

CARTE DES SURFACES IMPERMÉABLES DE LA
RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE 2022

RAPPORT

BRUXELLES ENVIRONNEMENT

Avenue du port 86C/3000
1000 Bruxelles



bruxelles
environnement
leefmilieu
brussel
.brussels 

WEO 

2023

Table des Matières :

1	Introduction	4
2	Méthodologie.....	5
2.1	Approche Méthodologique.....	5
2.2	Données Utilisées.....	6
2.2.1	Zone d'intérêt	6
2.2.2	Images satellitaires et aériennes	6
2.2.3	Occupation du sol	11
2.3	Classification Perméable/Imperméable.....	11
2.4	Prétraitement.....	12
2.5	Modèle d'apprentissage profond	13
2.6	Post-Traitement	15
2.7	Vérification.....	16
2.8	Evolution de 2006 à 2022	17
3	Résultats.....	20
3.1	Comparaison des modèles.....	20
3.2	Performance du modèle	21
3.2.1	Contextualisation des performances du modèle 2022.....	21
3.2.2	Comparaison des modèles 2006 et 2022.....	22
3.3	Imperméabilité par Commune en 2022.....	24
3.4	Evolution de Perméabilité 2006 – 2022.....	26
3.5	Evolution de la perméabilité 1955 – 2022	29
4	Conclusions	30
5	Références	31
	Appendice A : Comparaison détaillée des modèles.....	32
	Appendice B : Notes de vérification.....	35

Document :

Client :	Bruxelles Environnement
Auteur(s) :	Charlotte Wirion (WEO), Rowan Steele (WEO)
Approbation :	Imeshi Weerasinghe (WEO)
Statut :	Final v4.0 (Partie 1 + 2)
Date :	14 juillet 2023

Liste des Acronymes :

Acronyme	Description
CNN	Réseau neuronal convolutif
MS	Multispectral
OSM	Open Street Map
PAN	Panchromatique
PIR	Proche infrarouge
SWIR	Short-Wave InfraRed (Infrarouge de courte longueur d'onde)

1 Introduction

Bruxelles Environnement a commandé une étude de WEO sur l'évolution des surfaces imperméables dans la Région de Bruxelles-Capitale en 2022. La précédente carte des zones imperméables en Région de Bruxelles-Capitale date de 2006 (Vanhuysse et al., 2006). Dans le cadre de cette étude, 6 cartes avaient été élaborées pour illustrer l'évolution de l'imperméabilité du sol en RBC entre 1955 et 2006. Des études ont par ailleurs été menées récemment par Bruxelles Environnement sur le taux de végétalisation de la région (Bruxelles Environnement, 2022).

L'objectif de la présente étude est triple :

- La première partie de l'étude consiste à cartographier précisément les surfaces imperméables actuelles.
- La deuxième partie de l'étude consiste à comparer la situation actuelle des surfaces imperméables à la carte précédente de 2006.
- La troisième partie de l'étude consiste à élaborer une méthode pour parvenir à une cartographie plus détaillée des différents types de matériaux utilisés pour l'empierrement et le semi-empierrement.]

L'évolution des surfaces imperméables dans la région est de grand intérêt pour plusieurs applications, y compris pour :

- Comprendre l'évolution des surfaces imperméables dans les différentes communes de la région – pour le terrain privé et public.
- Eclairer la politique de développement de la région
- Paramétrer les modèles hydrauliques/hydrologiques
- Définir les îlots de chaleurs
- Définir les orientations des futures études approfondies sur le réaménagement de quartiers spécifiques
- Alerter sur la 'perte' de surfaces perméables

Puisque Bruxelles Environnement a envie de mettre à jour la carte régulièrement, WEO a proposé deux méthodes différentes pour élaborer la carte. Une première méthode basée sur les images satellitaires de Sentinel-2 et l'orthophoto aérienne de la région et une deuxième basée sur les images satellitaires haute résolution commerciales de WorldView-2.

2 Méthodologie

2.1 Approche Méthodologique

Les méthodes utilisées pour les deux modèles sont présentées en Figure 1 pour Sentinel-2 et Figure 2 pour WorldView-2.

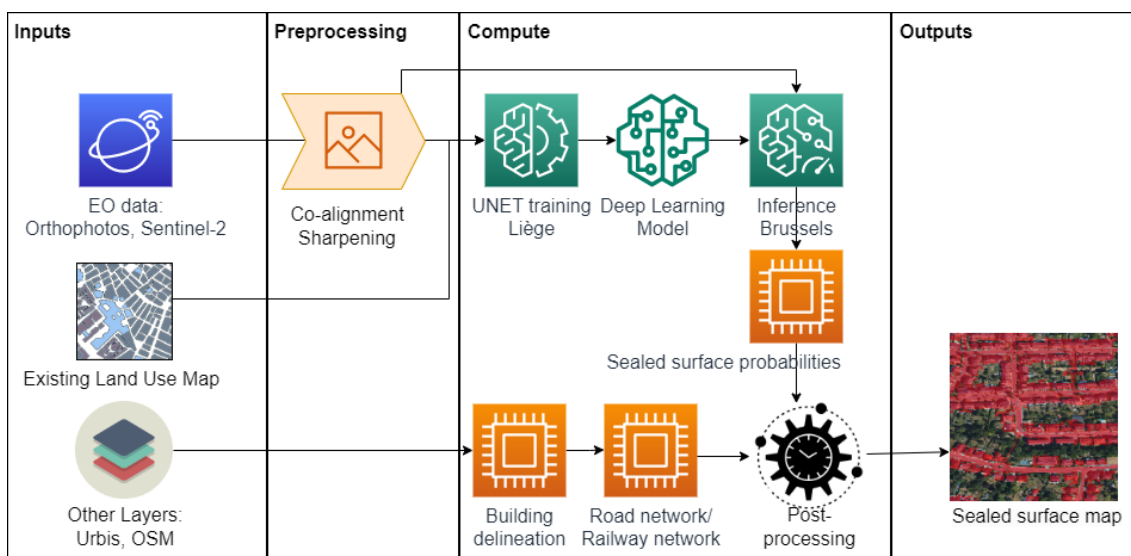


Figure 1: Méthode 1 : Sentinel-2. Sommaire de Méthodologie

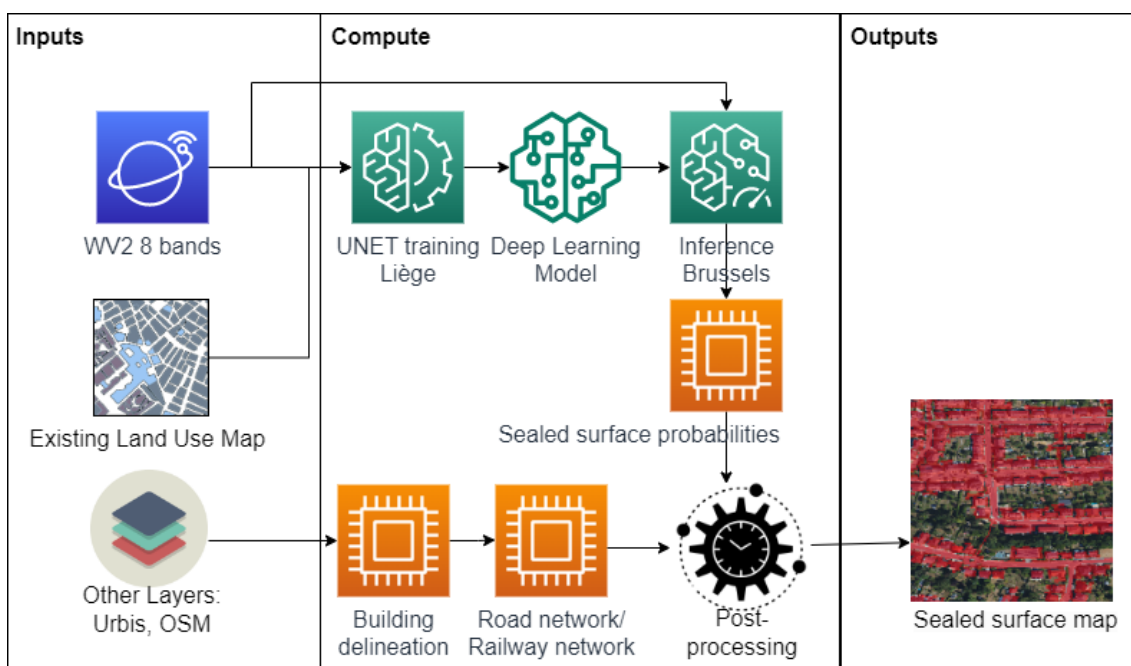


Figure 2: Méthode 2 : WorldView-2 Sommaire de Méthodologie

2.2 Données Utilisées

WEO a utilisé un modèle d'apprentissage automatique. Pour élaborer un modèle de ce type, il faut tout d'abord un ensemble de données pour entraîner le modèle. Puis, il faut déployer le modèle pour le lieu d'intérêt. WEO a analysé plusieurs options pour un ensemble de données pour entraîner le modèle, mais a sélectionné la Wallonie pour les raisons suivantes :

- Disponibilité d'une carte de couverture du sol de la résolution d'1m de 2020 avec une précision urbaine de 93.4%. La carte a été développée en 2018 et actualisée en 2019 et 2020.
- Disponibilité d'une image satellitaire de haute-résolution WorldView-2 pour une période similaire (Mars 2021).
- Disponibilité d'orthophotos aériennes de haute-résolution de 2018, 2019, 2020 et 2022.
- Bonne ressemblance avec Bruxelles, avec les zones de caractéristiques similaires à Bruxelles (Liège, Charleroi).

2.2.1 Zone d'intérêt

La limite de la zone d'intérêt pour cette étude est la région de Bruxelles-Capitale. Les zones pour entraîner les modèles d'apprentissage profond sont Liège et Charleroi en Wallonie.

2.2.2 Images satellitaires et aériennes

Pour élaborer une carte avec une résolution d'un mètre, il faut une image satellitaire ou aérienne d'une résolution inférieure à 1m. WEO propose un premier modèle qui combine des orthophotos aériennes avec Sentinel-2 et un deuxième modèle avec WorldView-2.

Sentinel-2 + Orthophoto

Le premier modèle utilise les images satellitaires de Sentinel-2. Un Satellite de l'Agence Spatiale Européenne lancé en 2014 et avec une bonne couverture depuis 2017, il a l'avantage de réaliser une nouvelle image de l'Europe tous les cinq jours. Le satellite est optimisé pour surveiller la couverture du sol et la végétation – avec 8 bandes dans le spectre visible et proche infrarouge et 2 bandes additionnelles dans le SWIR. Le désavantage de Sentinel-2 est sa résolution de 10m. Pour cette raison, WEO a augmenté la résolution avec une approche d'apprentissage automatique utilisant comme entraînement les orthophotos aériennes disponibles dans les zones d'intérêts et les années de référence.

Tableau 1: Principales caractéristiques – Sentinel-2

Sentinel-2															
Lancement	2015 (Sentinel 2-A) 2017 (Sentinel 2-B)														
Dates Entraînement	Toutes les images disponibles entre juin et juillet 2018, 2019, 2020														
Dates Déploiement	Modèle hiver : toutes les images entre janvier et mars 2022 Modèle été : toutes les images entre juin et juillet 2022														
Bandes Spectrales	<table border="1"> <tr> <td>1- Aérosol Côtier</td> <td>8- PIR</td> </tr> <tr> <td>2- Blue</td> <td>8A- PIR 'étroit'</td> </tr> <tr> <td>3- Vert</td> <td>9-Vapeur d'eau</td> </tr> <tr> <td>4 - Rouge</td> <td>10-SWIR-Cirrus</td> </tr> <tr> <td>5- 'Red Edge'</td> <td>11-SWIR</td> </tr> <tr> <td>6- 'Red Edge'</td> <td>12-SWIR</td> </tr> <tr> <td>7- 'Red Edge'</td> <td></td> </tr> </table>	1- Aérosol Côtier	8- PIR	2- Blue	8A- PIR 'étroit'	3- Vert	9-Vapeur d'eau	4 - Rouge	10-SWIR-Cirrus	5- 'Red Edge'	11-SWIR	6- 'Red Edge'	12-SWIR	7- 'Red Edge'	
1- Aérosol Côtier	8- PIR														
2- Blue	8A- PIR 'étroit'														
3- Vert	9-Vapeur d'eau														
4 - Rouge	10-SWIR-Cirrus														
5- 'Red Edge'	11-SWIR														
6- 'Red Edge'	12-SWIR														
7- 'Red Edge'															
Revisite	5 jours (à l'équateur)														
Résolution	10m (visible) 10-20m (PIR) 20m (Red Edge) 20m (SWIR) 60m (autres)														

WEO a utilisé plusieurs images de Sentinel-2 pour aider le modèle à différencier les surfaces naturelles et imperméables.



Figure 3: Composé en couleur naturelle Sentinel-2 - 8 mars 2022 – Bruxelles



Figure 4: Composé en couleur naturelle Sentinel-2 - 8 mars 2022 – Parc Cinquantenaire

Pour augmenter la résolution de Sentinel-2, WEO a utilisé les orthophotos aériennes. Pour l’entraînement des modèles à Liège et à Charleroi, les orthophotos de la Région wallonne ont été utilisées à partir des étés 2018, 2019 et 2020. Pour le résultat final, une orthophoto d’été d’UrbIS a été utilisée, ainsi qu’une orthophoto d’hiver de Digital Vlaanderen. De plus amples détails peuvent être trouvés dans le tableau 2.



Figure 5: Orthophoto – 7 mars 2022 – Parc Cinquantenaire

Tableau 2: Principales caractéristiques – Orthophotos Aériennes utilisées

	Bruxelles	Wallonie
Dates	Été : 19 juillet 2022 Hiver : 7 mars 2022	5 mai – 4 août 2018 5 mai – 4 août 2019 1 avril - 24 avril 2020
Bandes Spectrales	Été : Rouge/Bleu/Vert + PIR Hiver : Rouge/Bleu/Vert	Rouge/Bleu/Vert + PIR
Résolution	Été : 40cm Hiver : 15cm	25cm
Source :	Été : UrbIS ¹ Hiver : Digital Vlaanderen ²	Service public de Wallonie ³

Modèle 2 : WorldView-2

En comparaison avec le modèle basé sur Sentinel-2, nous avons produit un modèle basé sur des images commerciales satellitaires de très haute résolution. WorldView-2 a été choisi par rapport à d'autres satellites de très haute résolution pour les raisons suivantes :

- Disponibilité d'une image claire en Wallonie (dans une grande ville) en mars 2020
- Disponibilité d'une image claire à Bruxelles en mars 2022
- Résolution de moins d'un mètre
- Images multispectrales

Tableau 3: Principales caractéristiques – WorldView-2

	WorldView-2
Lancement	2009
Bandes Spectrales	Panchromatique Bleu côtier Bleu Vert Jaune Rouge 'Red Edge' PIR1 PIR2
Résolution	0,46m @ Nadir (pan) 1,8m @ Nadir (MS)

Les images sélectionnées pour cette étude ont les caractéristiques indiquées dans le Tableau 4 ci-dessous.

¹ <https://datastore.brussels/web/urbis-download>

² <https://metadata.vlaanderen.be/metadatacenter/srv/dut/catalog.search#/metadata/f5304d6d-0dd4-43fd-a726-427af31e8d61>

³ <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/7369222c-5241-452a-af07-4929506212f9.html>

Tableau 4: Caractéristiques des images satellitaires utilisées - WorldView-2

	Image d'entraînement	Image d'inférence
Localisation	Liège	Bruxelles
Date	1/3/2021	5/3/2022
Surface (km ²)	152	167
Numéros de référence	10300500AFF8B700	10300500C7F8E700 10300500C7F8E900
Couverture nuageuse	0%	0%
Élévation du soleil	31°	32°
Off-Nadir	24,5°	11°/20,5°
Product	WorldView-2 8 Bands	
Niveau de traitement	1 : 12k Orthorectifié	



Figure 6: Image RVB de WorldView-2 (Liège)

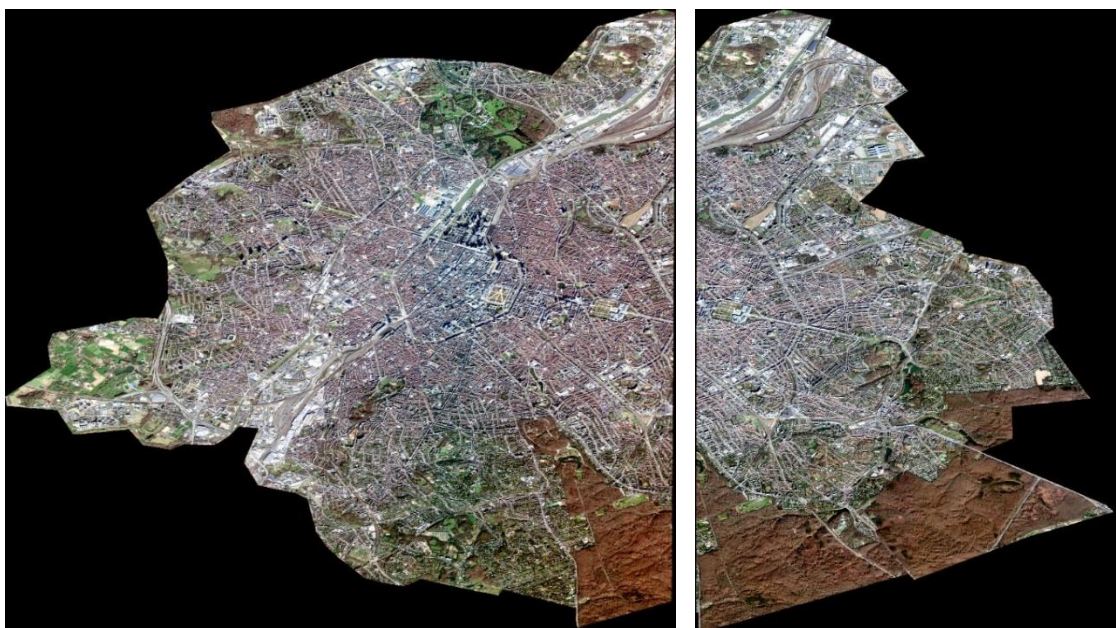


Figure 7: Images RVB de WorldView-2 (Bruxelles Ouest et Est)

2.2.3 Occupation du sol

La référence pour l’entraînement du modèle d’apprentissage profond était une carte de l’occupation du sol en Wallonie de 2020⁴. Le projet WALOUS a produit la carte avec une précision de 93,4% dans les zones urbaines. La correspondance entre les catégories de cette carte et la perméabilité se trouve ci-dessous.

Tableau 5: Désignation de perméabilité des classes de la Carte d’occupation du sol WALOUS 2020

Classe	Catégories – WALOUS 2020
Perméable	Eau Couvert herbacé continu Couvert herbacé en rotation Sols nus Arbres Feuillus Arbres Résineux
Imperméable	Revêtement artificiel du sol Constructions artificielles hors sol

2.3 Classification Perméable/Imperméable

Sur le terrain, il existe un spectre de classes entre complètement perméable et complètement imperméable. Pour assurer que la carte soit bien adaptée aux usages envisagés pour celle-ci, les classifications pour les surfaces complexes ont été définies comme suit :

- Les toitures vertes ont une capacité limitée pour absorber la pluie. Pour simplifier, en général, les toitures ‘extensives’ sont considérées comme imperméables et les toitures ‘intensives’, perméables. Mais puisque le modèle ne peut pas voir la profondeur du substrat et comme les toitures intensives sont rares à Bruxelles, toutes les toitures vertes seront considérées imperméables.
- Les chemins de fer : Il a été décidé que les rails seront catégorisés selon les prédictions du modèle (perméable ou imperméable).
- Les terrains de sports : Les terrains de sports peuvent être perméables (comme les terrains de football naturels), semi-perméables (les terrains de tennis en gazon ou en argile) ou imperméables (comme les terrains de foot artificiels, les courts de tennis en béton). En réalité, le modèle a des difficultés à faire la distinction entre les terrains de sports artificiels et naturels. Les terrains de gazon naturels et artificiels seront donc catégorisés perméables par le modèle. Les courts de tennis en argile ou en béton seront imperméables.
- La zone perméable autour des arbres de rue sera catégorisée comme imperméable s’il y a du gravier ou du sol très compacté, mais comme perméable s’il y a de la végétation.
- Les parkings avec des traitements spécifiques pour augmenter la perméabilité seront difficiles à reconnaître par le modèle et seront classifiés comme imperméables.

⁴ <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/47b348f1-6e7a-4baa-963c-0232a43c0cff.html>

2.4 Prétraitement

Le traitement des images satellitaires n'est pas le même pour Sentinel-2 et WorldView-2.

Pour Sentinel-2 nous utilisons toutes les images Sentinel-2-L2A disponibles entre janvier et mars pour l'hiver ou juin et juillet pour l'été avec une couverture nuageuse inférieure à 80% (1 image disponible tous les 5 jours). Le prétraitement pour Sentinel-2 consiste en :

- la création d'un masque nuage-ombre avec cm-predict,⁵
- le co-alignement de l'orthophoto et des images Sentinel-2 et
- l'augmentation de la netteté de toutes les bandes Sentinel-2 à une résolution spatiale de 1m.

En raison de la sous-estimation du masque de nuage Sen2Cor (inclus dans le produit de niveau 2) lors de la détection d'ombres de nuages et de petits nuages fragmentés, nous avons décidé d'utiliser un algorithme de masquage de nuage alternatif (avec licence open source) développé par kappazeta⁶. Il génère un masque de sortie « .tif » géoréférencé de 10 m avec des nuages clairs, des ombres de nuages, des nuages semi-transparents, des nuages et des classes manquantes atteignant un score de coefficient de Dice de 79 % (55 % pour Sen2Cor avec le même jeu de données).

Après le masquage des nuages-ombres, nous combinons les images Sentinel-2 de la période utilisée en une seule image en utilisant la moyenne du signal par bande spectrale. L'orthophoto et l'image Sentinel-2 obtenue sont d'abord co-alignées pour s'assurer que chaque pixel est au même emplacement.

Ensuite, un régresseur de forêt aléatoire est formé avec les bandes RVB de l'orthophoto à 1m rééchantillonnées à basse résolution (10 ou 20 m) et les bandes respectives à basse résolution. Puis appliqué aux bandes basse résolution pour obtenir une représentation à 1m de résolution des données basse résolution (Wang et al., 2019). Les ombrages à haute résolution présentes dans l'orthophoto sont introduites dans les images de Sentinel-2 avec cette approche.

⁵ https://github.com/kappazeta/cm_predict

⁶ <https://kappazeta.ee>

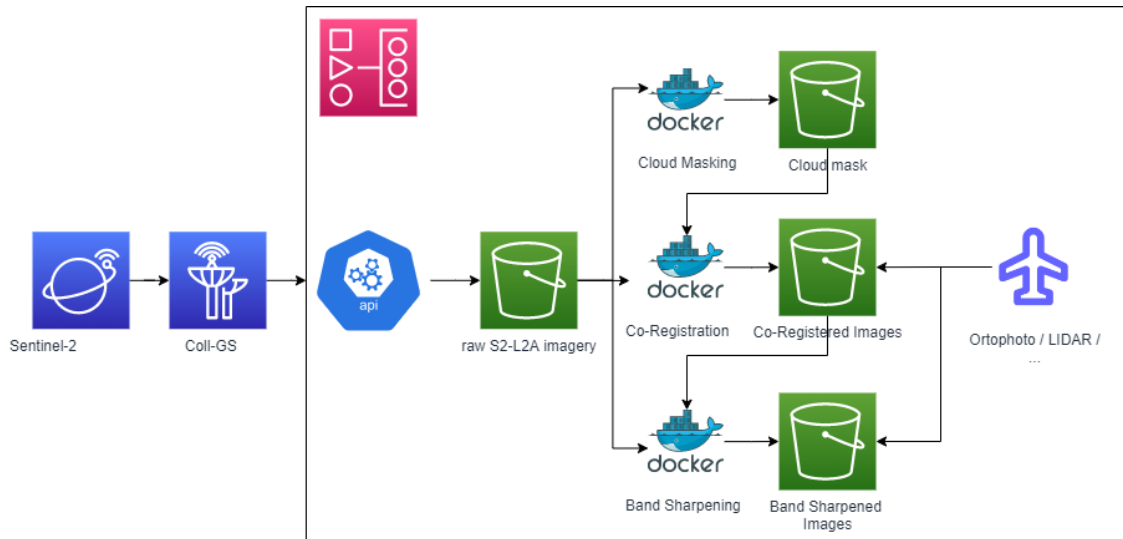


Figure 8: Prétraitement des images Sentinel-2 pour le modèle d'apprentissage profond

Pour WorldView-2, nous utilisons les techniques de *pansharpening*, qui utilisent une bande panchromatique (PAN) à 45cm (rééchantillonné à 1m) pour augmenter la netteté des bandes multispectrales de 1,8m à 1m. Il n'y a qu'une image WorldView-2 pour Liège et une image pour Bruxelles qui sont utilisées dans ce projet.

2.5 Modèle d'apprentissage profond

U-Net est une architecture de réseau neuronal convolutif (CNN) qui a été initialement proposée pour la segmentation d'images biomédicales, mais qui a depuis été appliquée à un large éventail de tâches de vision par ordinateur. Elle a été introduite par Olaf Ronneberger, Philipp Fischer et Thomas Brox dans leur article de 2015 intitulé "U-Net : Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation".

L'innovation clé de l'architecture U-Net est son utilisation d'une forme en "U", qui se compose d'un chemin de contraction et d'un chemin d'expansion. Le chemin de contraction capture le contexte de l'image à plusieurs échelles en réduisant progressivement la résolution de l'image, tout en augmentant le nombre de canaux de caractéristiques. Le chemin d'expansion restaure ensuite la résolution de l'image en augmentant la taille des cartes de caractéristiques, tout en utilisant des connexions sautées pour combiner les caractéristiques de bas niveau du chemin de contraction avec les caractéristiques de haut niveau du chemin d'expansion.

Cette architecture en forme de U s'est avérée très efficace pour les tâches de segmentation d'images et a déjà très bien fonctionné pour la segmentation de la couverture terrestre au Luxembourg. Notre architecture U-Net se compose alternativement de 3 ou 4 couches répétées combinant des convolutions 3x3, une activation *Rectified Linear Unit* (ReLU) et un pooling max de 2x2 dans la partie encodeur, et des convolutions inversées de 3x3 avec une activation ReLU similaire dans la partie décodeur. Nous utilisons une fonction de perte binaire pondérée par classe et alternativement un optimiseur ADAM ou la descente de gradient stochastique.

Le tableau 6 est un récapitulatif des données utilisées pour l'entraînement du modèle et la prédiction à Bruxelles respectivement avec les images Sentinel-2 et WorldView-2. Nous utilisons la précision de la validation comme critère pour l'optimisation du modèle.

Pour entraîner le modèle WorldView-2, nous avons testé deux approches: la première utilisant seulement les données de la prédiction hivernale de Bruxelles avec Sentinel-2; la seconde utilisant également une image de Liège afin d'augmenter le volume de données. De moins bons résultats ont été obtenus avec la seconde approche : les différences entre l'image WorldView-2 de Liège et celle de Bruxelles étaient trop importantes. C'est donc la première approche qui a été retenue au final, à savoir celle se limitant aux données de Bruxelles.

Tableau 6: Données satellitaires utilisés pour entrainer le modèle d'apprentissage profond

	Sentinel-2 Modèle	WorldView-2 Modèle
Images pour entrainement	Sentinel-2 + Orthophoto	WorldView-2
Bandes Spectrales	9	5
Régions pour entrainement	Liège, Charleroi	(Liège), Bruxelles
Périodes pour entrainement	Juin – juillet 2018, 2019, 2020	21 mars 2021 Janvier – mars 2022
Carte d'entrainement	Occupation du sol - WALOUS 2018, 2019, 2020	(Occupation du sol – WALOUS 2020) Prédiction du modèle Sentinel-2 hivernale de Bruxelles
Périodes pour prédiction	Modèle hiver : Janvier – mars 2022 Modèle été : Juin – juillet 2022	22 mars 2022

2.6 Post-Traitement

Le post-traitement peut être utilisé pour augmenter la précision et la cohérence des classifications de perméabilité lorsqu'il existe une carte très à jour de haute précision pour une couverture de sol spécifique. Pour l'étude de 2006, les données d'UrbIS ont été largement utilisées pour le post-traitement. Les avantages du post-traitement sont :

- Une augmentation de la précision du modèle pour les types de couverture du sol qui changent rarement (par exemple l'eau)
- La cohérence avec les autres couches d'UrbIS

Les désavantages du post-traitement sont :

- Une classification imprécise lorsque l'imperméabilité est variable au sein d'une même utilisation du sol (par exemple les accotements plantés le long des routes)
- La difficulté à reproduire un résultat sans accès aux ensembles de données historiques
- Le recours à des ensembles de données avec des niveaux de précision ou d'actualité potentiellement inconnus

Pour cette étude, le groupe de pilotage a décidé que le post-traitement appliqué au résultat du modèle d'apprentissage serait différent selon les parties de l'étude :

- d'un côté, un post-traitement limité pour obtenir la carte finale des surfaces imperméables en 2022 (partie 1 de l'étude).
- de l'autre côté, un post-traitement similaire à celui utilisé par l'étude de 2006 pour comparer l'évolution de l'imperméabilisation entre 2006 et 2022 (partie 2 de l'étude).

Post-traitement – Résultat final des surfaces imperméables en 2022 (partie 1 de l'étude)

L'objectif ici est triple: avoir le résultat le plus précis possible, que l'étude soit reproductible avec des images satellites et que le résultat ne dépende pas trop d'autres données. Alors le post-traitement est limité à :

1. Combinaison des surfaces imperméables des résultats d'hiver et d'été.

2. Dans les zones d’ombrages plus présentes en hiver, seules les surfaces imperméables du modèle d’été sont retenues.
3. L’utilisation de la couche UrbIS pour les zones d’eau (Tableau 7).

Post-traitement – Comparaison avec l’étude de 2006 (partie 2 de l’étude)

Pour mieux estimer l’évolution de l’imperméabilisation entre 2006 et 2022 de la Région bruxelloise nous essayons de limiter l’influence de la méthodologie en adoptant un post-traitement similaire à celui de 2006 où plusieurs données UrbIS avaient été utilisées (Tableau 7).

Tableau 7: Couches UrbIS pour post-traitement

Couches UrbIS 2006 ⁷	Couches UrbIS 2022	Classification de la surface
Ss : Surfaces de rues	UrbAdm_STREET_SURFACE_LEVEL0 : type : S,I, B, PB, A, W, C, AC, IC, K, SC, IL	Imperméable
Bu : Bâtiments	UrbAdm_BUILDING	Imperméable
Rb : Zones de chemin de fer	UrbAdm_RAIL	Perméable
Wb : Zones d'eau	UrbAdm_STRETCH_OF_LAND : type : WB UrbAdm_BLOCK : type : WB	Perméable
Gb : Zones vertes.	UrbAdm_BLOCK : type : GB	Perméable

Les couches qui ajoutent à l’imperméabilisation sont les bâtiments et les routes. La couche des zones d’eaux est utile pour convertir certains pixels en perméables qui, à cause de la sédimentation ou autre, ont été mal classifiés comme imperméables. La couche des zones vertes et celle des rails sont classifiés comme perméables.

2.7 Vérification

Pour évaluer la précision des résultats, WEO a utilisé les images aériennes et *Google Street View* pour classier manuellement 7.600 pixels. Tout d’abord, la région a été divisée en 19 zones de 3km x 3km. Dans chaque zone de 9km², on a employé un algorithme pour sélectionner aléatoirement un bloc de vérification de 20 m x 20 m (400 pixels).

⁷ L’année des couches vecteurs d’UrbIS n’est pas mentionnée dans l’étude précédente

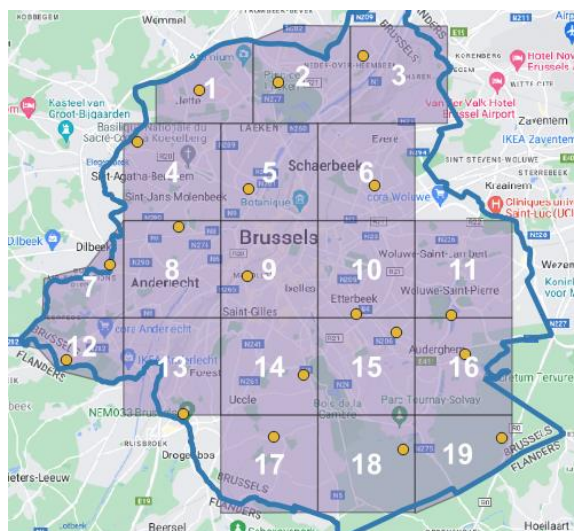


Figure 9 : Emplacement des blocs de vérifications dans chaque zone de la ville

Puis nous avons utilisé un mélange de plusieurs Orthophotos, couches UrbIS et *Google Street View* pour classer chaque bloc de 20x20m. Cette carte vectorielle a ensuite été convertie en raster, selon la majorité de couverture dans le pixel de 1m x 1m.

Un exemple de la classification se trouve ci-dessous, avec une image de *Google Street View* qui montre que la pergola est pavée et alors imperméable.



Figure 10: Exemple de bloc de vérification

2.8 Evolution de 2006 à 2022

Objectif

La deuxième partie du marché consiste à comparer les changements au niveau des surfaces imperméables par rapport à une étude sur l'imperméabilité de Bruxelles réalisée par l'ULB/IGEAT pour le ministère de la Région de Bruxelles-Capitale, Administration de l'Équipement et des Déplacements/Direction de l'Eau (Vanhuysse et al. 2006). Cette étude a débouché sur une image

raster binaire de résolution 60cm (les données sources étant Landsat 30m, QuickBird 2,4m avec une orthophoto d'UrbIS de 2004).

Une mission délicate

Les différences dans les données de télédétection disponibles et la technique de modélisation peuvent influencer l'imperméabilité prédite dans les études de 2006 et de 2022. L'objectif de cette phase est donc de comprendre au mieux l'impact de ces différences et de les isoler des vraies différences d'étanchéité sur le terrain.

Malheureusement, une comparaison directe avec les résultats de 2006 n'est pas possible en raison d'une différence dans la zone d'étude. L'étude de 2006 était centrée sur les limites des bassins versants et donc de petites zones au nord et au sud de la région bruxelloise n'ont pas été cartographiées, comme le montre la figure ci-dessous. Ces zones non incluses en 2006 sont majoritairement perméables.

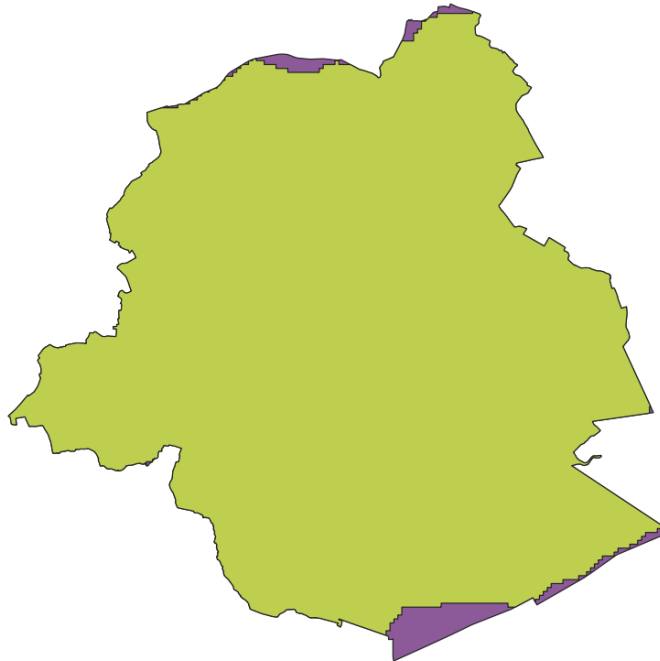


Figure 11: Violet : Partie de la Région bruxelloise non incluse dans l'étude de 2006. Vert : Portion de Bruxelles incluse dans les deux études

L'étude de 2006 a utilisé des techniques de post-traitement qui n'ont pas été utilisées en 2022. Pour réduire l'impact des différences de modèle dans la comparaison, un post-traitement accru, comme indiqué dans le paragraphe 2.6 p. 15, a été ajouté au modèle de 2022.

Méthodologie de comparaison utilisée

Afin de préciser si les différences entre les résultats de 2006 et 2022 étaient dues aux différences entre les images de télédétection et les modèles utilisés, ou si elles représentent un changement véridique sur la surface de Bruxelles, nous avons en outre classifié la précision de l'étude de 2006 avec les

mêmes 7.600 pixels de vérification (19 blocs de 400 pixels), utilisant une orthophoto de 2004 - la même orthophoto utilisée dans la prédiction du modèle (cf. Tableau 8).

Tableau 8: Caractéristiques – Orthophoto Bruxelles 2004

Date	31 mars 2004
Bandes Spectrales	RVB
Résolution	10cm
Source	UrbIS (A la demande)

Afin de comprendre encore mieux les différences entre les modèles, un bloc de vérification a été choisi aléatoirement dans chacune des six zones d'intérêt avec un fort changement entre 2006 et 2022. Ces zones supplémentaires n'ont pas été utilisées pour les calculs d'erreur du modèle.

1. La prison de Haren (de perméable à imperméable)
2. Le site du campus hospitalier Bordet-Erasme (de perméable à imperméable)
3. La friche Josaphat (d'imperméable à perméable)
4. Le parc de la porte de Ninove (d'imperméable à perméable)
5. Tour & Taxis (Mixte)
6. Triangle Delta (Mixte)

Au total, le rapport a donc étudié 25 blocs de 400 pixels (soit 10.000 pixels).

3 Résultats

3.1 Comparaison des modèles

Trois modèles ont été développés dans cette étude, en raison des forces et faiblesses potentielles de chaque approche. Deux modèles ont utilisé les observations de la base Sentinel-2, qui ont ensuite été affinées à la résolution de 1m à l'aide d'une orthophoto aérienne. Ces modèles diffèrent par l'utilisation d'images satellites d'été pour l'un et d'images hivernales pour l'autre. Le troisième modèle a utilisé un ensemble de données du satellite commercial haute résolution WorldView-2 (qui a une bande panchromatique avec une résolution de 50 cm, et les bandes multispectrales à 1,8 m) – rééchantillonné à une résolution de 1 m.

Un résumé des performances de chacun de ces modèles est présenté dans le Tableau 9. La précision indique si la classification du modèle est correcte, et donc si tout ce que le modèle classe comme imperméable est vraiment imperméable. Le rappel indique si les surfaces imperméables existantes en réalité (dans nos pixels de vérification) sont bien classifiées comme imperméables par le modèle. Le f-score combine ces 2 mesures dans une seule métrique en utilisant la moyenne harmonique et indique donc bien lequel des modèles est le plus exact.

En général, pour tous les modèles, la précision est supérieure au rappel indiquant que les modèles sous-estiment les surfaces imperméables existantes. Cette différence est moins prononcée pour le modèle Sentinel-2 hiver. Il a donc été décidé qu'en raison d'une exactitude supérieure et de la possibilité de reproduire plus facilement et à moindre coût les résultats avec des données open source dans le future, un modèle Sentinel-2 est sélectionné.

Afin d'allier les avantages de Sentinel-2 hiver et été, un quatrième modèle, combinant les deux résultats, a été créé. Ce modèle final nommé Sentinel-2 combiné, combine les zones imperméables détectées des modèles d'été et d'hiver, sauf dans les zones d'ombrages en hiver où seulement ceux du modèle d'été sont pris en compte. La couche des zones d'eau UrbIS a également été superposée pour garantir que toutes les zones d'eau sont marquées comme perméables.

Tableau 9: Comparaison des modèles développées

	Sentinel-2 hiver	Sentinel-2 été	Sentinel-2 combiné	WorldView-2
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> Moins d'interférences de la canopée des arbres 	<ul style="list-style-type: none"> Les vraies zones perméables ont été très bien détectées 	<ul style="list-style-type: none"> L'approche combinée réduit les effets de canopée et d'ombrage. 	<ul style="list-style-type: none"> Une résolution spatiale supérieure dès le début
Désavantages	<ul style="list-style-type: none"> Impact plus élevé des ombrages 	<ul style="list-style-type: none"> Les zones imperméables ont été moins bien détectées, à cause de la canopée des arbres. 		<ul style="list-style-type: none"> Un volume inférieur de données d'entraînement entraîne une précision moindre. Dépend d'images satellitaires commerciales
Précision	0,959	0,975	0,960	0,971
Rappel	0,888	0,785	0,888	0,772
f-score	0,923	0,870	0,923	0,860
Sélection			Sélectionnée	

3.2 Performance du modèle

3.2.1 Contextualisation des performances du modèle 2022

Le modèle final a obtenu un f-score de 0,923. Ce résultat signifie que 92 % des 7.600 zones de vérification de 1 x 1m étaient correctement marquées par le modèle. Le Tableau 10 montre que 95 % des zones perméables réelles ont été correctement marquées comme perméables, tandis que 89 % des zones imperméables réelles ont été correctement marquées comme imperméables. Il y a donc plus de surfaces imperméables classifiées comme perméables par le modèle : autrement dit, le modèle tend à sous-estimer l'imperméabilité réelle. L'exactitude du modèle indique une bonne qualité du modèle et suggère qu'il est adapté pour l'objectif de cette étude.

Tableau 10: Matrice de confusion du modèle sélectionné : Sentinel-2 combiné 2022. Lignes : vérité terrain, colonnes prédictions du modèle, normalisé avec les valeurs vérité terrain

		Prédiction du modèle	
		Surfaces imperméables	Surfaces perméables
Classe réelle	Surfaces imperméables	0,888	0,112
	Surfaces perméables	0,048	0,953

Pour contextualiser l'exactitude de cette étude, nous avons utilisé une classification simplifiée comme point de référence. Cette classification est une estimation basique de la perméabilité de Bruxelles basée sur les couches d'occupation du sol d'UrbIS de 2022. La principale limitation d'une estimation avec les couches d'UrbIS existantes est l'incapacité de différencier les surfaces imperméables et perméables sur les terrains privés. Le modèle final a une performance supérieure à la classification simplifiée (f-score = 0,825).

Tableau 11: Comparaison de la précision avec un chiffre de référence

Surfaces Imperméables	Etude 2022	Classification simplifiée ⁸
Précision	0,960	0,996
Rappel	0,888	0,705
f-score	0,923	0,825

3.2.2 Comparaison des modèles 2006 et 2022

Le Tableau 12 montre que la performance estimée du modèle de 2022 (f-score de 0,923) est supérieure à celle de 2006 (0,863).

Tableau 12: Comparaison de la précision des modèles 2006 et 2022

Surfaces Imperméables	Etude 2022	Etude 2006
Précision	0,960	0,943
Rappel	0,888	0,794
f-score	0,923	0,863

Afin d'attribuer les différences entre la catégorisation des surfaces imperméables et perméables pour Bruxelles, nous comparons les résultats des simulations (avec les couches UrbIS) pour 2006 et 2022 avec les 10.000 pixels rassemblés en 19 blocs de vérification et les 6 blocs de vérifications additionnels dans des zones préalablement identifiées. Pour 16 des 25 blocs, on trouve un changement d'imperméabilité : 7 blocs deviennent plus imperméables et dans les 9 blocs restants, les surfaces sont reconverties en zones perméables.

La Figure 12 illustre la corrélation entre les différences mesurées dans les blocs de vérification et celle simulée en 2022 par rapport aux valeurs mesurées en 2006. Elle montre que la simulation de 2022 évalue les différences mesurées avec une corrélation de 98% (R2).

Les résultats de simulations entre 2006 et 2022 indiquent une incrémentation d'imperméabilisation qui n'a pas été vérifiée par notre approche de vérification et s'explique en raison d'une sous-estimation des surfaces imperméables plus prononcées en 2006 (-0,13%) qu'en 2022 (-0,02%).

⁸ Cette classification n'a été utilisée que comme point de comparaison pour la précision du modèle et suppose que tous les terrains, rues et chemins de fer privés sont imperméables ; alors que seuls les parcs et les forêts sont perméables.

L'erreur de modélisation est estimée en comparant la différence de surfaces imperméables simulées en 2006 et 2022 pour les 25 blocs avec les différences mesurées : cette erreur est de 1,59%.

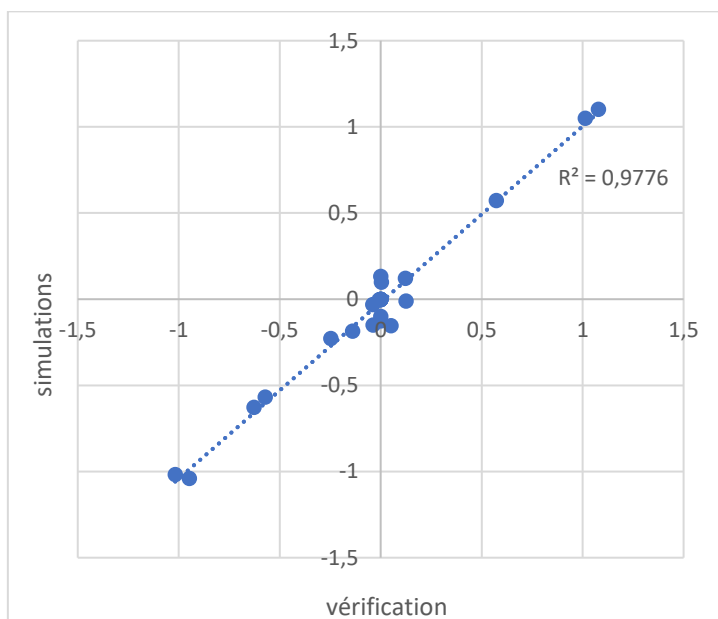


Figure 12: Corrélation entre les différences en surfaces imperméables entre 2006 et 2022 en comparant les surfaces imperméables des blocs de vérifications avec les simulations pour les blocs en 2022.

La Figure 13 analyse spécifiquement les 6 zones de changements significatifs de perméabilité entre 2006 et 2022. Nous voyons que la différence modélisée ressemble étroitement à la différence observée sur le terrain pour les six zones d'intérêt.

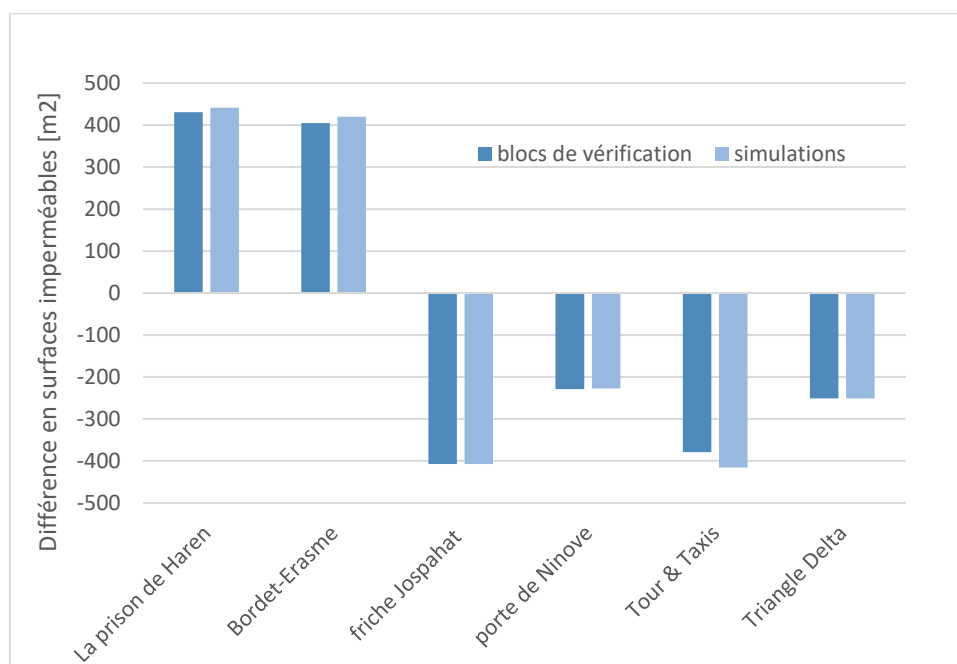


Figure 13: Comparaison des différences en surfaces imperméables [m2] mesurées dans les blocs de vérifications avec notre approche manuelle et nos simulations pour les zones d'intérêts entre 2006 et 2022.

3.3 Imperméabilité par Commune en 2022

Globalement, la Région bruxelloise a en 2022 une imperméabilité estimée de 53,2 % soit 8.645 hectares sur les 16.242 hectares de la région. L'imperméabilité de chaque commune est indiquée dans le tableau 12. Les communes avec les plus fortes imperméabilités sont Saint-Josse-ten-Noode (91%) et Saint-Gilles (90%), tandis que la plus faible est Watermael-Boitsfort (16%).

Tableau 13: Imperméabilité par Commune en 2022

Commune	Surface (ha) ⁹	Surface Imperméable (ha)	% Imperméable
Anderlecht	1.791	1.001	56%
Auderghem	897	289	32%
Berchem-Sainte-Agathe	295	170	58%
Bruxelles	3.309	2.081	63%
Etterbeek	318	267	84%
Evere	513	303	59%
Forest	630	459	73%
Ganshoren	243	132	54%
Ixelles	641	489	76%
Jette	519	292	56%
Koekelberg	119	91	77%
Molenbeek-Saint-Jean	601	433	72%
Saint-Gilles	253	226	90%
Saint-Josse-ten-Noode	116	105	91%
Schaerbeek	790	619	78%
Uccle	2.287	689	30%
Watermael-Boitsfort	1.298	212	16%
Woluwe-Saint-Lambert	730	427	58%
Woluwe-Saint-Pierre	894	358	40%
Région de Bruxelles-Capitale	16.242	8.645	53,2%

⁹ Utilisation du sol sur base du registre cadastral par commune, 2022, Statbel
<https://statbel.fgov.be/fr/themes/environnement/sol/utilisation-du-sol>

Part des surfaces imperméables par commune en 2022
Aandeel van de ondoorlatende oppervlakken per gemeente in 2022

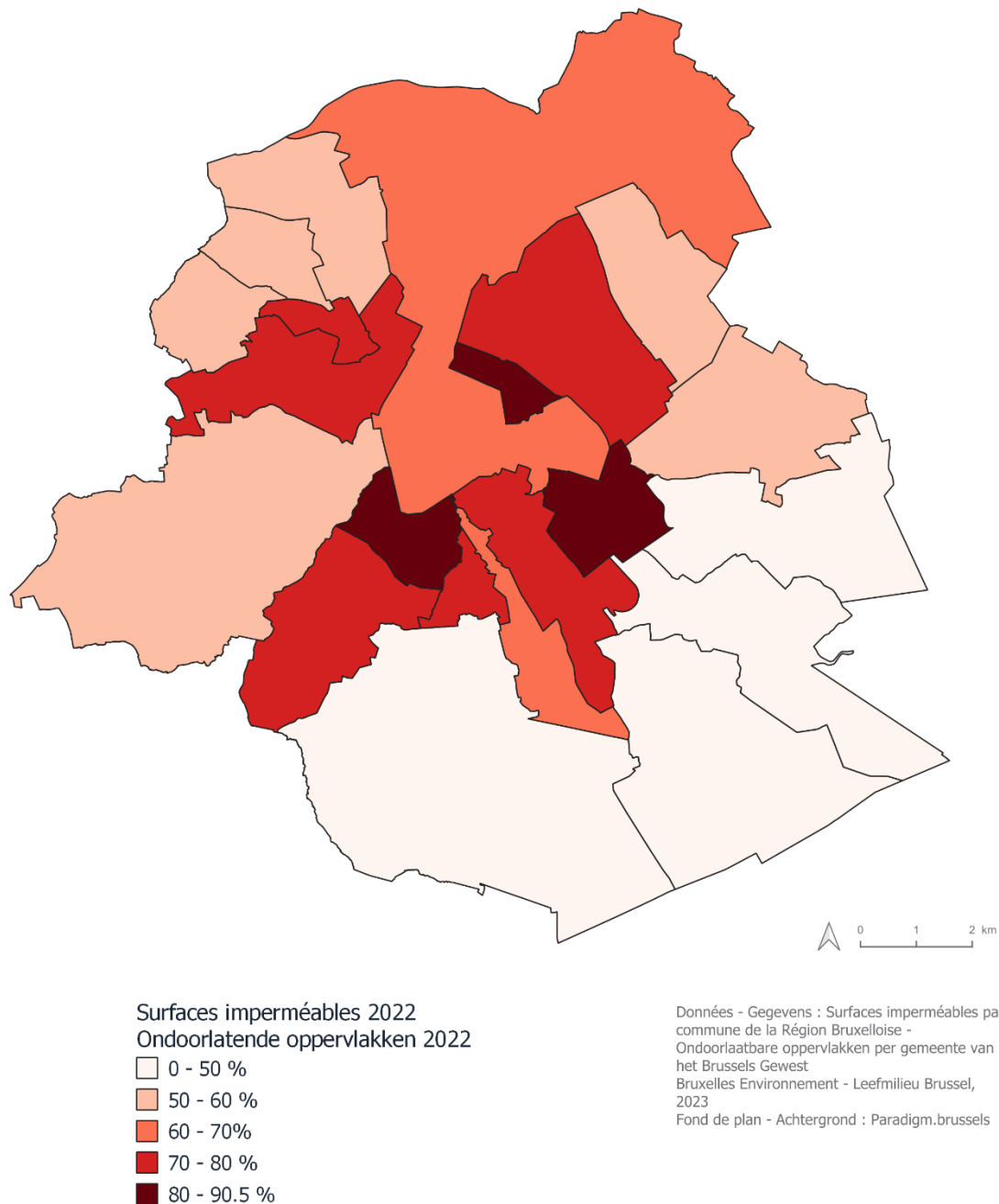


Figure 14: Couverture imperméabilisée par commune [%]

3.4 Evolution de Perméabilité 2006 – 2022

Une comparaison directe avec l'étude de 2006 n'est pas possible pour deux raisons principales :

1. La zone d'étude de 2006 ne couvre pas toute la région bruxelloise
2. L'étude de 2006 a utilisé des techniques de post-traitement qui n'ont pas été utilisées en 2022.

Afin de faciliter la comparaison des deux études, les modifications suivantes ont été apportées au modèle de 2022 :

- Seule la partie de la région bruxelloise incluse dans les deux études a été analysée. Cela représente 97,7% de la région totale. Dans cette partie, le pourcentage imperméable est plus élevé : les zones éliminées (situées notamment en Forêt de Soignes) étaient en effet majoritairement perméables.
- Un post-traitement accru, différent de celui employé pour le résultat de 2022, a été appliqué au modèle de 2022 pour réduire l'impact des différences de méthodes de modélisation dans la comparaison. Ce post-traitement augmente l'imperméabilité du résultat de 53,2% à 53,7% en moyenne pour l'ensemble de la zone d'étude.

Les résultats de cette analyse se trouvent dans le Tableau 14. Sur base de la comparaison entre les deux modèles (2006 et 2022), et tenant compte des limites méthodologiques expliquées au chapitre 2.8, les constats suivants peuvent être dressés :

- Les communes montrant la plus grande évolution de leurs superficies imperméables sont Bruxelles-Ville (243 ha) et Anderlecht (139 ha).
- En proportion du territoire, les évolutions les plus marquées sont constatées pour Jette (+ 26%) et Woluwe-Saint-Lambert (+ 25%).
- Aucune commune n'affiche de diminution de l'imperméabilisation.

Tableau 14: Comparaison entre l'imperméabilité de 2022 et 2006 par commune sur base du model pour la zone d'étude de 2006 (superficie partielle de la région)

Commune	Surface (Ha ¹¹)	2022		2006 ¹⁰		Changement		
		Surface Imperméable (Ha)	% Imperméable	Surface Imperméable (Ha)	% Imperméable	Évolution (Ha)	En proportion de surface par rapport à 2006	En points de pourcentage entre 2006 et 2022
Anderlecht	1.790	1.009	56%	869	49%	139	16%	8%
Auderghem	883	304	34%	262	30%	42	16%	5%
Berchem-Sainte-Agathe	295	176	60%	142	48%	34	24%	12%
Bruxelles	3.216	1.939	60%	1.696	53%	243	14%	8%
Etterbeek	318	272	86%	239	75%	33	14%	10%
Evere	513	294	57%	241	47%	53	22%	10%
Forest	630	415	66%	394	62%	21	5%	3%
Ganshoren	243	136	56%	127	52%	9	7%	4%
Ixelles	641	493	77%	456	71%	36	8%	6%
Jette	516	299	58%	237	46%	62	26%	12%
Koekelberg	119	93	78%	81	68%	12	15%	10%
Molenbeek-Saint-Jean	601	438	73%	371	62%	67	18%	11%
Saint-Gilles	253	214	85%	214	85%	-0	0%	0%
Saint-Josse-ten-Noode	116	105	90%	91	79%	14	15%	12%
Schaerbeek	790	619	78%	554	70%	66	12%	8%
Uccle	2.098	769	37%	733	35%	36	5%	2%
Watermael-Boitsfort	1.226	228	19%	207	17%	22	10%	2%
Woluwe-Saint-Lambert	730	451	62%	361	49%	90	25%	12%
Woluwe-Saint-Pierre	893	406	45%	336	38%	70	21%	8%
Région de Bruxelles-Capitale	15.870	8659	54,6%	7.611	48,0%	1.048	13,8%	6,6%

¹⁰ La méthode de calcul de la superficie des communes bruxelloises a été mise à jour en 2019 (IBSA, 2019). Les chiffres 2006 de ce rapport se réfèrent à la méthode mise à jour.

¹¹ Utilisation du sol sur base du registre cadastral par commune, 2022, Statbel <https://statbel.fgov.be/fr/themes/environnement/sol/utilisation-du-sol>

Évolution des surfaces imperméables modélisées en 2006 et en 2022, en points de pourcentage, par commune.
Evolutie van de gemodelleerde ondoorlatende oppervlakken in 2006 en 2022, in procentpunten, per gemeente.

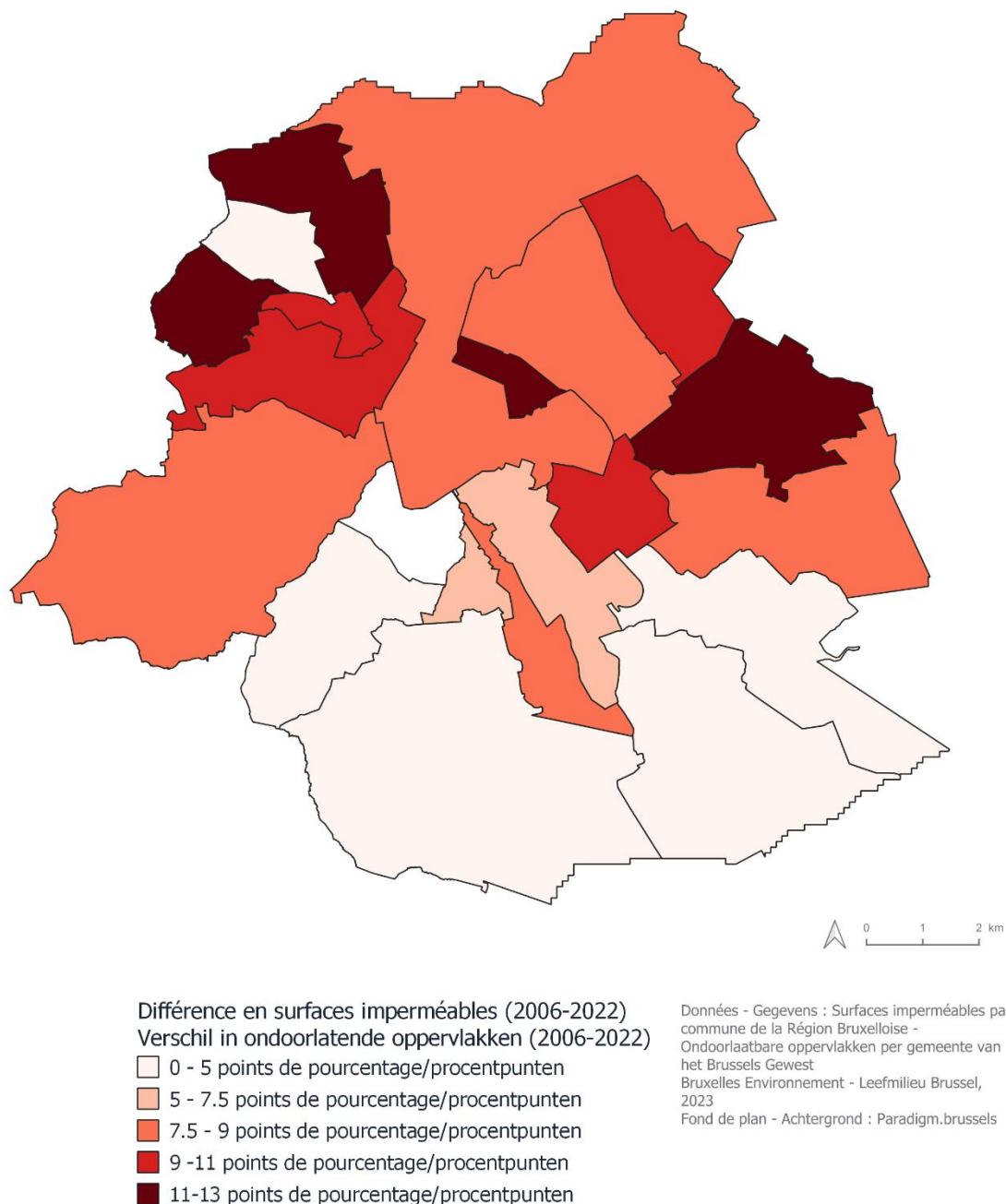


Figure 15 : Augmentation (en points de %) entre 2006 et 2022 des surfaces imperméables, en considérant l'emprise commune aux deux études les ayant estimées respectivement. Cette emprise commune ne recouvre pas entièrement les 4 communes suivantes : Bruxelles, Uccle, Watermael-Boitsfort et Auderghem.

3.5 Evolution de la perméabilité 1955 – 2022

L'étude de 2006 a estimé la surface imperméable de Bruxelles de 1955 à 2006. La Figure 16 présente l'évolution de la part des surfaces imperméables entre 1955 et 2006, telles qu'elles ont été modélisées par l'étude de 2006. Une estimation de la part des surfaces imperméables en 2022 a été rajoutée à ce graphique, sur base de l'estimation réalisée par notre étude sur la même base territoriale que celle de 2006. Tout en tenant compte des limitations méthodologiques des différentes études, la progression de la part des surfaces imperméables poursuit une tendance linéaire entre 1955 et 2022.

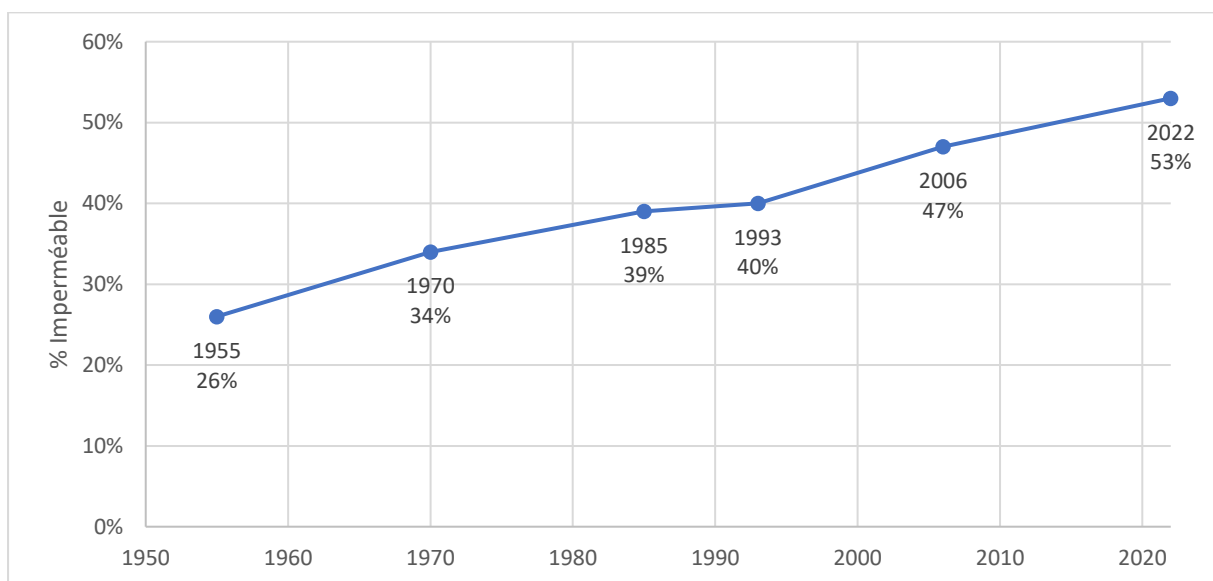


Figure 16: Surface imperméable de Bruxelles 1955 - 2022 (Source : 2022 – Modèle Sentinel-2 combiné, 1955-2006 – Vanhuysse et al. 2006) ¹²

¹² L'étude de 2006 couvre un 97,7% de la région de Bruxelles-Capitale. Les statistiques dans cette figure sont donc uniquement pour cette partie de la région.

4 Conclusions

En utilisant différents types de données, WEO a créé des cartes d'imperméabilisation des sols de Bruxelles-Capitale pour 2022 et comparé l'évolution avec les résultats de l'étude de 2006.

Nous avons effectué une classification de l'imperméabilisation du sol sur base d'images satellitaires « open source » et orthophotos de même que sur base d'images satellitaires commerciales. L'avantage d'utiliser une image commerciale est qu'elle est produite à haute résolution et peut être incrémentée à une très haute résolution avec des méthodes du pan-sharpening. Le désavantage est le coût lié aux images qui donc limite la quantité d'images qu'on peut utiliser par étude et du coup restreint la fiabilité du modèle. Le désavantage des images « open source » est la résolution spatiale moins nette des images. Nous utilisons les orthophotos existantes et un modèle d'apprentissage automatique afin d'augmenter la netteté des images satellitaires « open source ». L'avantage est que plusieurs images peuvent être combinées par saison, résultant dans une donnée plus cohérente au fil du temps. De plus, nous avons moins de limitations dans l'étendue géographique et donc plus de possibilités d'augmenter les données pour entraîner nos modèles, résultant dans une prédiction plus fiable dans le futur. Le potentiel de réduire l'impact que la qualité des images satellitaires peut avoir sur les résultats, fait que la méthodologie avec des images satellitaires « open source » est reproductible pour des estimations des taux d'imperméabilité à long terme.

Les résultats de cette étude, avec une approche utilisant des images « open source », estiment le pourcentage des surfaces imperméables en Région de Bruxelles-Capitale en 2022 à 53,2%. La précision de 0,92 f-score représente la bonne qualité du modèle. La classification des surfaces perméables est légèrement meilleure que celle des surfaces imperméables en raison principalement d'une sous-estimation des surfaces imperméables.

L'objectif de l'étude était également d'estimer la différence entre les prédictions de 2006 et 2022 et de quantifier l'erreur liée aux différences dans les prédictions. Cependant, le chiffre de 53,2% de 2022 n'est pas directement comparable au chiffre de l'étude de 2006 pour deux raisons principales : des différences dans la zone d'étude d'une part et dans le post-traitement appliqué d'autre part. Un travail additionnel a donc été requis pour permettre la comparaison entre les 2 études. Les estimations du modèle de 2022 démontrent une continuation de la tendance linéaire dans l'incrémentation de la surface imperméable à Bruxelles-Capitale depuis 1993. Les modèles de 2006 et 2022 diffèrent dans l'exactitude de l'identification des surfaces imperméables avec une sous-estimation plus prononcée en 2006 qu'en 2022, et ce surtout sur les terrains privés. Il est donc important des rester prudent avec la valeur d'incrémentation des surfaces imperméables entre 2006 et 2022. Le modèle proposé pour l'étude de 2022 quantifie la différence entre 2006 et 2022 par rapport aux surfaces de vérification avec une corrélation de 98%, ce qui indique que le modèle de 2022 arrive à bien identifier les changements en surfaces imperméables pendant cette période.

5 Références

Bruxelles Environnement (2022) Toutes les cartes d'Analyse Nature à Bruxelles <https://environnement.brussels/pro/outils-et-donnees/cartes/toutes-les-cartes-danalyse-nature-bruxelles#la-carte-de-vegetation>

IBSA (Institut Bruxellois de Statistique et d'Analyse) (2019) 162,4 km² est la superficie de la Région de Bruxelles-Capitale <https://ibsa.brussels/le-saviez-vous/162-4-km2-est-la-superficie-de-la-region-de-bruxelles-capitale>

Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In: Navab, N., Hornegger, J., Wells, W., Frangi, A. (eds) Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science (), vol 9351. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Vanhuyse, S., Depireux, J. et Wolff, E. (2006) Etude de l'évolution de l'imperméabilisation du sol en Région de Bruxelles-Capitale. Réalisée par L'ULB/IGEAT pour le Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale, Administration de l'Équipement et des Déplacements/Direction de l'Eau. https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/STUD_2006_ImpermeabiliteSolsRBC

Wang, J., Huang, B., Zhang, H. K., & Ma, P. (2019). Sentinel-2A image fusion using a machine learning approach. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57(12), 9589-9601.

Appendice A : Comparaison détaillée des modèles

A.1 Comparaison des modèles 2022

Les figures 17 à 22 illustrent les résultats des différents modèles de 2022 – basés sur Sentinel-2 ou WorldView-2. Pour d'un côté le quartier au Nord de Tour et Taxis (Esseghem) et de l'autre côté des rues arborées : Boulevard d'Auguste Reyers et Avenue Eugène Plasky.

Pour la zone de Tour et Taxis on voit bien que les constructions ont bien été identifiées par les modèles en 2022, mais il y a une différence dans le pourcentage de sols compactés identifié comme imperméable et même une certaine confusion des surfaces bétonnées classifiées comme perméables (modèles de Sentinel-2).

Pour les canopées d'arbres dans les rues, dans les modèles de WorldView-2 et Sentinel-2 été, les zones en-dessous de la canopée sont classifiées perméables, même si elles sont imperméables. Le modèle Sentinel-2 hiver est le seul à identifier les deux, tant les zones imperméables que les zones perméables, en-dessous des canopées.

En conséquence, la décision a été prise de combiner les deux modèles de Sentinel-2 pour tirer profit des avantages des différents modèles.

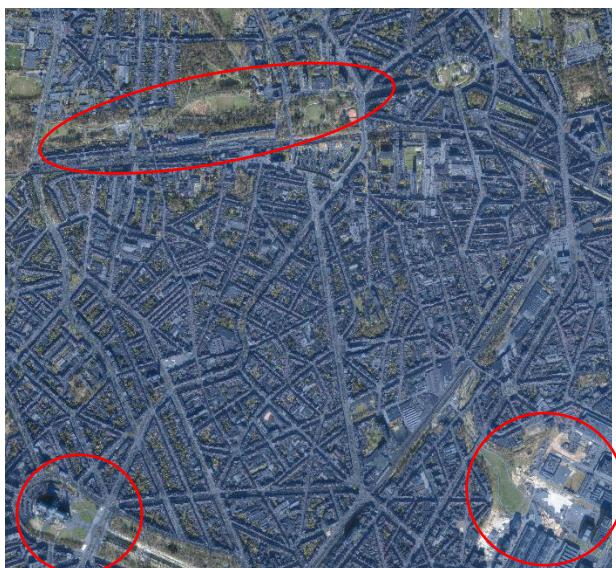


Figure 17: Illustration du modèle Sentinel-2 hiver 2022



Figure 18: Routes arborées - modèle Sentinel-2 hiver 2022



Figure 19 : Illustration du modèle Sentinel-2 été 2022



Figure 20: routes arborées - modèle Sentinel-2 été 2022



Figure 21 : Illustration du modèle WorldView-2 2022

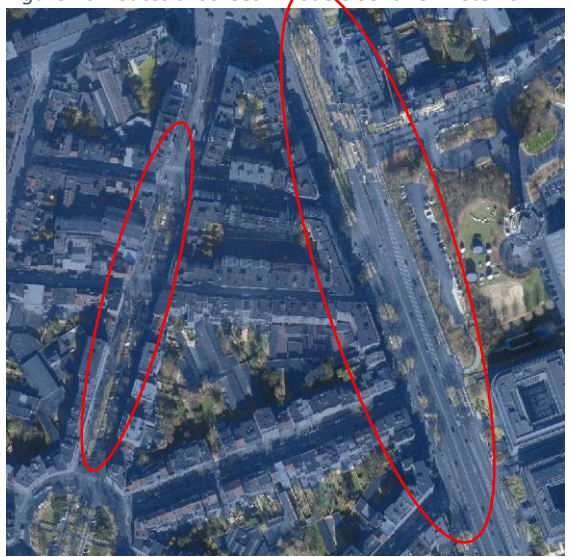


Figure 22: routes arborées - modèle WorldView-2 2022

A.2 Comparaison des modèles 2006 et 2022

La Figure 23 et la Figure 24 illustrent la comparaison avec les résultats de 2006. En 2006, comme la couche UrbIS pour les routes (UrbAdm_RoadTransportNetworks — RoadArea) est utilisée, toutes les routes selon cette couche sont classifiées comme imperméables, ignorant les zones perméables en-dessous des arbres. Pour que la comparaison entre 2006 et 2022 soit plus représentative des vrais changements et non pas des différences de méthodologie, nous ajoutons les couches UrbIS au modèle combiné de 2022 pour classifier les rues et bâtiments imperméables (aux seules fins de la comparaison des résultats de 2022 par rapport à 2006 - partie 2 de l'étude). Pour la détermination du taux d'imperméabilisation en 2022 (partie 1 de l'étude), le modèle n'a pas subi ce post-traitement.



Figure 23 : Illustration du modèle 2006



Figure 24 : Routes arborées - modèle 2006

Appendice B : Notes de vérification



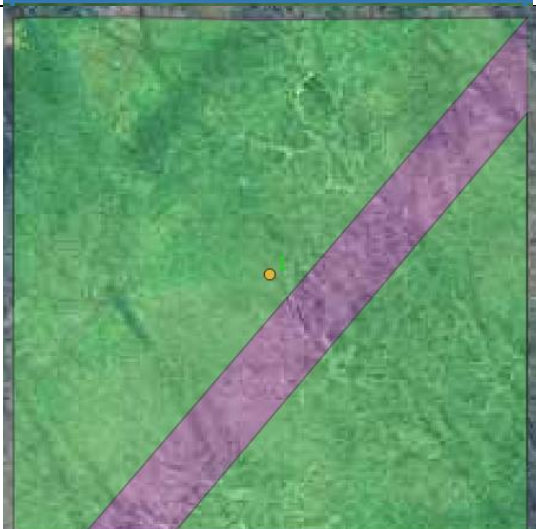
Les résultats de la vérification de 19 blocs de 20m x 20m (400 pixels) sélectionnés aléatoirement sont présentés avec 6 blocs sélectionnés spécifiquement comme zones d'intérêt. L'analyse inclut la vérification visuelle des orthophotos de 2022, les résultats du modèle de 2022 (sentinel-2 combiné) et la vérification visuelle de 2006.

Dans les analyses suivantes, les fonds de plan utilisés sont :




- 2022 : Orthophoto (15cm résolution, 7 mars 2022, Source : Digital Vlaanderen¹³)
- 2006 : Orthophoto de 2004 (10cm résolution, 31 mars 2004, Source : UrbIS – A la demande)

¹³ <https://metadata.vlaanderen.be/metadatascenter/srv/dut/catalog.search#/metadata/f5304d6d-0dd4-43fd-a726-427af31e8d61>

Bloc 1

<p>Vérification visuelle 2022 : Un chemin à faible perméabilité sous une végétation dense. La meilleure image provient de l'orthophoto de l'été 2019.</p>	 <p>An aerial orthophoto showing a garden area with dense vegetation. A diagonal path is visible, and a small yellow dot is marked on the path. A white number '1' is in the top left corner.</p>
<p>Résultat du modèle 2022 : Le modèle ne voit pas le chemin imperméable sous les arbres.</p>	 <p>A map showing the result of the 2022 model. The area is mostly green, representing permeable surfaces. A purple area is visible in the top left corner, representing impermeable surfaces. A yellow dot is marked in the center.</p>
<p>Vérification visuelle 2006 : L'aire de jeux au fond du jardin semble avoir été implantée après 2006 où la zone semble perméable avec un petit cabanon un peu plus loin</p>	 <p>A map showing the result of the 2006 model. The area is mostly green, representing permeable surfaces. A diagonal purple path is visible, representing impermeable surfaces. A yellow dot is marked in the center.</p>

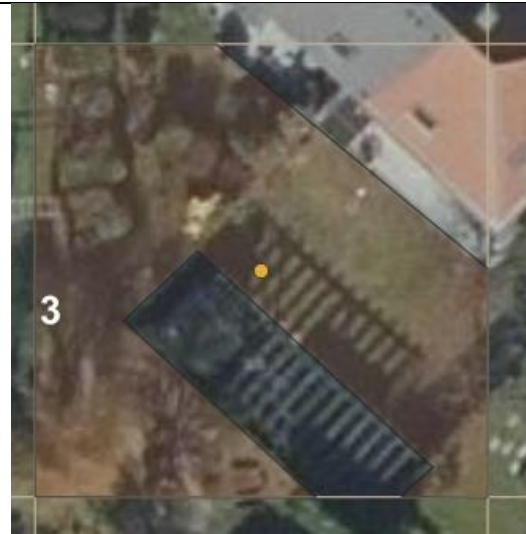
Bloc 2

<p>Vérification visuelle 2022 : Tous marqués perméables. Au sein du Parc de Laeken</p>	
<p>Résultat du modèle 2022 : La classe perméable est correctement déterminée</p>	
<p>Vérification visuelle 2006 : Pas de changement</p>	

Bloc 3

Vérification visuelle 2022 :

Le seul doute était la pergola dans le coin inférieur gauche. Confirmé par Google Street View que cela est pavé en dessous.



Résultat du modèle 2022 :

La maison est bien identifiée, mais la pergola n'est pas marquée comme imperméable.



Vérification visuelle 2006 :

La pergola a été construite après 2006. Seul un petit cabanon existait. La surface restante semble être un potager (sol nu) donc est considérée comme perméable en 2006.



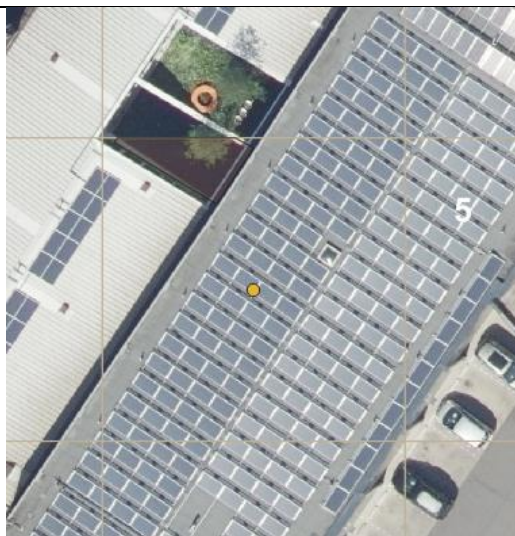
Bloc 4

<p>Vérification visuelle 2022 : Tout est imperméable.</p>	
<p>Résultat du modèle 2022 : Le bâtiment est bien identifié.</p>	
<p>Vérification visuelle 2006 : Tous imperméables pour 2006 - 2022. Les panneaux solaires sont nouveaux en 2022.</p>	

Bloc 5

Vérification visuelle 2022 :

Zone de toit principalement. Mais il y a une cour. Il est clair que l'arbre est présent à partir de l'orthophoto d'été. Difficile de dire quelle est la végétation sous-jacente. Sur les images en proche infrarouge, seule la zone sous l'arbre montre un signal de végétation. L'image est une orthophoto de l'été 2019. La cour intérieure est classée comme imperméable car elle est très probablement liée au drainage et ne permet pas d'infiltration ou de stockage à long terme.



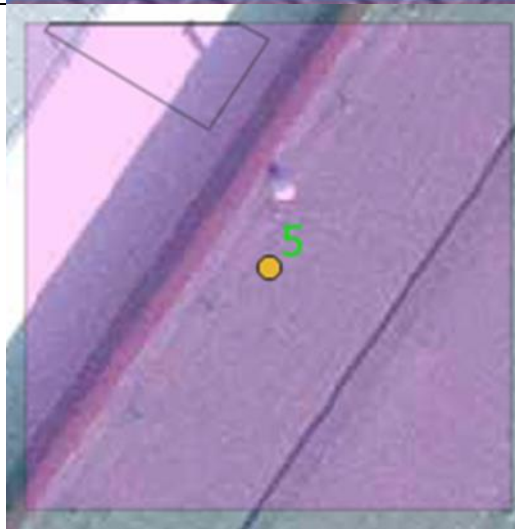
Résultat du modèle 2022 :

Le bâtiment est bien identifié.



Vérification visuelle 2006 :

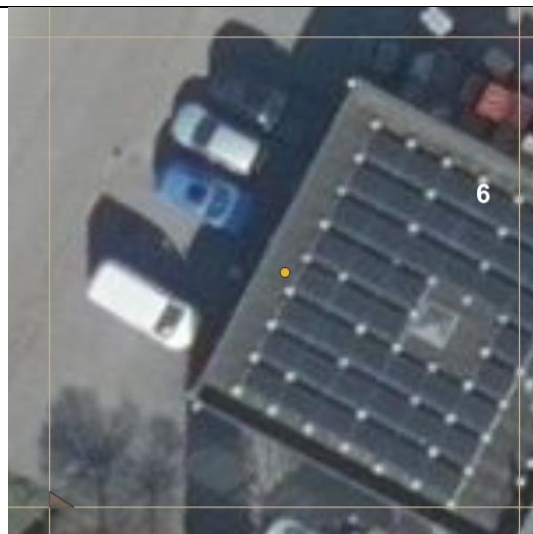
Le tout imperméable. Pas de changement en 2022.



Bloc 6

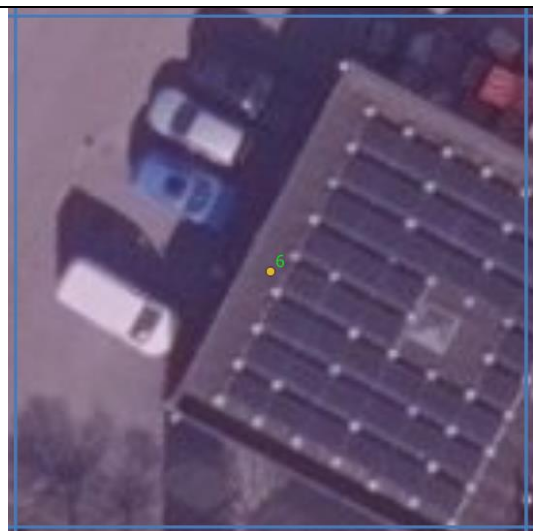
Vérification visuelle 2022 :

Une très petite zone dans le coin inférieur gauche est perméable. Confirmé avec diverses orthophotos comme étant de l'herbe sous les arbres. Reste imperméable.



Résultat du modèle 2022 :

Le bâtiment et la surface imperméable sont bien identifiés.


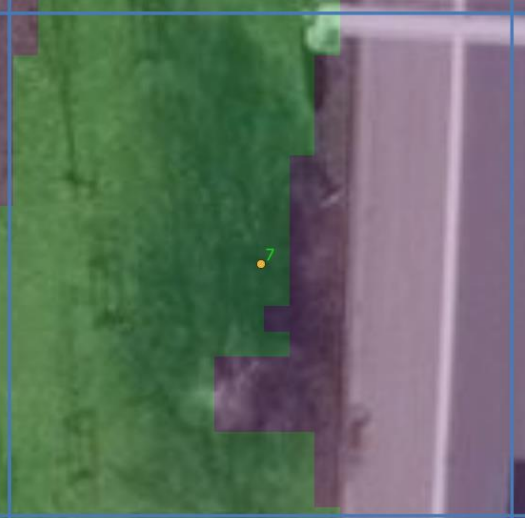



Vérification visuelle 2006 :

Tout est considéré comme imperméable en 2006.



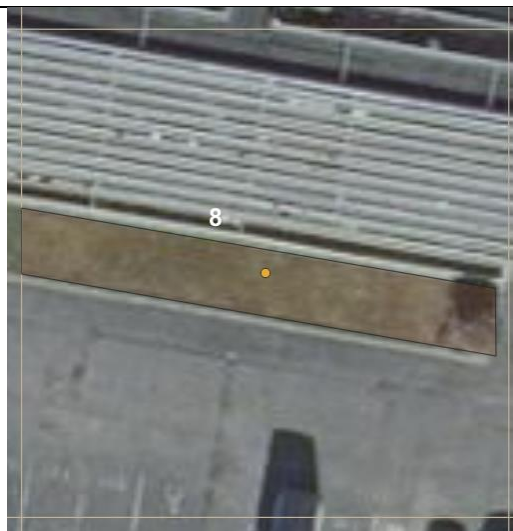
Bloc 7

<p>Vérification visuelle 2022 : Un pylône sur le chemin est clairement identifié. Base du pylône imperméable, le reste est perméable.</p>	
<p>Résultat du modèle 2022 : Les zones perméables et imperméables sont assez bien identifiées, sauf une zone avec beaucoup de végétation à côté de la rue.</p>	
<p>Vérification visuelle 2006 : En 2006, le pylône n'existait pas encore.</p>	

Bloc 8

Vérification visuelle 2022 :

Cas simple. Plantation verte à l'extérieur du bâtiment. Notez qu'il y a des sentiers en béton intermittents le long de l'herbe sur le côté droit de l'image. Confirmé avec vue sur la rue.



Résultat du modèle 2022 :

La surface perméable est assez bien identifiée, mais il y a quelques plantes qui ne sont pas identifiées comme perméables.



Vérification visuelle 2006 : Aucun changement entre 2006 et 2022.



Bloc 9

Vérification visuelle 2022 :

Potentiellement une très petite zone plantée sous le très haut bâtiment, mais cachée derrière le bâtiment en image d'hiver. Uniquement visible dans l'ancienne image d'été ci-dessous. Tout au plus serait de 2m². Difficile à vérifier sur place. Marqué tout comme imperméable étant donné le manque de preuves pour perméable.



Résultat du modèle 2022 :

Tout est bien identifié.



Vérification visuelle 2006 : Aucun changement entre 2006 et 2022.



Bloc 10

Vérification visuelle 2022 :

Arbres avec un petit sol nu en dessous. Sol nu avec des racines marquées perméables.



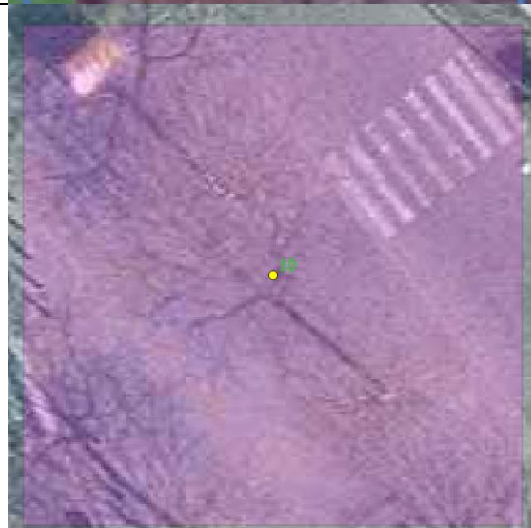
Résultat du modèle 2022 :

Tout est bien identifié, sauf les petites parcelles perméables autour des arbres.



Vérification visuelle 2006 :

L'entourage des arbres au sol semble être imperméable en 2006. Des changements pour ouvrir la fosse des arbres semblent avoir eu lieu à une date ultérieure.



Bloc 11

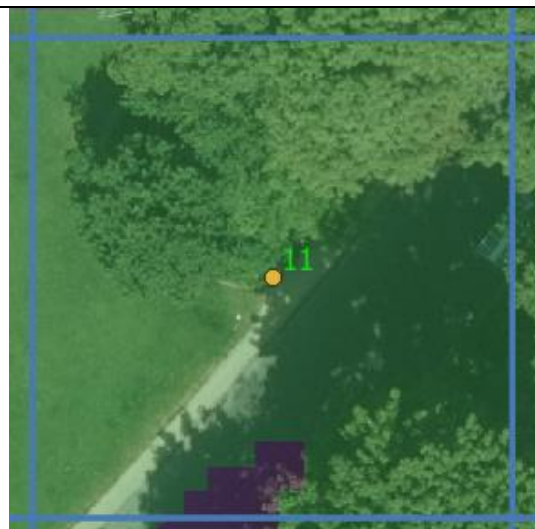
Vérification visuelle 2022 :

Sentier en gravier compacté sur le côté gauche marqué imperméable. Herbe au bord de la route sur le côté droit perméable.



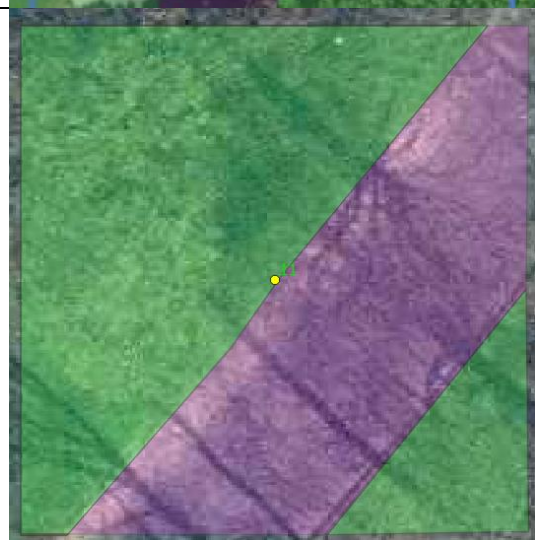
Résultat du modèle 2022 :

La rue n'est pas bien identifiée comme imperméable à cause de la couverture et de l'ombrage des arbres.



Vérification visuelle 2006 :

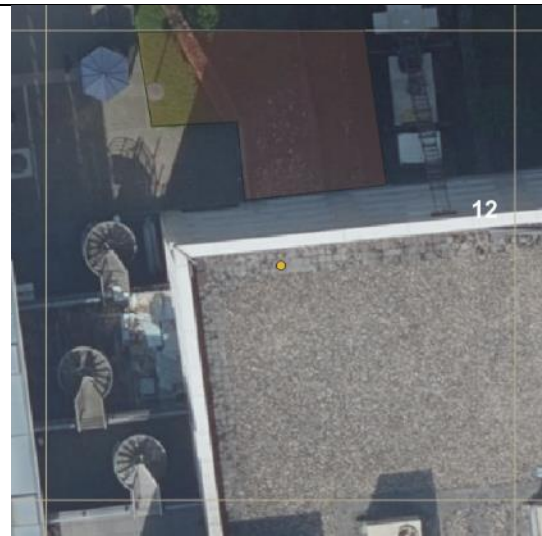
Aucun changement.



Bloc 12

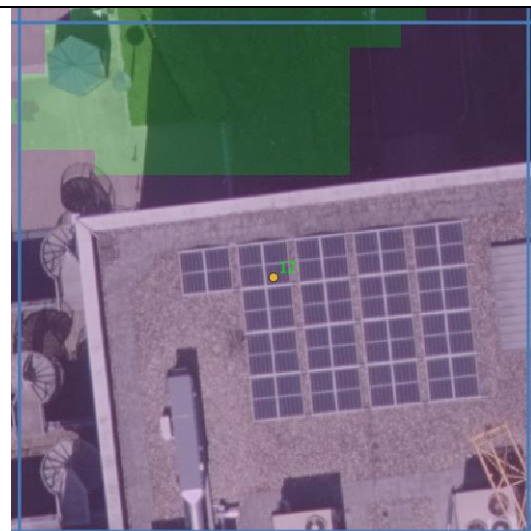
Vérification visuelle 2022 :

Zone très ombragée. D'après les anciennes orthophotos d'été et la vue sur la rue, il semblerait qu'il s'agit d'une zone perméable en haut. À droite, l'orthophoto de l'été 2017.



Résultat du modèle 2022 :

La majorité de l'image est bien identifiée comme imperméable. Le modèle confirme aussi qu'il a une zone perméable au Nord.


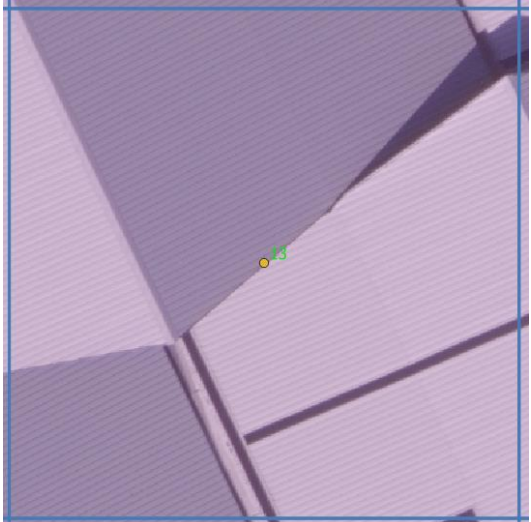



Vérification visuelle 2006 :

Chantier de construction en 2006. Le tout marqué comme imperméabilisé, car sol potentiellement très compacté en raison des travaux.



Bloc 13

<p>Vérification visuelle 2022 : 100% Toit.</p>	
<p>Résultat du modèle 2022 : Bien identifié.</p>	
<p>Vérification visuelle 2006 : Conversion des zones perméables en 2006 en zones de toiture en 2022.</p>	

Bloc 14

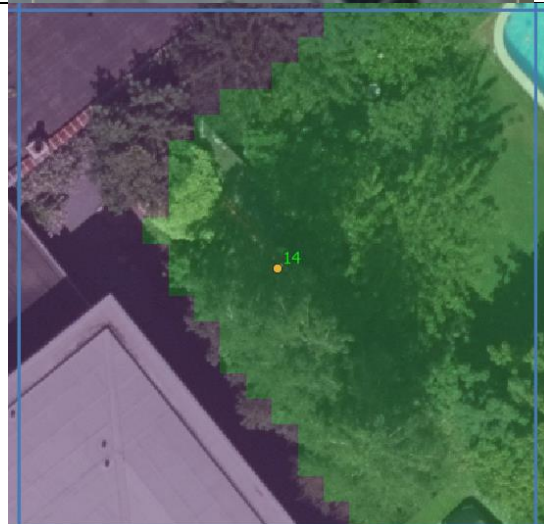
Vérification visuelle 2022 :

Très difficile à évaluer. Semble être des plates-bandes surélevées et des sentiers étroits. Photo d'hiver (à gauche) très floue.



Résultat du modèle 2022 :

Une situation complexe avec un tout petit sentier imperméable en dessous des arbres. Le modèle est assez précis sauf ce sentier.



Vérification visuelle 2006 :

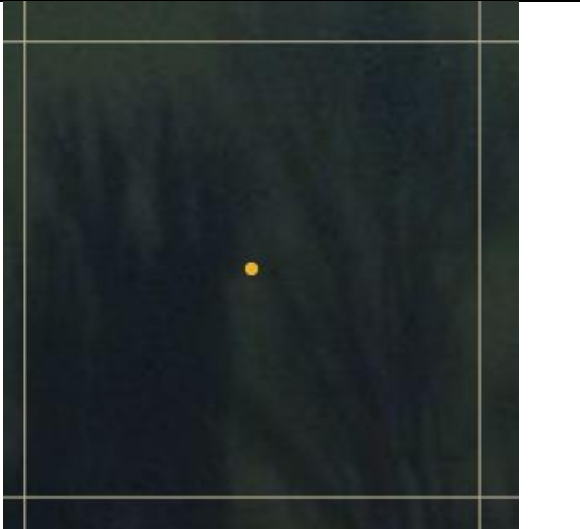
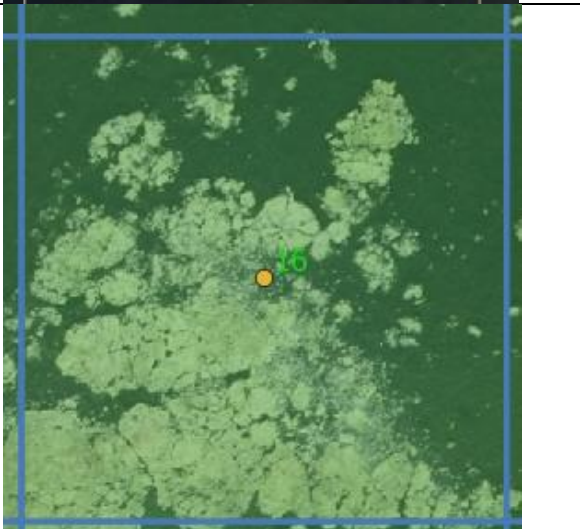
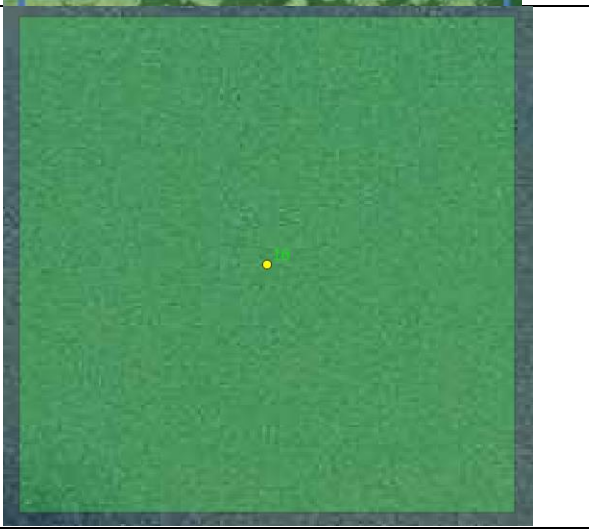
Grande différence entre 2006 (à gauche) et 2022 (à droite), principalement la perméabilisation du court de tennis.



Bloc 15

<p>Vérification visuelle 2022 : 100% imperméable. Très ombré en hiver.</p>	
<p>Résultat du modèle 2022 : Bien identifié.</p>	
<p>Vérification visuelle 2006 : Espace jardin existant en 2006 (à gauche) et aménagé en 2022.</p>	

Bloc 16

<p>Vérification visuelle 2022 : 100% eau - perméable.</p>	
<p>Résultat du modèle 2022 : L'étang est bien identifié comme perméable.</p>	
<p>Vérification visuelle 2006 : Aucun changement.</p>	

Bloc 17

Vérification visuelle 2022 :

Affaire complexe. Ajusté selon l'orthophoto 2022 PIR E-O.



Résultat du modèle 2022 :

Le petit sentier imperméable n'est pas identifié. Mais le résultat pour le reste de la scène est assez précis.



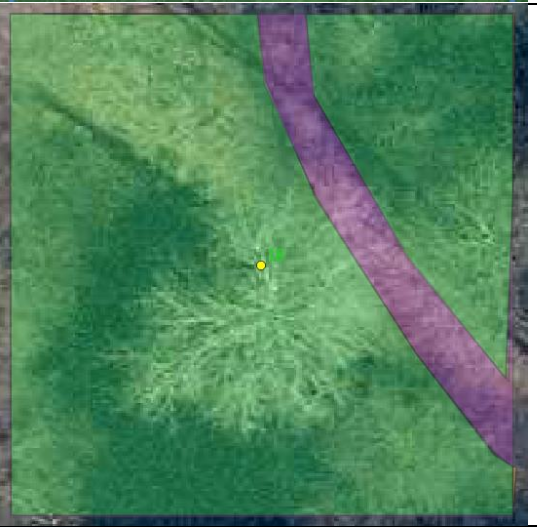


Vérification visuelle 2006 :

Affaire complexe, mais la zone de l'étang semble encore étanche en 2006.



Bloc 18

<p>Vérification visuelle 2022 : Relativement simple. Chemin de gravier longeant le bois et l'étang.</p>	
<p>Résultat du modèle 2022 : La majorité est bien identifiée comme perméable. Mais, comme dans les blocs 1 et 11, le chemin imperméable situé dans une zone très végétalisée n'est pas bien capturé.</p>	
<p>Vérification visuelle 2006 : Aucun changement. Même résultat dans le modèle de 2006.</p>	

Bloc 19

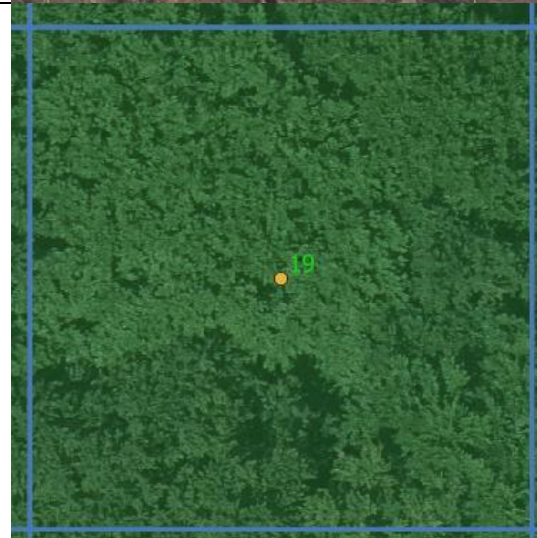
Vérification visuelle 2022 :

Asphalte ou peut-être Gravier/Sable Chemin compacté à travers la forêt. Cas plus clair dans l'orthophoto de 2019 (illustrée ci-dessous). Tout sauf chemin perméable.



Résultat du modèle 2022 :

Similaire à bloc 18.



Vérification visuelle 2006 :

Aucun changement.

