



Outils opérationnels - services écosystémiques

Mise en place d'outils opérationnels d'évaluation des services écosystémiques en Wallonie à toutes les étapes d'un projet (définition de la vision, conception, mise en œuvre)

Rapport technique : exemple d'utilisation de la matrice des capacités –
artificialisation des terres entre 2007 et 2019

Janvier 2023

Outils opérationnels – services écosystémiques

Evaluation de la perte en services associé à l’artificialisation entre 2007 et 2019

Février 2023

Version 1.0

Dernière date de modification : 01/02/2023

Modifications principales depuis la dernière version (1.0) : -

Équipe du projet

Marc Dufrêne
Marie Pairon

Biodiversité - Services écosystémiques - Biens communs
UR BIOSE/Axe Biodiversité et Paysages - UR TERRA
Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech
Passage des Déportés, 2
B-5030 Gembloux, Belgique



Composition du comité d'accompagnement

Le comité d'accompagnement de la mission est chargé de la coordination globale des projets ainsi que de la vérification et validation des prestations. Il est composé des membres de l'équipe de projet et pour le pouvoir adjudicateur du fonctionnaire dirigeant (Catherine Généreux), et de : Limpens Antoine (SPW Mobilité et Infrastructures - Département Expertises Hydraulique Environnement - Direction des Etudes environnementales et paysagères), Jeuniaux Aurélie (SPW Agriculture, Ressources naturelles et environnement - Département de la Nature et des Forêts - Direction des Ressources forestières), Brahic Yvan (SPW Agriculture, Ressources naturelles et environnement - Département du Développement, de la Ruralité et des Cours d'eau et du Bien-être animal - Direction de l'Aménagement foncier rural), Detiffe Nicolas (SPW Agriculture, Ressources naturelles et environnement - Département du Développement, de la Ruralité et des Cours d'eau et du Bien-être animal - Direction des Cours d'eau non navigables), Engels Patrick (SPW Agriculture, Ressources naturelles et environnement - Département de l'Étude du milieu naturel et agricole - Direction de la Coordination des Données), Fermin Nicolas (SPW Agriculture, Ressources naturelles et environnement - Département de l'Environnement et de l'eau - Direction des eaux de surface), Fierens Corentin (SPW Agriculture, Ressources naturelles et environnement - Département du Sol et des Déchets - Direction de la Protection des sols), Joiris Eric (SPW Agriculture, Ressources naturelles et environnement - Département de la Nature et des Forêts - Direction de la Nature et des Espaces verts), Lebeau Julie (SPW Agriculture, Ressources naturelles et environnement - Département de la Nature et des Forêts - Direction de la Nature et des Espaces verts), Marée Sophie (CR Senne - LIFE BELINI), Mulders Christian (SPW Agriculture, Ressources naturelles et environnement - Département de l'Environnement et de l'eau - Cellule intégration Agriculture-Environnement), Poncelet Catherine (SPW Agriculture, Ressources naturelles et environnement - Département du Développement, de la Ruralité et des Cours d'eau et du Bien-être animal - Direction des Cours d'eau non navigables), Rollin Xavier (SPW Agriculture, Ressources naturelles et environnement - Département de la Nature et des Forêts - Direction de la Nature et des Espaces verts).

Table des matières

1. Introduction.....	5
2. Matrice des capacités	5
2.1. Les éléments en lignes : adaptation de la typologie des écosystèmes au contexte wallon	7
2.2. Les éléments en colonnes : la typologie des services écosystémiques.....	8
3. Présentation des étapes de la méthodologie globale d'évaluation	9
3.1. ETAPE 1 : Délimitation des zones dont l'occupation du sol sera modifiée dans le scénario/projet	9
3.2. ETAPE 2 : Identification des écosystèmes impactés : cartographie des lignes de la matrice dans la situation initiale et projetée et calcul des superficies.....	10
3.3. ETAPE 3 : Priorisation des services écosystémiques principaux à prendre en compte dans l'analyse.....	10
3.4. ETAPE 4 : Evaluation de la capacité à fournir les services pour la situation initiale et projetée	11
3.5. ETAPE 5 : Comparaison entre les services rendus en situation initiale et projetée	12
3.6. ETAPE 6 : Présentation des résultats	13
4. Application à l'exemple de l'artificialisation	15
4.1. ETAPE 1 : Délimitation des zones dont l'occupation du sol sera modifiée dans le scénario/projet	15
Identification des parcelles artificialisées pour la situation de référence (2007) et la situation projetée (2019)	15
Identification des zones étant passées du non-artificialisé vers l'artificialisé	17
4.1. ETAPE 2 : Identification des écosystèmes impactés : cartographie des lignes de la matrice dans la situation initiale et projetée	24
4.2. ETAPE 3 : Priorisation des services écosystémiques principaux à prendre en compte dans l'analyse.....	27
4.3. ETAPE 4 : Evaluation de la capacité à fournir les services pour la situation initiale et projetée.....	28
4.4. ETAPE 5 : Comparaison entre les services rendus en situation initiale et projetée	29
4.5. ETAPE 6 : Présentation des résultats	30
5. Description des annexes mises à disposition.....	31
6. Conclusion	32
7. Références.....	33

1. Introduction

La convention « Mise en place d'outils opérationnels d'évaluation des services écosystémiques en Wallonie à toutes les étapes d'un projet (définition de la vision, conception, mise en œuvre) » a pour but de développer des outils opérationnels d'évaluation des services écosystémiques en Wallonie. L'un des outils développés est la 'matrice des capacités'.

Cet outil est très souple et facilement adaptable à différentes sources de données. Ainsi, cette méthode permet d'évaluer la manière dont les services écosystémiques seront affectés par un plan ou programme qui modifie l'occupation ou l'utilisation du sol et de représenter cette modification spatialement.

Cela nécessite d'avoir deux représentations cartographiques de l'utilisation/occupation du sol: l'une au temps t (situation actuelle) et l'autre au temps $t+1$ après mise en place du plan ou programme et de comparer les deux.

Il a été proposé de tester cette matrice avec un exemple théorique qui s'intitule comme suit : quelle est la perte de services écosystémiques engendrée par l'artificialisation des terres en Wallonie entre 2007 et 2019 ?

Cette question tire son origine des travaux sur la définition de l'artificialisation des terres menés par Messieurs Patrick Engels (SPW-ARNE), Sébastien Hendrickx (ULiege, LEPUR, CPDT) et Julien Charlier (IWEPS) dans le courant 2021 – 2022.

L'objectif du présent rapport est de présenter l'utilisation de cet outil dans ce cas concret.

La **première partie** rappelle rapidement ce qu'est une **matrice des capacités** et son intérêt dans l'évaluation des services écosystémiques. Plus d'information sur la manière dont elle a été produite et ses limitations est disponible dans le rapport dédié intitulé 'NVEWalloniell_matcap_v2.0' disponible sur la plateforme Wal-ES : <https://services-ecosystemiques.wallonie.be/fr/matrice-des-capacites.html?IDC=5948&IDD=4151>.

La **seconde** détaille la **méthodologie proposée** pour évaluer la modification dans la fourniture des services par les écosystèmes de manière générale.

La **troisième partie** illustre la méthodologie pour répondre à la question posée en lien avec l'artificialisation. Elle présente les **données cartographiques d'artificialisation des terres** qui ont été utilisées pour produire une estimation des zones artificialisées entre 2007 et 2019 : quelles hypothèses, quelles sources de données, quelles corrections, le cas échéant ; pour obtenir une cartographie la plus correcte possible des terrains artificialisés entre 2007 et 2019 avant d'expliquer comment la démarche peut s'appliquer à ces données.

Cette application n'est bien entendu qu'un exemple et la méthodologie peut être répliquée à d'autres cas pratiques, pour autant que la question s'accompagne d'une modification dans l'occupation du sol d'un territoire donné ; la matrice ne prenant pas en compte les modalités de gestion.

Différents documents (xls, R code, ...) sont disponibles sous différents formats pour permettre à l'utilisateur de réappliquer la méthode à d'autres cas d'études et la base de données relative à l'exercice en particulier est également fournie. Ces documents sont détaillés en annexe du rapport.

2. Matrice des capacités

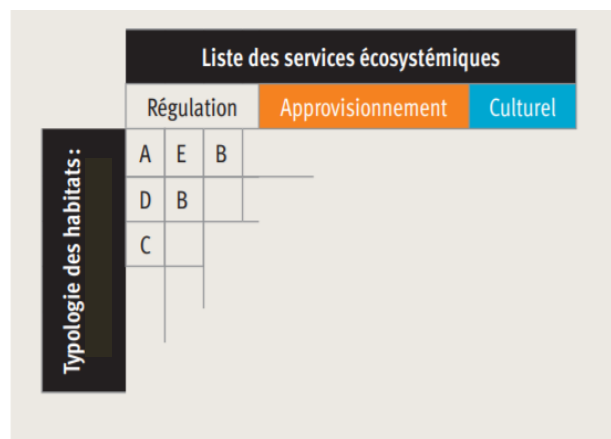
L'évaluation des SE en tant que telle est une matière complexe qui ne peut par définition être unique ou universelle, ce qui la rend difficile à comprendre et à appréhender. Cette évaluation est

en effet liée à un usage (l'usage que l'homme a du service) qui peut être réel, potentiel, présent ou futur. La valeur des SE est donc liée aux représentations et aux usages dans un contexte, tout l'enjeu de l'évaluation étant de déterminer la valeur qui convient à un moment donné et pour un projet donné (Maillefert et Petit, 2017).

Une des approches possibles pour réaliser une évaluation des services écosystémiques se base sur une matrice reprenant en ligne une typologie des écosystèmes et en colonne les différents services écosystémiques (Figure 1). Cette matrice peut être appelée 'matrice des capacités' comme proposé dans Campagne, Tschanz, et Tatonni (2016) si elle représente la capacité d'un écosystème à fournir un service. En parlant de matrice des capacités, on parle donc bien de la perception des experts sur la capacité d'un écosystème à fournir un service donné dans l'état actuel des connaissances et des pratiques (offre) et non pas de ce qui serait attendu de la part d'un écosystème donné (demande).

Les lignes de la matrice permettent de différencier les écosystèmes rendant des services écosystémiques potentiellement différents ou avec des niveaux de fourniture de services différents. Chaque cellule de la matrice est remplie avec un score reflétant la capacité à produire un service écosystémique donné (par exemple, un score allant de 0 = non pertinent à 5 = capacité très élevée à fournir le service). Les scores des cellules peuvent se baser sur des indicateurs ou des modèles biophysiques existants, mais sont plus fréquemment remplis sur base de jugements d'experts.

Figure 1: Schéma de la matrice des capacités (source : Campagne, Tschanz, et Tatonni 2016)



Un exemple de matrice adaptée au contexte wallon a été réalisé dans le courant de l'automne 2021. La matrice a été adaptée à la fois dans ses lignes (typologie des écosystèmes considérés) et dans ses colonnes (typologie des services écosystémiques). Cette matrice prend en compte l'hétérogénéité du paysage, au travers de l'inclusion des facteurs abiotiques dans les lignes de la matrice. La prise en compte des facteurs abiotiques s'est faite par un croisement entre les typologies des écosystèmes et les contextes écologiques marginaux.

On a donc obtenu une matrice qui permettait de relier la typologie d'occupation du sol et des contextes écologiques aux services rendus par ces catégories d'écosystèmes. Cette méthode fait donc partie des modèles d'indicateurs spatiaux qui relient les types d'occupation du sol ou les types d'écosystèmes aux services écosystémiques. Elle ne prend pas en compte à ce stade les modalités de gestion des écosystèmes, n'a pas de notion de temporalité (âge du peuplement forestier par exemple) ni de taille de l'écosystème (à l'exception des plans d'eau qui ont été distingués en deux catégories en fonction de leur taille).

Les valeurs prises par les cellules de la matrice sont des valeurs allant de 0 à 5 selon la définition suivante :

Capacité à fournir un SE donné

- 0 Non pertinent
- 1 très faible
- 2 faible
- 3 moyenne
- 4 élevée
- 5 très élevée

2.1. Les éléments en lignes : adaptation de la typologie des écosystèmes au contexte wallon

Il a été démontré à de nombreuses reprises, et c'est l'une des critiques principales de l'approche, que les polygones d'occupation/utilisation du sol seuls ne fournissaient pas un découpage du territoire pertinent en matière d'offre en services écosystémiques. La capacité d'une portion de territoire à fournir un service dépend bien entendu du type de couvert, mais de bien d'autres choses encore (pression sur les écosystèmes, valeurs d'indicateurs d'état, raffinages thématiques – altitude, types de sols, climat, ...).

Dans le cadre de la matrice wallonne, nous avons travaillé sur un découpage spécifique appelé « **unité de production des SE** » (UPS ou SPU en anglais pour *Service Providing Unit*). L'unité de production des SE est une notion qui permet notamment de répondre aux critiques faites sur la méthodologie présentée dans les travaux de Burkhard *et al.* (2009) qui, pour rappel, ne prenait en compte que le type d'utilisation d'un sol dans la matrice des capacités. Elle considère en effet non seulement les différents *types d'utilisation du sol* (regroupés en grands écosystèmes selon une terminologie et un découpage propres à Wal-ES) mais également les informations relatives au *contexte écologique* (types de sols, pentes, altitude...).

Les éléments en ligne résultent d'un travail réalisé en amont sur une cartographie de l'occupation/utilisation du sol pour pouvoir distinguer les éléments présentés au Tableau 1. Ils résultent d'une combinaison entre les données d'occupation et d'utilisation des sols (Walous 2018 et OCS 2019) mais ont également fait appel à une série de données extérieures (couche des essences forestières et masque forestier – Gembloux Agro Biotech – Forest is Life, IGN TOP 10V, ou encore le parcellaire agricole anonyme de 2019 – SPW).

Cette typologie des écosystèmes fait le compromis entre un niveau de détail trop important (qui rendrait le fait de compléter la matrice trop fastidieux) et un niveau de détail trop faible (qui ne permettrait pas de capter une partie des subtilités propres aux écosystèmes wallons).

Tableau 1: Les types d'utilisation/occupation du sol repris dans la matrice (lignes) avant croisement avec les contextes écologiques marginaux

Usage	Classification
Eaux de surface	Eaux stagnantes et milieux associés de petite taille
Eaux de surface	Lacs de retenue d'eau (réservoirs)
Eaux de surface	Cours d'eau navigables
Eaux de surface	Cours d'eau non navigables et milieux associés
Conservation de la nature	Milieux ouverts naturels ou extensifs
Conservation de la nature	Forêts feuillues
Conservation de la nature	Forêts résineux
Utilisation primaire sylvicole	Forêts feuillues
Utilisation primaire sylvicole	Forêts résineux
Utilisation primaire sylvicole	Forêts mélangées

Conservation de la nature	Prairies et prés de fauche
Utilisation primaire agricole	Prairies permanentes
Utilisation primaire agricole	Prairies temporaires
Utilisation primaire agricole	Cultures fourragères
Utilisation primaire agricole	Maïs fourrager
Utilisation primaire agricole	Céréales et assimilées
Utilisation primaire agricole	Cultures sarclées (betteraves, chicorées, pdt, légumes)
Utilisation primaire agricole	Oléagineux
Utilisation primaire agricole	Vergers intensifs et fruits à coques
Utilisation primaire agricole	Sapins de Noël
Utilisation primaire agricole	Autres cultures et autres usages agricoles
Utilisation secondaire et tertiaire	Zones imperméabilisées et bâtiments
Utilisation secondaire et tertiaire	Zones abandonnées (friches)
Utilisation secondaire et tertiaire	Carrières
Utilisation secondaire et tertiaire	Jardins et parcs
Utilisation secondaire et tertiaire	Equipements sportifs et loisirs de plein air
Utilisation secondaire et tertiaire	Sols nus
Autres usages	Couvert herbacé en rotation dans l'année
Autres usages	Couvert herbacé permanent
Autres usages	Zone boisée
Autres usages	Couvert de buisson (résineux ou feuillus <3m)

Certaines de ces lignes sont ensuite déclinées sur base des éléments du contexte écologique suivants, et ce dans le but d'identifier par exemple les zones humides, ou les sols superficiels :

- Sols tourbeux et paratourbeux
- Sols hydromorphes et sols alluviaux et colluviaux
- Sols sur fortes pentes
- Substrats superficiels et autres sols à texture sableuse
- Autres sols

2.2. Les éléments en colonnes : la typologie des services écosystémiques

En colonne, on retrouve différents services écosystémiques. Les services représentés dans la matrice sont issus d'un exercice de priorisation et d'un tri suite à l'exercice réalisé par les experts pour supprimer des services pour lesquelles la méthodologie de la matrice présentait de trop grandes incertitudes.

La liste des services considérés est présentée au Tableau 2. Elle est issue de la nomenclature CICES adaptée à la Wallonie et présentée sur la plateforme Wal-ES (<https://services-ecosystemiques.wallonie.be/fr/typologie-des-se.html?IDC=5900>).

Tableau 2: Liste des services écosystémiques repris dans les colonnes de la matrice après priorisation et suppression des services pour lesquelles les incertitudes étaient trop importantes

Nom_SE	Catégorie	Type
SES_Production	Alimentation	Cultures d'alimentation
SES_Production	Alimentation	Elevage
SES_Production	Alimentation	Animaux sauvages terrestres
SES_Production	Alimentation	Plantes et champignons sauvages terrestres comestibles
SES_Production	Matériaux	Bois d'œuvre

SES_Production	Matériaux	Fourrage
SES_Production	Energie	Arbres et résidus ligneux à des fins énergétiques
SES_Production	Eau	Eau de surface potable
SES_Régulation	Evènements extrêmes	Protection contre l'érosion
SES_Régulation	Evènements extrêmes	Maintien du cycle hydrologique et des flux d'eau
SES_Régulation	Evènements extrêmes	Protection contre les inondations
SES_Régulation	Evènements extrêmes	Prévention et contrôle des feux
SES_Régulation	Pollutions	Maintien de la qualité des eaux de surface
SES_Régulation	Pollutions	Maintien de la qualité des eaux souterraines
SES_Régulation	Pollutions	Capture des poussières, des produits chimiques et des odeurs
SES_Régulation	Pollutions	Mitigation des impacts visuels
SES_Régulation	Processus biologiques	Pollinisation
SES_Régulation	Climats	Régulation du climat global par séquestration des gaz à effet de serre
SES_Régulation	Climats	Régulation du climat régional
SES_Culturels		Environnement de la vie courante (pour vivre et travailler)
SES_Culturels		Sources d'expériences et de connaissance (science et éducation)
SES_Culturels		Environnement pour des loisirs (activités récréatives)
SES_Culturels		Sources d'inspiration et de valeurs (entités emblématique et inspiration artistique)

3. Présentation des étapes de la méthodologie globale d'évaluation

La méthodologie d'évaluation est directement inspirée des travaux de Campagne et Roche (2021) réalisés dans le cadre de l'intégration de l'évaluation des services écosystémiques dans les études d'incidences. Les grandes étapes sont sensiblement identiques et nous renvoyons le lecteur au guide développé par le DREAL pour plus de détail. Ce dernier est téléchargeable au lien suivant : <https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/?Evaluer-les-services-ecosystemiques>.

La méthodologie est simplifiée pour répondre à l'exercice proposé ici, mais peut tout à fait être utilisée pour répondre à des cas plus complexes comme présenté dans le guide de Campagne et Roche (2021).

Les principales étapes sont les suivantes :

1. **ETAPE 1 : Délimitation des zones** dont l'occupation du sol sera modifiée dans le scénario/projet
2. **ETAPE 2 : Identification des écosystèmes impactés** : cartographie des lignes de la matrice dans la situation initiale et projetée,
3. **ETAPE 3** : Priorisation des **services écosystémiques principaux** à prendre en compte dans l'analyse,
4. **ETAPE 4 : Evaluation de la capacité** à fournir les services pour la situation initiale et projetée,
5. **ETAPE 5 : Comparaison** entre les services rendus en situation initiale et projetée,
6. **ETAPE 6 : Présentation** des résultats.

Chacune de ces étapes est décrite ci-après.

3.1. ETAPE 1 : Délimitation des zones dont l'occupation du sol sera modifiée dans le scénario/projet

La première étape de l'analyse consiste à délimiter les zones qui vont faire l'objet de l'évaluation. Dans le guide méthodologique de Campagne et Roche (2021), une distinction est proposée entre deux périmètres pour coller à la législation en matière d'études d'incidences :

- Le périmètre de la zone d'emprise du projet (zone d'impact direct de l'aménagement = emprise du projet et chantier),
- Le périmètre du projet (zone plus large comprenant la zone d'emprise et les environs immédiats susceptibles d'être impactés de manière plus indirecte).

En fonction de la finalité de l'évaluation, ces deux périmètres peuvent ou non être pertinents. Dans notre exemple, un seul périmètre sera considéré.

3.2. **ETAPE 2 : Identification des écosystèmes impactés** : cartographie des lignes de la matrice dans la situation initiale et projetée et calcul des superficies

Une fois le ou les périmètres délimités, il convient de lister les types d'écosystèmes présents au sein du/des périmètre(s), leur surface en état initial et en état final afin de pouvoir calculer la différence de superficie pour chaque écosystème entre l'état initial et l'état final.

Par écosystème on réfère ici à la typologie proposée dans la matrice des capacités qui, pour rappel, est un croisement entre une typologie d'utilisation/occupation du sol et les contextes écologiques marginaux.

Pour la situation de 2019 de référence, cette cartographie des écosystèmes a déjà été réalisée : elle est disponible au format raster (résolution de 5m). Il suffit donc à l'utilisateur de découper la cartographie de référence sur base du ou des périmètre(s) qu'il a défini à l'étape 1 et de calculer les superficies de chaque ligne représentée dans son ou ses périmètres.

Pour la situation projetée, l'utilisateur doit pouvoir disposer d'une carte d'utilisation/occupation du sol dont la typologie peut être reclassée dans la typologie des lignes de la matrice (voir Tableau 1 pour rappel). Si, au sein des périmètres, il identifie la présence de contextes écologiques marginaux (voir : <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/b18318eb-5e91-48ae-a6a5-6f49d06b15a1.html>), il devra ensuite faire le croisement de l'utilisation/occupation du sol avec la carte des contextes écologiques marginaux pour réobtenir la bonne typologie des lignes de la matrice. Les tables de correspondances entre le niveau 3 des contextes écologiques marginaux et sensibles et les catégories simplifiées des lignes de la matrice sont disponibles dans le fichier xls fourni (voir page 31 pour la description des annexes fournies).

3.3. **ETAPE 3** : Priorisation des **services écosystémiques principaux** à prendre en compte dans l'analyse

Il est proposé d'utiliser ici exactement la même méthode que celle proposée dans le guide de Campagne et Roche (2021).

Cette méthode de priorisation prend en compte à la fois la nature du projet et son contexte. L'arbre de décision résultant est proposé à la Figure 2.

La première question à se poser est la suivante : le service est-il potentiellement impacté par le projet ? Pour répondre à cette question, il est possible de se référer à une matrice des impacts potentiels directement tirée de la matrice des capacités. Cette matrice des impacts potentiels propose des valeurs de 1 à 3 sur base du niveau de capacité des différents écosystèmes à fournir les différents services (1 = valeurs de 0 à 1 dans la matrice des capacités, 2 = valeurs de 2 et 3 dans la matrice des capacités et 3 = valeurs de 4 et 5). Une valeur de 3 indique qu'un écosystème donné à une forte capacité à fournir un service donné. Ce tableau peut être utilisé pour répondre à la première question de l'exercice de priorisation des services (étape 3 de la méthodologie).

L'utilisateur peut sélectionner les lignes dont les superficies impactées sont importantes et voir sur quels services ces impacts auront théoriquement le plus d'impact (valeurs de 2 ou 3 dans la matrice des impacts potentiels).

Les deuxième et troisième questions sont relatives au contexte : le service est-il important pour les acteurs et le service a-t-il un enjeu local ou est-il présent dans la réglementation du territoire ? Ces éléments de contexte peuvent être débattus avec les acteurs du territoire ou les élus locaux.

Sur base des réponses à ces trois questions, on distingue l'impact potentiel du service et son importance qui déterminent la priorité à accorder au service dans l'évaluation.

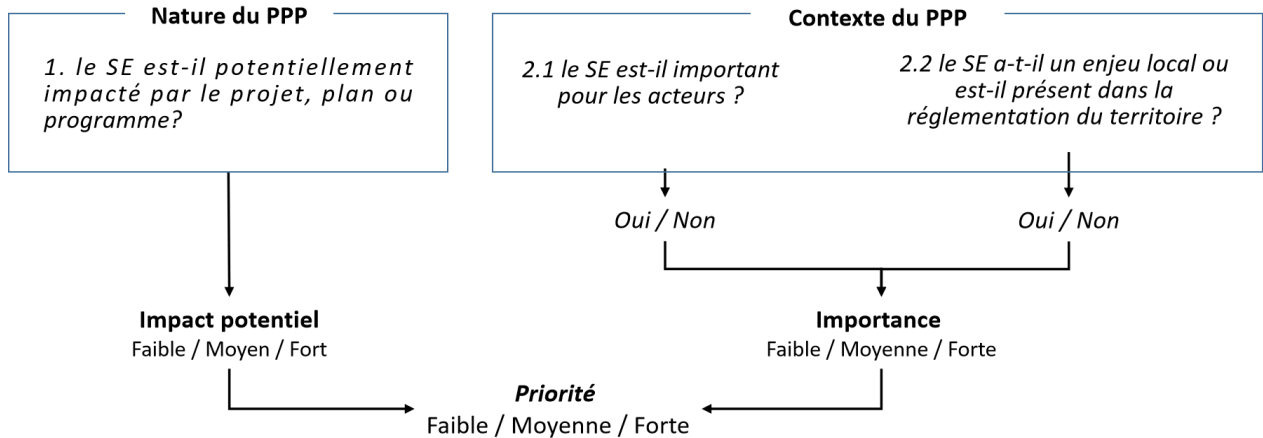


Figure 2: Méthode de priorisation de l'importance des services écosystémiques dans le cadre du projet : arbre de décision (source : Campagne et Roche (2021))

Il est conseillé de faire cette analyse pour un nombre plus élevé de services que celui repris dans la matrice. Pour rappel, la liste complète des services est reprise sur la plateforme Wal-ES : <https://services-ecosystemiques.wallonie.be/fr/typologie-des-se.html?IDC=5900>. Cette typologie peut être adaptée aux besoins du projet. Si l'un des services identifié comme prioritaire par cette méthode ne figure pas dans les colonnes de la matrice des capacités à ce stade, il conviendra soit de l'évaluer par une méthode alternative, soit de rajouter une colonne dans la matrice des capacités et de la remplir sur dire d'experts ou d'analyse de la littérature existante.

3.4. **ETAPE 4 : Evaluation de la capacité** à fournir les services pour la situation initiale et projetée

L'évaluation de la capacité des écosystèmes présents dans le/les périmètre(s) dépend de la superficie des différents écosystèmes au sein de ce(s) périmètre(s) en situation initiale et projetée.

Pour prendre en compte ces superficies, il convient de calculer une **matrice pondérée par les surfaces**. Dans cette étape, il est nécessaire de calculer une matrice pondérée par les surfaces des écosystèmes en état initial et une matrice pondérée par les surfaces des écosystèmes en état final. Pour rappel, les superficies des écosystèmes en état initial et final ont été calculés à l'étape 2.

La manière de calculer cette matrice pondérée pour chaque état est reprise à la Figure 3. Dans cette figure, on peut voir qu'un calcul des superficies a été effectué pour chaque ligne de la matrice (colonne nombre d'hectares dans le périmètre). La valeur prise pour chaque cellule de la matrice est pondérée sur base de cette superficie en multipliant la valeur moyenne de la matrice wallonne par le rapport entre la superficie de l'écosystème de la ligne et la surface totale du périmètre considéré. Ainsi, même si un écosystème donné (une ligne de la matrice) a potentiellement un fort impact sur la capacité à fournir un service donné (valeurs de 4 ou 5 dans la matrice initiale), son importance sera revue très nettement à la baisse s'il est très faiblement représenté au sein du périmètre.

La capacité globale du périmètre à fournir un service donné se calcule ensuite en sommant l'ensemble des valeurs pondérées prises par les écosystèmes pour une colonne donnée (correspondante au service considéré). Ce calcul est illustré dans l'encadré en bas de la matrice fictive présentée à la Figure 3. Le résultat est intitulé 'sommés des scores pondérés par les surfaces'.

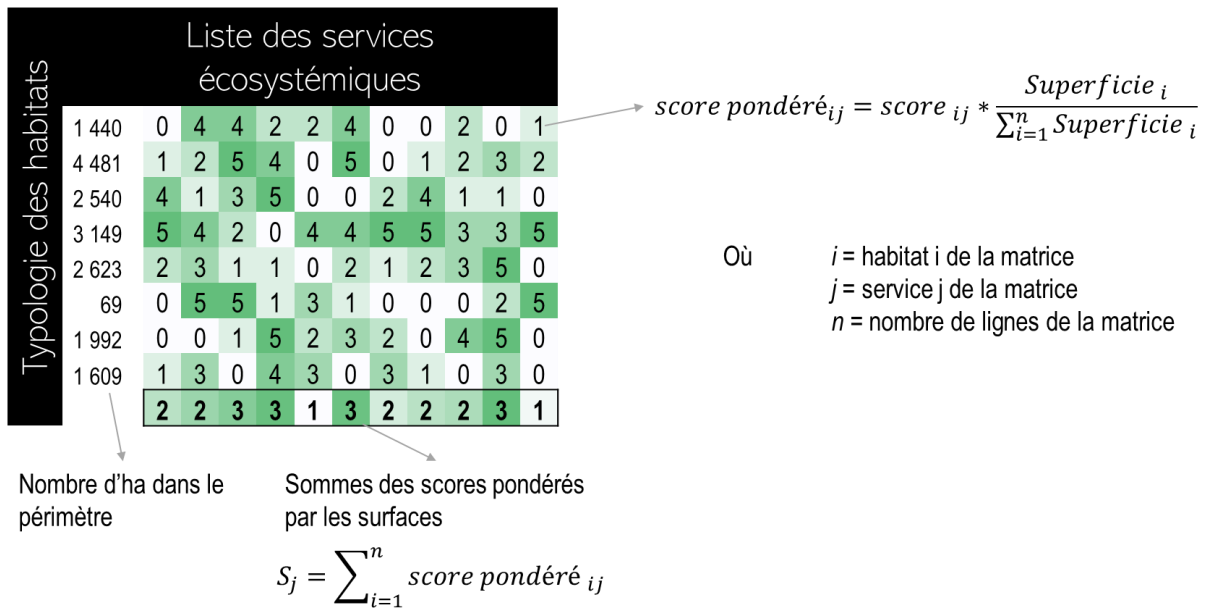


Figure 3: Exemple fictif de calcul d'une matrice pondérée par les superficies des écosystèmes dans un périmètre donné

3.5. ETAPE 5 : Comparaison entre les services rendus en situation initiale et projetée

Une fois la somme des scores pondérés calculée en situation initiale et situation finale, il convient de quantifier la capacité à fournir les SE en situation initiale et situation finale et de faire le bilan de l'impact du projet sur les services.

La quantification de la capacité à fournir les SE en situation initiale et finale se fait sur base des sommes des scores pondérés calculés à l'étape 4.

Si la valeur de la somme des scores pondérés d'un service est inférieure ou égale à 1, la capacité du périmètre à fournir ce service est jugée comme étant « très faible », si la valeur est comprise entre 1 et 2, elle est considérée comme « faible », entre 2 et 3 comme « moyenne », entre 3 et 4 comme « forte » et entre 4 et 5 comme « très forte » (les bornes supérieures étant des « inférieurs ou égal à »).

Cette quantification peut s'effectuer pour l'état initial et l'état final sur base des deux matrices des scores pondérés calculées à l'étape 4.

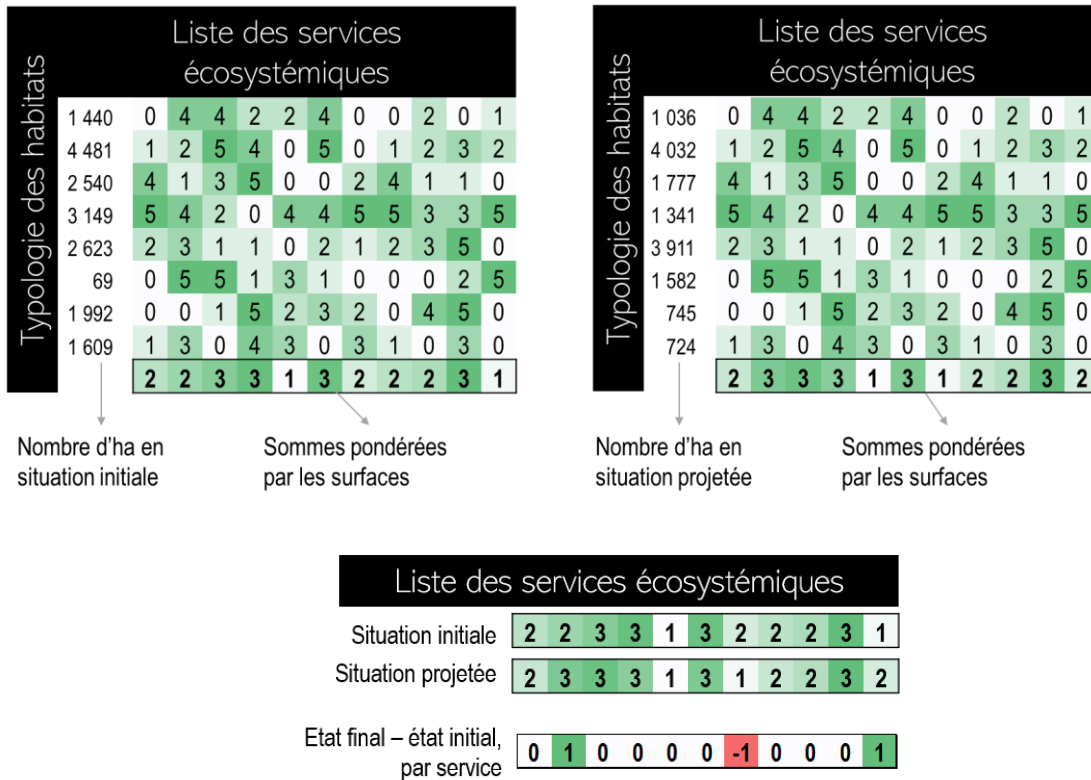


Figure 4: Exemple fictif de calcul du bilan de l'impact d'un projet sur les services (différence des scores pondérés pour l'état initial et l'état projeté)

Le bilan de l'impact sur les services se calcule ensuite en exprimant la différence entre la quantification en état final et en état initial (somme des scores pondérés par SE pour l'état final moins la somme des scores pondérés par SE pour l'état initial) comme illustré de manière fictive à la Figure 4.

Cette différence peut s'exprimer en valeur relative (comme dans l'exemple) ou en pourcentage. Elle est considérée comme très forte si elle est supérieure ou égale à 0.61, comme forte si elle est comprise entre 0.60 et 0.48, comme modérée si elle est comprise entre 0.47 et 0.36, comme faible si elle est comprise entre 0.35 et 0.26 et comme non significative si elle est inférieure ou égale à 0.25.

3.6. ETAPE 6 : Présentation des résultats

La présentation des résultats peut ensuite se faire sous forme de bouquets de services pour une visualisation rapide ou sous forme de cartographie.

La représentation par bouquet de services présente l'avantage d'être synthétique en trois graphiques (l'un pour la situation initiale, l'autre pour la situation projetée, le dernier pour la différence). La capacité d'un périmètre de projet à fournir chaque service y est représentée sous forme d'un pétale (plus le pétale est grand, plus la somme des scores pondérés est importante) comme illustré à la Figure 5.



Figure 5: Représentation illustrative des sommes des scores pondérés par service en situation initiale, projetée et pour la différence entre la situation projetée et initiale. Chaque pétale du bouquet représente la somme d'un score pondéré pour un service (valeur maximale – pétale le plus grand – égale à 5 et valeur minimale – pétale inexistant- égale à 0)

Il est bien entendu également possible de présenter les résultats pour ces trois situations par service au sein de cartographies de services en situation initiale, projetée et en différence relative projetée moins initiale. L'utilisateur a dû en effet, pour calculer les superficies de chaque ligne de la matrice au sein de son/ses périmètre(s), représenter cartographiquement les écosystèmes pour les deux situations. Il est alors possible, par une simple jointure de table, d'associer à ces polygones, les valeurs des scores de la matrice initiale. La représentation de la différence peut se faire en calculant, pour chaque pixel, la différence des valeurs prises pour le service en situation projetée et initiale. Si l'écosystème n'a pas subi de changement entre la situation initiale et la situation projetée, la valeur de la différence sera nulle, de sorte que la cartographie ne représente que les zones au sein desquelles la capacité des écosystèmes été amenée à changer, la direction (positive ou négative) de ces changements ainsi que leur ampleur (voir exemple fictif en Figure 6).

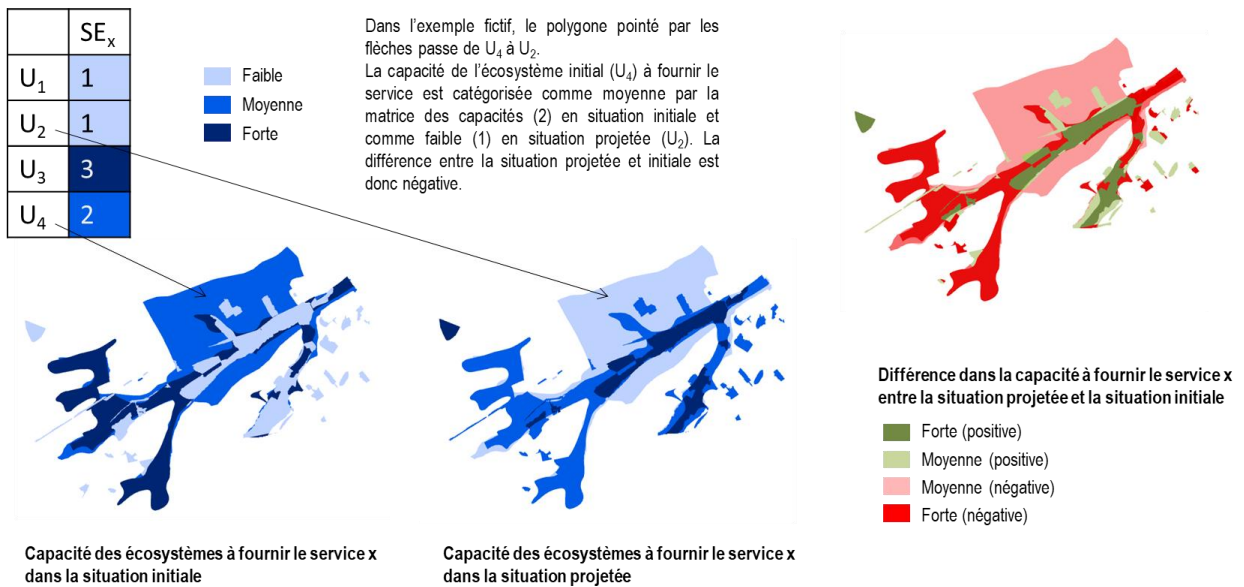


Figure 6: Exemple fictif de représentation cartographique des résultats de l'évaluation d'un service x en état initial et final et de la différence

4. Application à l'exemple de l'artificialisation

4.1. ETAPE 1 : Délimitation des zones dont l'occupation du sol sera modifiée dans le scénario/projet

Dans l'exemple qui nous intéresse, cette première étape revient à mettre en évidence les portions du territoire qui n'étaient pas artificialisées en 2007 et qui le sont devenues en 2019.

La notion d'artificialisation qui est utilisée ici est celle du Schéma de Développement du Territoire (SDT) qui définit « l'artificialisation des terres » comme le « processus par lequel des surfaces sont retirées de leur état naturel, forestier ou agricole ».

La Figure 7 renvoie un schéma de la typologie proposée en 2021 pour faire la distinction entre terres artificialisées et terres non artificialisées. On peut y voir que les jardins et parcs par exemple font partie des terres artificialisées sous le vocable « sols non revêtus végétalisés ». A l'inverse, les sols à usage agricole, même intensif, sont considérés comme non artificialisés selon cette convention.

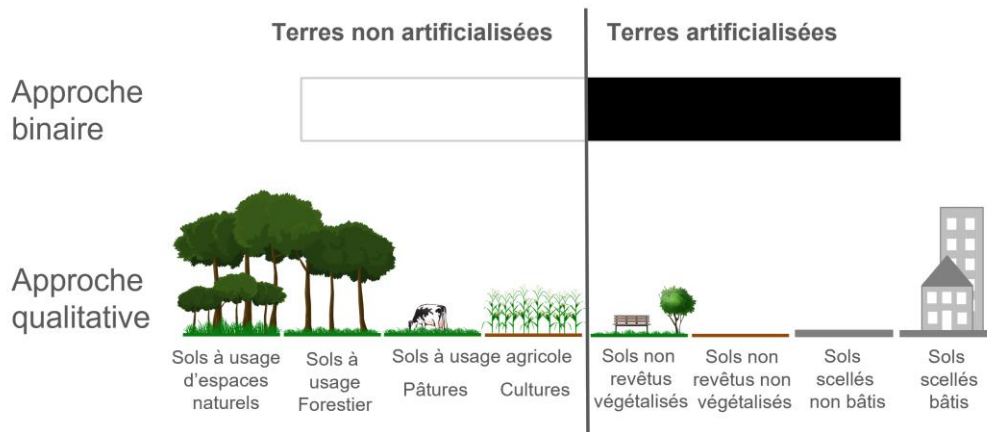


Figure 7: Typologie d'artificialisation en Wallonie (Nomenclature CPDT-SPW ARNE-IWEPS : groupe de travail artificialisation Wallonie (Patrick Engels, Sébastien Hendricks, Julien Charlier), 2021)

L'identification des zones dont l'occupation du sol a été modifiée en lien avec l'artificialisation nécessite deux étapes successives :

- Premièrement, l'identification des parcelles artificialisées en 2007 pour la situation de référence et en 2019 pour la situation actuelle et
- Deuxièmement, l'identification des pixels qui sont passés du non-artificialisé vers l'artificialisé par une comparaison des situations 2007 et 2019.

Ces deux étapes sont décrites ci-après.

Identification des parcelles artificialisées pour la situation de référence (2007) et la situation projetée (2019)

Situation de référence (2007)

L'identification des parcelles artificialisées en 2007 s'est faite sur base la carte d'occupation du sol de Wallonie (COSW 2007). L'identification de l'activité sur la parcelle dans la COSW avait en effet été réalisée sur base de la matrice cadastrale, donnée qui a également servi de base à l'identification de l'utilisation des parcelles dans la couche UTS de Walous (2018). Il nous a dès lors semblé pertinent de repartir de données dont les informations de base étaient similaires.

Au sein des niveaux de la COSW 2007, ont été considérées comme artificialisées dans un premier temps tous les terrains de niveau 1 'territoires artificialisés'. Cela comprend notamment :

- Les terrains résidentiels (11),
- Les espaces d'activité économique, de service, d'équipement et de communication (12). Cette catégorie comprend les espaces d'activités économique, de service et d'équipement communautaire, les réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés, les zones portuaires et les aéroports et aérodromes,
- Les mines, décharges et espaces abandonnés (13). Cette catégorie comprend les situations d'extraction de matériaux, les décharges et les friches, ruines et bâtiments abandonnés,
- Les espaces verts artificialisés, non agricoles (14). Cette catégorie comprend les espaces verts urbains, les équipements sportifs et de loisir de plein air,
- Les autres espaces (15).

Après analyse des résultats de cette extraction, nous avons rencontré différentes limites de cette simplification, toutes dues à la qualité de la donnée d'entrée :

- Le non cadastré n'est pas caractérisé de manière très fine : nous nous sommes rendus compte qu'une partie des routes n'étaient pas reprise dans la catégorie 'artificialisé', en raison du fait qu'une partie de celles-ci sont non cadastrées. Par défaut et pour ne pas sous-estimer les zones artificialisées dans la situation de référence, nous avons donc également considéré toutes les parcelles non cadastrées comme étant artificialisées. Cela nous permet de récupérer les routes, mais implique malheureusement que l'ensemble des eaux courantes soient également identifiées comme artificialisées. Comme nous ne considérerons que les pixels qui sont passés de non artificialisés vers artificialisés, cela ne posera normalement pas de problème pour autant que les cours d'eau soient bien considérés comme non artificialisés dans la situation actuelle.
- Certains terrains sont plus difficilement classables, comme notamment les terres vaines et vagues (qui sont techniquement artificialisées mais pourraient être en 32 dans la COSW). Des erreurs ont également été notées sur les carrières qui n'étaient sans doute plus en activité en 2007 mais qui étaient toujours identifiées comme telles ou dans les parcs urbains, dont la distinction avec les autres forêts semble parfois aléatoire. Par exemple, le Sart Tilman à Liège est considéré comme 'artificialisé' car appartenant à la catégorie des espaces verts urbains tandis que d'autres petits bois proches des centres urbains ne sont pas caractérisés comme tels. Par exemple, le Bois des rêves et le bois de Lauzelle à Louvain-la-Neuve, pourtant fort proches des centres urbains ne sont pas considérés comme des espaces verts urbains.
- La sous-classe 1214 de la COSW (terrains occupés par des bâtiments agricoles) reprend parfois certains terrains agricoles au-delà de la partie strictement artificialisée (bâtiment et jardin).
- Tous les cas présentés ci-avant impliquent des terrains qui seraient artificialisés en 2007 et ne le seraient plus en 2019 sur base d'un changement de méthodologie de désignation des terres artificialisées. Comme nous allons nous concentrer uniquement sur les terrains qui sont passés de non artificialisés vers artificialisés, nous avons considéré ces imprécisions comme négligeables.

Situation actuelle (2019)

La convention relative aux services écosystémiques en Wallonie dont mention dans l'en-tête a mis en place une nouvelle carte croisant l'occupation et l'utilisation qui permettait de faire le meilleur usage possible de toutes les informations disponibles en Wallonie. Les sources de ces données

étaient notamment : WalOUS OCS (2019) et UTS (2018), mais aussi d'autres données utilisées pour corriger certaines erreurs et/ou pour préciser certains usages. Parmi celles-ci, notamment : le raster LifeWatch d'occupation du sol pour identifier les milieux ouverts d'intérêt, le masque forestier pour identifier les coupes à blanc, le parcellaire SIGEC anonyme, les unités de gestion Natura 2000 et les sites protégés selon la LCN pour identifier les espaces dédiés à la conservation de la nature, etc.

Une typologie spécifique a été créée pour cette cartographie. Plus d'information sur cette méthodologie est disponible sur la plateforme Wal-ES : <https://services-ecosystemiques.wallonie.be/fr/principaux-ecosystemes.html?IDC=5840>.

Cette typologie a été utilisée comme base pour l'exercice de la matrice des capacités réalisé en 2021. Elle a également été transposée en typologie binaire 'artificiel' – 'non artificiel' selon la logique proposée à la Figure 7. Sur base de cette classification, sont considérés comme artificialisés, les terres suivantes :

- tous les revêtements artificiels et constructions artificielles, quel que soit leur usage,
- tous les parcelles identifiées comme d'usage de production secondaire, tertiaire, usage résidentiel et réseaux, sauf l'occupation du sol 'résineux et feuillus' pour l'industrie extractive, en ce compris les infrastructures sportives (terrains de football,...), les zones récréatives (golfs, ...), et les jardins (usage résidentiel).

On notera également que par méconnaissance de leur niveau d'artificialisation, tous les plans d'eau et cours d'eau ont été considérés de nature 'non artificialisée' et ne seront donc pas considérés dans les zones artificialisées dans la situation actuelle.

Identification des zones étant passées du non-artificialisé vers l'artificialisé

Méthodologie d'identification

Notre objectif étant bien ici de délimiter notre périmètre d'étude, il convient de restreindre l'analyse aux seules zones du territoire qui se sont vues artificialisées entre 2007 et 2019. Pour les identifier de manière simplifiée et s'affranchir des erreurs potentielles de limites entre le parcellaire cadastral de 2007 et 2019, nous avons transformé les zones de la situation de 2007 en raster de 5 m de résolution.

Le *raster calculator* a ensuite été utilisé pour ne garder des pixels de valeur 1 que lorsque la zone était NA (non artificialisée) en 2007 et devenue A (artificialisée) en 2019. Deux exemples sont illustrés à la Figure 8 et à la Figure 9 pour une zone d'activité économique et une zone résidentielle, respectivement.



Figure 8: Illustration d'un exemple de changement d'artificialisation des terres entre 2007 et 2019 en zone d'activité économique. Zone d'activité économique de Damré au Nord-Est de Sprimont. Légende : en haut, à gauche : orthophotoplan 2020, à droite : terres artificialisées COSW 2007 ; en bas, à gauche : terres artificialisées OCS 2019, à droite : terres nouvellement artificialisées entre 2007 et 2019. Echelle : 1 : 7 500.

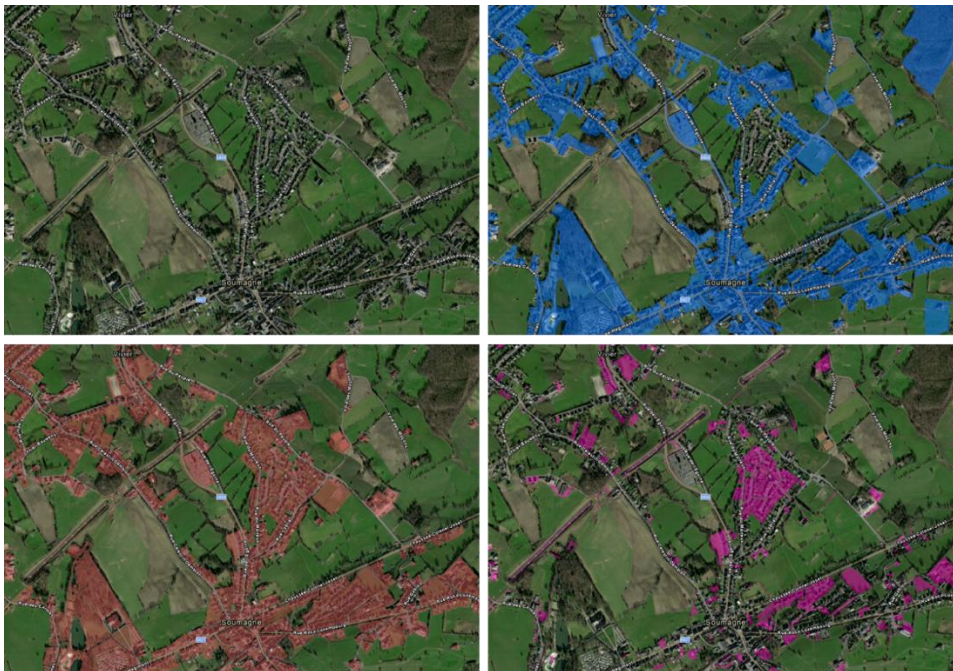


Figure 9: Illustration d'un exemple de changement d'artificialisation des terres entre 2007 et 2019 en zone résidentielle. Développement d'un nouveau quartier résidentiel au nord de Soumagne. Légende : en haut, à gauche : orthophotoplan 2020, à droite : terres artificialisées COSW 2007 ; en bas, à gauche : terres artificialisées OCS 2019, à droite : terres nouvellement artificialisées entre 2007 et 2019. Echelle : 1 : 7 500.

Les Figure 8 et Figure 9 permettent de montrer que si on reste à l'échelle du 1 : 10 000ème, les changements les plus importants sont pointés par la méthodologie simplifiée. Des détails et erreurs en tout genre, tant dans la situation de référence que dans la situation projetée sont facilement observables dès que l'on diminue encore d'échelle. En fonction des situations, on peut distinguer plusieurs cas de figure :

- les deux erreurs s’annulent car elles proviennent de la même source (erreur de délimitation de la parcelle au cadastre),
- l’erreur se situe uniquement dans l’identification de l’artificialisation de 2007 et pas dans la situation actuelle de 2019. Comme on ne considère que les cas NA vers A cela ne pose pas de problème,
- l’erreur se situe uniquement dans l’identification de l’artificialisation de 2019 et pas dans la situation de référence de 2007. Ces erreurs sont plus problématiques car elles entraînent des erreurs dans les changements NA vers A qui ne sont pas réels.

Test des erreurs au sein du territoire de la Ville de Namur

Afin de tester la fréquence de ces erreurs à l’échelle d’un territoire géographique, il a été proposé de travailler à l’échelle du territoire de Namur. Il n’était en effet pas envisageable de réaliser ce test à l’échelle de la Wallonie. Pour procéder de manière efficace lors de cette vérification, nous avons réalisé un clip des parcelles cadastrales de 2018 (situation de référence pour l’UTS de Walous) sur la Ville de Namur. Nous avons ensuite calculé la superficie couverte par les pixels considérés comme étant passés de ‘NA’ vers ‘A’ entre 2007 à 2019. Nous avons ensuite parcouru l’ensemble des parcelles du territoire (effort d’échantillonnage : 2 heures d’une personne) pour mettre en évidence les cas suivants :

- « Correct » : Artificialisé sur toute la parcelle ou sur une partie de la parcelle en accordance avec l’orthophotoplan, les superficies calculées au sein de la parcelle sont donc correctes, et représentent soit toute la parcelle, soit une partie seulement de celle-ci,
- « NA » : Non artificialisé sur toute la parcelle malgré la présence de pixels qui mentionnent une artificialisation en 2019,
- « A_TOUT » : Une partie seulement de la superficie de la parcelle est identifiée comme artificialisée alors que l’ensemble de la parcelle devrait être classée en artificialisée. C’est typiquement le cas de parcelles au sein desquelles une nouvelle construction a été faite mais n’était pas encore référencée comme ‘résidentielle’ au cadastre. L’occupation du sol indique correctement le bâtiment comme artificialisé, mais pas le jardin associé sur la parcelle,
- « A_PARTIM » : par opposition au cas précédent, désigne un cas où les pixels artificialisés représentent une superficie trop importante de la parcelle. C’est le cas de grandes parcelles qui englobent à la fois le jardin d’habitation et une partie de la prairie et/ou du champ agricole à l’arrière,
- « A2007 » : aurait vraisemblablement du déjà être identifié comme artificialisé en 2007 et résulte donc d’une erreur dans la COSW2007. Il est à noter dans ce cas de figure que nous n’avons pas la prétention d’être exhaustifs pour cette erreur. En effet, pour les détecter de manière propre, il aurait fallu repartir d’un orthophotoplan de 2006-2007 et vérifier les valeurs de la COSW, ce qui sortait du cadre du présent exercice. Nous avons noté A2007 lorsque les choses semblaient flagrantes.

Pour illustrer ces différents cas de figures, la Figure 10 reprend des exemples illustrés.

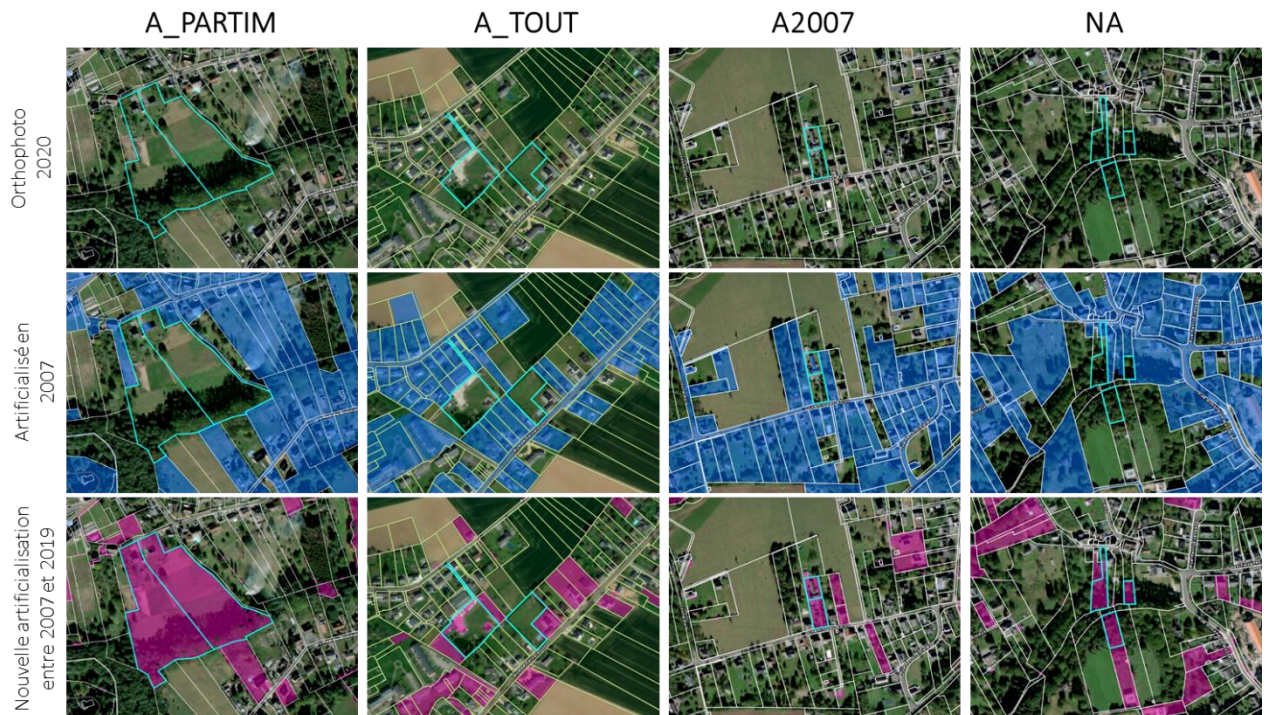


Figure 10: Illustration d'exemples des erreurs identifiées sur les nouvelles artificialisations entre 2007 et 2019. Les parcelles corrigées sont encadrées en bleu turquoise. Echelle : 1 : 2 500^{ème}.

Situation de référence (COSW 2007) pour la Ville de Namur

Le territoire de la Ville de Namur était artificialisé selon la COSW et les hypothèses prises dans ce travail (*i.e.* le non cadastré = artificialisé) à 34.7%. La répartition entre les différentes affectations se trouve au Tableau 3.

Tableau 3: Superficie des terres artificialisées en 2007 sur le territoire de la Ville de Namur (situation de référence selon la COSW 2007) par grand type d'affectation (niveau 2).

Terres artificialisées en 2007 sur le territoire de la Ville de Namur			
Class			% superficie totale du territoire
Niv2	Nom Niv 2	ha	
11	Terrains résidentiels	2875.8	16.3
12	Espaces d'activité économique, de service, d'équipement et de communication	1140.4	6.5
13	Mines, décharges et espaces abandonnés	340.8	1.9
14	Espaces verts artificialisés, non agricoles	199.8	1.1
15	Autres	13.0	0.1
0	Non cadastré	1540.9	8.7
Total		6110.7	34.7

Le nombre total de parcelles sur la Ville est de 56 404. Sur ces parcelles, 10 969, soit 19.4% sont concernées par une superficie non nulle de pixels nouvellement artificialisés avant correction. Cela représente une superficie totale nouvellement artificialisée de 925.2 ha. La superficie artificialisée de 2007 était de 6110.7 ha, on observe donc une augmentation de 13.1 % d'artificialisation.

Corrections effectuées et types d'erreurs

Ces chiffres sont les chiffres avant correction. Au total, 164 parcelles ont été corrigées, soit 0.3%. Sept parcelles appartenaient à l'erreur 'A_PARTIM', 93 à 'A_TOUT', 3 à 'A2007' et 61 à 'NA'.

En terme de superficies, certaines erreurs sont nettement plus importantes que d'autres. Deux erreurs principales de superficies très importantes ont été identifiées :

- L'identification des carrières : notamment sur Beez et Live-sur-Meuse, les zones identifiées comme artificialisées en 2007 sur les carrières semblent très importantes. Elle inclut en effet des boisements qui semblent plus anciens que des boisements de 20 ans. A l'inverse, certaines extensions n'étaient pas identifiées en 2007.
- L'identification des parcs urbains/forêts urbaines. Les résultats de la transposition de l'UTS 2019 en 'artificialisé' pour cette catégorie de parc sont très étonnants. Par exemple, au niveau du parc de la Citadelle, les forêts ne sont pas identifiées comme parcs sauf quand elles font partie de la parcelle résidentielle des habitants. Par contre, les bois de la Vecquée, du Duva, Brulé, de l'Evêque et d'Erpent sont identifiés en parcs urbains et de ce fait artificialisés selon notre logique de typologie. Ces superficies ont été retirées des zones artificialisées au risque de faire gonfler de manière trop importante et non justifiée les chiffres d'artificialisation entre 2007 et 2019. Ces bois sont illustrés à la figure 5 et représentent une superficie totale de plus de 300 ha. Ils expliquent en grande partie à eux seuls la grande différence observées entre les superficies avant et après correction (tableau 2).

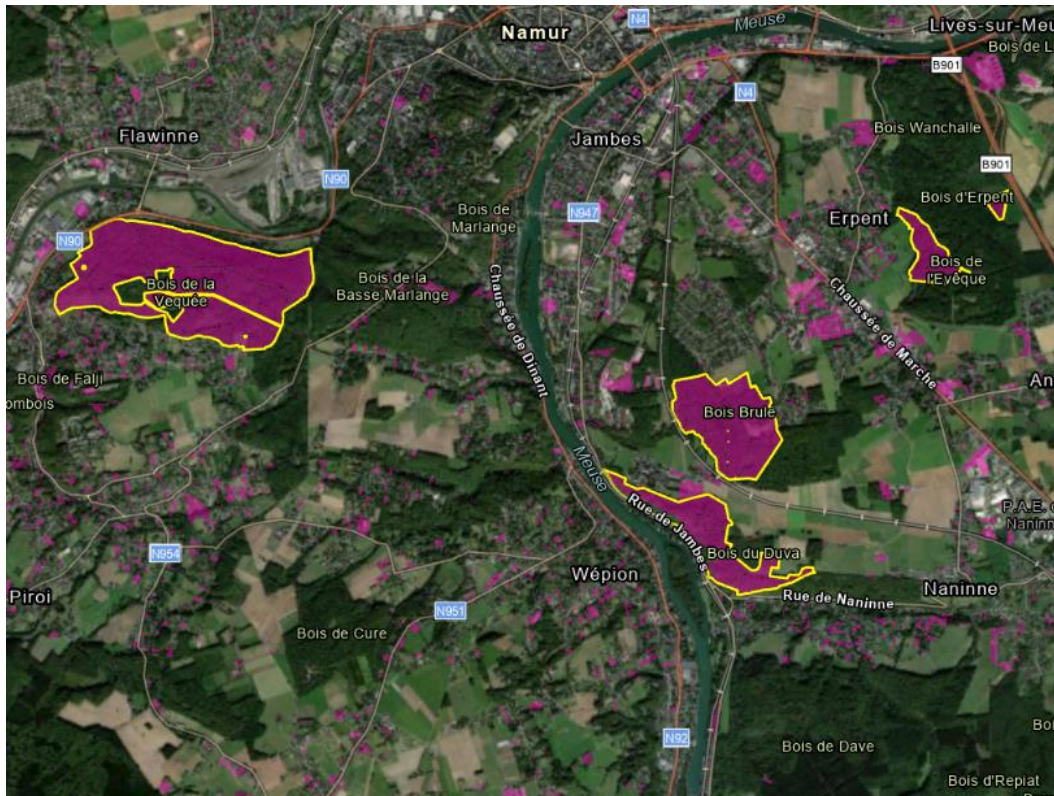


Figure 11: Bois urbains selon l'UTS (Walous 2018) qui ont été considérés comme 'artificialisés' de manière automatique et corrigés dans le cas de la Ville de Namur

Le Tableau 4 reprend les superficies de terres artificialisées entre 2007 et 2019 sur le territoire de la Ville avant et après corrections. Les corrections des superficies ont été effectuées comme suit :

- Lorsque la parcelle est identifiée comme 'A_PARTIM' : la superficie des terres artificialisées entre 2007 et 2019 est égale à la superficie des pixels dans la parcelle divisée par deux,
- Lorsque la parcelle est identifiée comme 'A_TOUT' : la superficie des terres artificialisées entre 2007 et 2019 est égale à la superficie totale de la parcelle,

- Lorsque la parcelle est identifiée comme 'A2007' et 'NA' : la superficie des terres artificialisées entre 2007 et 2019 est ramenée à 0.

Au total, près de 600 hectares supplémentaires ont été artificialisés entre 2007 et 2019 sur le territoire de la Ville de Namur. Cela représente une augmentation de 8.9 % par rapport à la situation de 2007 (6110.7 ha artificialisés) et un total de 3.4% de la superficie totale du territoire.

Tableau 4: Superficies de terres artificialisées entre 2007 et 2019 (ha) avant et après corrections sur le territoire de la Ville de Namur.

	Après corrections	Avant corrections
Correct	568.2	568.2
A_PARTIM	3.6	7.2
A_TOUT	27.3	6.9
A2007	0.0	4.4
NA	0.0	338.5
Total général	599.1	925.2

Certains points sont importants à soulever ici car ils n'ont pu faire l'objet d'une correction :

- Lorsqu'une parcelle n'était pas encore 'résidentielle' au cadastre 2018 qui a servi de base à l'UTS mais déjà bâtie à l'OCS de 2019, seul le bâtiment est considéré comme artificialisé. Cela a été corrigé, mais n'inclut par exemple par les piscines. Ces piscines, comme tous les plans d'eau, ont en effet été classés en 'NA'. Il pourrait être intéressant de faire une distinction entre les plans d'eau et les piscines pour l'artificialisation.
- Certaines parcelles à la COSW reprenaient des fonds de parcelles qui étaient agricoles ou forestières. Pour ne pas inclure de biais, nous n'avons pas fait de correction sur le fait que ces parcelles étaient trop artificialisées que ce qui est 'réel', même en 2019.

Corrections des zones artificialisées sur tout le territoire

Forts de l'identification des types d'erreurs et de leur ordre de grandeur, nous avons ensuite tenté de corriger ces plus grosses erreurs à l'échelle du territoire wallon.

Ces corrections ont porté sur les plus grandes parcelles qui risquaient d'entraîner les plus grandes erreurs en terme de superficies nouvellement artificialisées. Elles sont détaillées ci-après par grande catégorie.

Classement des parcelles à « usage résidentiel » de plus de 5 ha

Pour limiter les erreurs de détection d'artificialisation de grandes parcelles, nous avons souhaité identifier les zones de 'parcs urbains' identifiés comme tels à l'utilisation du sol de 2018 (WalOUS). Cette notion de parc n'est cependant pas disponible et ces parcs sont mélangés aux jardins sous le niveau 5 'usage résidentiel'. Nous sommes donc repartis de la couche d'utilisation du sol 'usage résidentiel' au sein de laquelle nous avons sélectionné uniquement les parcelles de plus de 15 ha. Parmi ces parcelles, 42 intersectaient des pixels artificialisés depuis 2007 sur l'entièreté de la Wallonie, dont 3 sur la Ville de Namur. Nous avons dès lors choisi de les passer tous en revue visuellement pour les attribuer à la classe 'artificiel' ou 'non artificiel'. Parmi les 42 parcelles, seulement 10 parcelles étaient effectivement artificialisées, et 32 ne l'étaient pas. Au-delà de ce nombre important de fausse identification d'artificialisation et des superficies qu'elles représentaient, nous avons ensuite décidé de diminuer la superficie des parcelles à 5 ha. Sur l'ensemble de la Wallonie, 120 parcelles supplémentaires étaient sélectionnées. La proportion était

nettement plus en faveur de l'artificialisation (81 parcelles artificialisées contre 39 non artificialisées). Nous avons donc jugé que l'effort de détection de zones importantes faussement identifiées en 'artificialisées' était suffisant. Cette étape permet de supprimer les grosses erreurs d'artificialisation à usage résidentiel identifiées sur la Ville de Namur à l'échelle de la Wallonie.

Vérification de l'artificialisation des parcelles dédiées à l'industrie extractive

Comme des superficies importantes étaient identifiées sur la Ville de Namur comme étant artificialisées à la COSW en lien avec les carrières, nous avons resélectionné les parcelles identifiées comme 'industrie extractive' à l'UTS qui intersectaient les pixels d'artificialisation. Une seule carrière semble avoir connu des superficies importantes d'augmentation d'artificialisation depuis 2007 : la carrière du Bois du Foriet, à l'ouest de Braine-l'Alleud. Ces parcelles ne sont pas responsables de superficies importantes identifiées de manière erronée en artificialisation depuis 2007.

Autres vérifications

Au fur et à mesure que nous vérifions des zones nouvellement artificialisées, nous sommes tombés sur des aplats de grandes superficies nouvellement artificialisées qui semblaient étonnantes mais n'étaient pas classées en 'usage résidentiel' à l'utilisation du sol. Un exemple est le domaine d'Argenteuil, à l'est de Waterloo. Ce dernier est classé à l'utilisation du sol « services d'enseignement », sans doute en raison de la présence de la chapelle Reine Elisabeth sur une partie de ce grand domaine foncier constitué par Ferdinand de Meeûs entre 1833 et 1836. Ce domaine, majoritairement boisé, ne peut de ce fait être considéré comme nouvellement artificialisé depuis 2007.

Nous sommes dès lors repartis des parcelles de l'UTS qui étaient en utilisation du sol secondaire (code 2) ou tertiaire (code 3) avec des superficies de plus de 15 ha au sein desquelles les pixels nouvellement artificialisés sont présents. Cela représente un total de 124 parcelles sur l'ensemble de la Wallonie. A nouveau, nous avons effectué une vérification visuelle. La plupart de ces parcelles étaient des parcelles de Golf ou des zones industrielles. Une petite partie seulement (19 parcelles) n'était pas artificialisée à l'image du domaine d'Argenteuil.

Pour le code 4 (Réseaux de transport, logistique et réseaux d'utilité publique), nous avons juste vérifié les infrastructures dédiées au transport aérien. Elles semblent avoir été bien identifiées à l'exception de l'aérodrome de Bauffe qui reprend une partie des zones agricoles autour des pistes. Celles-ci ont été extraites et corrigées en 'non-artificialisées'.

Finalement, une dernière analyse visuelle des zones nouvellement artificialisées a été réalisée au 1 :25 000 ème pour s'assurer que les grandes parcelles qui étaient désignées comme artificielles l'étaient réellement. Quelques corrections supplémentaires ont été encore effectuées (par exemple sur les « Infrastructures pour la distribution d'eau et l'assainissement » dans le code 4 qui étaient boisées).

Afin d'illustrer ce résultat à l'échelle du territoire wallon, nous avons calculé les pourcentages de recouvrement des zones nouvellement artificialisées par commune. Au total, une superficie de 36 757 hectares, soit 2.2 % du territoire wallon en moyenne, ont été artificialisés entre 2007 et 2019. Cela représente environ 3 000 ha par an.

La Figure 12 illustre le pourcentage de terrains nouvellement artificialisé par rapport à la superficie communale entre 2007 et 2019. Des disparités sont observables entre les communes. Les valeurs par commune vont de 0.63% d'artificialisation supplémentaire (commune de Florenville) à 9.07% (commune d'Herstal).

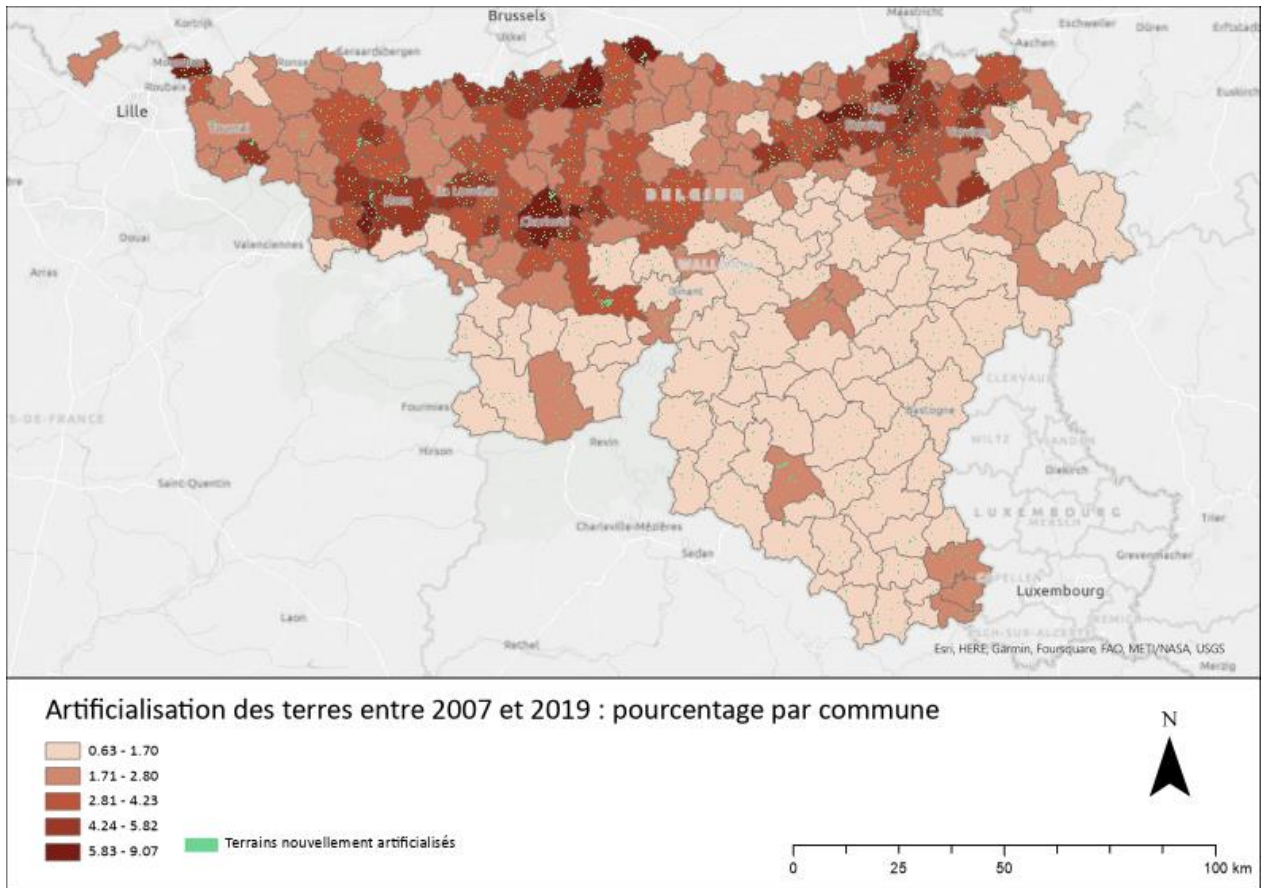


Figure 12: Pourcentage d'artificialisation des terres par commune entre 2007 et 2019 selon la méthodologie proposée dans ce rapport. Les terrains nouvellement artificialisés sont identifiés en vert.

4.1. ETAPE 2 : Identification des écosystèmes impactés : cartographie des lignes de la matrice dans la situation initiale et projetée

Une fois le périmètre sur lequel faire porter notre évaluation des services corrigé et identifié, il convient de connaître l'écosystème qui était en présence en 2007 et en 2019 en chaque point du périmètre selon la nomenclature des lignes de la matrice des capacités.

Pour avoir des typologies identiques d'occupation du sol entre la situation de référence et la situation projetée, nous sommes repartis de la typologie des écosystèmes de Wal-es (<https://services-ecosystemiques.wallonie.be/fr/principaux-ecosystemes.html?IDC=5840>) qui était disponible à la fois pour la couche de données IGN TOP10 vector utilisée dans les années 2000 pour la cartographie des habitats Natura 2000 et pour la couche de données d'occupation/utilisation du sol de 2019 créée dans le cadre de cette convention. Cela permet par ailleurs d'avoir une double validation sur le niveau 'artificiel' de la situation de référence (2007).

Nous proposons de représenter ces changements d'occupation du sol dans une matrice de confusion qui reprend en lignes la situation de référence (2007) et en colonne la situation actuelle (2019).

Les calculs ont été effectués en transformant les pixels artificialisés depuis 2007 en une couche de points et l'outil '*extract multivalued to points*' a ensuite été utilisé pour identifier à quelle typologie d'occupation du sol était associé chaque point dans les deux couches de données susmentionnées.

La matrice de confusion résultante (Tableau 5) montre certaines incohérences entre la donnée COSW de 2007 et la TOP10V utilisée pour attribuer une occupation du sol à la situation de référence de 2007. Ainsi, il semblerait qu'une part non négligeable des 36 757 ha nouvellement artificialisés

l'étaient déjà en 2007 (chiffres identifiés en rouge dans le Tableau 5), suggérant une erreur dans la couche COSW. Ces erreurs proviennent majoritairement de 9 469 ha de zones qui étaient déjà identifiées comme 'jardins' à la TOP10V mais n'étaient pas identifiées comme usage résidentiel à la COSW. Ces superficies ont été retirées du calcul de l'impact de l'artificialisation sur la fourniture des services écosystémiques.

L'autre information que l'on peut tirer de cette matrice de confusion est la suivante : l'artificialisation s'est majoritairement faite au profit des jardins (catégorie ART_JARD pour 14 641 ha) et des zones industrielles (ART_ZI pour 15 331 ha) et au détriment des utilisations du sol agricoles (AGR_CULT : cultures 6 308 ha, AGR_PRA_PER : prairies 11 377 ha).

Pour pouvoir ensuite calculer les superficies de ces différentes occupations du sol en fonction des contextes écologique marginaux, l'information sur le type de contexte écologique en chaque point issu des pixels nouvellement artificialisés a été extraite. Chaque combinaison utilisation du sol X contexte écologique a ensuite été reclassée dans la typologie des lignes de la matrice pour permettre d'avoir les superficies en ha de chaque ligne de la matrice en 2007.

Outils opérationnels - services écosystémiques
Application évaluation SES - exemple artificialisation – janvier 2023

Tableau 5: Matrice de comparaisons de l'occupation du sol des pixels artificialisés (ha) entre 2007 et 2019 (après corrections) sur le territoire wallon. Lignes : utilisation du sol en 2007, colonne : utilisation du sol en 2019.

Étiquettes de lignes	ART_CAR	AGR_CULT_CER	AGR_PRA_PER	AGR_VER	ART_FRITERRIL	ART_JARD	ART_SOLN	ART_SPOR	ART_ZI	AUT_BOI	AUT_MO	NAT_MO	AUT_CULT	AUT_HER	SYL_FEU	SYL_RES	Total
ART_CAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AGR_CULT_CER	184.81	-	-	-	0	1 556	30	189	3 092	80	-	-	422	754	-	-	6 308
AGR_PRA_PER	38	-	-	-	0	5 228	16	181	4 821	146	-	-	97	851	-	-	11 377
AGR_VER	2	-	-	-	-	491	1	12	217	11	-	-	4	42	-	-	779
ART_FRITERRIL	-	-	-	-	-	0	-	-	2	0	-	-	-	0	-	-	2
ART_JARD	2	-	-	-	0	5 552	4	453	2 602	187	-	-	97	572	-	-	9 469
ART_SOLN	48	-	-	-	168	86	36	16	1 416	48	-	-	3	105	-	-	1 926
ART_SPOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ART_ZI	0	-	-	-	-	80	1	2	1 102	9	-	-	1	26	-	-	1 221
AUT_BOI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AUT_MO	20	-	-	-	0	422	13	39	867	106	-	-	32	249	-	-	1 748
NAT_MO	0	-	-	-	0	10	-	4	26	4	-	-	-	3	-	-	46
AUT_CULT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AUT_HER	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SYL_FEU	28	-	-	-	0	991	27	144	671	746	-	-	7	186	-	-	2 800
SYL_RES	12	-	-	-	0	226	10	64	515	166	-	-	0	87	-	-	1 079
TOTAL	335	-	-	-	168	14 641	138	1 104	15 331	1 501	-	-	663	2 875	-	-	36 757

4.2. ETAPE 3 : Priorisation des services écosystémiques principaux à prendre en compte dans l'analyse

L'analyse de la priorité des services dans le cadre de l'exemple de l'artificialisation a été réalisée sur base de l'arbre de décision proposé dans le guide d'évaluation de Campagne et Roche (2021). Les résultats sont présentés au Tableau 6. Il est important de noter que cet exercice est relativement fictif à savoir d'une part que les acteurs n'ont pas réellement été interrogés et que d'autre part les enjeux locaux n'ont pas été adaptés aux différents profils des différentes communes wallonnes.

Tableau 6: Liste des services écosystémiques pris en compte et de leur priorité

Services écosystémiques	1. Nature du projet	2. Contexte du projet			Résultat
	1. Impact potentiel	2.1 Importance du SE pour les acteurs	2.2 Enjeux local ou réglementaire spécifique	2. Importance locale du SE	Priorité
Cultures d'alimentation	Fort	Oui	Oui	Fort	Forte
Elevage	Fort	Oui	Oui	Fort	Forte
Animaux sauvages terrestres	Moyen	Non	Oui	Moyenne	Moyenne
Plantes et champignons sauvages terrestres comestibles	Faible	Non	Non	Faible	Faible
Poissons, crustacés et mollusques élevés dans les eaux douces	Faible	Non	Non	Faible	Faible
Poissons, crustacés et mollusques sauvages d'eau douce	Faible	Non	Non	Faible	Faible
Bois d'œuvre	Fort	Oui	Oui	Fort	Forte
MO pour fertilisation et amélioration du sol (compost des PAC et déchets verts des particuliers, déchets agricoles)	Faible	Non	Oui	Moyenne	Faible
Fourrage	Fort	Oui	Oui	Fort	Forte
Matière organique issue de l'agriculture à des fins énergétiques	Fort	Non	Non	Faible	Moyenne
Matière organique issue des déchets à des fins énergétiques	Faible	Non	Non	Faible	Faible
Arbres et résidus ligneux à des fins énergétiques	Fort	Oui	Oui	Fort	Forte
Eau de surface potable	Fort	Oui	Non	Moyenne	Moyenne
Eau de surface à des fins autres que la consommation (e.g. refroidissement)	Faible	Non	Non	Faible	Faible
Protection contre l'érosion	Fort	Oui	Oui	Fort	Forte
Maintien du cycle hydrologique et des flux d'eau	Moyen	Oui	Non	Moyen	Moyenne
Protection contre les inondations	Fort	Oui	Oui	Fort	Forte
Protection contre les tempêtes	Faible	Non	Non	Faible	Faible
Prévention et contrôle des feux	Faible	Non	Non	Faible	Faible
Bioremédiation des sols pollués	Faible	Non	Non	Faible	Faible
Maintien de la qualité des eaux de surface	Fort	Oui	Oui	Fort	Forte

Maintien de la qualité des eaux souterraines	Fort	Oui	Oui	Fort	Forte
Capture des poussières, des produits chimiques et des odeurs	Faible	Non	Oui	Moyen	Moyenne
Mitigation des impacts visuels	Faible	Non	Non	Faible	Faible
Bruit	Moyen	Non	Non	Fort	Moyenne
Pollinisation	Moyen	Oui	Oui	Fort	Moyenne
Environnement pour des loisirs (activités récréatives)	Fort	Oui	Oui	Fort	Forte
Sources d'inspiration et de valeurs (entités emblématique et inspiration artistique)	Fort	Oui	Oui	Fort	Forte
Environnement de la vie courante (pour vivre et travailler)	Fort	Oui	Oui	Fort	Forte
Sources d'expériences et de connaissance (science et éducation)	Fort	Oui	Oui	Fort	Forte

Au total, 13 services ont été jugés prioritaires, il s'agit de :

- Cultures d'alimentation,
- Elevage,
- Bois d'œuvre,
- Fourrage,
- Arbres et résidus ligneux à des fins énergétiques,
- Protection contre l'érosion,
- Protection contre les inondations,
- Maintien de la qualité des eaux de surface,
- Maintien de la qualité des eaux souterraines,
- Environnement pour des loisirs (activités récréatives),
- Sources d'inspiration et de valeurs (entités emblématique et inspiration artistique),
- Environnement de la vie courante (pour vivre et travailler),
- Sources d'expériences et de connaissance (science et éducation).

4.3. ETAPE 4 : Evaluation de la capacité à fournir les services pour la situation initiale et projetée

Sur base de la superficie de chaque écosystème (lignes de la matrice) en 2007 et en 2019, nous calculons une matrice pondérée pour les deux situations. Les valeurs de chaque colonne sont ensuite sommées pour obtenir une valeur par service pour la situation initiale et la situation projetée.

Les résultats sont présentés au Tableau 7 : ils donnent la somme des scores pondérés en état initial et final ainsi que la qualification de la capacité de fourniture du service sur base de la valeur de la somme des scores.

La capacité des écosystèmes à fournir les services en situation projetée est presque toujours très faible pour les services de production, faible pour les services de régulation et variable pour les services culturels. La qualification de l'état final pour les services culturels est « forte » pour « l'environnement de la vie courante », « moyenne » pour « l'environnement pour les loisirs » et « sources d'expériences et de connaissances ». Cela s'explique en partie par le fait que la présence de jardins ou de parcs en état final en lieu et place de cultures et de prairies a un impact moins négatif sur ces services que sur les services de production notamment.

Tableau 7: Somme des scores pondérés par les superficies en situation initiale et projetée et qualification de la capacité de fournir les différents services en situation initiale et projetée

		Somme des scores pondérés		Qualification de la capacité en SE	
		Initial	Final	Initial	Final
1P_AL_CULT	Cultures d'alimentation	1.34	0.83	Faible	Très faible
1P_AL_ELEV	Elevage	2.59	0.97	Moyenne	Très faible
1P_MA_BOIS	Bois d'œuvre	0.70	0.37	Très faible	Très faible
1P_MA_FOUR	Fourrage	3.20	0.98	Forte	Très faible
1P_EN_ARBR	Arbres et résidus ligneux à des fins énergétiques	2.05	1.07	Moyenne	Faible
2R_EX_EROS	Protection contre l'érosion	3.55	1.86	Forte	Faible
2R_EX_INON	Protection contre les inondations	3.30	1.64	Forte	Faible
2R_PO_EASU	Maintien de la qualité des eaux de surface	3.11	1.71	Forte	Faible
2R_PO_EASO	Maintien de la qualité des eaux souterraines	2.99	1.89	Moyenne	Faible
3C_LOIS	Environnement pour des loisirs (activités récréatives)	2.66	2.40	Moyenne	Moyenne
3C_VIEC	Environnement de la vie courante (pour vivre et travailler)	3.24	3.36	Forte	Forte
3C_CONN	Sources d'expériences et de connaissance (science et éducation)	2.88	2.03	Moyenne	Moyenne
3C_INSP	Sources d'inspiration et de valeurs (entités emblématique et inspiration artistique)	2.88	1.95	Moyenne	Faible

4.4. ETAPE 5 : Comparaison entre les services rendus en situation initiale et projetée

Le Tableau 8 présente les résultats des calculs de bilan de l'impact sur les services entre la situation en état final et en état initial (en pourcentage et en différence relative). Pour le service d'environnement de la vie courante, la différence est non significative.

Pour la plupart des autres services, l'impact est fort à très fort, sauf pour :

- le service de bois d'œuvre (impact faible, sans doute expliqué par le fait que les superficies en zones forestières qui se sont vues artificialisées sont relativement faibles en proportion des superficies agricoles – voir Tableau 5 pour les superficies et Tableau 7 pour la capacité à fournir le service en valeur absolue),
- l'environnement pour les loisirs (impact faible, les détails des calculs de la matrice pondérée en état initial et en état final renseignent sur le fait que la valeur de 1.5 qui était observée en situation initiale pour les prairies qui étaient majoritaires dans l'occupation du sol s'est transformée en 1.4 pour l'occupation du sol 'parcs et jardins' devenue majoritaire, d'où la faible différence observée).

Tableau 8: Somme des scores pondérés par les superficies en situation initiale et projetée et qualification de la capacité de fournir les différents services en situation initiale et projetée

		Bilan de l'impact sur les services écosystémiques		
		SEII Après	Différence Final-Initial	Importance Impact
1P_AL_CULT	Cultures d'alimentation	-37.95 %	-0.51	Fort
1P_AL_ELEV	Elevage	-62.44 %	-1.62	Très fort
1P_MA_BOIS	Bois d'œuvre	-47.76 %	-0.33	Faible
1P_MA_FOUR	Fourrage	-69.51 %	-2.22	Très fort
1P_EN_ARBR	Arbres et résidus ligneux à des fins énergétiques	-47.82 %	-0.98	Très fort
2R_EX_EROS	Protection contre l'érosion	-47.69 %	-1.69	Très fort
2R_EX_INON	Protection contre les inondations	-50.43 %	-1.66	Très fort
2R_PO_EASU	Maintien de la qualité des eaux de surface	-45.15 %	-1.41	Très fort
2R_PO_EASO	Maintien de la qualité des eaux souterraines	-36.88 %	-1.10	Très fort
3C_LOIS	Environnement pour des loisirs (activités récréatives)	-9.70 %	-0.26	Faible
3C_VIEC	Environnement de la vie courante (pour vivre et travailler)	3.78 %	0.12	NS
3C_CONN	Sources d'expériences et de connaissance (science et éducation)	-29.57 %	-0.85	Très fort
3C_INSP	Sources d'inspiration et de valeurs (entités emblématique et inspiration artistique)	-32.11 %	-0.92	Très fort

4.5. ETAPE 6 : Présentation des résultats

Comme mentionné lors de la présentation de la méthodologie, les résultats peuvent être représentés de plusieurs manières différentes.

La première manière est la présentation des résultats figurant aux Tableau 7 et Tableau 8 sous forme de bouquets de services plus visuels et plus porteurs pour la communication (Figure 13).

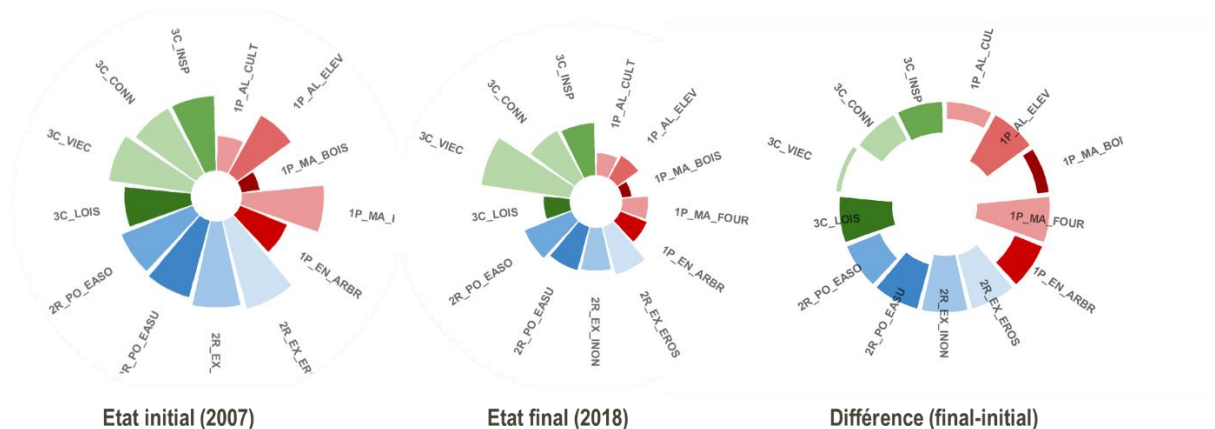


Figure 13: Exemple de représentation des résultats sous forme de bouquet de services : capacité des écosystèmes nouvellement artificialisés entre 2007 et 2019 à fournir différents services, en état initial (non artificialisé), en état final (artificialisé) et différence.

La seconde manière de présenter les choses est une manière cartographique. Un extrait des cartes présentant la capacité des écosystèmes qui ont été modifiés par l'artificialisation entre 2007 et 2019 sur la commune de Namur pour le service de lutte contre les inondations est présenté à la Figure 14. Pour l'état initial et l'état final, les valeurs sont présentées en valeur absolue (rouge pour les valeurs les plus faibles – capacité très faible de l'écosystème à fournir le service, vert pour les valeurs les plus élevées – capacité très forte de l'écosystème à fournir le service). La carte présentant les différences propose des valeurs négatives dans les gammes de rouge/orange et des valeurs positives dans les gammes de verts. Comme on peut le constater, l'artificialisation des terres a un impact majoritairement

négatif sur ce service et d'autant plus négatif que l'artificialisation s'accompagne d'une grande zone imperméabilisée sur la parcelle. On voit en effet clairement la localisation de chaque zone bâtie sur les parcelles nouvellement artificialisées en situation 2019 (elles apparaissent en rouge) par opposition aux zones de jardins qui présentent des valeurs de 2.2 dans la matrice (ils apparaissent dès lors en orange).

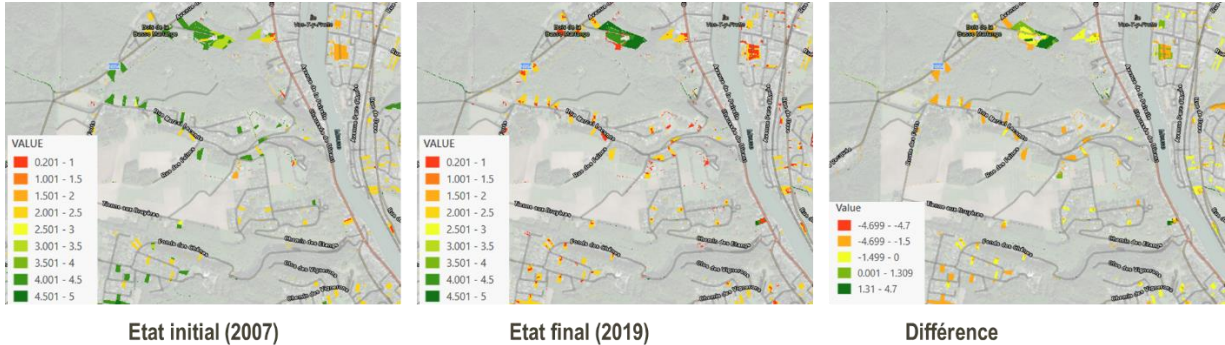


Figure 14: Exemple de représentation cartographique des résultats : zoom sur le sud de la commune de Namur : service d'atténuation contre les inondations

Ces cartographies peuvent bien entendu être reproduites pour chaque service écosystémiques jugé prioritaire.

Nous pensons que faire des sommes ou des moyennes des valeurs par pilier de service est relativement peu pertinent car on perd la compréhension fine des mécanismes qui justifient le passage d'une valeur à l'autre en état initial et final, mais cela peut bien entendu s'envisager également.

5. Description des annexes mises à disposition

Pour pouvoir réutiliser ces informations sur un autre projet, une série de documents est mise à disposition :

1. Raster de la matrice pour l'année 2019 de référence sur base de la typologie de la matrice. Valeur = 1 à 76 (lignes de la matrice), table attributaire associée pour les colonnes. Résolution : 5 m.
2. Fichier xls reprenant les étapes de l'évaluation, la matrice et les codes et noms des lignes et des colonnes et des dictionnaires (exemple : le code CEMS et le lien avec le regroupement des contextes fait dans la matrice)
3. Disponible sur le géoportail : contextes écologiques marginaux et sensibles (format .shp) (<https://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=1024.2119634239061,320310.7880365761,12160.965455930898,171705.0345440691>)
4. Code R pour produire des bouquets de service et exemple de feuille excel d'input associée

Si vous êtes intéressés par les résultats du travail sur l'artificialisation en tant que tel, ils sont compilés dans une geodb (Artif_SES_202301.gdb) qui reprend :

1. Le raster de la matrice en 2019 pour les pixels artificialisés entre 2007 et 2018 (New_artif_MATCAP_2019)
2. Le raster de la matrice en 2007 pour les pixels artificialisés entre 2007 et 2018

3. L'exemple de résultat pour le service d'atténuation contre les inondations en 2019 (SES__R_EX_INON_2019)
4. L'exemple de résultat pour le service d'atténuation contre les inondations en 2007 (SES__R_EX_INON_2019)
5. L'exemple de résultat pour le service d'atténuation contre les inondations (différence 2019-2007) (SES__R_EX_INON_Diff_2019_2007)

6. Conclusion

Le présent rapport avait pour but de présenter l'une des manières d'utiliser la matrice des capacités pour évaluer l'impact d'un changement d'utilisation et d'occupation du sol sur les services écosystémiques. Son objectif était de présenter ces étapes dans un premier temps puis de les illustrer à partir d'un cas concret. Le cas concret était : quelle est la perte de la capacité des écosystèmes à fournir les services écosystémiques en lien avec l'artificialisation des terres entre 2007 et 2019.

La méthodologie s'articule en 6 étapes distinctes : délimitation des zones d'impact, identification des écosystèmes impactés, priorisation des services écosystémiques à prendre en compte, évaluation de écosystèmes à fournir ces services en situation initiale et projetée à l'aide de la matrice des capacités, comparaison entre la situation initiale et projetée et présentation des résultats.

L'exercice relatif à l'artificialisation a permis de mettre notamment en lumière la difficulté d'avoir des cartographies comparables dans le temps pour caractériser cette artificialisation (mise en évidence notamment de soucis liés à l'identification des parcelles artificialisées (dues aux nombreuses erreurs COSW2007 mais aussi UTS2018)). Cela a nécessité la mise en place d'une série importante de corrections pour lesquelles nous ne pouvons promettre l'exhaustivité à l'échelle de la Wallonie et qui ont été caractérisées de manière plus précise à l'échelle de la Ville de Namur.

Les résultats ont été présentés par bouquet de services ou sur une carte au 1 :10 000 (état 2007, état 2019, différence) et montrent une réduction très importante des services de production, une réduction importante des services de régulation et une situation variable pour les services culturels en fonction du type de service considéré ; les services en lien avec les loisirs et l'environnement de la vie courante étant globalement moins impactés par la dynamique de l'artificialisation.

L'ensemble de ces analyses peut se recalculer à l'échelle souhaitée en changeant la pondération de la matrice (état initial et état final et différence) sur base d'un simple clip sur la zone d'intérêt pour calculer les superficies des différentes lignes de la matrice. Ces différentes échelles pourraient être : échelle communale, échelle d'un bassin versant, échelle d'un projet, ...

Les résultats cartographiques sont disponibles pour l'ensemble de la Wallonie ainsi qu'une série de livrables pour faciliter la prise en main de la méthode et son application à un autre cas d'étude.

7. Références

- Burkhard, Benjamin, Franziska Kroll, Felix Müller, et Wilhelm Windhorst. 2009. « Landscapes' capacities to provide ecosystem services—a concept for land-cover based assessments ». *Landscape online* 15: 1-22.
- Campagne, Carole Sylvie, et Philip K Roche. 2021. « Guide pour la prise en compte des services écosystémiques dans les évaluations des incidences sur l'environnement ». Guide méthodologique, DREAL, 131 pages.
- Campagne, Carole Sylvie, Leita Tschanz, et Thierry Tatoni. 2016. « Outil d'évaluation et de concertation sur les services écosystémiques: la matrice des capacités ». *Sciences Eaux et Territoires*, n° Hors série 23: 6-p.
- Maillefert, Muriel, et Olivier Petit. 2017. « Vers une démarche intégrée d'évaluation et de représentation des services écosystémiques : perspective interdisciplinaire et enjeux en milieu urbain ». *Environnement Urbain / Urban Environment*, n° Volume 11 (mars). <http://journals.openedition.org/eue/1551>.