

INDICATEUR : IMPERMÉABILISATION DES SOLS

THEME : EAU ET ENVIRONNEMENT AQUATIQUE

1 INTERET ET ELEMENTS D'INTERPRETATION DE L'INDICATEUR

Question posée par l'indicateur :

Quelle est la proportion de surfaces imperméables en Région bruxelloise ?

Contextualisation de l'indicateur :

- Problématique environnementale sous-tendue par l'indicateur : impact de l'urbanisation sur le cycle de l'eau, sur la santé des sols, sur la verdurisation, sur le climat (îlot de chaleur)
- Choix de l'indicateur : L'Europe s'est fixée des objectifs stratégiques en matière d'artificialisation des sols (voir les « objectifs quantitatifs à atteindre » ci-dessous). Dans la proposition de directive sur la surveillance et la résilience des sols qui en découle, le degré d'artificialisation des terres et d'imperméabilisation des sols constitue un des indicateurs de l'état de santé des sols.
- Contexte bruxellois : Le degré d'imperméabilisation des sols de la Région bruxelloise avait été cartographié lors d'une étude en 2006, ainsi que son évolution depuis 1955. Une actualisation de cette carte était souhaitée, non seulement pour réviser l'évaluation du **risque d'inondation** mais aussi pour juger de l'étalement urbain et de ses autres **incidences environnementales**.
Le suivi de cet indicateur est également nécessaire pour évaluer la mise en œuvre des mesures de lutte contre l'imperméabilisation des sols, dans le cadre notamment de la gestion intégrée des eaux pluviales (GIEP), de la stratégie bruxelloise Good Soil, adoptée en 2024 en application de la stratégie européenne et de la future directive sur la santé des sols, ou encore de la loi européenne sur la restauration de la nature adoptée en 2024.

Objectifs quantitatifs à atteindre et, le cas échéant, statut :

- Au niveau mondial :
Un des objectifs de développement durable des Nations Unies (15.3) est, d'ici 2030, de « lutter contre la désertification, restaurer les terres et sols dégradés, notamment les terres touchées par la désertification, la sécheresse et les inondations, et s'efforcer de parvenir à un monde neutre en matière de dégradation des terres ».
- Au niveau européen :
L'Europe s'est fixée un **objectif de « zéro artificialisation nette » des sols à l'horizon 2050**. La stratégie pour les sols à l'horizon 2030 de la Commission européenne reprend cet objectif et **requiert des Etats membres de définir des objectifs ambitieux en vue de réduire cette artificialisation nette d'ici à 2030** à l'échelle nationale, régionale et locale mais aussi de rendre compte des pouvoirs accomplis. Une proposition de directive sur la surveillance et la résilience des sols en découle. Le concept d'artificialisation y est décrit comme la conversion de terres naturelles et semi-naturelles mais aussi comme la perte de services écosystémiques fournis par les sols.
De plus, la loi européenne sur la restauration de la nature, adoptée en 2024, exige des Etats Membres de restaurer 20% des habitats terrestres d'ici 2030 et l'ensemble des écosystèmes ayant besoin d'être restaurés d'ici 2050. Les zones urbaines ont l'obligation de maintenir leurs espaces verts et leur couvert arboré.
- Au niveau bruxellois :
Aucun objectif quantitatif n'a encore été déterminé au niveau régional.
La Stratégie bruxelloise Good Soil adoptée en 2024 prévoit, à l'issue d'une étude, de fixer une trajectoire de diminution d'ici 2050. Elle prévoit également de compenser l'artificialisation de nouveaux sols par la protection et la restauration des sols de qualité.

La révision du Plan Régional d'Affectation du Sol (PRAS), en cours à l'écriture de cette fiche, pourrait rendre des zones vertes actuellement constructibles en zones non urbanisables, en application de la loi sur la restauration de la nature.

2 FONDEMENTS METHODOLOGIQUES

Définition :

Cette carte indique les surfaces imperméables où l'eau de pluie ne peut pas ou difficilement s'infiltrer dans le sol.

Les surfaces imperméables sont typiquement constituées des revêtements de sol artificiels (comme les rues, les places, les parkings, etc.), des bâtiments et des sols compactés. Les surfaces perméables correspondent typiquement aux sols couverts de végétation, aux sols nus et aux zones d'eau.

La méthode ne permet en revanche pas de distinguer les revêtements semi-perméables (voir « difficultés méthodologiques rencontrées »).

Unité :

Classification binaire des pixels (1 m x 1 m) en surface perméable / imperméable

Un traitement cartographique peut ensuite être appliqué pour calculer le taux d'imperméabilisation (%) d'une zone donnée telle que rue, îlot urbain, quartier, commune... (part des pixels imperméables par rapport à la totalité des pixels dans la zone délimitée).

Mode de calcul et données utilisées :

La méthodologie est détaillée dans le rapport d'étude de WEO de 2023 (parties 1 et 2 du rapport - voir références bibliographiques). Elle a fait appel à l'intelligence artificielle : un **modèle d'apprentissage profond (deep learning)**.

Les différentes phases de modélisation sont :

- Prétraitement (*preprocessing*)
- Entraînement (*compute / training*)
- Déploiement ou prédiction (*compute / inference*)
- Post-traitement (*compute / post-processing*).

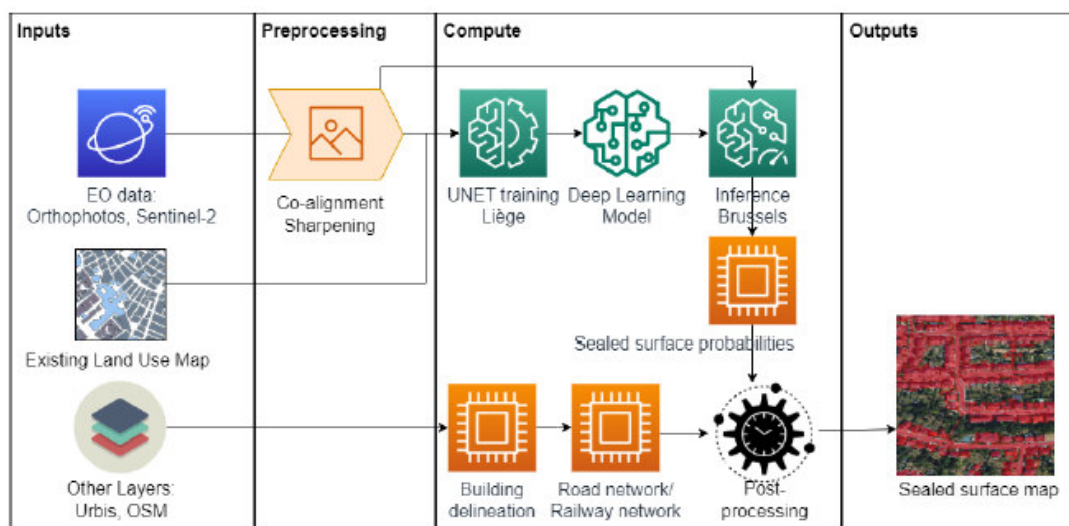


Schéma de la méthodologie (extrait du rapport WEO, 2023)

Les **données sources** utilisées (pour le déploiement du modèle) sont :

- **Des images satellitaires open source de Sentinel-2** (résolution de 10 m), satellite de l'Agence Spatiale Européenne réalisant une image de l'Europe tous les 5 jours et optimisé pour surveiller la couverture du sol et la végétation. Toutes les images disponibles avec une couverture nuageuse inférieure à 80% pendant les périodes d'intérêt suivantes ont été utilisées :
 - entre juin et juillet 2022 pour l'été,
 - entre janvier et mars 2022 pour l'hiver.
- **Deux orthophotos aériennes** de la Région bruxelloise :
 - une orthophoto d'été d'UrbIS (19 juillet 2022 - résolution de 40 cm),

○ une autre d'hiver de Digitaal Vlaanderen (7 mars 2022 - résolution de 15 cm).
Les caractéristiques complètes et origines de ces données figurent dans le rapport d'étude.

La carte finale devait avoir une résolution inférieure à 5 m. Les images satellitaires open source ont l'avantage d'être gratuites mais l'inconvénient d'être de moins bonne résolution que des images commerciales. Pour parvenir à la résolution désirée, celles-ci doivent être combinées avec des images de très haute résolution, inférieure à 1 m, à savoir les orthophotos (étape du prétraitement).

Deux modèles de prédiction ont été produits dans un premier temps : « **Sentinel-2 été** » et « **Sentinel-2 hiver** » (à l'issue du déploiement).

Puis un modèle final, combinant les 2 précédents, a été créé dans un second temps (étape du post-traitement) : « **Sentinel-2 combiné** ». Le fait d'associer des données des 2 saisons (été / hiver) permet de tirer profit des avantages de chacune d'entre elles :

- en été, le soleil est plus haut et les ombres sont par conséquent beaucoup moins importantes ;
- en hiver, la végétation est moins développée, ce qui permet de mieux discerner les sols situés sous la végétation haute (sous les couronnes des arbres).

Tout modèle d'apprentissage nécessite une **phase d'entraînement** avant son déploiement. Le modèle a été entraîné sur les zones de Liège et de Charleroi, qui ont été choisies pour leur ressemblance avec Bruxelles ainsi que pour la disponibilité de données à la qualité requise. Les données sources utilisées pour la phase d'entraînement sont :

- Des images satellitaires de Sentinel-2 : toutes les images disponibles entre juin et juillet pour 2018, 2019 et 2020.
- Des orthophotos aériennes de la Wallonie (résolution de 25 cm) du Service public de Wallonie : 5 mai – 4 août 2018, 5 mai – 4 août 2019, 1 avril – 24 avril 2020.
- Une carte de l'occupation du sol en Wallonie de 2018, 2019 et 2020 (résolution d'1 m - projet WALOUS), précise à 93,4% dans les zones urbaines.

Le **prétraitement** a notamment consisté en :

- La création d'un masque nuage-ombre pour les images satellitaires,
- Le co-alignement des orthophotos avec les images satellitaires puis la combinaison des images satellitaires de chaque période en une seule image (en utilisant la moyenne du signal par bande spectrale),
- L'augmentation de la netteté de toutes les bandes des images satellitaires à une résolution de 1 m.

Un **post-traitement** a été appliqué pour augmenter la précision des prédictions du modèle. Mais celui-ci a volontairement été restreint afin que l'étude soit reproductible avec des images satellites et que le résultat dépende peu d'autres données. Il n'est en effet pas toujours aisé ni garanti de remettre la main sur toutes les données historiques ayant servi lors de cette phase.

Le post-traitement s'est donc **limité à** :

- Combiner les surfaces imperméables des modèles Sentinel-2 d'hiver et d'été,
- Ne retenir que les surfaces imperméables du modèle d'été dans les zones d'ombrages,
- Utiliser la couche des zones d'eau (UrbIS) pour convertir des pixels mal classifiés (d'imperméables en perméables).

Ce post-traitement est beaucoup plus léger que celui appliqué pour la 2^{ème} carte produite lors de l'étude, ayant servi à tracer l'évolution de l'imperméabilisation.

Source des données utilisées :

Etude de WEO de 2023 pour le compte de Bruxelles Environnement (voir références bibliographiques)

Périodicité conseillée de mise à jour de l'indicateur :

Une mise à jour dans les 5 ans devrait avoir lieu.



3 COMMENTAIRES RELATIFS A LA METHODOLOGIE OU A L'INTERPRETATION DE L'INDICATEUR

Limitation / précaution d'utilisation de l'indicateur :

Performance du modèle

La performance du modèle final (Sentinel-2 combiné) est de **92,3% (f-score)**. Autrement dit, le modèle prédit correctement la classification des pixels dans 92,3 % des cas.

Cette précision a été évaluée en classifiant manuellement 7.600 pixels répartis dans 19 blocs de vérification de 20 m * 20 m (400 pixels/bloc) sélectionnés aléatoirement, à partir d'orthophotos, de Google Street View et de couches UrbIS.

Le f-score est la moyenne harmonique :

- de la précision (modèle -> réalité) : 96,0% des pixels classifiés comme imperméables par le modèle sont vraiment imperméables.

- et du rappel (réalité -> modèle) : 88,8% des zones imperméables réelles ont été correctement classifiées dans le modèle.

Par ailleurs, 95,3% des zones perméables réelles ont été correctement marquées dans le modèle, ce qui est supérieur au rappel : autrement dit, **le modèle tend à sous-estimer l'imperméabilité réelle.**

Précaution d'utilisation

La carte de l'imperméabilisation des sols de 2022 ne doit PAS être comparée aux cartes établies pour les années entre 1955 et 2006. Pour ce faire, une autre carte a été produite (voir la fiche méthodologique relative à l'indicateur sur l'évolution des surfaces imperméables). Les modèles diffèrent en effet au niveau :

- méthodologique (données de télédétection sources, post-traitement surtout),
- de leur performance (meilleure dans le cas de la carte de 2022),
- de leur résolution (1 m pour la carte de 2022, 60 cm en 2,4 m pour la carte de 2006, 20m-30m pour les cartes d'évolution de 1985 à 2006, et 1 ha pour celles de 1955 à 1985),
- de leur emprise (100% vs 97,7% de la superficie régionale).

Difficultés méthodologiques rencontrées :

Sur le terrain, il existe un **spectre de classes entre « complètement perméable » et « complètement imperméable »**.

Un des objectifs principaux de l'étude était qu'elle soit reproductible et donc basée le plus possible sur les résultats du modèle (avec un post-traitement le plus réduit possible). Les pixels sont catégorisés selon les prédictions du modèle pour certaines surfaces complexes :

- Les zones de chemins de fer.
- Les zones autour des arbres de rues (imperméable s'il y a du gravier ou du sol très compacté, perméable s'il y a de la végétation).

En revanche, **le modèle ne permet pas de distinguer les revêtements semi-perméables.**

Trois types d'objets sont difficiles à classifier :

- **Les terrains de sports** : le modèle distingue mal les terrains de sport naturels qui sont perméables (ex : terrains de foot en gazon naturel) des terrains artificiels qui peuvent être de perméabilité variable selon la nature de la sous-couche (ex : terrains en gazon synthétique), semi-perméables (ex : courts de tennis en gazon ou en terre battue), ou imperméables (ex : courts de tennis en béton).

Par conséquent, les courts de tennis en terre battue ou en béton sont classifiés comme imperméables. Tous les autres terrains de sports sont classifiés comme perméables.

Or il serait souhaitable que les terrains en gazon synthétique apparaissent comme imperméables compte tenu de leur ruissellement significativement plus élevé et plus rapide que ceux avec un gazon naturel (voir partie 3 du rapport de WEO, 2023).

- **Les chaussées ou parkings avec des traitements spécifiques pour augmenter leur perméabilité** (ex : asphalte drainant, dalles alvéolées, pavés à larges joints) : ils sont classifiés par le modèle comme imperméables.

- **Les toitures vertes** : leur capacité pour absorber la pluie est limitée mais elle est supérieure dans le cas des toitures vertes intensives (considérées en général comme perméables) par rapport aux extensives (considérées comme imperméables). Le modèle ne pouvant voir la profondeur du substrat, les toitures vertes sont classifiées selon les prédictions du modèle : généralement comme imperméables. Les toitures vertes avec des potagers sont classifiées comme perméables mais elles sont rares à Bruxelles.



Indicateurs complémentaires ou alternatifs (indicateur « idéal ») :

- Types et perméabilité des revêtements de sols
- Occupation du sol (bâti, routes, zones vertes, zones d'eau, etc.)

Données complémentaires (pour interprétation, analyse plus fine...) :

- Taux de végétalisation
- Couverture végétale
- Dispositifs de GiEP (Gestion intégrée des Eaux Pluviales)

4 LIENS AVEC D'AUTRES INDICATEURS OU DONNEES (RAPPORTS SUR L'ETAT DE L'ENVIRONNEMENT BRUXELLOIS)

- Espaces verts et biodiversité – La couverture végétale en Région bruxelloise
- Espaces verts et biodiversité – Fragmentation des habitats naturels
- Climat – Cartographie des îlots de chaleur à Bruxelles
- Cartographie relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondations

5 PRINCIPALES INSTITUTIONS IMPLIQUEES DANS LE DEVELOPPEMENT D'INDICATEURS SIMILAIRES (EUROPE, BELGIQUE, AUTRE SI PERTINENT)

- Agence Européenne de l'Environnement – Indicateur « Imperviousness and change in Europe »
<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/imperviousness-and-imperviousness-change-in-europe>
- Région wallonne : Etat de l'environnement wallon - « Imperméabilisation des sols »
<http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicator sheets/SOLS%20Focus%201.html>
- Région flamande : Departement Omgeving, Indicator « Verharding »
<https://indicatoren.omgeving.vlaanderen.be/indicatoren/verharding> en Jaarlijkse bodemafdekkingskaart Vlaanderen
<https://omgeving.vlaanderen.be/nl/jaarlijkse-bodemafdekkingskaart-vlaanderen-jaarbak>

6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES (METHODOLOGIE, INTERPRETATION)

- WEO, juillet 2023. « Carte des surfaces imperméables de la Région de Bruxelles-Capitale 2022 ». Etude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement. Parties 1 et 2. 54 pp. Disponible sur :
https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/Rapport_Partie_1-2_Carte_Impermeable_Bruxelles_vf.pdf
Partie 3 – Revêtements perméables, toitures vertes, terrains de sport. 20 pp. Disponible sur :
https://document.environnement.brussels/opac_css/doc_num.php?explnum_id=11044
- ULB-IGEAT (S. Vanhuysse, J. Depireux et E. Wolff), octobre 2006. « Etude de l'évolution de l'imperméabilisation du sol en Région de Bruxelles-Capitale ». Etude réalisée pour le compte du Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale - AED – Direction de l'eau. 60 pp. Disponible sur :
https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/STUD_2006_ImpermeabiliteSolsRBC
- REGLEMENT (UE) 2024/1991 DU PARLEMENT EUROPEEN ET DU CONSEIL du 24 juin 2024 relatif à la restauration de la nature et modifiant le règlement (UE) 2022/869. J.O. du 29.7.2024. 93 pp. Disponible sur : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202401991
- COMMISSION EUROPEENNE, novembre 2021. « Stratégie de l'UE pour la protection des sols à l'horizon 2030 – Récolter les fruits de sols en bonne santé pour les êtres humains, l'alimentation, la nature et le climat ». COM/2021/699 final. Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité Economique et Social européen et au Comité des Régions. 31 pp. Disponible sur : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0699>
- Proposition de DIRECTIVE DU PARLEMENT EUROPEEN ET DU CONSEIL relative à la surveillance et à la résilience des sols, juillet 2023. COM/2023/416 final. 74 pp+19 pp d'annexes. Disponible sur : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A52023PC0416>
- BRUXELLES ENVIRONNEMENT, adoptée en mai 2024. « Stratégie Good Soil – Vers une gestion intégrée et durable des sols bruxellois ». 17 pp. Disponible sur : <https://environnement.brussels/goodsoil>



7 COUVERTURE SPATIO-TEMPORELLE

Série temporelle disponible :

2022

Remarque importante : Des cartes pour 1955, 1970, 1985, 1993, 2006 sont disponibles (ULB-IGEAT, 2006) mais elles ne peuvent être comparées à cet indicateur ; pour ce faire, une autre carte a été produite : voir « limitation / précaution d'utilisation de l'indicateur » et l'autre fiche méthodologique.

Couverture spatiale des données :

Région, raster de 1m x 1m

Date de dernière mise à jour de l'indicateur :

Juillet 2024

Date de dernière mise à jour de cette fiche méthodologique :

Juillet 2024

