 1 du GIEC 2006. Ils proposent huit services écosystémiques, mais dans le cadre de cette étude, la méthode de l'atténuation du changement climatique est choisie en observant les échanges des gaz à effet de serre entre l'atmosphère, la faune, la flore et le sol. Ils précisent que l'outil TESSA n'est pas nécessairement adapté à une évaluation en milieu urbain, mais permet néanmoins une approche qualitative d'évaluation des espaces (Van Oijstaeijen et al., 2020). Dans leur méthode, ils précisent qu'il n'y a pas de données tabulaires dans les lignes directrices du GIEC 2006 pour les zones bâties, mais que deux méthodes sont utilisables, dont la méthode 3 qui peut être adaptée aux pelouses urbaines ainsi que la méthode 4, pour les parcs urbains.

Seules les méthodes ont été traduites en français par les créateurs, ainsi avant son traitement, il était nécessaire de traduire les arbres décisionnels permettant d'arriver au choix de la méthode (Annexes 1-10).

Pour l'évaluation du stockage et séquestration du carbone, il y a 6 calculs/méthodes à suivre pour chaque espace :

1. Calcul du carbone stocké
2. Calcul du carbone séquestré
3. Calcul des émissions de CO₂
4. Calcul des émissions de CH₄
5. Calcul des émissions de N₂O
6. Addition des calculs 2-5
7. Faire la différence entre les résultats 1 et 6

N'ayant pas l'occasion d'effectuer des mesures sur le terrain, les couches QGIS des espaces verts utilisées précédemment sur le terrain ont été partagées pour l'étude. Elles ont été croisées avec les données de l'occupation du sol OSO de Théia, afin de guider le choix des méthodes. L'objectif étant d'identifier les services écosystémiques en milieux urbains, seuls les espaces verts au cœur de l'enveloppe urbaine choisie ont été retenus et non ceux en périphérie, plus proches des grandes prairies et des cultures agricoles, afin d'avoir les résultats les plus pertinents à l'étude.

InVEST :

InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) est un outil de modélisation des services écosystémiques. Il a récemment été adapté en partie au milieu urbain, avec l'élaboration de Urban InVEST (Sharp et al., 2020). InVEST propose plusieurs modèles, tous adaptés à différents services écosystémiques tels que : le rafraîchissement urbain, l'atténuation des risques de crues urbaines, l'accès à la nature urbaine ou la rétention des eaux pluviales urbaines. De plus, parmi leurs modèles originaux, certains sont applicables au milieu urbain, dont la pollinisation, l'atténuation du changement climatique, la qualité paysagère, la protection des côtes, la qualité de l'habitat, l'évaluation des risques d'un habitat ainsi que les services de récréation.

Dans le cas de cette étude, l'intérêt était porté sur les modèles de stockage et de séquestration de carbone. Ce dernier modélise le stock de carbone à partir de quatre sources : la biomasse de surface, la biomasse de subsurface, le sol et la matière organique morte, le tout en fonction d'une carte d'occupation des sols.

L'interface InVEST se présente sous la forme d'une carte, avec des couches de données SIG ou tabulaires à importer dans les différentes catégories. Ils proposent également des guides d'utilisation extrêmement détaillés, avec des propositions de sources des données en open access.

Pour la modélisation du stockage et de séquestration du carbone, InVEST a besoin des données suivantes :

- Couche LU/LC (Land Use / Land Cover), source conseillée : ESA WorldCover 2021
- Densité de carbone dans la biomasse en surface
- Densité de carbone en biomasse de subsurface
- Densité de carbone dans le sol
- Densité de carbone de la matière organique morte

REGREEN :

Il s'agit d'un projet européen et chinois (H2020) appelé REGREEN avec pour objet de trouver des solutions fondées sur la nature en milieu urbain. Il est constitué de 19 partenaires à l'échelle européenne, dont fait partie l'Agence Régionale de Biodiversité en Île-de-France. Ils travaillent autour de 4 axes :

1. L'amélioration des connaissances sur les solutions fondées sur la nature
2. Le développement d'outils cartographiques et de modélisations
3. Le déploiement de marchés et d'emplois liés aux solutions fondées sur la nature
4. L'étude des liens entre bien-être, santé et nature en ville

Dans ce document et cette méthode, ce qu'ils appellent "solutions fondées sur la nature" (SFN) sont les actions de préservation, de gestion et de reconquête des écosystèmes en cherchant à favoriser l'atténuation par le captage et le stockage du carbone, ainsi que l'adaptation par la protection contre les risques naturels (tempêtes, inondations et glissements de terrain) au changement climatique.

Ainsi, les objectifs de ce projet sont de :

- Quantifier et modéliser les services écosystémiques des SFN
- Étudier les liens entre bien-être, santé et la nature en ville
- Améliorer les systèmes de gouvernance et de planification
- Déploiement de marchés et d'emplois liés aux solutions fondées sur la nature
- Sensibilisation des enfants et des jeunes à la nature et aux SFN

Pour ce projet, ils ont mis en place un outil cartographique Cartoviz qui permet de visualiser les résultats obtenus par la méthode REGREEN, c'est-à-dire les zones de renaturation prioritaires en milieux urbains et les sites minéralisés potentiellement renaturables.

Pour l'application de cette méthode, l'enjeu et le services écosystémique choisi est l'adaptation au changement climatique, qui cible les zones exposées aux risques d'inondations par les crues, le ruissellement ou bien l'îlot de chaleur urbain. Il y a deux grandes étapes pour appliquer cette méthode. Tout d'abord, il s'agit de localiser les zones de renaturation prioritaires à travers 3 enjeux : la biodiversité, le changement climatique et la santé et le cadre de vie. Ensuite, il est nécessaire de localiser et quantifier les sites imperméabilisés mais potentiellement renaturables en croisant les zones prioritaires et les sites potentiels, en faisant une analyse quantitative et en identifiant les potentiels et les limites pour chaque site.

3. Critères de hiérarchisation des outils

Les critères permettant d'analyser et de choisir les outils suivant le principe du développement durable et de la résilience : un outil doit être généralisable, applicable à plusieurs échelles, abordable financièrement, relativement simple à manipuler tout en restant pertinent et de source fiable. Pour l'évaluation des divers outils, une note est appliquée à chaque critère afin d'en faire une analyse multicritère de ces derniers. Les notes varient de 1 à 3, 1 étant une correspondance faible au critère, 2 une correspondance moyenne et 3 une correspondance forte.

1. Crédibilité

La crédibilité scientifique d'un outil est la base sur laquelle ses résultats pourront s'appuyer afin d'utiliser ces derniers comme aide décisionnelle dans la planification territoriale. Dans le cadre de cette étude de cas, la crédibilité peut être complexe à définir, à cause d'absence de résultats référentiels, ainsi ce critère sera déterminé par la fiabilité des données utilisées.

2. Flexibilité scalaire

Pour une étude de services écosystémiques, relatant ainsi les espaces naturels ou semi-naturels, le cadre urbain requiert des outils utilisables à petite échelle, voire l'échelle parcellaire, et non limités aux grands espaces naturels. Un outil pouvant être utilisé à petite comme à grande échelle facilite sa reproduction et permet de gagner du temps et d'éviter d'apprendre un nouvel outil pour tout nouveau projet (Bagstad et al., 2013).

3. Généralisable :

Aucun territoire n'est uniforme, ainsi, il est important d'avoir des outils et des méthodes applicables à différents mélanges de paysages et de territoires. Par exemple, il faut que ces outils soient applicables à une agglomération, comme à une petite ville, comme à une zone périurbaine. Peu importe les proportions, ces outils et méthodes doivent être adaptés à des mélanges d'espaces artificialisés, naturels et semi-naturels pour qu'il soit applicable à tous les documents de planification à l'échelle communale et intercommunale.

Même si les outils sont créés pour un lieu spécifique, il est préférable s'ils sont applicables à une diversité d'espaces (Bagstad et al., 2013).

4. Reproductibilité

La reproductibilité est un critère qualitatif, qui permet, entre autres, de jauger la simplicité de la prise en main de l'outil et la facilité de reproduction de cet outil sur un autre territoire. Il est lié à l'accessibilité de l'outil (principalement des données, sont-elles facilement accessibles ? demandent-elle des expertises spécifiques en SIG ? l'outil est-il gratuit ? ou demande-t-il un/des dispositifs/logiciels sous licence payante ?...). Un outil reproductible permettra de le définir comme indicateur de suivi qui accompagnera la mise en œuvre du PLUi.

5. Pertinence

La pertinence d'un outil est déterminé par sa capacité de répondre aux besoins identifiés et aux objectifs posés. Dans le cadre de cette étude, ce critère servira de note finale d'évaluation d'outil, une pondération des notes attribuées à chaque critère précédemment cité sera faite afin d'établir cette notation finale.

Les quatre critères cités ci-dessus sont tous aussi indispensable les uns que les autres dans l'évaluation d'outils d'identification de services écosystémiques pour les intégrer, mais en raison des ressources disponibles, la crédibilité n'étant pas certifiable, elle sera moins prise en compte que les autres. Au contraire, la reproductibilité sera plus forte dans cette pondération.

Tableau 1 : Pondération des critères pour l'évaluation de la pertinence de l'outil

Critère	Poids du critère dans l'évaluation de la pertinence
Crédibilité	0,125
Flexibilité scalaire	0,25
Généralisable	0,25
Reproductibilité	0,375

4. L'Auxerrois, un contexte idéal pour une étude de cas

Le site d'études choisi est la Communauté d'Agglomérations de l'Auxerrois, dans le département de l'Yonne en Bourgogne-Franche-Comté. Le siège de la Communauté d'Agglomérations se trouve à Auxerre, contient 29 communes pour un total de 67 651 habitants (agglo-auxerrois.fr, 2023). Le territoire de la communauté d'agglomérations est en cours de démarches sur plusieurs documents de planification. Le Schéma de Cohérence Territorial (SCoT) a été arrêté le 11 novembre 2023 et le Plan Climat-Air-Énergie Territorial (PCAET) est en cours de finalisation, avec les dernières consultations publiques finies le 31 décembre 2023. De plus, la Communauté d'Agglomérations a lancé son Plan Local de l'Urbanisme avec un volet Habitat et Mobilité (PLUiHM), qui est actuellement à la phase de diagnostic territorial qui inclut l'Etat Initial de l'Environnement. Celui-ci met en exergue les enjeux du territoire sur les thématiques environnementales : ressources en eau, risques, changement climatique, trames verte et bleue.

La définition de ces enjeux permet de guider les élus du territoire dans l'élaboration de leur Projet d'Aménagement et de Développement Durable.

L'étude, menée ici, s'inscrit donc parfaitement dans le déroulé du PLUi HM de la CA de l'Auxerrois et permet d'amender celui-ci.

> Définition de la zone d'étude

Cette étude cherche à appliquer des outils aux milieux urbains, or, la Communauté d'Agglomérations de l'Auxerrois possède des grands espaces naturels et cultivés sur le territoire, avec des milieux urbains diffus sur tout le territoire. Pour concentrer ces applications sur le tissu urbain, j'ai fait le choix de délimiter une zone urbaine qui prend sur les communes d'Auxerre, de Saint-Georges-sur-Baulche et Monéteau, sur laquelle j'effectue toutes mes études. Je me suis servie de la couche shapefile OSO de Théia 2022 importée dans QGIS. Après une visualisation générale de l'occupation du sol du territoire, les catégories de base de Théia ont été simplifiées afin de constituer quatre groupes :

- > milieux artificialisés (urbain dense, diffus, zones industrielles et commerciales et les routes)
- > espaces cultivés (colza, céréales à paille, tournesol, tubercules / racines et vignes)
- > espaces naturels verts (prairie, forêt de feuillus et forêt de conifères et les landes)
- > zones humides (plages et dunes et eau)

de l'occupation du sol de Théia pour avoir une observation globale du territoire.

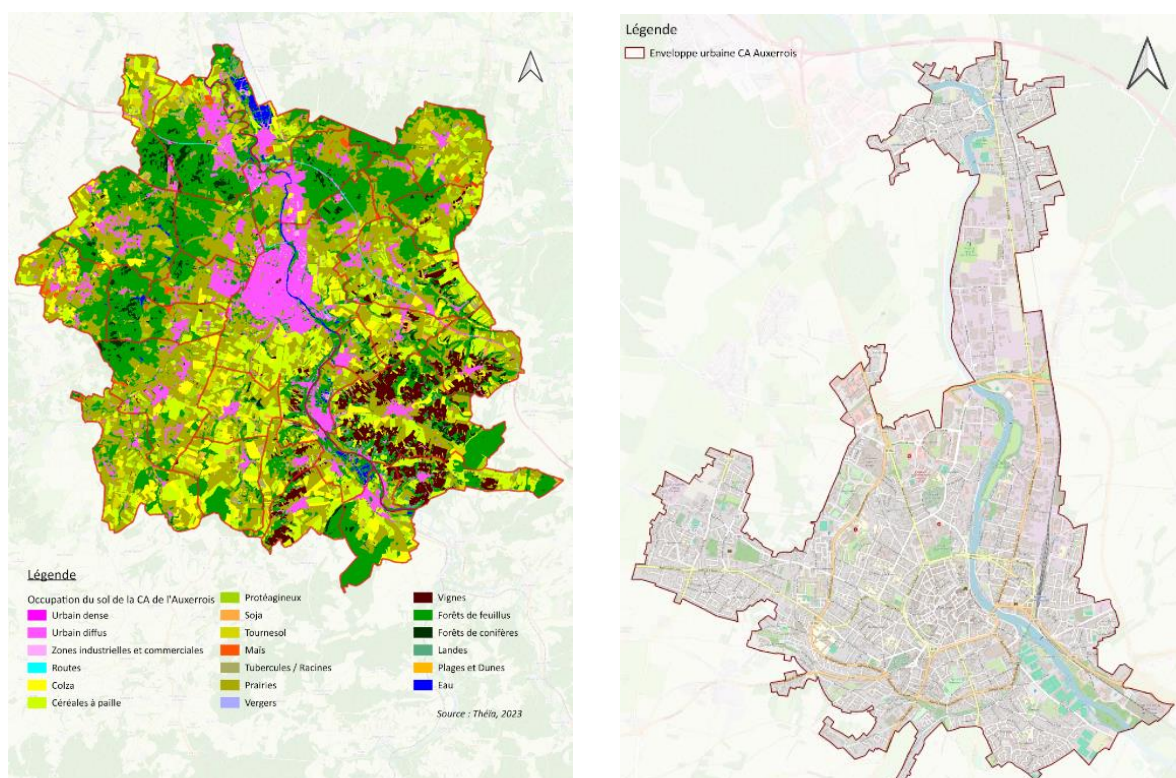


Figure 6 : Occupation du sol de la CA de l'Auxerrois (gauche) et le site urbain choisi pour l'étude (droite)

Concentré autour de la ville d'Auxerre, on observe un tissu urbain diffus relativement homogène s'arrêtant à l'ouest sur la commune de Saint-Georges-sur-Baulche et au nord sur la commune de Monéteau (fig. 6). Avant toute étude, pour s'assurer que l'enveloppe urbaine choisie est pertinente, une analyse de l'occupation du sol a été faite à l'aide de l'extension QGIS « GroupStats », qui permet de calculer le pourcentage de chaque milieu sur une surface donnée.

Tableau 2 : Répartition du type d'occupation du sol de la zone urbaine (en %) (Source : OSO_Théia 2022, GroupStats)

Occupation du sol	Urbain dense (1)	Urbain diffus (2)	Zones industrielles et commerciales (3)	Routes (4)	Colza (5)	Céréales à paille (6)	Tournesol (9)	Tubercules / Racines (12)	Prairies (13)	Vignes (15)	Forêts de feuillus (16)	Forêts de conifères (17)	Landes (19)	Plages et dunes (21)	Eau (23)
Taux de recouvrement (en %)	0.25	80.35	2.00	0.40	0.71	0.06	0.10	0.00	6.27	0.38	6.79	0.01	0.23	0.04	2.40

En simplifiant cette division du territoire, notre site d'études est recouvert à 83% de milieux artificialisés, de 13.3% d'espaces verts, 2.4% de zones humides et 1.3% de terrains cultivés (tableau 3).

L'occupation du sol, la présence de milieux naturels et de milieux artificialisés, est la base de l'étude et sert

Tableau 3 : Simplification de la répartition de l'occupation du sol (Source : OSO Théia, 2022)

Type de milieu	Taux de recouvrement (%)
Milieux artificialisés	83.0
Espaces naturels herbacés	13.3
Zones humides	2.4
Espaces cultivés	1.3

de référence pour la pertinence de ces outils dans ces milieux. L'objectif est d'appliquer ces outils à des milieux principalement artificialisés /imperméabilisés. Celle-ci permet d'assurer que les résultats ne seront pas biaisés par la prise en compte de grandes parcelles de cultures agricoles par exemple, ou de milieux naturels qui ne sont pas des milieux imperméables. Ainsi, l'analyse de l'occupation du sol confirme un milieu urbain relativement dense mais mixte, avec la présence de certains espaces naturels, qui sont en suffisamment grand nombre pour être étudiés, sans pour autant falsifier les résultats.

III. Résultats

1. Application des quatre outils à l'Auxerrois

ARIES :

ARIES FOR SEEA permet d'exporter des rasters du carbone stocké par la végétation (fig. 7), de la masse de carbone organique (fig. 8) ainsi que la quantité de carbone stocké dans le sol (fig. 9).

Le stockage de carbone dans la végétation est calculé en faisant la somme de

La masse de carbone organique recensée par l'outil correspond à tout le carbone organique qui peut se trouver au sein du sol, de la biomasse aérienne et des racines.

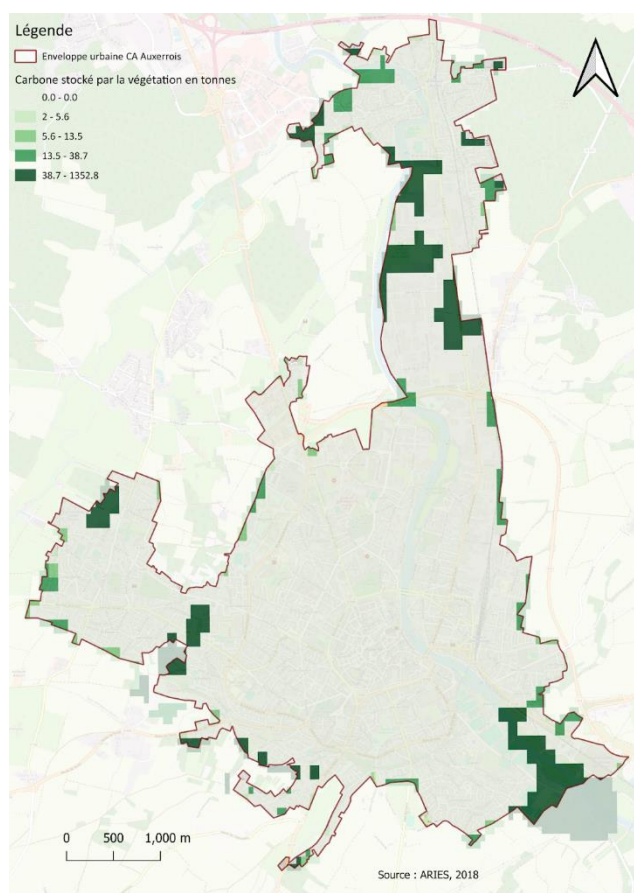


Figure 7 : Quantité de carbone stocké par la végétation au sein du site d'études (en tonnes) (Source : QGIS, ARIES FOR SEEA)

La répartition du carbone stocké dans le sol est similaire à celle du carbone organique. Les espaces de concentration élevées de stockage de carbone contournent le centre urbain diffus d'Auxerre, avec une concentration faible à Monéteau et Saint-Georges-sur-Baulche.

Il y a peu de carbone stocké par la végétation au sein de l'enveloppe urbaine, en particulier au centre. On observe des données significatives de stockage sur les bords du site, sûrement dû à la présence de terres cultivées aux frontières. On remarque que la végétation au sein du tissu urbain ne stocke pas de quantité de carbone assez significative de manière à être prise en compte par l'interface.

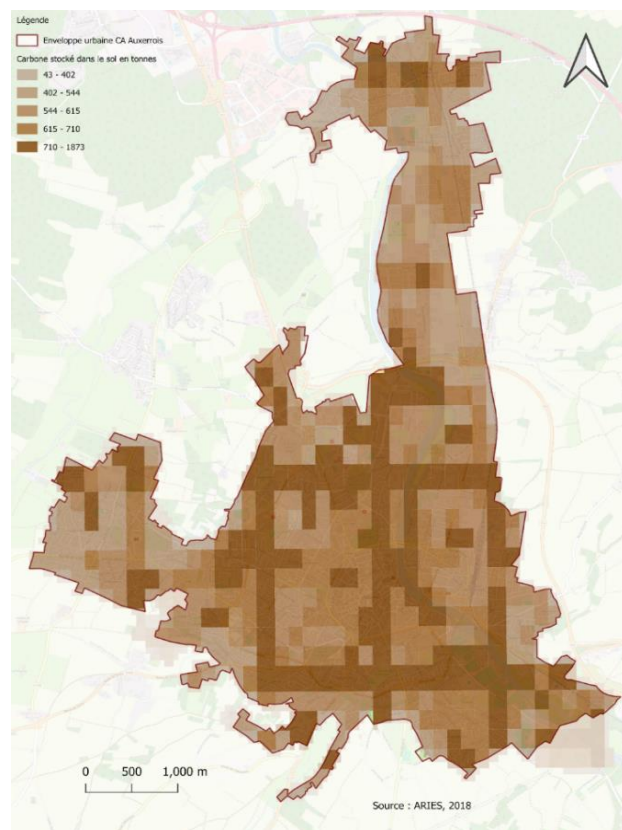


Figure 8 : Quantité de carbone stocké dans le sol au sein du site d'études en tonnes (Source : QGIS, ARIES FOR SEEA)

La masse de carbone organique stocké sur le territoire correspond à la somme du stock de carbone stocké par le sol ainsi que par la végétation. On observe ainsi une concentration de lieux stockant significativement plus de carbone au centre du site d'études et mais que les bordures du site semblent en stocker moins (mais pas pour autant peu).

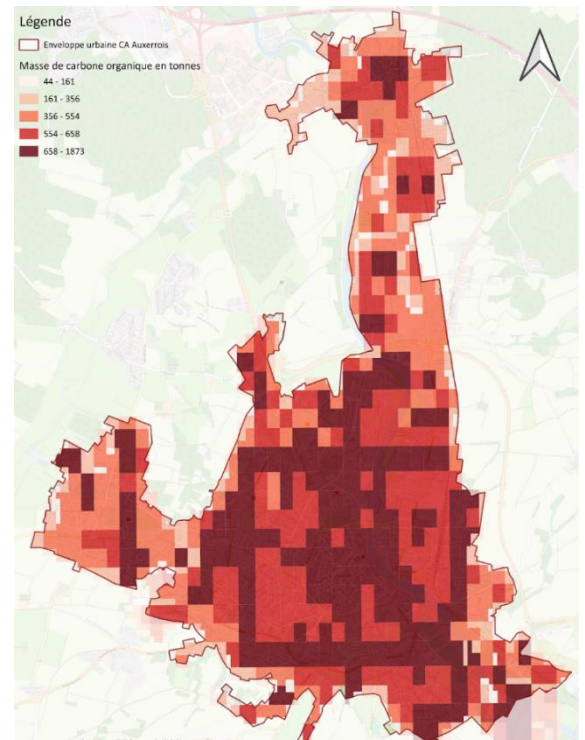


Figure 9 : Masse de carbone organique stocké au sein du site d'études (en tonnes) (Source : QGIS, ARIES FOR SEEA)

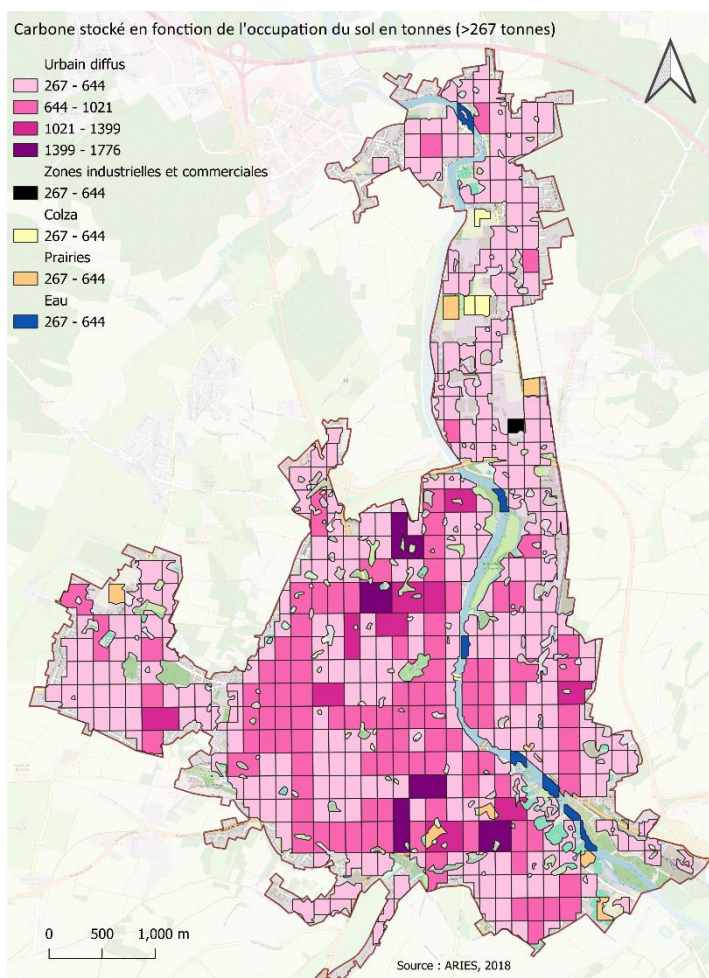


Figure 10 : Type de milieux stockant plus de 267 tonnes de carbone (Sources : QGIS, ARIES FOR SEEA, Théia)

Afin de visualiser le type de zones stockant le plus de carbone, la carte de la masse de carbone stocké en fonction de l'occupation du sol (fig. 10) représente seulement les sites stockant plus de 267 tonnes. Elle a été faite en faisant l'intersection des couches vecteurs de la masse de carbone organique avec celle de l'occupation du sol (OSO) de Théia 2022.

Il en ressort que les milieux urbains diffus stockent la majeure partie du carbone au sein du site d'études, ce qui s'explique sûrement par la proportion de couverture du sol. Parmi les autres milieux se retrouvent uniquement le colza pour les espaces cultivés, les prairies pour les espaces verts ainsi que certaines parties de l'Yonne pour les espaces aquatiques.

TESSA :

Pour la méthode TESSA, les données de stock de carbone n'ont pas été recensées dans des bases de données existantes, et bien que certaines méthodes de récupération des données soient applicables en milieu urbain, je n'ai pas eu le temps, ni les ressources d'effectuer les mesures sur le terrain. Malgré tout, certaines mesures étaient estimables à partir d'interprétations et de mesures de photographies satellites (Google Earth, GéoPortail et IGN Remonter le Temps). Le terrain d'études choisi est le Parc de L'Arboretum, situé au sud de l'Auxerre, avec une surface de 36000 m² (routes comprises). Ce site a été choisi en étudiant les données sur les espaces verts fournies par la communauté d'agglomérations, spécifiquement pour sa taille, son emplacement (en plein centre urbain) et sa couverture végétale relativement simple à délimiter. La boîte à outils TESSA est écrite de manière à être utilisée sur des grands espaces naturels, ainsi son application sur le site d'études entier n'était pas pertinente dû à la quantité de milieux artificialisés aux alentours.

Afin de mettre en œuvre cet outil, il fallait tout d'abord suivre les arbres décisionnels pour l'évaluation du service écosystémique de régulation du climat. Ce parc urbain étant principalement recouvert de pelouses/prairies, l'arbre décisionnel CLIMAT 2 (Annexe 2) à dominance prairial a été suivi.

Arbre décisionnel CLIMAT 2 :

1. Est-ce qu'il y a des espaces avec différents habitats ou niveaux de perturbation :
 - Oui → Méthode CLIMAT 1
 - Disposez-vous de données de terrain quantitatives ? **Non**
 - Classez les zones selon qu'elles sont « faiblement », « moyennement » ou « fortement » perturbées à l'aide des indications qualitatives suivantes
 - J'ai supposé une perturbation moyenne du milieu, lié à l'activité humaine, le piétinement et l'entretien, puisque les questions de l'outil à ce sujet étaient liées aux activités industrielles et agricoles d'exploitation, et il ne me semblait pas judicieux de désigner ce site comme faiblement perturbé au vu de son environnement.
2. Est-ce que les prairies sont cultivées ? **Non**
3. Est-ce qu'elle est fertilisée ? **Oui**
 - a. N'ayant pas d'informations sur les méthodes de gestion du parc, j'ai supposé qu'elle a été fertilisée par moment dans les 50 dernières années au vu de son évolution entre 1953 et 2020 (interprétation visuelle de photographies aériennes de Remonter le Temps).
4. Est-ce qu'elles sont pâturées ? **Non**
 - ⇒ **Compléter les arbres décisionnels CLIMAT 5, 6, 8 et 9**

Arbre décisionnel climat 5 : Estimation du stock de carbone.

1. Calculer le carbone en surface :
 - a. Est-ce que des données sur le stock de bois vendable sont disponibles ? **Non**
 - b. Est-ce que des ressources pour des enquêtes locales sur le terrain sont disponibles ? **Non**
 1. Utiliser la **Méthode Climat 2**

1.1. Méthode Climat 2 : Estimation du stock de carbone de la biomasse aérienne vivante en utilisant les estimations niveau 1 du GIEC

Il n'était pas possible de prendre des mesures sur le terrain, donc j'ai séparé le parc en deux types de milieux : les milieux ouverts ras (qui seront nommés "prairie" par la suite) et les milieux arborés (qui seront nommés "forêt tempérée" par la suite), que j'ai pu délimiter et mesurer à l'aide de Google Earth, sans prendre en compte les milieux dénudés ou artificialisés (fig. 11).



Figure 11 : Mesures des surfaces herbacées (jaune) et arborées (vert) sur Google Earth

Tableau 4 : Surface et proportion des deux milieux identifiés sur le site : les prairies sont les milieux ouverts ras et les forêts tempérées sont les milieux arborés

	Surface en m²	Surface en %	Surface en ha
Forêt tempérée	8243,99	27,10	0,824399
Prairies	22180,87	72,90	2,218087
Total	30424,86	100,00	3,042486

Au vu des définitions des différents habitats dans l'Annexe *Estimations de la biomasse et de la matière organique des sols minéraux pour différents types d'habitats* de la version française de TESSA, les données utilisées pour estimer les stocks de carbone sont les valeurs de référence pour les zones boisées (forêt tempérée) et pâturage tempéré (prairie). Ainsi, en multipliant les surfaces des sites en hectare par les valeurs référentielles et par le coefficient multiplicateur, le parc stock 22.18 tonnes de carbone dans la biomasse vivante aérienne.

Tableau 5 : Calcul du carbone stocké par la biomasse vivante aérienne par milieu

	Biomasse Vivante Aérienne	Stock de carbone BVA
Forêt tempérée	39,571152	19,785576
Prairies	5,1016001	2,397752047
Total en tonnes	44,6727521	22,18332805

2. Méthode Climat 5 : Estimation du stock de carbone de la biomasse souterraine en utilisant les facteurs de conversion du GIEC

Pour la forêt tempérée, le tableau 4.4 du chapitre 4, du volume 4 des lignes directrices du GIEC (2006) indique un ratio R de 0.46 pour les forêts continentales tempérées avec des espèces de feuillus mixtes. Il est indiqué que le parc contient plusieurs espèces différentes, mais avec des données imprécises, j'ai choisi de prendre une donnée non spécifique aux espèces, mais plutôt au taux de biomasse aérienne vivant (ici, inférieure à 75 tonnes par hectare).

Pour la prairie, il était possible de se référer au tableau dans l'Annexe *Estimations de la biomasse et de la matière organique des sols minéraux pour différents types d'habitats*, avec les données sur la biomasse aérienne vivante des pâturages tempérés, avec la donnée de biomasse souterraine.

Après le calcul du coefficient multiplicateur, le parc stock 23,70 tonnes de carbone dans la biomasse souterraine.

Tableau 6 : Calcul du carbone stocké par la biomasse souterraine par milieu

	Biomasse Souterraine	Stock de carbone BS
Forêt tempérée	18,20272992	9,10136496
Prairies	31,053218	14,59501246
Total en tonnes	49,25594792	23,69637742

3. Méthode Climat 6 : Estimation du stock de carbone de la matière organique morte (litière et bois mort) en utilisant les estimations niveau 1 du GIEC.

L'estimation de la quantité de litière et de bois mort nécessite des données connues et réputées pour la forêt tempérée, qui n'existent pas sur ce site, ainsi, en suivant le tableau d'estimation pour les zones boisées, il n'y a pas de litière ni de bois mort sur notre site. Il en est de même pour la prairie, la méthode climat 6 indique que les quantités sont négligeables.

4. Méthode Climat 7 : Estimer le stock de carbone organique du sol dans les sols minéraux et organiques.

Pour cette méthode, il était nécessaire de savoir s'il s'agissait d'un sol minéral ou organique, or je n'ai pas accès à ces données. Ainsi, à l'aide de la carte des sols de FAO UNESCO, le sol d'Auxerre a été identifié comme un cambisol eutrique. Les cambisols sont caractérisés par l'absence d'une couche accumulée d'argiles, d'humus, de sels solubles ou d'oxydes de fer et d'aluminium. Ils ont une forte concentration de minéraux. Ainsi, le sol du Parc de l'Arboretum est un sol minéral. De ce fait, la donnée de référence pour une forêt en climat tempéré sec à choisir est celle d'un sol à argile très actif, soit 38 tonnes de carbone organique par hectare.

La prairie est calculable à partir des informations du GIEC. Notre stock de carbone de référence est donc de 38 tonnes par hectare, le facteur de variation des stocks pour les systèmes d'affectation des terres (F_{Aft}) des strates herbacées est indiqué être $F_{Aft} = 1$.

Pour le facteur de variation des stocks pour les systèmes de gestion ($F_{Gestion}$), le tableau 6.2 du chapitre 6 des lignes directrices du GIEC (2006) propose plusieurs facteurs en fonction du mode de gestion. N'ayant pas d'informations précises sur les méthodes de gestion, j'ai supposé une gestion améliorée représentant des prairies gérées durablement, subissant une pression moyenne par les pâturages et recevant au moins un type d'amélioration (fertilisation, amélioration des espèces, irrigation, etc.), avec un facteur $F_{Gestion}$ de 1.14. Pour le facteur de variation des stocks pour les entrées de matière organique (FE), j'ai supposé un niveau nominatif, avec un facteur de 1. Ainsi, à l'aide de la formule suivante, il y a 127,41 tonnes de carbone organique dans le sol du parc de l'Arboretum.

$$COS = COS_{REF} \times F_{Aft} \times F_{Gestion} \times FE.$$

Tableau 7 : Calcul du carbone organique stocké par les sols minéraux

	Carbone organique des sols minéraux
Forêt tempérée	31,327162
Prairies	96,08752884
Total en tonnes	127,4146908

Tableau 8 : Somme du carbone stocké par milieu

	Stock de carbone BVA	Stock de carbone BS	Bois Mort / Litière	Carbone organique des sols minéraux	Total
Forêt tempérée	19,785576	9,10136496	0	31,327162	60,21410296
Prairies	2,397752047	14,59501246	0	96,08752884	113,0802933
Total en tonnes	22,18332805	23,69637742	0	127,4146908	173,2943963

Ainsi, le stock total de carbone sur le site de 173.29 tonnes.

Arbre décisionnel Climat 6 : Estimation de la séquestration du carbone

1. Est-ce qu'il s'agit d'une tourbière (dominance de sphaignes ?) **Non**
2. Calculer carbone séquestré en végétation de surface sur un an
 - Le calcul sur un an n'est pas possible dû au manque de temps et l'absence de données, ainsi il n'est pas possible pour moi de faire ce calcul dans le cadre de cette étude

Arbre décisionnel Climat 8 : Estimation des émissions de CH₄

1. Le sol est-il minéral ou organique ? **Minéral**
 - On suppose que les émissions CO₂ sont négligeables

Arbre décisionnel Climat 9 : Estimation des émissions de N₂O

1. S'agit-il d'une tourbière drainée ? **Non**
2. Est-ce que des fertilisants azotés ou de l'engrais sont utilisés ? OU l'herbe est-elle très pâturée ? **Non**
au deux questions
 - On suppose que les émissions N₂O sont négligeables

InVEST :

Pour l'utilisation de l'outil InVEST, il a tout d'abord fallu exporter et traiter la couche TIF de ESA WorldCover 2021. Facilement accessible, cette dernière a dû être vectorisée et catégorisée sur QGIS, avec une adaptation de la légende et de la symbologie par rapport à leur carte web interactive. Les problèmes ont été rencontrés au niveau des données des réservoirs de carbone. La source proposée, Soil Grids, offrait une couche de concentration de carbone dans le sol, mais seulement sous forme de raster, alors qu'un fichier csv est nécessaire pour l'application de cet outil. A partir de là, il a été identifié que cet outil demandait des données trop précises, qui n'existaient pas pour la Communauté d'Agglomérations de l'Auxerrois. Ainsi, l'outil n'a pas pu être traité entièrement.

InVEST est un outil qui peut être extrêmement intéressant, et a sa place dans l'évaluation de services écosystémiques en milieux urbains. Le problème est sa complexité. L'objectif de cette étude est de trouver des outils qui peuvent être utilisés par des urbanistes et planificateurs urbains dans le cadre de préparation de PLUi, or, InVEST demande des données tellement précises et développées, que ces dernières ne sont pas accessibles pour les PLUi. Si une ville, une métropole ou une intercommunalité souhaite faire des études

aussi précises sur son terrain (simuler le développement de la séquestration de carbone, modéliser les îlots de fraîcheur etc.), ils demanderaient à une structure spécialisée pour les faire, car ces dernières seront équipées à trouver, traiter et interpréter ces données. Dans le cadre d'un PLUi, il n'est pas possible de faire les relevés, de traiter une si grande quantité de données brutes pures.

Ce n'est pas un outil d'accompagnement, il s'agit réellement d'un outil de développement, qui n'est pas accessible aux non spécialistes (en l'absence des données).

Dans un cadre où les données nécessaires étaient déjà toutes pré traitées et préparées à intégrer dans l'outil, ce dernier serait utilisable pour un PLUi. Malheureusement, dans le cas de la CA de l'Auxerrois, ces données n'existent pas et ainsi il n'est absolument pas judicieux de chercher à utiliser InVEST.

REGREEN :

La méthodologie REGREEN (Deboeuf de Los Ríos et al., 2022) requiert différentes données, que ce soit sur la végétation, la biodiversité, les risques d'inondation, de ruissellement et d'îlots de chaleur. Afin d'observer la régulation du climat et des zones potentielles à renaturer, cette application s'est faite sur les deux enjeux : Biodiversité et Changement Climatique. Ces deux enjeux proposés par la méthode REGREEN permettent une lecture complète des résultats. L'enjeu changement climatique permet d'identifier les sites à enjeu pour le service de régulation du climat (l'évaluation des îlots de chaleur et des risques) et l'étude de l'enjeu biodiversité permet d'établir des sites potentiels de stockage de carbone.

Enjeu Biodiversité :

La Communauté d'Agglomérations de l'Auxerrois a transmis leurs couches recensant les espaces verts sur la commune d'Auxerre, mais ces derniers n'avaient pas de table d'attributs et ne couvraient pas l'entièreté de l'enveloppe urbaine étudiée. Ainsi, je l'ai combinée aux couches SIG de la BD TOPO, la BD TOPAGE et la BD Forêt. Les zones de végétation ont ensuite été traitées et hiérarchisées comme indiqué dans la méthodologie officielle, en fonction de leur surface, leur pourcentage de couverture végétale (pour celles connues) ajoutées aux habitats rares identifiés auparavant.

Tableau 9 : Attribution des scores aux milieux naturels du site d'études

	Seuils	Score attribué
% de couverture végétale	>10%	1
	entre 10% et 40%	2
	>40%	3
Taille de la parcelle	0 ha	0
	entre 0 ha et 4.4 ha	1
	> 4.4 ha	2
Habitats rares	Arbres	1
	Mares/Retenues d'eau	1
	Rives semi-naturelles	1
	Zone humide	2 (3 si superficie > 4.4 ha)

Les pourcentages de couverture végétales n'étant pas toutes connues, la documentation de la BD Forêt permettait d'estimer à minima la couverture végétale de leurs entités, puisqu'elle divise ses espaces arborées en forêts "ouvertes" et "fermées", liées au pourcentage de couverture végétale et de couverture arborée (>10% pour les plaines, >40% pour les forêts fermées et entre 10 et 40% pour les forêts ouvertes).

L'identification des habitats rares n'est pas forcément simple en milieu urbain, d'après la méthodologie publiée pour le projet REGREEN, ils considèrent les sites avec des arbres remarquables, des zones humides, des mares ou bien des espèces patrimoniales/protégées comme des habitats rares en milieu urbain. L'association ARBRES avait recensé un arbre remarquable en face de la Médiathèque de Monéteau, mais suite à une observation d'images satellites, cet arbre n'est plus présent (il a été recensé en 2018 et la dernière photo de Google Earth date de 2021). En milieu urbain, les pelouses sèches, les landes et les prairies pourraient également être considérées comme des habitats rares.

Des mares sont présentes sur le site, recensées en 2009 par le Conservatoire d'Espaces Naturels de Bourgogne, mais n'ayant pas le temps de traiter les données, seules les retenues d'eau permanentes présentes au sein de l'enveloppe urbaine choisie, les zones humides naturelles et les masses d'eau superficielles permanentes (artificielles ou naturelles) ont été retenues pour ces habitats. Les données CarHab du département de l'Yonne ont également été utilisées afin d'identifier certaines zones spécifiques au sein de l'enveloppe urbaine.



Figure 12 : Répartition des scores de biodiversité sur le site d'études (Sources : CarHab 2023, BDForêt 2018, BDTopo 2023, CA de l'Auxerrois)

Sur la fig.12, les milieux ayant un score de 2 ou 3 se situent principalement le long de l'Yonne, malgré tout, certaines sont parsemées au sein des bâtiments mais leur taille limite leur impact et leur score. Il serait intéressant de renaturer les rives ouest de l'Yonne au niveau de l'Auxerre afin d'équilibrer la quantité de sites bâtis.

Enjeu Changement Climatique :

Une étude de surchauffe urbaine sur la surface de l'Auxerre a été faite par le bureau d'études TRIBU, et bien qu'ils aient donné accès aux rapports, ils n'avaient pas les données brutes SIG. Ainsi, à l'aide d'une image de la carte, géoréférencée et rastérisée, il a été possible de dessiner les polygones pour les différentes zones à enjeux sur la ville d'Auxerre (cette carte ne s'étend pas sur la totalité de l'enveloppe urbaine choisie, notamment au niveau des communes de Monéteau et Saint-Georges).

Tableau 10 : Scores attribués en fonction du coefficient de rafraîchissement urbain

	Seuils	Score attribué
Coefficient de rafraîchissement urbain	0 - 0.15	0
	0.15 - 0.35	1
	0.35 - 0.65	2
	0.65 - 1	3

La DREAL de Bourgogne-Franche-Comté propose les données de Territoires à risque important d'inondation (TRI) de l'Auxerre, qui permet d'identifier les zones inondables, risque des aléas forts, moyens et faibles, donc des événements fréquents, moyens et extrêmes.

Tableau 11 : Attribution des scores en fonction des risques d'inondation et de ruissellement

	Seuils	Score attribué
Risque inondation	Aléa fort : hauteur minimale > 1.5 m	0
	Aléa moyen : hauteur minimale > 1 m	
	Aléa faible : hauteur minimale > 1.5 m	
	Aléa fort : hauteur minimale : entre 0.5 et 1.5 m	1
	Aléa moyen : hauteur minimale entre 0.5 et 1 m	
	Aléa faible : hauteur minimale entre 1 et 1.5 m	
	Aléa fort : hauteur minimale < 0.5	2
	Aléa moyen : hauteur minimale < 0.5	
	Aléa faible : hauteur minimale < 1 m	
Risque de ruissellement	aléa fort	0
	aléa moyen	1
	aléa faible	2

La méthodologie explique que les scores doivent être additionnés entre eux puis comparés à des sites renaturables tels que les cimetières, les parkings, les berges artificialisées. Ces sites seraient désignés comme renaturables et leur score total permettrait de définir une échelle de priorité parmi les sites (.

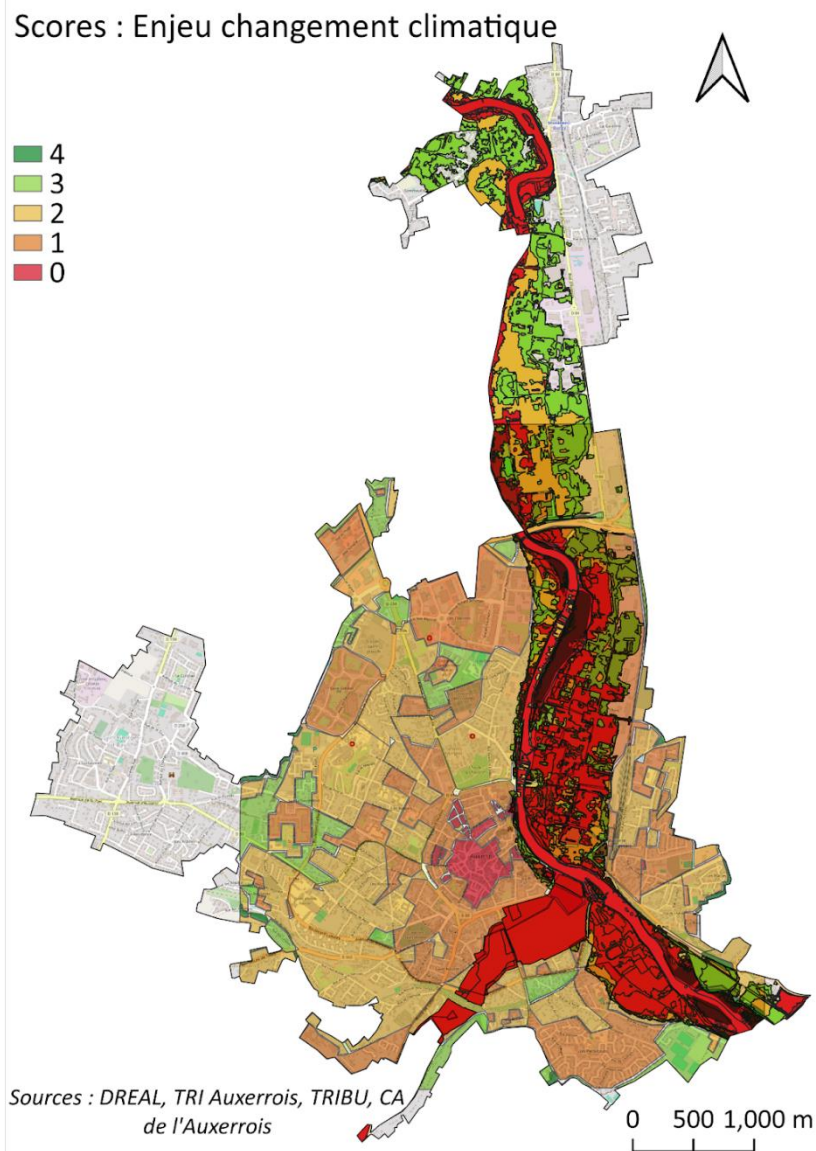


Figure 13 : Répartition des scores de l'enjeu changement climatique sur le site d'études (Source : TRI Auxerre, DREAL, TRIBU surchauffe urbaine)

Les sites avec un score 0 se situent principalement aux bords de l'Yonne, en zone de risque d'inondation et de ruissellement, ainsi que le centre d'Auxerre, au risque de surchauffe urbaine. Cela correspond aux mêmes sites que l'enjeu biodiversité. Suivant la méthodologie décrite, les rives et berges, les parkings et certains bâtiments au sein des zones inondables seraient idéaux à renaturer en priorité.

2. Tableau de hiérarchisation des outils en fonction des critères

On peut remarquer qu'en dehors de l'outil InVEST, les outils appliqués répondent aux objectifs posés, avec chacun leur force particulière.

Tableau 12 : Tableau de hiérarchisation des outils en fonction des critères cités

Critères échelonnés, de 1 à 3 pour chacun (faible, moyen, fort)							
Outil	Crédibilité	Echelle	Généralisabl e	Reproductible	Pertinence	Remarques	Outils externes utilisés
ARIES	2	2	2	3	2.375	ARIES est assez facile d'utilisation, une fois la prise en main initiale faite, les plus gros défauts de cet outil sont l'échelle/lisibilité ainsi que le faible nombre de SE observables. Malgré tout, il a un fort potentiel, et des mises à jour sont toujours en cours, avec les services culturels qui vont être rajoutés en 2024	QGIS pour une meilleure visualisation des résultats (facultatif)
TESSA	1	2	2	3	2.25	Une bonne méthode lorsque les données n'existent pas et qu'il n'y a pas de spécialiste sur le terrain, mais demande des données qui ne sont pas forcément accessibles de manière immédiate. Les méthodes et outils nécessaires pour récupérer les données sont accessibles à tous, mais peuvent prendre du temps (la séquestration de carbone doit se faire sur un an, une fois au début et une fois à la fin)	Copie des lignes directrices du GIEC 2006 Google Earth pour les mesures de surfaces des milieux
InVEST	N/A	2	1	1	N/A	En principe, outil très intéressant si les données sont disponibles et prétraitées, sinon pas adapté ni accessible aux bureau d'études pour les PLUi	Logiciel InVEST
REGREEN	2	3	2	3	2.25	REGREEN est une méthodologie très transversale, prenant en compte de nombreuses variables. Il s'agit de l'outil qui a été le plus chronophage de tous, mais ceci est lié au manque de données brutes.	QGIS

IV. Discussion

1. Revue des outils : le choix entre accessibilité et crédibilité

Les trois outils réellement appliqués proposaient des résultats assez variables. ARIES et TESSA proposent en sortie des données quantitatives (de crédibilité variée) alors que la méthodologie appliquée de REGREEN propose des sites propices à renaturer, qui soit des sites proposant moins de services écosystémiques ou bien des sites à conserver, ceux qui proposent le plus de services écosystémiques.

Les trois outils semblent pertinents à l'échelle urbaine, même si ARIES et TESSA ne le sont pas explicitement, ils ont été relativement simples à adapter aux milieux urbains.

ARIES se démarque par son accessibilité, il ne nécessite pas de données externes, et peut être interprété de manière visuelle sans tableaux rien que sur l'interface web ARIES FOR SEEA. Il est également possible de télécharger les cartes sous forme de Raster et les polygoniser en vecteurs, tout en gardant les valeurs de la carte, ce qui rend leur utilisation bien plus simple et plus développée (possibilité d'intégrer dans un projet existant avec d'autres données existantes, comparaisons plus précises que visuelles). Malgré tout, il reste un problème d'échelle dans son application. Le quadrillage et la taille des cellules peut être adapté en fonction de la surface étudiée, mais n'est pas forcément applicable à l'échelle parcellaire. La crédibilité de cet outil est difficile à démontrer de par sa nature d'Intelligence Artificielle et l'absence de données brutes, non traitées par l'outil pour sa vérification.

TESSA est un outil facilement accessible, peu importe ses connaissances dans le domaine de l'écologie ou de l'urbanisme, mais présente quelques désavantages. Tout d'abord, en l'absence de données existantes, il nécessite des études et de relevés sur le terrain, qui sont certes faciles à faire (les outils requis ne sont pas extrêmement spécialistes et restent à la portée de non spécialistes), mais un problème a été rencontré pour le calcul de la séquestration de carbone. Ce calcul requiert deux relevés de terrains identiques, mais à 12 mois d'écart. C'est un outil qui requiert du temps et de l'organisation. Il se base principalement sur les lignes directrices du GIEC (2006), et renvoie régulièrement à ce dernier pour des données de références ou des tableaux explicatifs. Il serait plus intéressant de les intégrer dans les annexes (certaines le sont, pas d'autres), puisqu'ils indiquent les chapitres et les articles, mais pas toujours les volumes, et il peut être facile de perdre du temps à regarder dans tous ces documents. Bien qu'il produise des données quantitatives, ces dernières peuvent être très approximatives, et n'assurent pas une crédibilité importante dans ses résultats. De plus, les méthodes à suivre se font par site d'études ou habitat, et il peut être risqué de se concentrer immédiatement vers les espaces "naturels", ce qui n'est pas adapté à une étude en milieu urbain. Malgré tout, cet outil permet une première approche, non officielle, qualitative avec une idée quantitative, qui peut être plus adaptée pour des études d'impacts de projets, plutôt qu'un état initial de l'environnement d'un PLUi.

Ils mentionnent les milieux urbains dans les méthodes climat 3 et 4, mais les questionnaires pourraient être simplement adaptés aux milieux urbains, ne serait-ce que pour les niveaux de perturbation du milieu (cf. Résultats - TESSA).

Le projet REGREEN a donné naissance à une méthodologie claire et simple à suivre, cherchant à hiérarchiser différents critères en milieu urbain. Cet outil se distingue du reste puisqu'il a été réfléchi et élaboré pour les milieux urbains (étude sur l'Île de France), et permet donc une meilleure crédibilité si correctement appliqué et interprété. La difficulté de REGREEN se trouve dans les données nécessaires. La nature même d'une évaluation des services écosystémiques implique des données transversales, mais dans le cas où elles n'ont pas toutes été recensées, ni traitées, cela peut être difficile pour des non-experts en logiciels SIG. Contrairement à InVEST, les données nécessaires pour l'application à l'enveloppe urbaine de l'Auxerre ont été trouvables et développées (pas toujours avec une précision très élevée), même si cela n'a pas été simple. Les données des îlots de chaleur et des coefficients de rafraîchissement urbains de la ville d'Auxerre proviennent d'une étude faite préalablement, mais ce type de données ne se trouve pas partout et donc ne peut pas être applicable à toutes les collectivités.

InVEST n'a pas pu être utilisé dans l'étude de cas dû aux demandes trop précises de données, notamment des données .csv de la concentration de carbone dans le sol.

2. La pertinence réelle des services écosystémiques en milieu urbain

Les services écosystémiques ont l'avantage de la transversalité. Comme les applications ont pu le démontrer, notamment dans le cas de ARIES, certains sites stockant le plus de carbone dans le sol n'étaient pas des espaces naturels, mais bel et bien des espaces urbanisés et artificialisés. Cela permet un nouveau point de vue sur l'espace et le tissu urbain, montrant de nouvelles opportunités et des sites à enjeux potentiels qui n'auraient pas été identifiés auparavant. De plus, le PCAET de la Communauté d'Agglomérations de l'Auxerrois a défini un enjeu majeur de "[préservation des] boisements, haies et prairies, constituant des puits de carbone et permettant de lutter contre le réchauffement climatique" (Plan Climat Air Energie Territorial de la Communauté d'Agglomérations d'Auxerre, 2023).

Préserver les boisements, haies et prairies, constituant des puits de carbone et permettant de lutter contre le réchauffement climatique

Le détachement des habitats rares et des sites protégés habituels encourage cette prise en compte de la nature ordinaire, apporte plus d'informations et de conscience du potentiel des espaces précédemment mis de côté.

Cet avantage des services écosystémiques est mis en avant par les méthodes d'obtention des données. Les données récupérées pour cette étude provenaient d'une étude sur la surchauffe urbaine sur la ville d'Auxerre, mais aussi de la Direction Régionale de l'Aménagement, de l'Environnement et du Logement et des Plans de Protection contre les Risques d'Inondations et des études des Territoires à Risque Important d'Inondations (TRI). Ces documents sont repris dans des documents d'urbanisme tels que les PLUi et les SCoT, mais souvent abordés en fonction de leur thématique. Ceci mène à un risque d'oubli des liens qui connectent tous ces espaces et toutes ces thématiques, ce que l'évaluation des services écosystémiques permet de compenser.

3. Traduction réglementaire

La traduction réglementaire est un outil de prise en compte de l'environnement dans les documents d'urbanisme. Dans le cas des enjeux environnementaux, cette dernière se fait à travers une évaluation environnementale, qui accompagne l'élaboration de documents tels que les SCoT, les PLUi ou bien les cartes communales et joue un rôle d'aide à la décision. L'évaluation environnementale est un outil d'information, qui identifie les enjeux environnementaux d'un territoire en fonction des interactions entre les thématiques environnementales. S'y retrouvent une dimension rétrospective, d'analyse historique d'un territoire ainsi qu'une dimension prospective, cherchant à construire une stratégie pour l'avenir d'un territoire. L'évaluation environnementale se divise en plusieurs étapes et plusieurs formes (fig. 14) : l'État Initial de l'Environnement (EIE), le Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD), des Orientations d'Aménagements et de Programmes (OAP) ainsi qu'un règlement écrit et graphique.

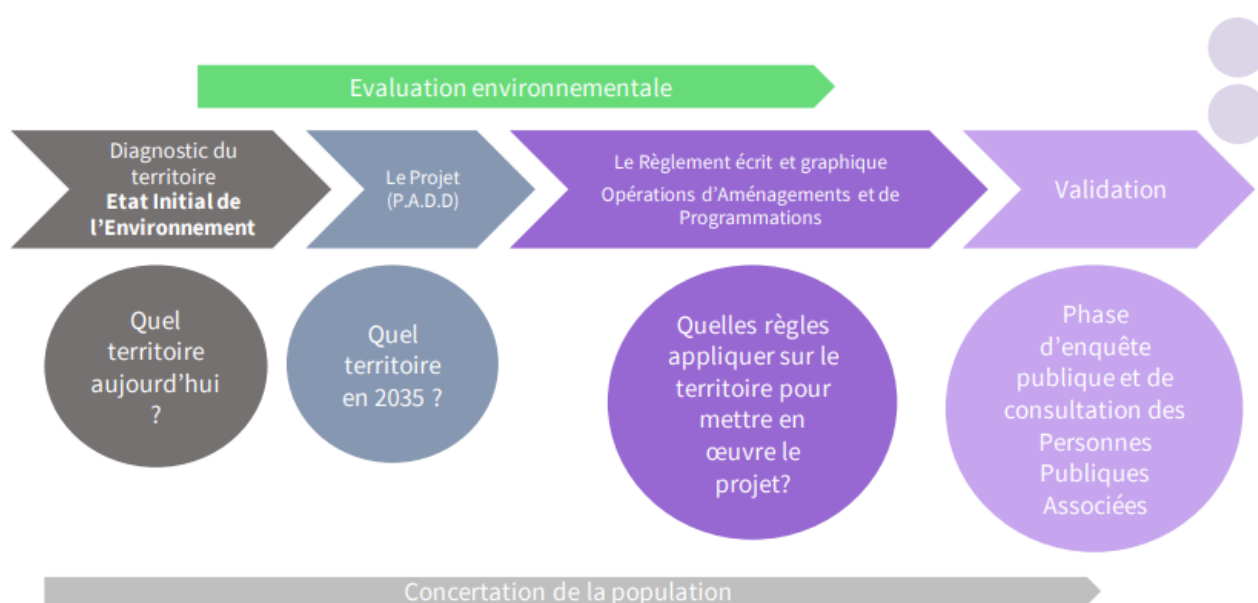


Figure 14 : Etapes de l'évaluation environnementale d'un PLUi (Source : Vinciane Leduc, Cittànova)

L'état initial de l'environnement est la première pièce constitutive d'une évaluation environnementale. L'EIE est une diagnostic dynamique et systémique qui fait ressortir les enjeux environnementaux d'un territoire en soulignant les interactions entre les problématiques environnementales à l'aide de thématiques transversales et en identifiant les constats, pressions et réponses apportées en fonction des particularités locales d'un territoire. Bien qu'il n'y ait pas d'obligations sur les thématiques à aborder dans un état initial de l'environnement, il doit répondre aux exigences de l'article 5 de la directive 2001/42/CE du Parlement Européen et du Conseil, du 27 juin 2001, relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement ainsi que l'article L121-1 du code de l'urbanisme : « *un rapport sur les incidences environnementales est élaboré, dans lequel les incidences notables probables de la mise en œuvre du plan ou programme, ainsi que les solutions de substitution raisonnables tenant compte des objectifs et du champ d'application géographique du plan ou du programme, sont identifiées, décrites et évaluées* » (article 5 de la directive 2001/42/CE) et « 3. La réduction des émissions de gaz à effet de serre, la maîtrise de l'énergie et la production énergétique à partir de sources renouvelables, la préservation de la qualité de l'air, de l'eau, du sol et du sous-sol, des ressources naturelles, de la biodiversité, des écosystèmes, des espaces verts, la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques, et la prévention des risques naturels prévisibles, des risques miniers, des risques technologiques, des pollutions et des nuisances de toute nature. »

(extrait de l'article L121-1). Néanmoins, les composantes environnementales d'un EIE sont le paysage patrimonial, la biodiversité, les milieux naturels, les sols et sous-sols, l'énergie, le bruit, la qualité de l'air, le cycle de l'eau et le réseau hydrographique, les déchets ainsi que les risques naturels et technologiques. L'état initial de l'environnement se présente ainsi comme le référentiel d'un territoire, l'état de référence de ce territoire pour la suite de l'évaluation environnementale.

Le Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD) est une pièce écrite qui présente le projet du territoire sur le long terme (en général 10 à 20 ans). C'est un document obligatoire pour un Plan Local d'Urbanisme (PLU, PLUi) qui fixe les objectifs et les orientations des projets de développement du territoire, en intégrant les enjeux de divers domaines, dont l'habitat, les énergies renouvelables, l'environnement... Défini dans l'article L151-5 du code de l'urbanisme, le PADD définit *"1° Les orientations générales des politiques d'aménagement, d'équipement, d'urbanisme, de paysage, de protection des espaces naturels, agricoles et forestiers, et de préservation ou de remise en bon état des continuités écologiques ; 2° Les orientations générales concernant l'habitat, les transports et les déplacements, les réseaux d'énergie, le développement des énergies renouvelables, le développement des communications numériques, l'équipement commercial, le développement économique et les loisirs, retenues pour l'ensemble de l'établissement public de coopération intercommunale ou de la commune."*

Le PADD sert de référence à l'ensemble des actions d'aménagement d'un territoire, et guide les composantes d'un PLU tels que les OAP, les règlements écrits et graphiques, mais il ne s'agit pas d'une pièce opposable.

Les Orientations d'Aménagement et de Programmation sont un des outils réglementaires du PLU. Déclinées du PADD, elles expriment les objectifs et stratégies d'aménagement d'une collectivité de manière qualitative. Elles proposent des orientations opposables (prescriptions), et chaque porteur de projet se devra d'y être compatible afin d'avoir la validation de son projet. Les OAP définissent de manière précise des dispositions en matière de préservation de l'environnement, mais peuvent également proposer des conseils en mesures de réduction d'incidences, voire des mesures compensatoires. On peut trouver deux formes d'OAP, les OAP thématiques et les OAP sectorielles.

Les Orientations d'Aménagement et de Programmation (OAP) sectorielles sont élaborées pour des quartiers ou des zones urbaines spécifiques, notamment dans le cas de la création d'une zone à urbaniser (AU), comme l'exige l'article R. 151-20. Ces orientations déterminent les modalités d'aménagement en mettant l'accent sur les aspects architecturaux, urbains et paysagers des espaces qui se prolongent dans la zone concernée.

Les OAP thématiques sont définies et détaillées dans les articles L 151-6 et l'article L. 151-7 du code de l'urbanisme peuvent porter sur l'aménagement, l'habitat, les transports, les déplacements. Selon l'article L. 151-6-2, les OAP définissent les « *actions et opérations nécessaires pour mettre en valeur les continuités écologiques*, et la loi Climat Résilience du 22 août 2021, rend obligatoire l'OAP de la Trame Verte et Bleue. Lors d'une modification par la loi 2023-973 du 23 octobre 2023, les OAP peuvent *porter sur des quartiers ou des secteurs à mettre en valeur, réhabiliter, renaturer, notamment par l'identification de zones propices à l'accueil de sites naturels de compensation, de restauration et de renaturation, restructurer ou aménager*, ce qui peut être approché par les services écosystémiques. C'est à cette échelle de traduction réglementaire que l'identification des services écosystémiques va réellement avoir de l'impact grâce au caractère opposable de cette pièce. Un exemple concret d'OAP sur la thématique du changement climatique et de la résilience urbaine est l'OAP Climat-Air-Energie du PLUm de Nantes Métropole, approuvé en avril 2019. Dans leur catégorie "Climat", ils proposent des règlements à l'échelle du quartier, du bâti, jusqu'au choix des matériaux. Pour ce faire, ils proposent des orientations sur la ventilation, des interactions transversales (introduire des îlots de fraîcheur), d'adaptation (mise en place de dispositifs spécifiques, dans ce cas : la gestion des eaux pluviales). Au-delà des orientations, cette OAP propose également des méthodes de gestion et de

développement tels que la rénovation en place de la reconstruction, un tableau avec les qualités et impacts sur les émissions de GES et d'énergie grise de différents matériaux. Cette OAP donne ainsi un mode d'emploi pour tout prospecteur de projet afin de veiller à leur correspondance et conformité au règlement imposé par tous les documents de planification.

En parallèle aux OAP se trouve le règlement écrit et graphique, à caractère obligatoire de respect. Ce dernier fixe les règles générales et les utilisations du sols, en cohérence avec le PADD. Le zonage d'un territoire (le règlement graphique) permet de définir des rôles et enjeux des sites (zones à urbaniser (AU), zones naturelles (N)...) qui sont encadrés par des règles délimitant les actions possibles qui peuvent être plus ou moins précises (exemple : « les espaces libres de toute construction doivent être plantés à raison d'un arbre de haut jet minimum pour 200m² d'espace libre ») (*sources internes à Cittanova*).

Les outils appliqués dans cette étude peuvent mettre en exergue de nouveaux enjeux au sein d'un territoire et faciliter leur intégration dans ces règlements obligatoires et opposables. La méthodologie proposée dans le cadre du projet REGREEN peut permettre de préciser le zonage, en particulier pour les zonages à raison de la résilience urbaine et de l'atténuation du changement climatique. Sa forme transversale pourra faciliter la rédaction des prescriptions et leurs justifications, et permettre la préservation d'espaces autrement délaissés. ARIES peut permettre une identification de

L'identification des services écosystémiques à l'aide des outils appliqués à l'Auxerrois rend propice l'élaboration de telles OAP, qui, accompagnées d'un règlement, peuvent prescrire certaines actions, certains projets et protéger ces espaces de services avec un caractère opposable. Parmi tous les outils utilisés, la méthode REGREEN semble idéale pour ce type d'OAP, prenant en compte plusieurs facteurs environnementaux, et adaptables aux différents enjeux.

V. Vers une planification territoriale plus active contre le réchauffement climatique : Synthèse et Perspectives

1. Une systématisation potentielle mais qui manque d'accessibilité

La question qui a guidé cette étude était la question de la systématisation de l'intégration des services écosystémiques dans les documents de planification à l'aide d'outils et de méthodes existants. Afin de tester la capacité de généralisation des outils relevés, ils ont été appliqués à l'étude de cas qui était celle d'une zone urbaine délimitée autour d'Auxerre, dont la collectivité présente le profil idéal pour un objectif d'applicabilité à toute échelle urbaine. Cette étude a démontré la présence encore de quelques lacunes pour la prise en compte des services écosystémiques, la principale étant les données existantes, ce qui a empêché l'application de InVEST par exemple. Cet outil demandait des données brutes précises, sous format .csv, des concentrations de carbone dans le sol, alors que ces dernières n'étaient accessibles que sous format Raster. Malgré tout, sans grande expertise avant le lancement de cette étude, les outils étaient faisables d'un point de vue technique, avec une prise en main simple pour les outils ARIES et TESSA, et plus complexe pour REGREEN (surtout lié au grand nombre de données différentes traitées pour cet outil). Pour une évaluation des services écosystémiques à l'échelle d'une ville, l'outil ARIES et la méthodologie REGREEN sont les plus adaptées, car elles permettent une vision d'ensemble, alors que la boîte à outils TESSA semble beaucoup plus adaptée à l'échelle parcellaire, et donc pour une étude d'impact d'un projet, plutôt qu'un état initial de l'environnement. Néanmoins, TESSA pourrait être utilisé suite à une évaluation générale afin de développer des zones sensibles ou à fort enjeu de manière plus spécifique.

De ce fait, il me semble approprié de dire que la systématisation de l'évaluation des services écosystémiques semble faisable, mais certaines données seraient indispensables pour une étude pertinente, dont les coefficients de rafraîchissement urbain, qui n'existent pas encore sur toutes les collectivités

La représentation cartographique des aspects monétaires de ARIES, mais aussi des

est encore en cours de développement, mais l'évaluation des services de pollinisation et d'érosion semblent d'ors et déjà pertinentes et les données monétaires disponible pourraient permettre une autre vision du territoire, ce qui risque d'être beaucoup plus parlant pour les acteurs locaux.

Face à la lutte actuelle de l'atténuation du changement climatique, les services écosystémiques sont les plus pertinents en milieux urbains. Comme dit précédemment, les milieux urbains subissent de fortes pressions du changement climatique et il faut développer les actions menées en dehors de simplement la restauration des milieux naturels existants, et porter son attention sur les milieux les moins étudiés, qui ne sont pas sans leurs apports.

2. Perspectives d'évolutions : une véritable concentration sur les milieux urbains en dehors des métropoles

Il semblerait judicieux de développer certaines études pour les territoires. Les études de risques d'inondation et des espaces verts existant sur une grande majorité des territoires, peu importe leur taille, mais certaines études telles que les études plus approfondies des espaces naturels urbains (couverture végétale,

recensement d'arbres remarquables...), des études sur les îlots de chaleur urbains ainsi qu'une transparence sur la gestion des milieux seraient indispensables pour le développement des évaluations des services écosystémiques.

Une des limites rencontrées au cours de cette étude est les outils développés ces dernières années. Faisant une veille bibliographique des outils potentiels, beaucoup sont nouveaux, soit sous-développés, soit trop demandeurs de temps/d'expertise/de données. Dans le cas d'application pour une évaluation environnementale pour l'élaboration d'un PLUi, ces derniers ne sont pas toujours idéaux. A ce sujet, dans le cas d'ARIES, il faudrait augmenter la transparence des données ainsi que les manuels d'utilisation pour combler cet écart. Certaines informations sont données, mais pas toujours de manière claire, ou sinon par le biais d'un autre site qui nécessite des recherches supplémentaires. C'est le problème auquel j'ai fait face dans la différenciation des données "Corganic mass" et "C stock in soil", il n'était pas clair au départ ce que chacune variable représentait. Donc, même si leurs sources sont toutes citées, et certaines explications données, cela demande du temps et un certain niveau de connaissances pour différencier certaines valeurs et les comprendre suffisamment pour les interpréter. Cet outil serait idéal pour les études à toutes échelles de par sa maniabilité, mais je suis certaine de ne pas avoir profité de certaines fonctionnalités dû à une absence de documentation et un manque d'explications. Au contraire, bien que le logiciel InVEST n'ai pas pu être appliqué, ce dernier propose des guides d'utilisation, des banques de données de référence ainsi que des méthodes détaillées qui seraient optimales pour ARIES.

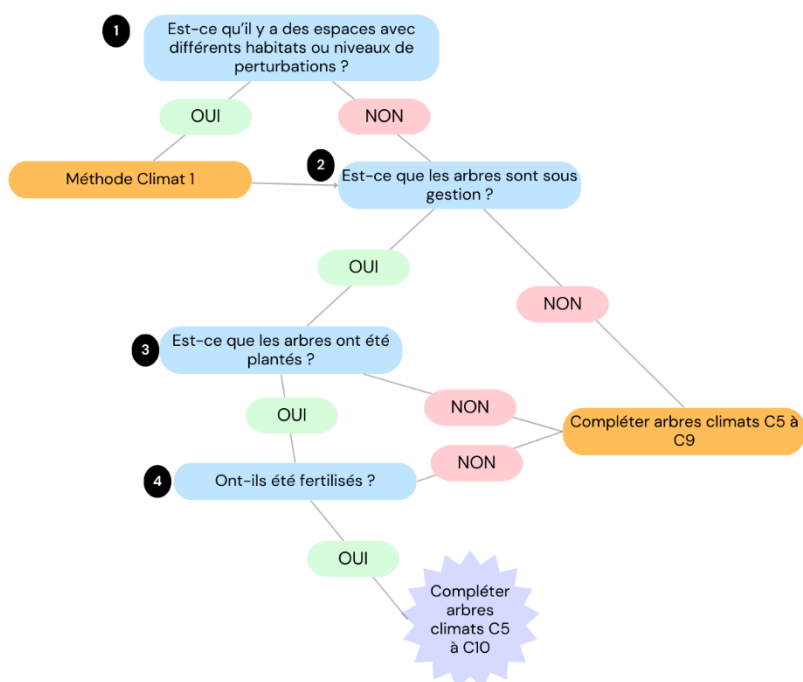
Un problème persiste, qui est celui de l'échelle. Comme mis en avant par certains auteurs (cf. Introduction), les milieux urbains sont encore en étude, mais peu d'études sur les villes moyennes ont été trouvées au cours de la revue bibliographique. En appliquant ces outils, cela se ressent dans les données demandées ou les méthodologies à suivre; les villes moyennes n'ont pas autant de ressources que les grandes villes et les métropoles, et donc, moins de données brutes, ce qui limite l'étendue possible des études, qui seraient, théoriquement, entièrement faisables à cette échelle. C'est là que se présente le véritable intérêt de l'Intelligence Artificielle dans le développement du SIG (Système d'Information Géographique), comme l'outil ARIES FOR SEEA, dans un but de développement d'outils de prédiction et d'apprentissage de solutions (11:57 2023). L'interprétation de photographies satellites et le développement de l'IA pourront rendre accessible tous types de données à tous. L'outil appliqué, ARIES, est encore en cours de développement, avec le prochain service écosystémique à sortir étant le tourisme lié à la nature, mais aussi des améliorations des fonctionnalités existantes, de nouveaux indicateurs... L'IA et les autres développement continus du SIG (tels que les données en temps réels) vont pouvoir accompagner divers secteurs, dont les acteurs de l'aménagement du territoire, de visualiser des données telles que les coûts monétaires (ARIES) ou l'Hypervision (*Les SIG Dans Smart City Mag*, 2023), facilitant et encourageant les prises de décisions et les actions qui s'ensuivent.

VI. Annexes

Annexe 1: Arbre décisionnel CLIMAT 1

Arbre décisionnel Climat C1

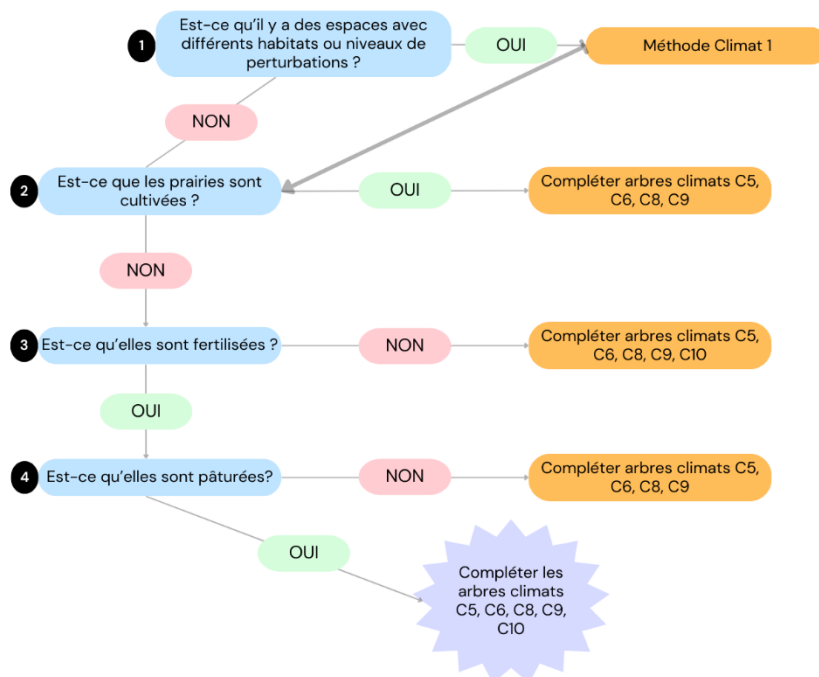
Pour un habitat à dominance d'arbres
(forêts ou prairies forestières)



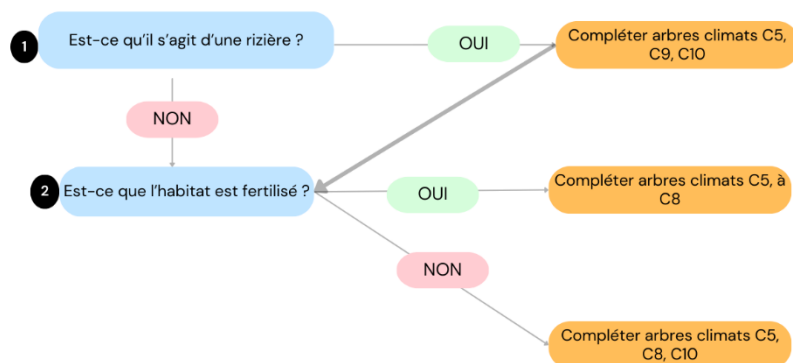
Annexe 2 : Arbre décisionnel CLIMAT 2

Arbre décisionnel Climat C2

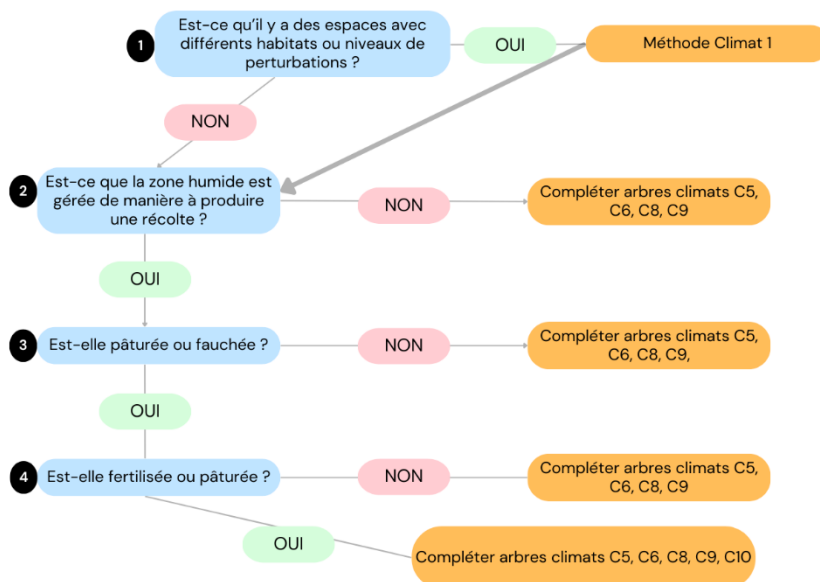
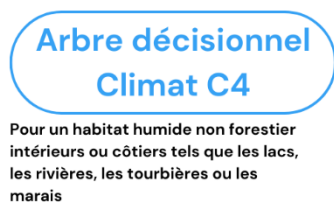
Pour un habitat à dominance prairial



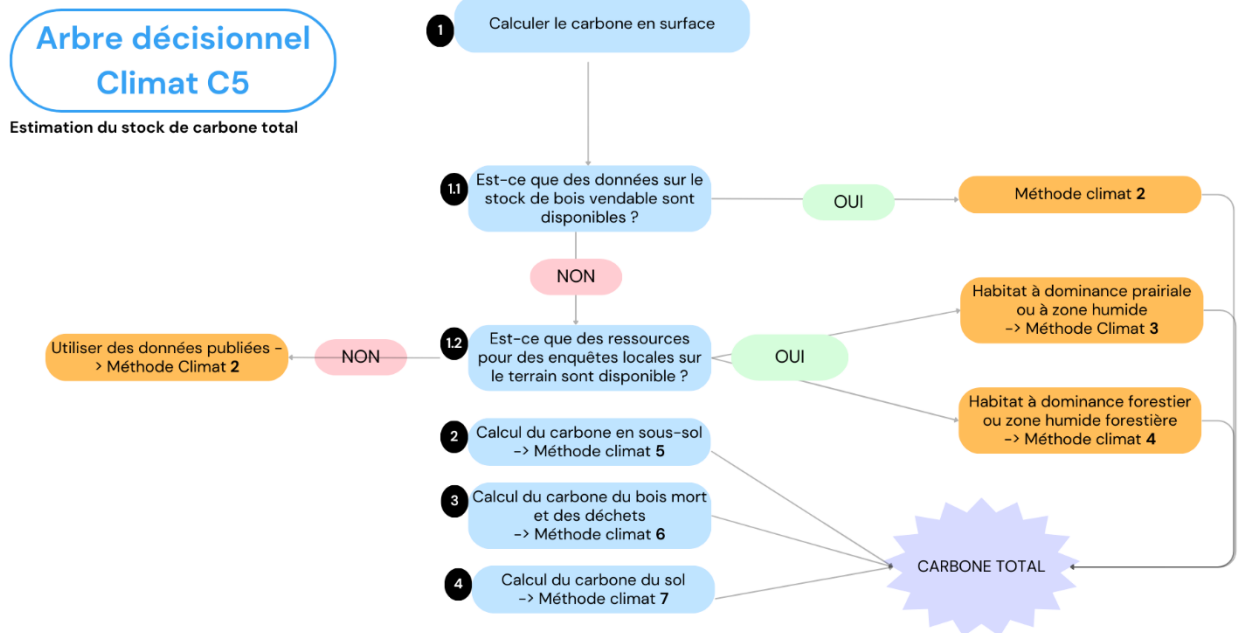
Annexe 3 : Arbre décisionnel CLIMAT 3



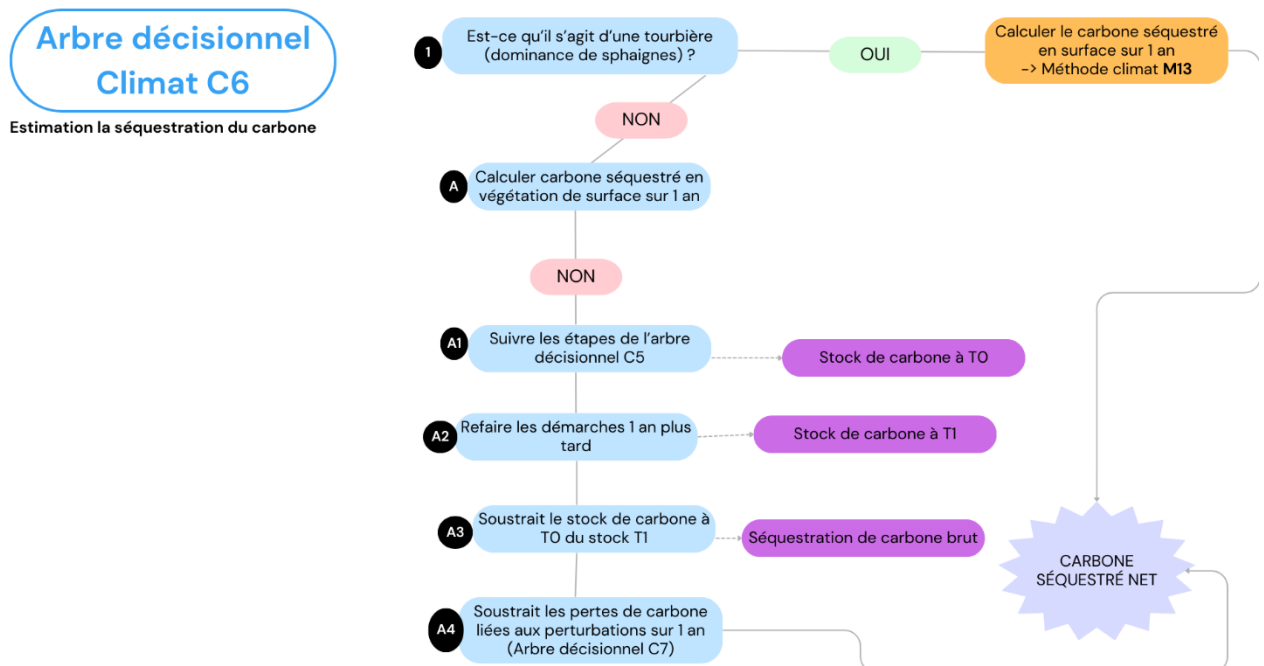
Annexe 4: Arbre décisionnel CLIMAT 4



Annexe 5: Arbre décisionnel CLIMAT 5



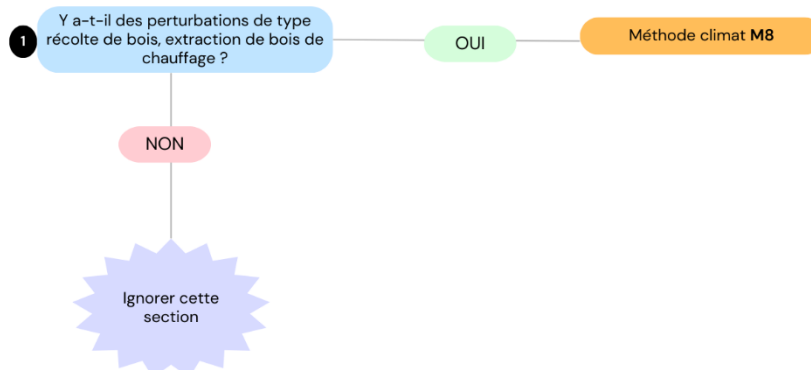
Annexe 6: Arbre décisionnel CLIMAT 6



Annexe 7: Arbre décisionnel CLIMAT 7

Arbre décisionnel Climat C7

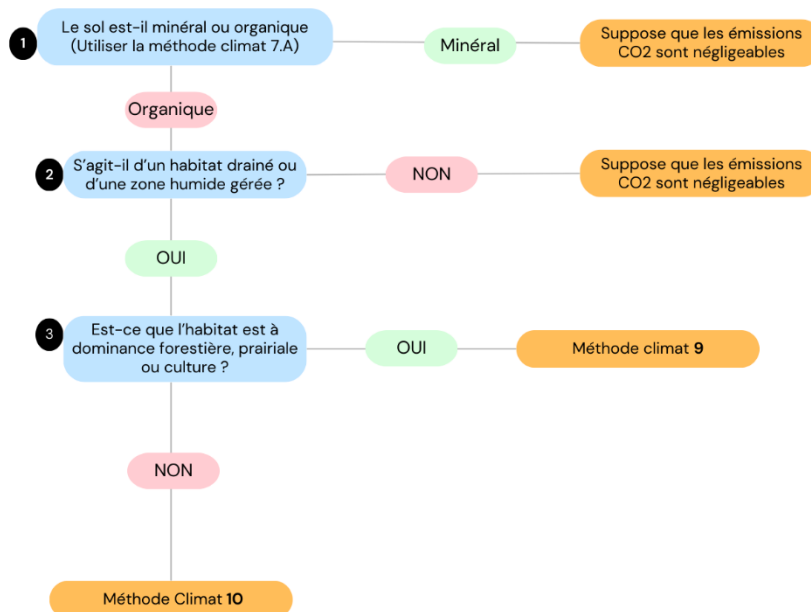
Estimation de la perte de carbone stocké
dans la végétation à cause des
perturbations



Annexe 8: Arbre décisionnel CLIMAT 8

Arbre décisionnel Climat C8

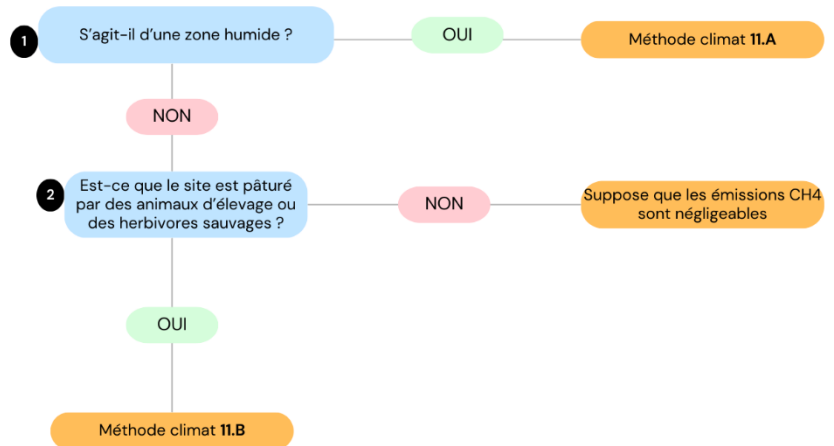
Estimation des émissions CO2 du sol



Annexe 9: Arbre décisionnel CLIMAT 9

**Arbre décisionnel
Climat C9**

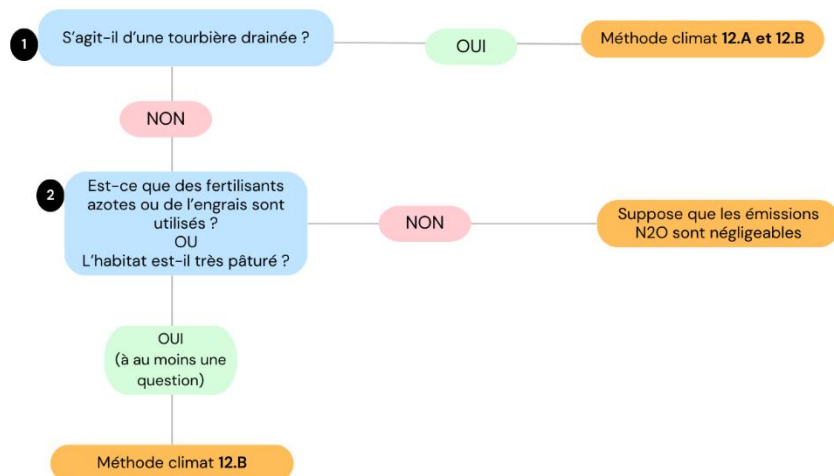
Estimation des émissions CH₄



Annexe 10: Arbre décisionnel CLIMAT 10

**Arbre décisionnel
Climat C10**

Estimation des émissions N₂O



VII. Bibliographie

Article L121-1—Code de l'urbanisme—Légifrance. (2024.). Consulté 26 janvier 2024, à l'adresse

https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000006814369

Bagstad, K. J., Semmens, D. J., Waage, S., & Winthrop, R. (2013). A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 5, 27-39.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.07.004>

Boumans, R., Roman, J., Altman, I., & Kaufman, L. (2015). The Multiscale Integrated Model of Ecosystem Services (MIMES) : Simulating the interactions of coupled human and natural systems. *Ecosystem Services*, 12, 30-41.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.01.004>

Bush, J., & Doyon, A. (2019). Building urban resilience with nature-based solutions : How can urban planning contribute? *Cities*, 95, 102483. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102483>

Chaurand, J. (2017). La cohérence interterritoriale des projets de continuités écologiques. L'exemple de la politique Trame verte et bleue en France. Environnement et Société. Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France, 2017.

Claron, C., Mikou, M., Levrel, H., & Tardieu, L. (2022). Mapping urban ecosystem services to design cost-effective purchase of development rights programs : The case of the Greater Paris metropolis. *Land Use Policy*, 122, 106349. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106349>

Dameron, A. (2018). L'aménagement urbain – Contribution à la reconnaissance d'une notion juridique: *Droit et Ville*, N° 85(1), 157-161. <https://doi.org/10.3917/dv.085.0157>

Deboeuf de Los Ríos, G., Barra, M., Grandin, G., & Bauquet, N. (2022). *Renaturer les villes : Méthode, exemples et préconisations*. Regreen nature-based solutions l'Institut Paris région-ARB, Agence régionale de la biodiversité.

Dizdaroglu, D. (2015). Developing micro-level urban ecosystem indicators for sustainability assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 54, 119-124. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.06.004>

ESRI France. Comment les SIG influencent-ils les politiques publiques ?. Les SIG dans Smart City Mag. 2023.

Disponible sur : [Les SIG dans Smart City Mag \(calameo.com\)](https://www.calameo.com/esrifrance/books/000196594000c3e00f9ea)

Haase, D., Larondelle, N., Andersson, E., Artmann, M., Borgström, S., Breuste, J., Gomez-Baggethun, E., Gren, Å., Hamstead, Z., Hansen, R., Kabisch, N., Kremer, P., Langemeyer, J., Rall, E. L., McPhearson, T., Pauleit, S., Qureshi, S., Schwarz, N., Voigt, A., ... Elmqvist, T. (2014). A Quantitative Review of Urban Ecosystem Service Assessments : Concepts, Models, and Implementation. *AMBIO*, 43(4), 413-433. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0504-0>

Intergovernmental Panel On Climate Change. (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1^{re} éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Kyprianou, I., Artopoulos, G., Bonomolo, A., Brownlee, T., Cachado, R. Á., Camaioni, C., Đokić, V., D'Onofrio, R., Đukanović, Z., Fasola, S., Di Giovanni, C. F., Cocci Grifoni, R., Hadjinicolaou, P., Ilardo, G., Jovanović, P., La Grutta, S., Malizia, V., Marchesani, G. E., Ottone, M. F., ... Carlucci, S. (2023). Mitigation and adaptation strategies to offset the impacts of climate change on urban health : A European perspective. *Building and Environment*, 238, 110226. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110226>

l'aménagement, O. de. (2023, octobre 17). *Se lancer dans une démarche d'évaluation environnementale (EE)*. <https://outil2amenagement.cerema.fr/se-lancer-dans-une-demarche-d-evaluation-r1376.html>

Les SIG dans Smart City Mag. (s. d.). Calameo.Com. Consulté 26 janvier 2024, à l'adresse <https://www.calameo.com/esrifrance/books/000196594000c3e00f9ea>

McPhearson, T., Andersson, E., Elmqvist, T., & Frantzeskaki, N. (2015). Resilience of and through urban ecosystem services. *Ecosystem Services*, 12, 152-156. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.07.012>

Peh, K. S.-H., Balmford, A., Bradbury, R. B., Brown, C., Butchart, S. H. M., Hughes, F. M. R., Stattersfield, A., Thomas, D. H. L., Walpole, M., Bayliss, J., Gowing, D., Jones, J. P. G., Lewis, S. L., Mulligan, M., Pandeya, B., Stratford, C., Thompson, J. R., Turner, K., Vira, B., ... Birch, J. C. (2013). TESSA : A toolkit for rapid assessment of

ecosystem services at sites of biodiversity conservation importance. *Ecosystem Services*, 5, 51-57.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.06.003>

Perschke, M. J., Harris, L. R., Sink, K. J., & Lombard, A. T. (2023). Using ecological infrastructure to comprehensively map ecosystem service demand, flow and capacity for spatial assessment and planning. *Ecosystem Services*, 62, 101536. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101536>

Communauté d'agglomérations de l'Auxerrois. *Plan Climat Air Energie Territorial*. (2023). Consulté 26 janvier 2024, à l'adresse <https://www.agglo-auxerrois.fr/Missions/Environnement/Plan-Climat-Air-Energie-Territorial>

Remonter le temps. (s. d.). Consulté 15 janvier 2024, à l'adresse [//remonterletemps.ign.fr](https://remonterletemps.ign.fr)

Rovai, M., Trinchetti, T., Monacci, F., & Andreoli, M. (2023). Mapping Ecosystem Services Bundles for Spatial Planning with the AHP Technique : A Case Study in Tuscany (Italy). *Land*, 12(6), 1123. <https://doi.org/10.3390/land12061123>

Wissal Selmi. Services écosystémiques rendus par la végétation urbaine Application d'approches d'évaluation à la ville de Strasbourg. Géographie. Université de Strasbourg, 2014. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-01136771v3⟩

Van Oijstaeijen, W., Van Passel, S., & Cools, J. (2020). Urban green infrastructure : A review on valuation toolkits from an urban planning perspective. *Journal of Environmental Management*, 267, 110603. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110603>

Veerkamp, C. J., Schipper, A. M., Hedlund, K., Lazarova, T., Nordin, A., & Hanson, H. I. (2021). A review of studies assessing ecosystem services provided by urban green and blue infrastructure. *Ecosystem Services*, 52, 101367. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101367>

Villa, F., Bagstad, K. J., Voigt, B., Johnson, G. W., Portela, R., Honzák, M., & Batker, D. (2014). A Methodology for Adaptable and Robust Ecosystem Services Assessment. *PLoS ONE*, 9(3), e91001. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091001>

Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J. E., Hyde, K. J. W., Morelli, T. L., Morissette, J. T., Muñoz, R. C., Pershing, A. J., Peterson, D. L., Poudel, R., Staudinger, M. D., Sutton-Grier, A. E., Thompson, L., Vose, J., Weltzin, J. F., & Whyte, K. P. (2020). Climate change effects on biodiversity,

ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of The Total Environment*, 733, 137782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>

Directrice de recherche :

Grellier Séraphine

Hickman Charlotte

PFE/DAE5

**Urbanisme et Ingénierie
Territorial option Aménagement
Durable et Génie Ecologique**

2023-2024

Les services écosystémiques et l'atténuation du changement climatique dans la planification : C

Résumé : (250 mots environ)

L'atténuation du changement climatique est un enjeu majeur dans la planification urbaine, mais il est difficile d'appliquer les outils classiques (ex : Trame Verte et Bleue) dans des milieux majoritairement imperméabilisés. Les services écosystémiques, soit les services des écosystèmes naturels et semi-naturels apportés aux humains sont des indicateurs idéaux pour identifier les sites à enjeux environnementaux à intégrer dans les Plans Locaux d'Urbanisme intercommunaux (PLUi). Les identifier n'est pas toujours simple, surtout dans des milieux urbains, ainsi cette étude applique quatre outils et méthodes d'identification des services écosystémiques (ARTificial Intelligence for Ecosystem Services, Toolkit for Ecosystem Services Assessments, Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs et le projet REGREEN) à une zone urbaine délimitée au sein de la Communauté d'Agglomérations de l'Auxerrois afin d'évaluer leurs pertinence à l'aide d'une analyse multicritère. Trois outils ont été concluants, dont ARIES qui se démarque par sa simplicité de prise en main, la boîte à outils TESSA par son accessibilité pour les non-experts de l'environnement et la méthode REGREEN par sa transversalité et sa crédibilité. L'outil InVEST n'a pas pu être appliqué au site d'études dû à une demande de données qui n'étaient pas accessibles. Ces outils ont permis d'identifier des sites à enjeux pour le service de la régulation du climat. La traduction réglementaire, en particulier les pièces opposables (Orientation d'Aménagement et de Programmation, règlements écrits, zonages), permettrait de concrétiser la prise en compte des SE et participer directement à l'atténuation du changement climatique dans les centres urbains.

Mots Clés : Services écosystémiques, Changement Climatique, Planification urbaine, Résilience urbaine, ARIES, TESSA, REGREEN, InVEST, Milieux urbains