



Évaluation des actifs durables (SAVi) des infrastructures basées sur la nature dans le cadre d'un projet agroforestier à Welkenraedt (Belgique)

Issued by: IISD-EU / David Uzsoki

Date: April 2021

Ref: D428h.2.5.1

Official reference number service contract: 2019/C3S_428h_IISD-EU/SC1



This document has been produced in the context of the Copernicus Climate Change Service (C3S).

The activities leading to these results have been contracted by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, operator of C3S on behalf of the European Union (Delegation Agreement signed on 11/11/2014). All information in this document is provided "as is" and no guarantee or warranty is given that the information is fit for any particular purpose.

The user thereof uses the information at its sole risk and liability. For the avoidance of all doubts, the European Commission and the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts has no liability in respect of this document, which is merely representing the authors view.



[L'Institut international du développement durable \(IIDD\)](#) et [KnowlEdge Srl](#) ont travaillé à l'intégration des données climatiques du [Copernicus Climate Data Store \(CDS\)](#) pour améliorer l'analyse des projets d'infrastructure avec la méthodologie SAVi. Ce projet sert à démontrer l'importance et l'utilité des données climatiques générées par les produits CDS dans le développement de projets d'infrastructure durables pour contribuer à une économie résiliente au climat et à faible émission de carbone.

L'évaluation du projet d'agroforesterie à Welkenraedt (Belgique) est l'un des cas pratique permettant de démontrer la valeur de l'intégration des données climatiques de la base de données Copernicus dans SAVi.

Remerciements

Nous sommes reconnaissants à la commune de Welkenraedt pour son soutien et tenons à remercier particulièrement M. Jonathan Leruth de sa collaboration et des informations fournies au sujet du projet agroforestier à Welkenraedt. Nous sommes aussi reconnaissants au Groupe d'Action Locale (GAL) pour les données qu'il nous a partagées. Nous remercions également M. Olivier Baudry de l'Association pour l'agroforesterie en Wallonie et Bruxelles (AWAF) pour ses discussions avec nous.

À propos de SAVi

SAVi est un service de simulation qui permet aux gouvernements et aux investisseurs d'évaluer les nombreux risques et externalités affectant les résultats de projets d'infrastructure.

SAVi se distingue par les caractéristiques suivantes :

- **Évaluation** : SAVi évalue, en termes financiers, les risques et les externalités environnementaux, sociaux et économiques des projets d'infrastructure. Ces variables sont ignorées dans les analyses financières traditionnelles.
- **Simulation** : SAVi combine les résultats de la pensée systémique et de la simulation de la dynamique des systèmes avec la modélisation du financement des projets. Nous collaborons avec les propriétaires d'actifs afin d'identifier les risques associés à leurs projets d'infrastructure, puis concevons des scénarios de simulation adaptés.
- **Adaptation** : SAVi est adapté en fonction des spécificités de chaque projet d'infrastructure.



À propos du Copernicus Climate Data Store (C3S)

La Commission européenne a chargé le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) de mettre en œuvre le Copernicus Climate Change Service (C3S). L'objectif principal de C3S est de fournir des données de haute qualité pour soutenir des politiques d'adaptation et d'atténuation des changements climatiques (CEPMMT, 2017). L'une des principales caractéristiques de C3S est le Climate Data Store (CDS), qui fournit des indicateurs climatiques actuels, passés et futurs. Le CDS comporte des observations historiques du climat, des bases de données sur l'observation de la Terre, des projections climatiques aux niveaux mondial et local, des prévisions saisonnières ainsi que des analyses climatiques aux niveaux mondial et local (CEPMMT, 2017).

Les données obtenues à partir de la boîte à outils CDS comprennent des indicateurs météorologiques localisés, tant historiques que futurs, tels les précipitations et la température. Les données historiques (ERA5) et les projections (CMIP5) peuvent être consultées et téléchargées directement dans le CDS. Certains indicateurs sont également accessibles via une application en ligne dédiée, créée pour faciliter l'échange d'informations entre le CDS et plusieurs modèles SAVi. SAVi utilise des informations sur le climat afin d'estimer les dommages pouvant résulter de phénomènes météorologiques ou de tendances climatiques extrêmes ainsi que la valeur ajoutée résultant d'une meilleure capacité d'adaptation, de même que pour calculer l'offre et la demande de services écosystémiques (Bassi, et al., 2020). Il est par exemple possible, grâce à l'intégration de données sur les précipitations, l'évaporation et les besoins en eau des cultures dans le modèle SAVi, d'évaluer l'approvisionnement en eau actuel et futur dans un environnement spécifique et d'ainsi contribuer à la planification des infrastructures d'irrigation (Bassi, et al., 2020).

Ce rapport (en anglais seulement) décrit comment les données du CDS ont été intégrées dans l'outil SAVi, c'est-à-dire comment plusieurs indicateurs climatiques ont été obtenus à partir de ces données et comment leur analyse a ainsi pu être améliorée. Grâce à une telle intégration, l'ISD peut finalement générer des analyses sophistiquées dérivées de SAVi sur les coûts des risques et des externalités liés au climat.

Auteurs

Andrea M. Bassi

Liesbeth Casier

Marco Guzzetti

Abigail Schlageter

David Uzsoki



Sommaire exécutif

Ce rapport présente l'évaluation SAVi d'un projet agroforestier dans la commune de Welkenraedt, en Belgique. L'agroforesterie est un type d'infrastructure basée sur la nature visant à maintenir et à restaurer la productivité des sols, à lutter contre l'érosion, à maintenir une qualité d'eau élevée et à renforcer la résilience climatique d'une région donnée. L'agroforesterie figure dans les plans climatiques de la commune de Welkenraedt.

Cette évaluation SAVi utilise les données climatiques du Copernicus Climate Data Store (CDS), notamment sur les précipitations, les changements de température, l'évaporation et les paramètres de vitesse du vent provenant de différents scénarios climatiques (RCP 4.5 et RCP 8.5). Chacun de ces paramètres a un impact significatif sur l'érosion des sols, la qualité et la disponibilité de l'eau, la productivité et les revenus agricoles.

L'évaluation SAVi sur le projet agroforestier à Welkenraedt comprend :

- Une évaluation économique du coût d'investissement, des externalités (bénéfices ajoutés/coûts évités) et des bénéfices directs (revenus) du projet agroforestier
- Une évaluation des impacts du climat sur la performance du projet agroforestier
- Une évaluation financière du projet agroforestier, incluant la façon dont les flux de revenus supplémentaires améliorent la performance financière globale d'un investissement dans l'agroforesterie

Les principales conclusions de cette analyse sont les suivantes :

- Les bénéfices nets du projet agroforestier sont estimés à 3 900 000 d'euros sur une période de 20 ans pour un investissement de 607 629 euros. Cela est dû aux externalités positives, aux coûts évités et aux flux de revenus potentiels supplémentaires, notamment grâce à la production de fourrage et de granulés de bois.
- Ces bénéfices ne peuvent qu'augmenter dans le contexte des changements climatiques, ce qui renforce l'intérêt économique des projets agroforestiers. L'agroforesterie a par exemple un effet rafraîchissant qui réduit le stress thermique du bétail, améliorant ainsi sa production de lait et, par conséquent, les revenus des agriculteurs.



Table SE1. Comment les décideurs et les parties prenantes peuvent-ils utiliser cette analyse?

Partie prenante	Rôle dans le projet	Manière dont la partie prenante utilisera les résultats de l'évaluation basées sur les données C3S
Commune de Welkenraedt	Conception, mise en œuvre et financement de projets ; Conception et mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation aux changements climatiques.	<ul style="list-style-type: none"> • Les décideurs politiques pourront utiliser cette analyse dans leur prise de décisions en matière de planification de l'adaptation aux changements climatiques, de conservation de la biodiversité et des forêts, d'agriculture durable et de développement économique. • Les détenteurs de budgets publics pourront utiliser cette analyse afin d'apprécier la valeur générée par le capital naturel et d'évaluer dans quelle mesure il génère des co-bénéfices supplémentaires et évite des coûts. • La commune de Welkenraedt pourra utiliser les résultats de cette analyse afin de définir des activités concrètes dans le cadre de son plan d'adaptation aux changements climatiques. Ce plan est en cours d'élaboration. • La commune prévoit également d'élargir ses activités de communication, de mobilisation et de sensibilisation des citoyens aux solutions basées sur la nature. Elle pourra utiliser les résultats de cette analyse afin d'informer les citoyens quant aux bénéfices à tirer de tels investissements dans la nature.
Réseau de la Convention des Maires pour le climat et l'énergie	Partage des meilleures pratiques pour des solutions basées sur la nature à des fins d'adaptation aux changements climatiques.	<ul style="list-style-type: none"> • Le réseau bénéficiera du partage de cas d'utilisation et de données relatives au climat afin de sensibiliser davantage et d'identifier les possibilités d'application pour d'autres collectivités locales.
Organisations de la société civile (OSC) locales	Consultations avec la commune sur la conception, la mise en œuvre et le suivi des bénéfices des projets agroforestiers en matière de résilience climatique et de biodiversité.	<ul style="list-style-type: none"> • Les OSC pourront utiliser les évaluations économiques des services écosystémiques afin de favoriser une restauration des forêts qui soutienne l'agriculture durable et la résilience aux changements climatiques, ainsi que de mener des campagnes de sensibilisation plus ciblées. • Les OSC pourront aussi utiliser l'évaluation économique des services écosystémiques fournis par les arbres afin de plaider pour des



		<p>investissements dans la plantation d'arbres, ainsi que dans l'agriculture durable.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le Groupe d'Action Locale (GAL) Pays d'Herve, une partie prenante de la société civile locale, compte utiliser cette analyse afin d'informer et de promouvoir différentes utilisations des infrastructures basées sur la nature, notamment l'utilisation de la biomasse pour le chauffage. Le GAL Pays d'Herve a fourni des données et des renseignements dans le cadre de l'analyse. • L'Association pour la promotion de l'agroforesterie en Wallonie et à Bruxelles (AWAF) et Natagriwal ont également apporté leur contribution et leurs données à l'analyse. Ces organisations pourront utiliser les résultats de cette analyse afin de continuer à promouvoir les projets agroforestiers, notamment dans le cadre de leurs activités de sensibilisation des agriculteurs.
Développeurs de projets et promoteurs d'infrastructures basées sur la nature	Mise en œuvre et financement de projets d'infrastructures basées sur la nature.	<ul style="list-style-type: none"> • Les développeurs et les promoteurs de projets pourront utiliser ces évaluations afin de concevoir des solutions de financement basées sur la nature, ce qui pourrait éventuellement permettre de mobiliser des capitaux auprès d'investisseurs privés. • Les donateurs et les parties prenantes du secteur privé pourront utiliser l'analyse comme base de référence afin de promouvoir des investissements écologiques dans différents secteurs, tels l'agriculture ou le traitement de l'eau.
Agriculteurs locaux	Consultations avec la commune sur la conception, la mise en œuvre et le suivi des bénéfices des projets agroforestiers.	<ul style="list-style-type: none"> • Les agriculteurs peuvent aider à promouvoir les solutions basées sur la nature lorsque la valeur économique de la conservation et de la restauration des services écosystémiques est reconnue. • La commune de Welkenraedt a souligné la nécessité pour les agriculteurs de mieux comprendre les bénéfices des infrastructures basées sur la nature, notamment en termes de valeur monétaire. Cette analyse répond à ce besoin en présentant les rendements et les revenus supplémentaires pouvant être générés par l'agroforesterie.



Table of Contents

1 Introduction	14
2 Méthodologie - SAVi Agroforesterie – Welkenraedt	16
2.1 Diagramme de la boucle causale	16
2.2 Données climatiques et impact des projets agroforestiers sur le climat	18
2.3 Analyse spatiale explicite	26
2.4 Hypothèses et données utilisées pour l'évaluation SAVi	30
3 Résultats - SAVi Agroforesterie - Welkenraedt	35
3.1 Analyse coûts-bénéfices (ACB) intégrée	35
3.2 Modèle de financement	37
4. Conclusions	39
Références	40
Annex A. Assessing Ecosystem Services Supply in Belgium by applying the Invest Tool	44



Liste des figures et des tableaux

Figure 1. DBC, Agroforesterie, Welkenraedt	17
Figure 2. Variations des précipitations, RCP 4,5	19
Figure 3. Variations des précipitations, RCP 8,5	19
Figure 4. Variation du volume des eaux de ruissellement, RCP 4,5	20
Figure 5. Variation du volume des eaux de ruissellement, RCP 8,5	20
Figure 6. Variation de la température de l'air, RCP 4,5	22
Figure 7: Variation de la température de l'air, RCP 8,5	22
Figure 8. Variation de l'évaporation, RCP 4,5	23
Figure 9. Variation de l'évaporation, RCP 8,5	24
Figure 10. Variation de la vitesse du vent, RCP 4,5.....	25
Figure 11. Variation de la vitesse du vent, RCP 8,5.....	25
Figure 12. Carte de la Belgique et Welkenraedt (en rouge)	27
Figure 13. Séquestration du carbone, scénario BAU	27
Figure 14. Séquestration du carbone, scénario ROWS	28
Figure 15. Qualité de l'habitat, scénario BAU	29
Figure 16. Qualité de l'habitat, scénario ROWS.....	29
Figure A1. Location of Welkenraedt	44
Figure A2. Tree rows considered in this analysis	46
Figure A3. LULC map – BAU scenario	47
Figure A4. LULC map – ROWS scenario.....	48
Figure A5. Carbon stored (Mg/Pixel) – BAU scenario	51
Figure A6. Carbon stored (Mg/Pixel) – ROWS scenario	52
Figure A7. Scores of habitat quality (BAU).....	56
Figure A8. Scores of habitat quality (ROWS)	57
Figure A9. Habitat Quality – difference between ROWS and BAU scenarios	58
Figure A10. Apis supply per pixel (BAU).....	62
Figure A11. Apis supply per pixel (ROWS)	63
Figure A12. Watershed around the municipality of Welkenraedt	67
Figure A13. Total sediment export – BAU and ROWS Scenario.....	71
Figure A14. Nitrogen export (kg/pixel)	76
Figure A15. Phosphorus export (kg/pixel)	78



List of Tables

Tableau SE1. Comment les décideurs et les parties prenantes peuvent-ils utiliser cette analyse?	6
Tableau 1. Séquestration du carbone, scénarios BAU et ROWS.....	28
Tableau 2. Qualité de l'habitat, scénarios BAU et ROWS	30
Tableau 3. Information sur les projets.....	30
Tableau 4. Hypothèses et références des données	31
Tableau 5. ACB intégrée, agroforesterie, Welkenraedt.....	36
Tableau 6. TRI et VAN, agroforesterie, Welkenraedt	37
Tableau A1. Carbon pools	50
Tableau A2. Carbon pool statistics.....	52
Tableau A3. Table of threats (maximum distance, weighted value, and decay function) for InVEST simulation	53
Tableau A4. Habitat Quality model – references “threat table”	53
Tableau A5. Habitat Quality model – references “threat sensitivity table”	54
Tableau A6. Table of Sensitivity of land cover types to each threat for InVEST simulation	55
Tableau A7. Habitat quality statistics.....	57
Tableau A8. Guild table used in this analysis.....	60
Tableau A9. Biophysical table – crop pollination.....	61
Tableau A10. Crop pollination statistics	63
Tableau A11. Biophysical table (Water Yield).....	66
Tableau A12. Water yield results.....	67
Tableau A13. Biophysical table annual sediment delivery ratio.....	69
Tableau A14. Annual sediment delivery ratio statistics.....	71
Tableau A15. Biophysical table – Annual Nutrient Delivery Ratio.....	74
Tableau A16. Nitrogen Delivery Ratio statistics.....	77
Tableau A17. Phosphorus Delivery Ratio statistics.....	78



Glossaire

Avantages nets : Montant cumulé des avantages monétaires accumulés par tous les secteurs et acteurs pendant la durée de vie des investissements vis-à-vis du niveau de référence, rapporté par le scénario d'intervention.

Boucle de rétroaction : Un « processus par lequel une cause initiale se répercute dans une chaîne de cause à effet, pour finalement se réaffecter elle-même » (Roberts et al., 1983).

Désagrégation verticale/horizontale des modèles : Les modèles ventilés verticalement contiennent un niveau de détail élevé au niveau sectoriel (c'est-à-dire l'énergie), tandis que les modèles ventilés horizontalement se concentrent sur la capture des interconnexions entre plusieurs secteurs et contiennent moins de détails au niveau sectoriel (PNUE, 2014).

Diagramme de boucle causale : Une représentation schématique des indicateurs et variables clés du système évalué, qui montre les liens de causalité entre eux et contribue à l'identification des boucles de rétroaction et des points d'entrée des politiques.

Dynamique des systèmes : Une méthodologie développée par J. Forrester à la fin des années 1950 (Forrester, 1961) qui consiste à créer des modèles descriptifs qui représentent les interconnexions causales entre les indicateurs clés et montrent leur contribution à la dynamique du système ainsi qu'aux questions étudiées. Les principaux piliers de la méthode de la dynamique des systèmes sont les boucles de rétroaction, les retards et la non-linéarité qui découlent de la saisie explicite des stocks et des flux (PNUE, 2014).

Indicateur : Paramètres intéressant une ou plusieurs parties prenantes qui fournissent des informations sur l'évolution des variables clés du système dans le temps et des tendances qui se dessinent dans des conditions spécifiques (Programme des Nations unies pour l'environnement [PNUE], 2014).

Méthodologie : Approche(s) théorique(s) utilisée(s) pour le développement de différents types d'outils d'analyse et de modèles de simulation. Cet ensemble de connaissances décrit à la fois les hypothèses sous-jacentes utilisées ainsi que les instruments qualitatifs et quantitatifs de collecte de données et d'estimation des paramètres (PNUE, 2014).

Modèle de simulation : Les modèles peuvent être considérés comme des cartes systémiques en ce sens qu'ils sont des simplifications de la réalité qui contribuent à réduire la complexité et décrivent, dans leur essence, le fonctionnement du système. Les modèles de simulation sont quantitatifs par nature et peuvent être construits en utilisant une ou plusieurs méthodologies (PNUE, 2014).

Optimisation : Un courant de modélisation qui vise à identifier la politique ou l'ensemble de politiques qui donnent les meilleurs résultats possibles à partir d'un ensemble d'alternatives, compte tenu d'un ensemble de critères (c'est-à-dire les paramètres à optimiser) et/ou de contraintes (c'est-à-dire le budget disponible) (PNUE, 2014).



Remise : Processus financier visant à déterminer la valeur actuelle d'une valeur monétaire future.

Scénarios : Attentes relatives à d'éventuels événements futurs utilisées pour analyser les réponses potentielles à ces nouveaux développements et ceux à venir. Par conséquent, l'analyse de scénarios est un exercice spéculatif dans lequel plusieurs alternatives de développement futur sont identifiées, expliquées et analysées afin de discuter de ce qui peut les provoquer et des conséquences que ces voies futures peuvent avoir sur notre système (par exemple, un pays ou une entreprise).

Taux de rendement interne (TRI) : Un indicateur des perspectives de rentabilité d'un investissement potentiel. Le TRI est le taux d'actualisation qui rend la valeur actuelle nette (VAN) de tous les flux de trésorerie d'un projet particulier égale à zéro. Les flux de trésorerie nets de financement donnent le TRI des capitaux propres.

Transparence du modèle : Mesure dans laquelle la structure et les équations du modèle sont accessibles et permettent de relier directement le comportement du modèle (c'est-à-dire les résultats numériques) à des composants structurels spécifiques du modèle (PNUE, 2014).

Valeur actuelle nette (VAN) : La différence entre la valeur actuelle des entrées de trésorerie nettes des coûts de financement et la valeur actuelle des sorties de trésorerie. Elle est utilisée pour analyser la rentabilité d'un investissement ou d'un projet prévu.

Validation du modèle : Processus consistant à évaluer dans quelle mesure le comportement du modèle (c'est-à-dire les résultats numériques) est conforme au comportement observé dans la réalité (c'est-à-dire les statistiques nationales, les bases de données établies) et à déterminer si la structure du modèle élaboré (c'est-à-dire les équations) est acceptable pour saisir les mécanismes qui sous-tendent le système à l'étude (PNUE, 2014).

Variables de stock et de flux : "Une variable de stock représente l'accumulation et est mesurée à un moment précis dans le temps. Une variable de flux est le taux de variation du stock et est mesurée sur un intervalle de temps" (PNUE, 2014, p. 51).



Liste des abréviations

ACB	Analyse coûts-bénéfices
BAU	Business-as-usual (Maintien du statu quo)
CMIP5	Projet d'intercomparaison de modèles couplés - Phase 5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)
CO ₂ e	Équivalent en dioxyde de carbone
CSC	Coût social du carbone
DBC	Diagramme de la boucle causale
CEPMMT	Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme
E&G	Exploitation et gestion
ETP	L'équivalent temps plein (Full-time equivalent)
ERA5	Cinquième génération de réanalyse du CEPMMT (ECMWF Reanalysis 5th generation)
GES	Gaz à effet de serre
Mn	Millions
PFNL	Produit forestier non-ligneux
PIB	Produit Intérieur Brut
PV	Photovoltaïque
RCP	Scénarios RCP (Representative Concentration Pathways)
SAVi	Outil d'évaluation des actifs durables



1 Introduction

La commune de Welkenraedt (Belgique) a demandé une évaluation SAVi afin d'estimer la valeur ajoutée des projets agroforestiers pour l'adaptation aux changements climatiques.

Welkenraedt est situé dans le « Pays de Herve », une région du sud-est de la Belgique proche des frontières néerlandaise et allemande. Au cœur de la région Meuse-Rhin, dans la zone transfrontalière appelée Parc des Trois Pays, le Pays de Herve et la commune de Welkenraedt est une région reconnue pour son environnement paisible, son agriculture qui, au fil des siècles, a façonné le paysage : des prairies entourées de haies et d'arbres appelés « bocage ». La commune compte environ 10 000 habitants (2021).

Welkenraedt et, par extension, la région wallonne au sud de la Belgique, promeut l'agroforesterie comme une solution rentable aux problèmes de climat et de biodiversité auxquels la région est confrontée. La commune a intégré l'agroforesterie dans sa stratégie d'adaptation aux changements climatiques et compte promouvoir ce type d'infrastructure basée sur la nature qui profite non seulement au climat, mais qui présente également d'autres co-bénéfices.

Grâce au travail du Groupe d'Action Locale (GAL) Pays de Herve, la commune a également cartographié les zones où des haies et des arbres supplémentaires pourraient être plantés. Ces données sont le point de départ de l'élaboration de cartes spatiales et de l'analyse économique réalisées dans le cadre de cette évaluation SAVi.

Les haies (basses et hautes) et les arbres remplissent un certain nombre de fonctions : ils fournissent de l'ombre, agissent comme brise-vent et brise-neige, assurent une protection globale du bétail contre les phénomènes météorologiques extrêmes, protègent contre l'érosion des sols, contribuent à la biodiversité et remplissent généralement une fonction importante dans l'écosystème. Les projets agroforestiers sont complexes et leurs avantages dépendent également des différentes compositions d'espèces de haies et d'arbres (AWAF, 2020). [Ce document](#) donne un aperçu des différentes compositions d'espèces et de leurs avantages pour la région. Cette évaluation SAVi est adaptée sur la base des informations contenues dans ce document et des discussions ayant eu lieu avec la commune sur la meilleure façon de refléter la complexité des performances de différents arbres et haies.

Le projet agroforestier simulé comprend une zone d'environ 100 000 m² de haies (basses et hautes) et d'arbres.

Les avantages multiples de ce projet agroforestier n'ont pas été pris en compte ni évalués, comme c'est souvent le cas pour les projets d'infrastructures basées sur la nature. Cela pourrait mener à la négligence de l'entretien des projets agroforestiers et ainsi compliquer la démonstration de l'intérêt d'investissements dans l'agroforesterie.

Grâce à la méthodologie SAVi, nous avons proposé une évaluation adaptée aux besoins de la commune, fournissant des preuves supplémentaires sur les coûts, les revenus et les co-



bénéfices potentiels de l'agroforesterie ainsi que des informations plus précises sur les variables climatiques pouvant avoir un impact sur les projets agroforestiers.

Cette analyse SAVi fournit à la commune un large éventail d'informations (cartes spatiales, données climatiques et évaluation économique pouvant servir à promouvoir l'utilisation de projets agroforestiers comme un investissement rentable pour les citoyens, les agriculteurs et la commune. Elle donne un premier aperçu des possibilités qu'offrent les infrastructures basées sur la nature, en particulier à la lumière des crises du climat et de la biodiversité. Ces informations peuvent également être utilisées pour faire progresser et mettre en œuvre la stratégie d'adaptation aux changements climatiques de la commune.

Par le biais de sa participation active au réseau de la Convention des Maires, Welkenraedt pourra également partager les arguments en faveur d'investissements dans les infrastructures basées sur la nature.



2 Méthodologie - SAVi Agroforesterie – Welkenraedt

2.1 Diagramme de la boucle causale

Le modèle [SAVi sur les infrastructures naturelles](#) (en anglais seulement) présente un schéma de discussion sur les risques, les avantages et les impacts climatiques des projets agroforestiers. Dans le cadre de cette évaluation, nous avons adapté le diagramme de la boucle causale (DBC) du modèle pour les infrastructures naturelles au projet agroforestier de Welkenraedt.

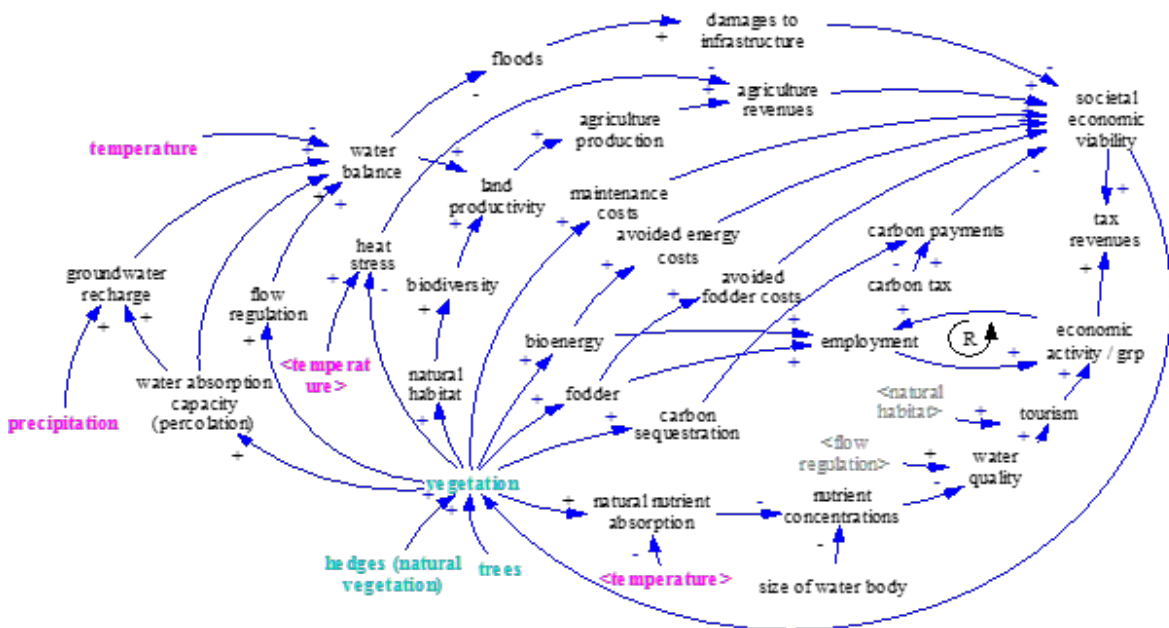
Le DBC est un outil d'analyse qui fait partie de l'évaluation SAVi et qui permet de rendre compte de la dynamique locale entourant le projet agroforestier. Il a été conçu en collaboration avec la commune de Welkenraedt et un expert en agroforesterie de la région wallonne. Le DBC constitue la première étape de l'adaptation de l'évaluation au contexte local. Le DBC présenté dans la figure 1 montre l'interconnexion des principaux indicateurs socio-économiques et environnementaux. Il permet une meilleure compréhension des impacts potentiels des changements climatiques de même que d'investissements durables en agroforesterie, en plus de démontrer comment ces impacts se manifestent à travers le système.

La figure 1 présente le DBC des dynamiques de base qui sous-tendent l'analyse du projet agroforestier.

Comment lire un DBC :

- Un lien causal de la variable A à la variable B est positif si un changement de A produit un changement de B dans la même direction.
- Un lien de causalité de la variable A à la variable B est négatif si un changement de A produit un changement de B dans la direction opposée (Bassi et al., 2016).

Figure 1. DBC, Agroforesterie, Welkenraedt



Le point de départ du DBC sont les variables en vert, lesquelles se rapportent au projet agroforestier de Welkenraedt : les haies et les arbres augmentent la végétation dans la région. Cela a divers effets, dont les services directs présentés directement autour de la variable « végétation ». La végétation peut entre autres créer de la bioénergie, produire du foin, absorber des nutriments, contribuer à la percolation et à la capacité d'absorption de l'eau, augmenter la régulation des flux et réduire le stress thermique. Plus précisément:

- Plus de végétation signifie une plus grande capacité d'absorption d'eau de la zone et une meilleure régulation des flux d'eau. Une meilleure absorption de l'eau a un impact positif sur la recharge des nappes phréatiques ainsi que sur le bilan hydrique global. La régulation des flux contribue également à l'équilibre hydrique qui réduit à son tour les inondations. Une diminution des inondations a un impact positif sur les dommages causés aux infrastructures hydrauliques, ce qui a aussi un effet socio-économique positif sur la viabilité des projets agroforestiers. Un meilleur équilibre hydrique a également un impact positif sur la productivité des terres, ce qui augmente la production et les revenus agricoles, ce qui constitue enfin un autre argument positif du point de vue sociétal en faveur d'investissements dans l'agroforesterie.
- Plus de végétation signifie également moins de stress thermique pour les vaches, ce qui a un impact direct sur les revenus agricoles.
- Plus de végétation a un impact positif sur l'habitat naturel et la biodiversité de la région. Cela contribue également à la productivité des terres et, ultimement, aux revenus agricoles.



- Plus de végétation entraîne un plus grand potentiel de bioénergie (granulés de bois), ce qui se traduit par un coût moindre pour l'énergie provenant d'autres sources ainsi qu'un impact positif sur la viabilité économique et sociétale des projets agroforestiers.
- L'augmentation de la végétation a un impact positif sur la production de fourrage, ce qui entraîne une réduction des coûts de fourrage pour les agriculteurs et contribue à la rentabilité sociétale des projets agroforestiers.
- Un potentiel plus élevé de production de bioénergie et de fourrage entraîne la création d'emplois locaux, par opposition à l'achat de biomasse et de fourrage de l'extérieur. Des emplois sont également créés grâce à la plantation d'arbres.
- L'agroforesterie présente aussi des avantages directs liés à la séquestration de carbone et l'absorption de nutriments. L'absorption de nutriments est influencée par les changements de température et a un impact sur la concentration des nutriments (qui est elle-même influencée par la taille de l'étendue d'eau), ce qui affecte alors la qualité de l'eau de la région, puis le tourisme et l'activité économique liée au tourisme, tout cela ayant enfin une influence sur la viabilité économique du projet pour la société.

Les variables en **rose** sont des variables climatiques que nous relient au CDS et qui ont un impact sur différentes variables du DBC. L'agroforesterie est liée à des bénéfices économiques, mais les changements climatiques peuvent aussi avoir un effet notable sur les résultats d'un projet. Les précipitations et la température ont un impact sur le bilan hydrique ainsi que la recharge des nappes phréatiques, qui sont ultimement liés au risque d'inondations et aux dommages causés aux infrastructures. La température a aussi un impact sur le stress thermique du bétail : un nombre plus élevé de mois de stress thermique dû aux changements climatiques peut éventuellement affecter les revenus des agriculteurs. Les projets agroforestiers réduisent significativement le stress thermique et deviennent donc plus attrayants sur le plan économique, selon les scénarios de changements climatiques.

2.2 Données climatiques et impact des projets agroforestiers sur le climat

Le CDS fournit des données permettant de prévoir comment différentes variables climatiques pourraient évoluer à Welkenraedt au cours de la durée du projet. Les figures 2 à 11 ci-dessous montrent comment les précipitations, le ruissellement, la température de l'air, l'évaporation et la vitesse du vent changeront à Welkenraedt au cours des 40 prochaines années. Deux scénarios climatiques sont représentés :

- Le scénario climatique RCP 4,5 suppose que les émissions atteignent leur maximum en 2040 et qu'elles commencent à diminuer par la suite.
- Le scénario RCP 8,5 suppose que les formes de production d'énergie à forte intensité de combustibles fossiles continuent à être utilisées massivement jusqu'à la fin du siècle.



Les scénarios RCP sont des trajectoires représentant l'évolution de la concentration des émissions d'équivalent en dioxyde de carbone (CO_2e) (ou gaz à effets de serre, GES) et sont utilisés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) afin de déterminer le niveau d'ambition politique nécessaire pour obtenir différents résultats en matière de réchauffement climatique. À l'origine, quatre principaux scénarios ont été élaborés, sur la base de différentes valeurs de forçage radiatif en 2100. Le scénario RCP 4,5, par exemple, correspond à une valeur de forçage radiatif de $4,5 \text{ W/m}^2$. Trois autres scénarios ont ensuite été envisagés depuis le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (AR5).

La ligne bleue représente les données historiques (ERA5) ; la ligne rouge représente quant à elle les données projetées (CMIP5) à partir de différentes bases de données et des résultats de différents modèles de circulation globale.

La cinquième génération de réanalyse du CEPMMT (ERA5) est une base de données regroupant les indicateurs mondiaux sur le climat, depuis janvier 1950 jusqu'à aujourd'hui. Le CMIP5 (Projet d'intercomparaison de modèles couplés – Phase 5) est une base de données comprenant les futures projections des indicateurs mondiaux sur le climat.

Figure 2. Variations des précipitations, RCP 4,5

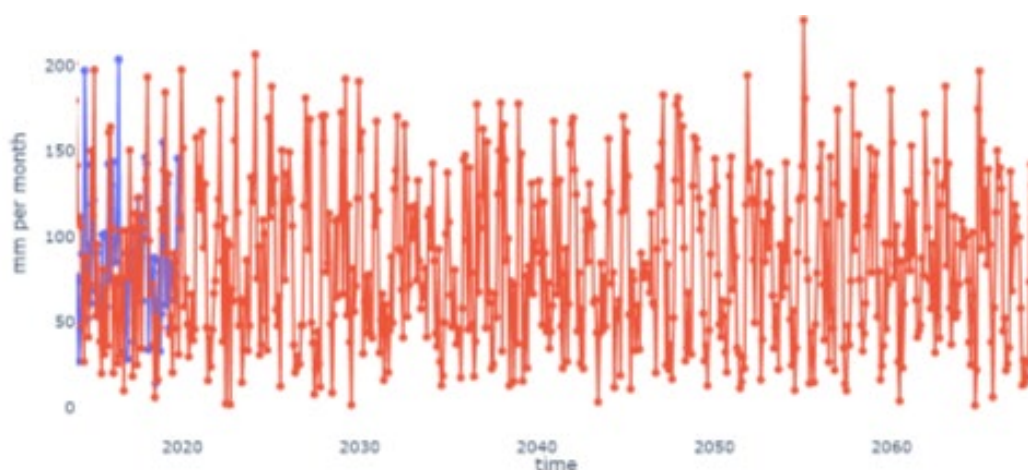
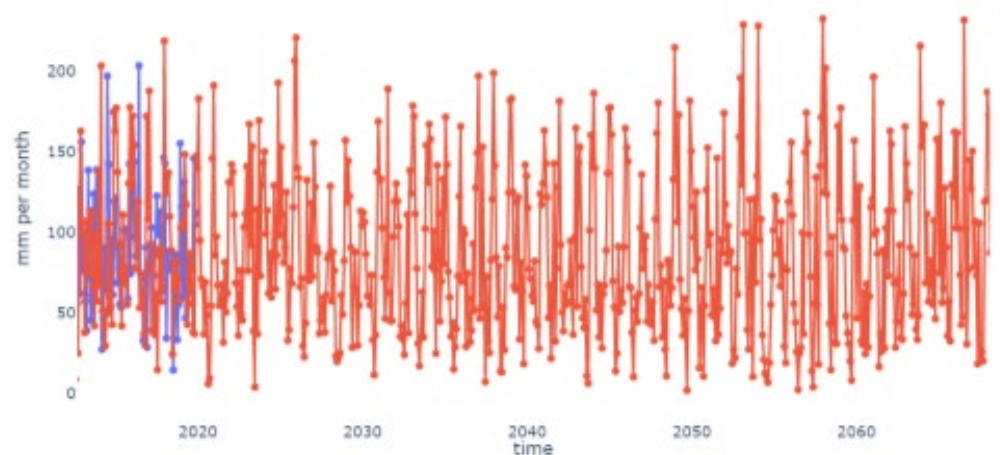


Figure 3. Variations des précipitations, RCP 8,5





La Figure 2 montre les variations de précipitations prévues à Welkenraedt dans le scénario RCP 4,5 en utilisant les données du CDS ; la Figure 3 montre les prévisions pour le scénario RCP 8,5. De fortes précipitations seraient plus fréquentes dans les deux scénarios, mais cela est encore plus évident dans le scénario RCP 8,5, qui suppose des émissions plus importantes. Les pics représentent des niveaux de précipitations élevés dans les deux figures, mais les pics ont particulièrement tendance à s'accroître avec le temps dans le scénario RCP 8,5.

Variation du volume des eaux de ruissellement dans les scénarios RCP 4,5 et 8,5 :

Figure 4. Variation du volume des eaux de ruissellement, RCP 4,5

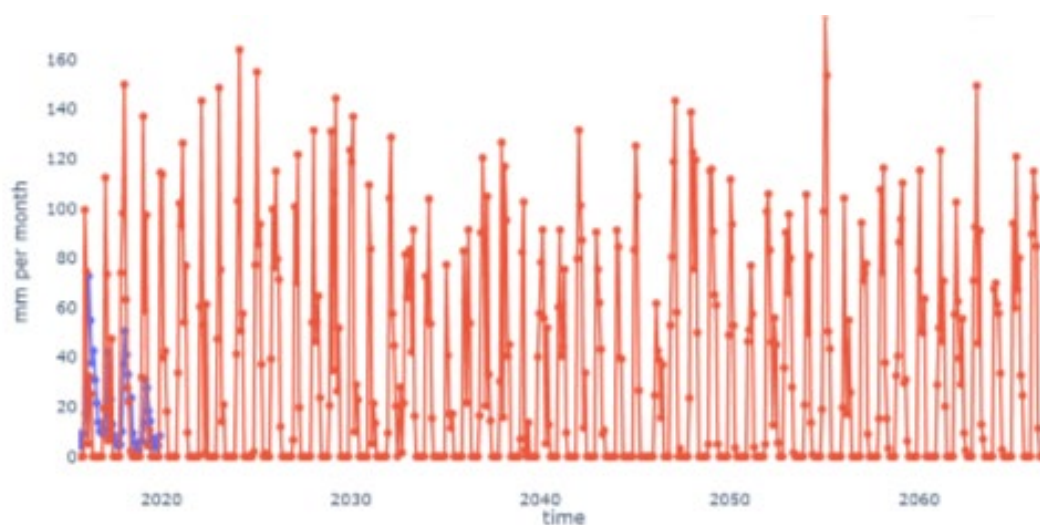
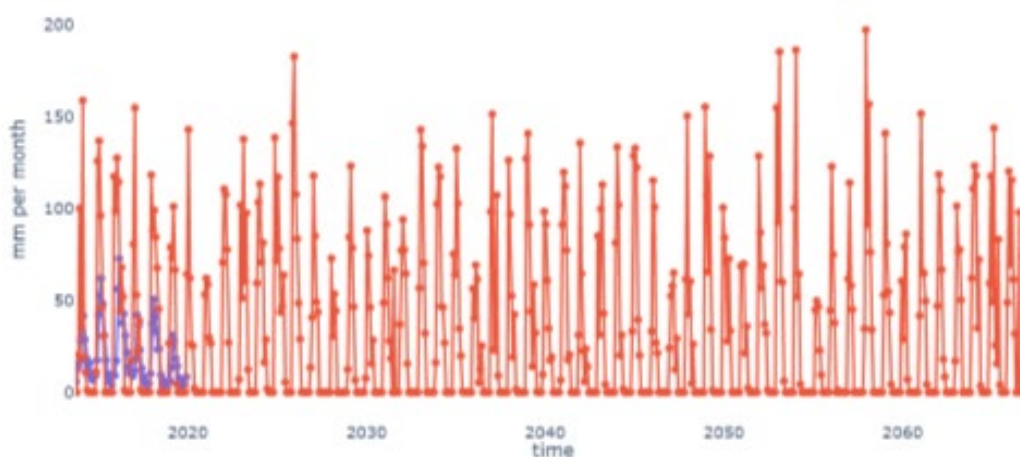


Figure 5. Variation du volume des eaux de ruissellement, RCP 8,5



L'augmentation des niveaux de précipitation entraînera à son tour un volume plus important de ruissellement en surface lors de fortes pluies. La Figure 4 montre les variations prévues du volume de ruissellement dans le scénario RCP 4,5 ; la Figure 5 montre les



prévisions pour le scénario RCP 8,5. Les résultats montrent que les volumes de ruissellement devraient augmenter significativement au cours des prochaines décennies sous le scénario RCP 8,5, alors que les variations sont moins marquées dans le scénario 4,5. De telles variations dans le volume des eaux de ruissellement sont conséquentes avec les variations prévues dans les précipitations prévues dans les deux mêmes scénarios RCP.

Si le ruissellement et les précipitations augmentent, les avantages du projet agroforestier, tels que pris en compte dans l'analyse coûts-bénéfices (ACB) intégrée, seront affectés. Le ruissellement des terres agricoles est responsable du transport des nutriments, tels que l'azote et le phosphore, vers les cours d'eau locaux. Ces nutriments doivent ensuite être éliminés par une installation de traitement des eaux usées. L'augmentation du ruissellement prévue pour le reste du siècle mènerait à une augmentation conséquente des concentrations d'azote et de phosphore dans les cours d'eau locaux. Une étude du Jialing River Watershed, en Chine, a justement révélé que « les effets de l'augmentation du ruissellement entraînent une augmentation d'environ 28,6 % et 22,5 % de la charge de pollution par les nitrates et les phosphates terminaux, respectivement » (Wu et al., 2012). Au cours des 40 prochaines années, les coûts de traitement des eaux augmenteraient donc parallèlement au volume des eaux de ruissellement.

Les projets agroforestiers ayant une capacité naturelle à éliminer l'azote et le phosphore, la viabilité économique de l'agroforesterie n'en serait que plus grande. L'agroforesterie permet de réduire les coûts liés au traitement des eaux usées en évitant que certains nutriments ne se retrouvent dans les cours d'eau. Selon une étude menée à Glensaugh en Écosse, « les forêts ont la capacité non seulement de réduire le ruissellement de surface, mais aussi d'absorber le ruissellement généré en amont » (Chandler et al., 2017).

Bien que nous ne disposions pas de données spécifiques à un lieu ou à un projet dans le cadre de cette évaluation, ce qui nous aurait permis de quantifier l'étendue de l'impact de la variable climatique sur le potentiel de l'agroforesterie pour éliminer l'azote et le phosphore, la littérature suggère que l'intérêt économique du projet agroforestier augmenterait avec le temps, car il est prévu que le ruissellement lui-même augmente à Welkenraedt au cours des 40 prochaines années. L'agroforesterie pourrait même atténuer certains des impacts négatifs causés par l'augmentation des précipitations et du ruissellement.

En plus de réduire les coûts liés au traitement des eaux, l'agroforesterie pourrait aussi prévenir les dommages causés par les inondations. En effet, une augmentation du ruissellement est associée à une augmentation des coûts liés aux inondations et aux dommages qui en résultent. Il a toutefois été démontré « qu'en interceptant les précipitations, en améliorant l'infiltration des sols et en retirant l'eau du sol, les arbres contribuent à réguler les eaux de pluie et à atténuer les inondations locales » (Hirons & Sjöman, 2018). L'agroforesterie pourrait donc neutraliser les risques d'inondation et les dommages qui en résultent du fait de l'augmentation des précipitations et du ruissellement.

Si, comme prévu, les niveaux de précipitation augmentent à Welkenraedt dans les prochaines décennies, le projet agroforestier deviendra encore plus attrayant sur le plan



économique, car des coûts de traitement des eaux et des dégâts causés par les inondations seront évités.

Figure 6. Variation de la température de l'air, RCP 4,5

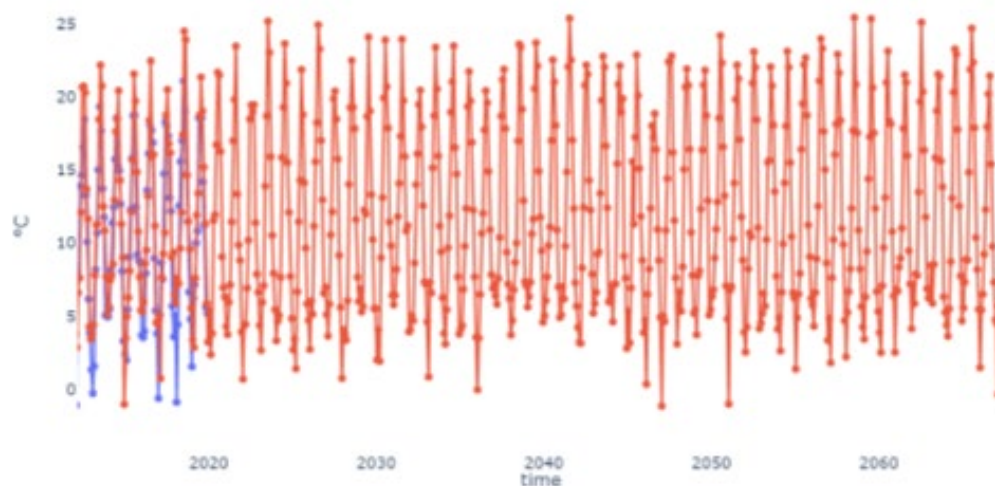
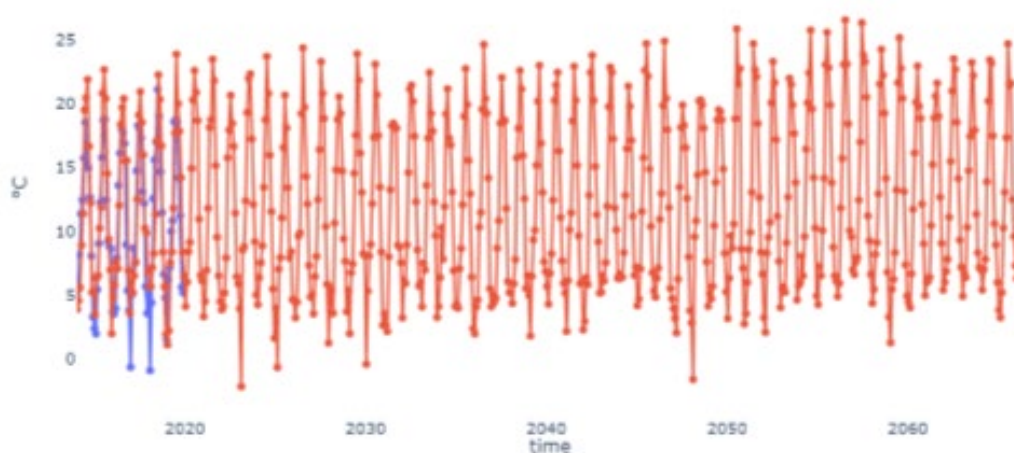


Figure 7. Variation de la température de l'air, RCP 8,5



La Figure 6 montre les variations de température de l'air prévues à Welkenraedt dans le scénario RCP 4,5; la Figure 7 montre les prévisions pour le scénario RCP 8,5. Les deux figures montrent une tendance à la hausse de la température de l'air, quoique cette hausse soit plus marquée dans le cas du scénario RCP 8,5.

Les variations de température de l'air auront divers impacts sur l'efficacité du projet agroforestier, ce qui affecte les valeurs dans l'ACB intégrée.

La littérature explique que les variations de température affectent le potentiel des projets agroforestiers à séquestrer le carbone. Une étude menée dans la province chinoise du Yunnan a révélé « qu'une augmentation de la température de 2°C a entraîné une forte diminution du [potentiel de séquestration du carbone] de la végétation forestière de



conifères » (Zhou et al., 2018). Par conséquent, si le projet agroforestier de Welkenraedt ne voyait pas le jour, on pourrait s'attendre à ce que les hausses de température réduisent le potentiel de la végétation dans la région à séquestrer le carbone. Si toutefois le projet agroforestier était mis en œuvre, certains de ces effets négatifs pourraient être évités ou compensés. Le projet proposé serait ainsi encore plus bénéfique sur le long terme, supposant que la température de l'air augmente dans les années à venir, comme le suggèrent les données du CDS.

Un autre avantage de l'agroforesterie est que les arbres ont un effet refroidissant qui pourrait réduire le stress thermique pour les humains comme pour le bétail. Les résultats de l'ACB indiquent effectivement que la réduction du stress thermique pour les vaches laitières améliore les rendements laitiers. Étant donné la hausse des températures prévue dans les années à venir, les avantages du projet agroforestier en matière de réduction du stress thermique seraient eux aussi plus importants et ce, dans les deux scénarios.

En outre, l'effet refroidissant des arbres pourrait augmenter la productivité du travail et avoir un effet positif sur la santé. Il a été démontré que l'effet refroidissant des arbres est particulièrement bénéfique pour la santé des « personnes âgées, des malades et des enfants » (Hirons & Sjöman, 2018). La hausse des températures prévue dans les deux scénarios climatiques devrait donc accroître les bénéfices du projet agroforestier en matière de refroidissement, plus encore que ce qui était estimé dans l'ACB avec l'atténuation de la perte de séquestration du carbone, l'accroissement du rendement des vaches en lait, l'augmentation de la productivité du travail et l'amélioration de la santé humaine.

Figure 8. Variation de l'évaporation, RCP 4,5

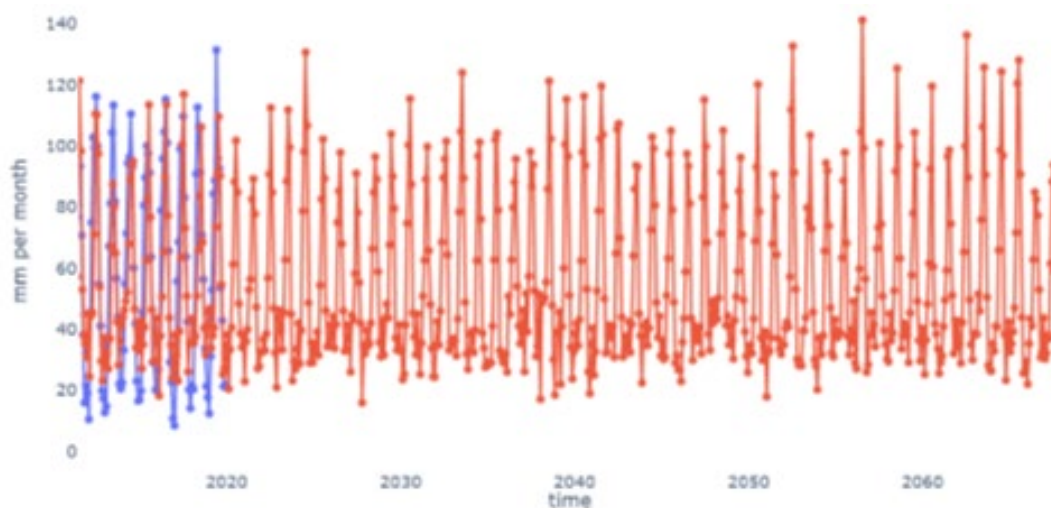
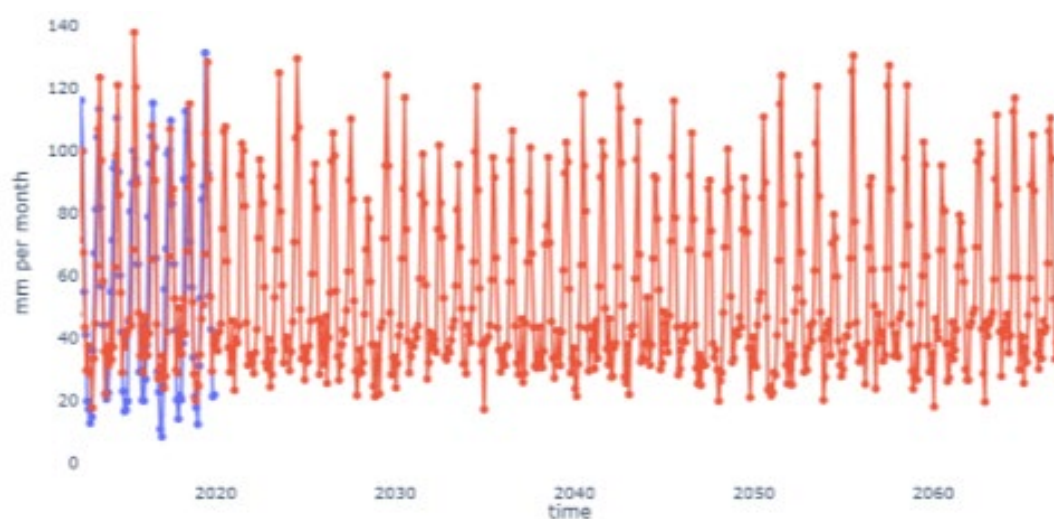




Figure 9. Variation de l'évaporation, RCP 8,5



La Figure 8 montre les variations de l'évaporation prévues à Welkenraedt dans le scénario RCP 4,5; la Figure 9 montre les prévisions pour le scénario RCP 8,5. Dans le premier scénario, il semble que l'évaporation augmente légèrement au cours des prochaines années. En revanche, l'évaporation semble rester relativement inchangée, voire légèrement diminuer, dans le second scénario.

Comme pour les autres variables climatiques, les variations de l'évaporation peuvent modifier l'attrait économique du projet agroforestier.

L'augmentation des niveaux d'évaporation peut avoir des effets néfastes sur l'environnement. Il a été démontré que « l'évaporation rend les couches supérieures du sol sèches et dures. Lorsque l'eau de pluie ou d'irrigation tombe ensuite sur le sol, une partie importante de l'eau s'écoule du sol au lieu de s'infiltrer dans le sol. Lorsque le sol est trop sec, les plantes peuvent ne pas pousser, et le sol est plus sensible à l'érosion éolienne » (Motes, 2019). Ainsi, les rendements agricoles de la région souffriront d'une augmentation de l'évaporation telle que prévue dans le scénario RCP 4,5. Les effets négatifs de l'augmentation du ruissellement seront également amplifiés.

De tels effets négatifs sur le climat peuvent cependant être évités grâce à l'agroforesterie. Une étude menée au Kenya a révélé que « les arbres pourraient réduire l'évaporation annuelle du sol directement sous leur couvert de 35% en moyenne » (Wallace, 1999). Le projet agroforestier contribuera donc à atténuer ces effets négatifs si l'évaporation augmente tel que prévu dans le scénario RCP 4,5. Les coûts ainsi évités amplifieront les arguments en faveur d'un investissement dans le projet agroforestier.

Figure 10. Variation de la vitesse du vent, RCP 4,5

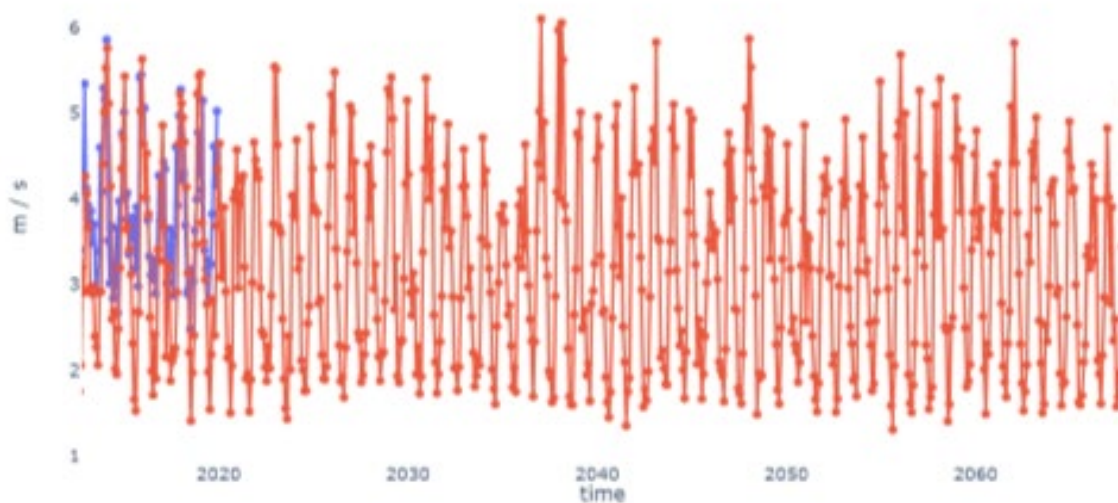
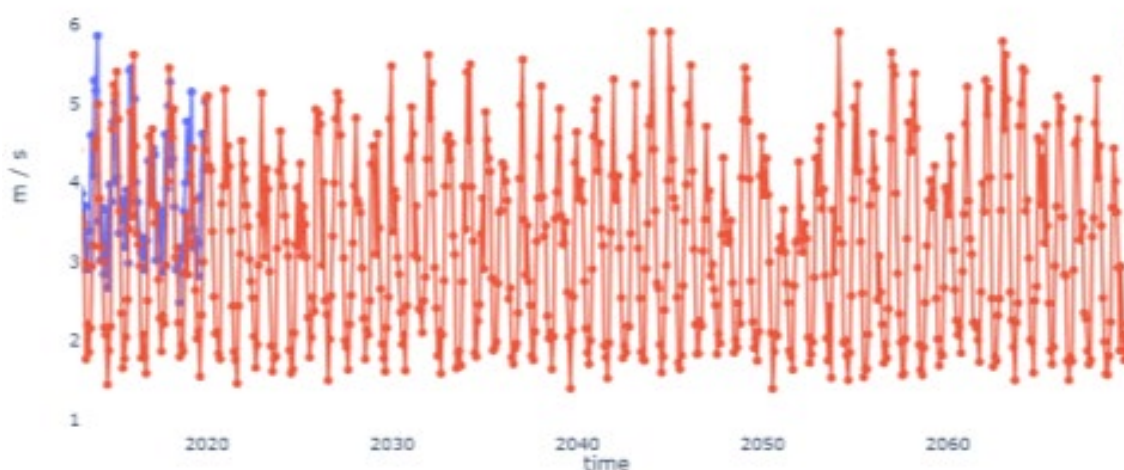


Figure 11. Variation de la vitesse du vent, RCP 8,5



La Figure 10 montre les variations de la vitesse du vent prévues dans le scénario RCP 4.5; la Figure 11 montre les prévisions pour le scénario climatique RCP 8,5. Le premier scénario prévoit une légère diminution de la vitesse du vent pendant le reste du siècle; le second scénario indique plutôt une légère augmentation. Le second scénario prévoit également une plus forte intensité de vents violents, ce qui est mis en évidence par les nombreux pics enregistrés vers la fin du siècle.

Une réduction de la vitesse du vent et des vents forts telle que prévue dans le scénario RCP 4,5 ne réduira probablement pas les bénéfices attendus du projet agroforestier. Une augmentation de la vitesse du vent et des vents forts, quant à elle, augmenterait plutôt l'attractivité du projet sur le plan économique. En effet, il a été démontré que la mise en œuvre de projets agroforestiers à proximité de terres agricoles tend à accroître les



rendements, car les arbres servent alors de brise-vent. Le projet agroforestier à Welkenraedt serait donc encore plus bénéfique en termes économiques s'il y avait intensification du vent et des vents forts dans les prochaines années.

Selon Jude Hobbs, spécialiste des haies, « lorsqu'une haie est plantée perpendiculairement aux vents dominants, elle peut réduire la vitesse du vent jusqu'à 75 % à des distances pouvant atteindre dix fois la hauteur de la haie sur un terrain plat » (Stross, 2020). Selon une estimation prudente d'une étude menée au Canada, les arbres peuvent augmenter le rendement des cultures de 5 % lorsqu'ils sont plantés (Alam, 2014). Il est donc évident qu'une augmentation de la vitesse du vent puisse entraîner une réduction des rendements agricoles, mais l'agroforesterie peut contrecarrer de tels effets en protégeant les cultures des changements climatiques.

2.3 Analyse spatiale explicite

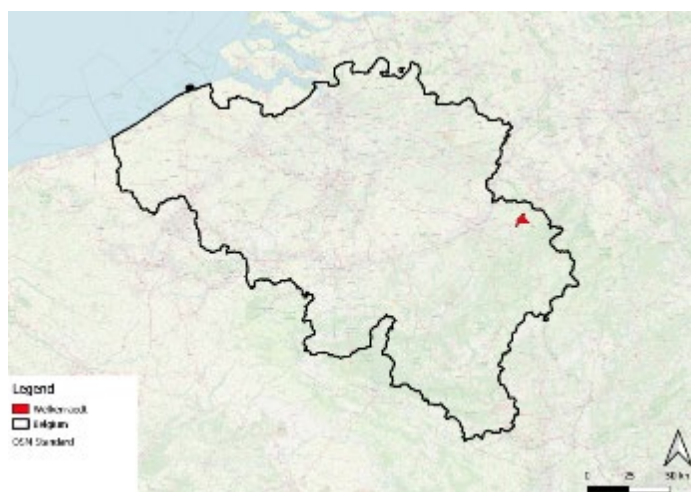
Nous avons utilisé des cartes spatiales générées par le modèle InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) afin d'estimer avec précision dans quelle mesure les différents services écosystémiques de Welkenraedt seraient affectés par le projet agroforestier. Plus précisément, nous avons produit, à partir d'InVEST, des cartes sur l'utilisation et la couverture des sols (LULC) nous permettant d'estimer l'impact de changements dans l'utilisation des sols sur différents services écosystémiques. Nous avons utilisé deux cartes LULC pour chaque modèle, basées sur deux scénarios pris en compte dans cette analyse :

- Scénario "Business-as-usual" (BAU) : la carte LULC originale a été utilisée.
- Scénario "Rangées d'arbres" (ROWS) : nous avons ajouté à la carte LULC originale les rangées d'arbres qui séparent les champs de culture que l'on trouve dans la zone d'étude.

Les résultats concernant la séquestration du carbone et la qualité de l'habitat sont présentés ici, mais l'analyse complète, qui a servi pour l'ACB intégrée, est disponible en annexe (en anglais).

Nous avons déterminé que le projet agroforestier entraînera une augmentation de la séquestration du carbone, de la pollinisation et de la qualité de l'habitat dans la région. Il permettra également de réduire les exportations de phosphore et d'azote dans la région. Des analyses spatiales ont par ailleurs été réalisées afin d'estimer l'impact du projet agroforestier sur la qualité de l'habitat, le rendement de l'eau et l'apport de sédiments.

Figure 12. Carte de la Belgique et Welkenraedt (en rouge)



La Figure 13 et la Figure 14 montrent la variation dans la séquestration du carbone entre les deux scénarios : le projet agroforestier entraînerait une augmentation de 0,5 % de la séquestration du carbone à Welkenraedt.

Figure 13. Séquestration du carbone, scénario BAU

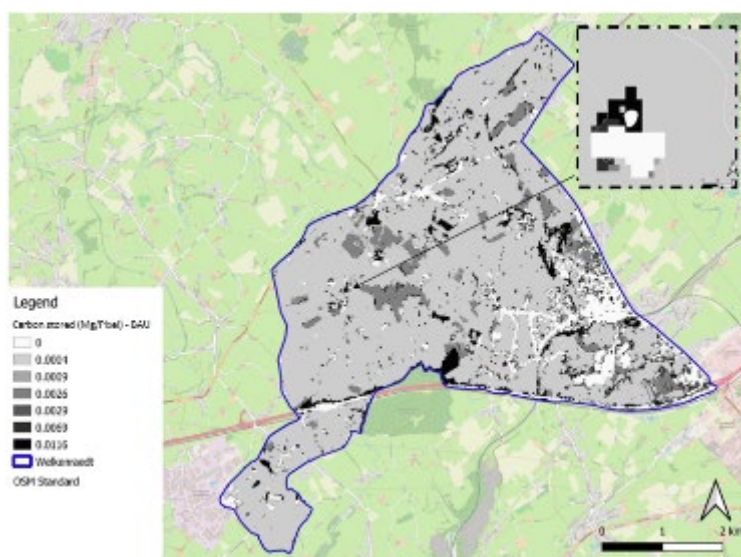


Figure 14. Séquestration du carbone, scénario ROWS

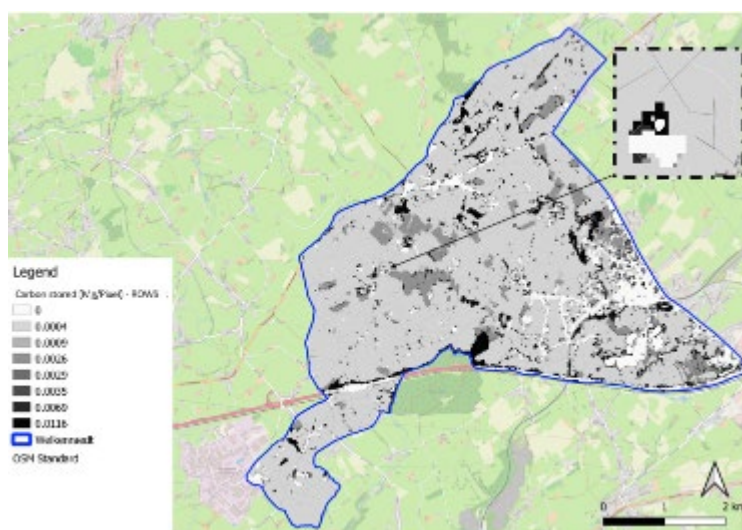


Tableau 1. Séquestration du carbone, scénarios BAU et ROWS

	Somme (mg)	Variation par rapport au scénario actuel (%)
Scénario BAU	85,789	0.5
Scénario ROWS	86,198	

La Figure 15 et la Figure 16 montrent quant à elles la variation dans la qualité de l'habitat entre les deux scénarios : le projet agroforestier entraînerait une amélioration de 1,8 % de la qualité de l'habitat.

Figure 15. Qualité de l'habitat, scénario BAU

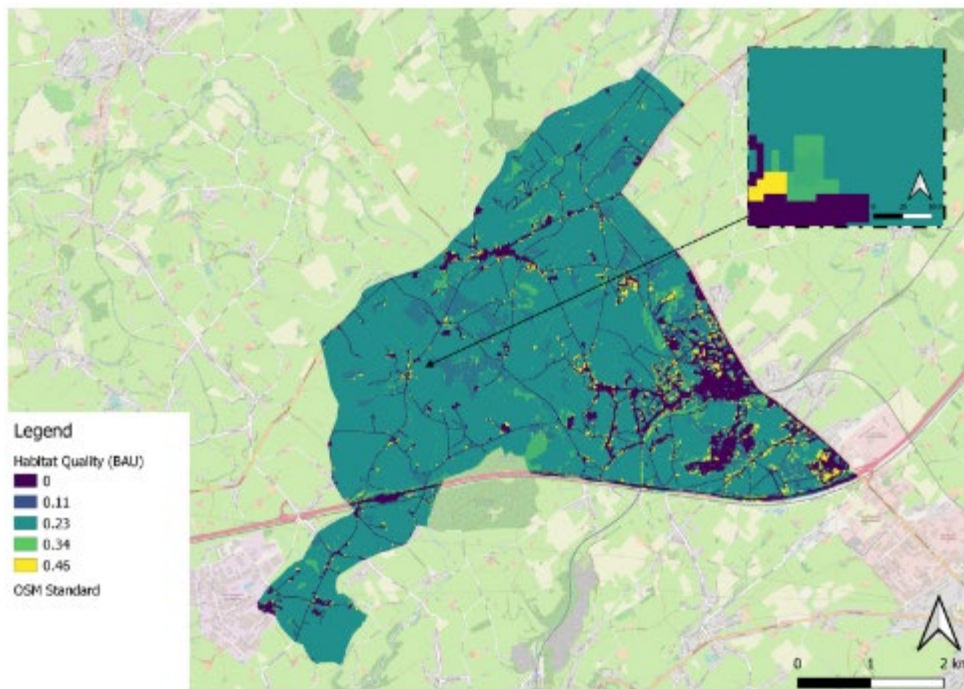


Figure 16. Qualité de l'habitat, scénario ROWS

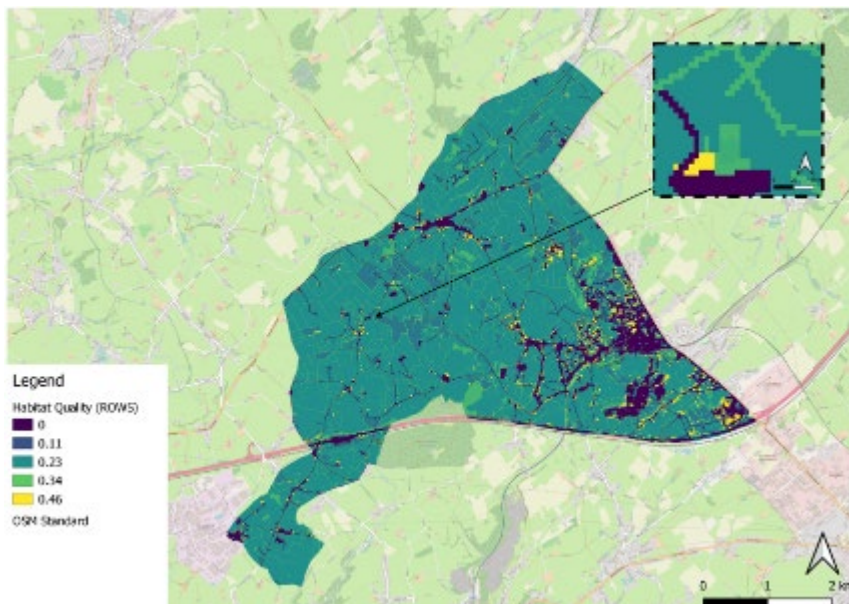




Tableau 2. Qualité de l'habitat, scénarios BAU et ROWS

	Moyenne	Variation par rapport au scénario actuel (%)
Scénario BAU	0.211	1.896%
Scénario ROWS	0.215	

2.4 Hypothèses et données utilisées pour l'évaluation SAVi

Le Tableau 3 et le Tableau 4 présentent les données, les hypothèses et le calcul des divers éléments de l'ACB intégrée.

Tableau 3. Information sur les projets

Zone (simulée avec le Système d'information géographique (SIG) InVEST)		
Superficie des rangées d'arbres (total)	98 916,30	m ²
Superficie des rangées d'arbres (total)	9,89	ha
Superficie d'un arbre (arbre isolé)	0,42	m ²
Arbres (pixels)	235,515	unit
Coûts (d'après Van Raffe et De Jong, 2014)		
Achat des plants	28 262	€
Plantation	357 983	€
Protection des plants	221 384	€
Total	607 629	€



Tableau 4. Hypothèses et références des données

Investissement et e&g	
Coût d'investissement	Les coûts d'investissement comprennent les montants liés à l'achat des plantes et à leur plantation. Nous avons d'abord calculé dans le logiciel QGIS le nombre de pixels représentant les arbres plantés (un pixel correspondant à un arbre). Nous avons ainsi obtenu un nombre de 235 515 arbres. Supposant ensuite, sur la base des données de Van Raffe et De Jong (2014), que les coûts liés à l'achat de plants et à leur plantation s'élèvent respectivement à 0,12 € arbre-1 et à 1,52 € arbre-1, nous avons trouvé que les coûts d'investissement totaliseraient 386 245 €.
Coût d'E&G	Supposant aussi, sur la base des données de Van Raffe et De Jong (2014), un coût d'E&G de 0,94 € arbre-1, nous avons trouvé que les coûts liés à la protection et à l'entretien des haies s'élèveraient à 221 384 €.
Externalités	
Revenu du travail agricole et d'autres industries	Nous avons calculé le revenu du travail agricole et d'autres industries en nous appuyant sur une estimation de Mills (2002) selon laquelle un coût de 1 000 000 £ pour la restauration de haies aurait un impact total (indirect et direct) sur le revenu de 1 364 436 £. Considérant les coûts totaux d'investissement et d'E&G du projet, nous avons déterminé que le revenu total du travail s'élèverait à 749 612 €.
Élimination de l'azote (N)	Nous avons calculé les coûts évités liés à l'élimination de N à partir des résultats du modèle InVEST sur le ratio annuel d'apport en nutriments, selon lesquels les arbres plantés pourraient réduire de 377 kg les exportations de N dans la zone étudiée. Nous avons ensuite multiplié ce chiffre par le coût de l'élimination de N dans les usines de traitement des déchets, sur la base de trois études différentes : 4,44 €/Kg, 7 €/Kg, et 8,5 \$/Kg (Preisner, Neverova-Dziopak & Kowalewski, 2020 ; Alam, et al., 2014 ; Tamburini, Soana, Monti, Fano & Castaldelli, 2020). Nous avons finalement calculé la valeur moyenne du coût évité de l'élimination de N dans la zone étudiée sur la base de la moyenne de ces trois valeurs, ce qui nous a donné un total de 46 857 € en coûts évités sur 20 ans.
Élimination du phosphore (P)	Nous avons calculé les coûts évités liés à l'élimination de N à partir des résultats du modèle InVEST sur le ratio annuel d'apport en nutriments, selon lesquels les arbres plantés pourraient réduire de 102 kg les exportations de P dans la zone étudiée. Nous avons ensuite multiplié ce chiffre par le coût de l'élimination de P dans les usines de traitement des déchets, sur



	la base de deux études différentes : 61,20 \$/kg et 24,46 €/Kg (Preisner, Neverova-Dziopak & Kowalewski, 2020 ; Alam, et al., 2014).
Approvisionnement en eau	Selon les résultats du modèle InVEST sur le rendement annuel en eau, les arbres nouvellement plantés pourraient augmenter le volume du rendement en eau de 10 000 m ³ . Supposant que le prix de l'eau est de 0,1 Eur/m ³ , nous avons calculé que les coûts totaux évités liés à l'approvisionnement en eau s'élèveraient à 1 000 € par an, ou 20 000 € sur une période de 20 ans.
Séquestration du carbone	Selon les résultats du modèle InVEST sur la séquestration du carbone, la quantité de carbone séquestré dans la zone étudiée serait de 4,6 t C/ha/an, soit 16 t CO ₂ /ha/an. En multipliant cette valeur par le nombre d'hectares couverts par les arbres plantés (9,89 ha) et par la valeur du carbone séquestré (10 \$/tonne métrique ou 9 \$/tonne (Lewandrowski, et al., 2004)), nous avons calculé que les bénéfices de la séquestration du carbone s'élèveraient à 27 495 € sur 20 ans.
Contrôle biologique	Selon Alam et al. (2014), les services écosystémiques rendus par la culture intercalaire d'arbres se chiffrent à 75 CAD/ha/an. En multipliant cette valeur par 9,89 ha, soit le nombre d'ha couverts par la plantation, nous avons calculé que les bénéfices liés au contrôle biologique dans la zone étudiée s'élèveraient à 9 496 € sur 20 ans.
REVENUS	
Tourisme et aménagement du territoire	Selon Rosember et al. (2017), la pratique du pique-nique a une valeur médiane de 23,62 \$/personne/jour. Supposant que les arbres plantés attireront 40 personnes/week-end, nous avons calculé que la valeur ajoutée pour le tourisme sera de 832 705 € sur 20 ans.
Production de lait (revenus supplémentaires grâce à la réduction du stress thermique)	<p>L'indice température-humidité (THI) tient compte des effets de la température ambiante et de l'humidité relative pour évaluer le risque de stress thermique chez le bétail (TermotecnicaPericoli, 2018). La formule est comme suit :</p> $THI = 0.8 * T + RH * (T - 14.4) + 46.4$ <p>Où T est la température ambiante ou la température au thermomètre sec en °C et RH est l'humidité relative exprimée sous forme de proportion.</p> <p>Nous avons d'abord calculé le supplément de production laitière en estimant le THI au mois de juillet dans une zone sans arbres (T=30°C, RH=0,78), puis dans une zone avec arbres (T=27,85°C, RH=0,78), tout en considérant que les zones avec arbres sont en moyenne plus fraîches de 2,15°C (Copernicus Climate Change,</p>



	<p>2020). Nous avons ainsi calculé un supplément de production laitière de 0,16 kg de lait/vache/jour. Nous avons ensuite multiplié ce chiffre par le nombre de jours chauds dans une année, le nombre d'années considérées (20), le nombre de vaches dans la zone étudiée (2762), puis le prix du lait à la ferme en Belgique (0,267 EUR/Kg, European Milk Board, 2016). Nous avons ainsi calculé que les revenus supplémentaires de production laitière découlant de la plantation d'arbres s'élèveraient à 139 845 €.</p>
Production de fourrage	<p>Nous avons multiplié le nombre d'arbres calculé dans le logiciel QGIS (235 515 unités) par la production de fourrage (kg) provenant du frêne commun (<i>Fraxinus excelsior</i>). Supposant que seulement 6% du total des arbres sont de taille similaire à celle du frêne commun, nous avons calculé que la production totale de fourrage provenant des arbres plantés s'élèverait à 706 545 kg/an. Supposant ensuite un taux de collection des feuilles de seulement 30%, nous avons estimé que la production totale de fourrage utilisée serait de 211 963,50 kg/an. Supposant enfin que le fourrage coûte environ 150 EUR/kg (CLAL, 2020), nous avons estimé les revenus du fourrage à 31 795 €/an, soit 635 891 € sur 20 ans.</p>
Production de granulés de bois/biomasse	<p>Nous avons multiplié le nombre d'ha qui seront couverts par des arbres tel qu'obtenu grâce au logiciel QGIS (9,89 ha) par une valeur intermédiaire de production de biomasse des haies arborées fournie par le client (15 m³/ha). Nous avons ensuite multiplié la production de biomasse obtenue (148,37 m³) par 1,4 afin d'exprimer cette valeur en tonnes (207,72 tonnes). Sachant qu'une tonne de bois correspond entre trois et quatre mètres cubes apparents (MCA), nous avons ensuite multiplié le nombre total de tonnes de biomasse par 3,5. Selon les documents partagés par notre client, la valeur économique d'un MCA de biomasse est de 24 €. Nous avons donc estimé les revenus économiques de la production de granulés de bois à 348 976 € sur 20 ans en multipliant 24 € par 727,03 MAP/an et par 20 ans.</p>
Augmentation du rendement des cultures grâce à l'effet brise-vent	<p>Nous avons d'abord calculé la valeur du rendement des cultures dans la zone étudiée (kg) en multipliant le nombre d'ha de différentes cultures (céréales, fourrage, pommes, poires) dans le Welkenraedt (StatBel, 2019) par la productivité moyenne des terres de ces cultures en Belgique entre 2000 et 2018 (FAOSTAT, 2020). Puis, grâce aux données de la Commission européenne (2016), nous avons estimé que l'augmentation moyenne du rendement des différentes cultures due à l'effet brise-vent des rangées d'arbres s'élève à 19,38% (nous avons aussi considéré un niveau d'augmentation plus faible à 10%). Nous avons alors</p>



	<p>calculé l'augmentation du rendement des cultures dûe à l'effet brise-vent en multipliant le rendement des cultures à Welkenraedt par 19,38% et 10%.</p> <p>Nous avons ensuite multiplié le supplément de production par les prix de vente moyens du blé (et du fourrage), des pommes et des poires (0,16 €/kg, 0,45 €/kg et 0,32 €/kg respectivement), tels que publiés par la Direction de l'Analyse Économique Agricole (2020) et European Crop Protection (2020). Nous avons finalement multiplié ces chiffres par le nombre d'années considérées dans cette analyse (20). Nous avons ainsi calculé que les revenus supplémentaires de la production agricole totaliseraient entre 942 747 € (effet brise-vent de 10 %) et 1 826 572 € (effet brise-vent de 19,38 %).</p>
--	---



3 Résultats - SAVi Agroforesterie - Welkenraedt

3.1 Analyse coûts-bénéfices (ACB) intégrée

Le Tableau 5 présente de l'ACB intégrée du projet agroforestier de Welkenraedt sur une période de 20 ans. Le tableau inclut notamment les externalités et les revenus affectés par les variables climatiques, ainsi que les hypothèses et données utilisées dans l'ACB intégrée.

Le projet agroforestier permet de générer des bénéfices aussi bien que d'éviter des coûts, lesquels nous avons quantifiés et exprimés en termes monétaires dans le cadre de cette analyse. Le projet génère notamment des revenus directs supplémentaires pour diverses parties prenantes. La somme des externalités (coûts évités/bénéfices) et des revenus supplémentaires prouve, d'une part, que le projet agroforestier procure un bénéfice net à la commune de Welkenraedt ainsi qu'à ses citoyens et, d'autre part, qu'il présente une opportunité d'investissement profitable sur les plans tant social qu'économique.

Premièrement, la plantation et l'entretien des haies génèrent des revenus de travail supplémentaires d'une valeur de 749 612 € sur 20 ans. Deuxièmement, l'agroforesterie fournit des services écosystémiques dont nous avons évalué la valeur ajoutée dans le cadre de cette analyse. Nous avons notamment évalué la valeur de l'élimination de l'azote et du phosphore, de la régulation de l'approvisionnement en eau, de la séquestration du carbone et de la pollinisation. Les hypothèses sur lesquelles reposent ces évaluations sont présentées dans le Tableau 6.

Nous avons par exemple estimé la valeur économique de l'élimination des nutriments en fonction du coût associé à la construction d'une installation de traitement des eaux usées, qui fournirait des services d'absorption des nutriments équivalents à ceux que procurent naturellement les arbres. Une telle estimation est hypothétique, du fait de la taille potentiellement très réduite de l'installation de traitement requise et de la difficulté de transporter l'eau à travers le territoire (qui rend impossible le recours à une station d'épuration centralisée). Par conséquent, nos résultats sont présentés à titre indicatif, avec pour objectif de donner une mesure de la valeur économique offerte et créée par la nature elle-même, par opposition aux coûts d'infrastructures construites.

- Nous avons finalement estimé en termes monétaires les bénéfices directs et les revenus supplémentaires générés par le projet agroforestier :
- La taille de certaines parties des haies pour la production de granulés de bois, destinés à être vendus et utilisés comme biomasse pour la production d'énergie, pourrait générer un revenu supplémentaire de 348 976 €.
- Les revenus du tourisme devraient augmenter de 832 705 €, au bénéfice du territoire du Pays de Herve qui entoure la commune de Welkenraedt.
- Les haies serviront de fourrage de haute qualité pour les vaches et devraient permettre aux agriculteurs d'économiser jusqu'à 635 891 €.



- Les vaches, grâce à l'ombre que procurent les haies, devraient aussi subir moins de stress thermique et donc produire plus de lait, procurant aux agriculteurs un revenu supplémentaire d'au moins 139 845 €. Cet impact pourrait être encore plus important selon les scénarios climatiques.
- Le rendement agricole des différentes cultures bénéficiera aussi directement de l'agroforesterie, grâce à l'effet brise-vent des arbres, qui devrait se traduire par des revenus supplémentaires de 1 384 659 € en production agricole.

Tableau 5. ACB intégrée, agroforesterie, Welkenraedt

ACB intégrée (EUR)	Agroforesterie	Variables climatiques connexes	Impact sur la viabilité économique
Investissement et E&G			
<i>Coût en capital</i>	386,245		
<i>Coût d'exploitation et d'entretien</i>	221,384		
Total des coûts d'investissement et d'E&G (1)	607,629		
Externalités - coûts évités/bénéfices ajoutés			
Revenu du travail agricole et d'autres industries	749,612		
Valeur de l'ES sélectionné			
Élimination de l'azote	46,857	Augmentation des précipitations et du ruissellement	+
Élimination de P	77,851	Augmentation des précipitations et du ruissellement	+
Capacité de rétention d'eau	20,000		
Séquestration du carbone	27,495	Augmentation de la température de l'air	+
Pollinisation	9,496		
Total des externalités (2)	1,227,584		
Revenus			
Production de granulés de bois / biomasse	348,976	Augmentation de la vitesse du vent	+
Tourisme et aménagement du territoire	832,705		
Production de fourrage	635,891	Augmentation de la vitesse du vent	+
Production laitière (réduction de l'effet du stress thermique)	139,845	Augmentation de la température de l'air	+
Production agricole (effet brise-vent)	1,384,659	Augmentation de la vitesse du vent	+
Total des revenus (3)	3,342,076		
Résultat net (2) + (3) - (1)	3,962,031		



3.2 Modèle de financement

L'objectif principal du modèle de financement du projet SAVi est d'évaluer la viabilité financière du projet et de calculer le retour sur investissement attendu lorsque les externalités environnementales, sociales et économiques sont prises en compte. Les projets d'infrastructure basée sur la nature, à l'instar de ce projet agroforestier, génèrent rarement des flux de trésorerie entrants, dans le sens traditionnel du terme. Cependant, comme montré dans l'ACB intégrée, les projets d'infrastructure basée sur la nature offrent une série d'avantages directs aux diverses parties prenantes, en plus d'externalités sous la forme de coûts évités et de bénéfices supplémentaires.

Pour démontrer la valeur d'investissement des infrastructures basées sur la nature, par le calcul de la valeur actuelle nette (VAN) et du taux de rentabilité interne (TRI), le modèle de financement de projet SAVi traite ces externalités comme des revenus. Cette approche est logique pour les décideurs qui souhaitent adopter une approche plus globale lorsqu'ils évaluent si le projet offre un bon rapport qualité-prix à la société tout au long de son cycle de vie. Lorsque les calculs de la VAN et du TRI intègrent les externalités, ils sont appelés respectivement valeur actuelle nette durable (VAN-D) et rendement interne durable (TRI-D). Afin de démontrer la pertinence d'investissements dans des projets d'infrastructure basée sur la nature, le modèle de financement du projet SAVi comptabilise ces externalités comme des revenus en calculant la valeur actuelle nette (VAN) et le taux de rendement interne (TRI). Cette approche est utile aux décideurs désirant adopter une approche plus globale afin de déterminer si un projet est rentable pour la société tout au long de son cycle de vie. Lorsque les calculs de la VAN et du TRI intègrent les externalités, on parle alors de valeur actuelle nette durable (VAN-D) et de rendement interne durable (TRI-D).

Le Tableau 6 présente les résultats du modèle de financement du projet. Si l'on se réfère aux revenus de la production laitière et de fourrage, le projet est difficile à justifier : la VAN est négative et le TRI est de 1,22 %, ce qui est inférieur au taux d'actualisation utilisé dans le cadre de cette évaluation. En revanche, si l'on considère l'ensemble des bénéfices générés par le projet, celui-ci devient rentable, le TRI passant à 20,88 %. En outre, si l'on intègre tous les revenus supplémentaires ainsi que les externalités, le TRI-D passe à 27,85 % et la VAN-D, à 1 430 000 €.

Tableau 6. TRI et VAN, agroforesterie, Welkenraedt

Scénario	TRI (%)	VAN (€)
Sur la base de la production supplémentaire en fourrage et en lait	1.22	- 120,000
Sur la base de tous les revenus supplémentaires	20.88	930,000
Sur la base de tous les revenus supplémentaires et des externalités	27.85	1,430,000



Les résultats financiers démontrent que le projet génère un niveau de revenus suffisant par rapport aux coûts engagés. Par conséquent, on peut dire du projet qu'il permet un usage avantageux des ressources publiques. Cette conclusion est confirmée par les valeurs élevées de VAN-D et TRI-D, lesquelles démontrent que les externalités évaluées ont un impact financier significatif sur le modèle financier et qu'elles génèrent des retombées significatives pour plusieurs parties prenantes locales ainsi que pour la société en général.

Les scénarios RCP 4, 5 et 8, 5 ont tous deux un impact significatif sur les variables climatiques, comme la température et les précipitations. Il est donc raisonnable de s'attendre à ce que le TRI et la VAN soient plus élevés dans le cadre de tels scénarios climatiques, car il est attendu que les changements dans les variables climatiques entraînent une augmentation des revenus du projet, comme la production laitière, ainsi que de la valeur de certains services écosystémiques.

L'évaluation financière du projet agroforestier a été réalisée en supposant que sa durée de vie utile serait de 20 ans. En fonction du type d'arbres plantés, cette durée pourrait être beaucoup plus longue en réalité. Cela signifierait que le projet aurait encore une valeur terminale très intéressante au-delà de 20 ans d'opération. Nous n'avons toutefois pas tenu compte ce paramètre dans l'évaluation financière en raison du peu d'information disponible sur la durée de vie des arbres. De plus, afin de refléter le temps nécessaire à la croissance des arbres, nous avons supposé que ceux-ci n'atteindraient pas leur plein potentiel de génération de revenus, y compris les externalités, avant 10 ans. Nos calculs n'ont donc pris en compte que 50 % des revenus pendant les 10 premières années.



4. Conclusions

Cette évaluation SAVi souligne l'attrait économique du projet agroforestier à Welkenraedt. L'analyse spatiale ainsi que les données du CDS, de même que la collaboration de la commune de Welkenraedt, ont permis d'adapter l'évaluation à la situation géographique et de déterminer les impacts spécifiques de l'agroforesterie dans la région.

Les résultats de l'ACB intégrée et les indicateurs financiers montrent l'attractivité économique et la viabilité financière du projet :

Les bénéfices nets du projet agroforestier sont estimés à 3 900 000 € sur 20 ans, correspondant à un coût d'investissement de 607 629 €. Ces bénéfices découlent d'externalités positives, de coûts évités et de flux de revenus potentiels supplémentaires, comme la production de fourrage et de granulés de bois.

Ces bénéfices ne peuvent qu'augmenter avec le temps en raison des changements climatiques, ce qui aura pour effet de rendre les projets agroforestiers encore plus attractifs d'un point de vue économique. L'agroforesterie devient plus intéressante lorsque l'on considère les changements climatiques, car elle en atténue voire élimine de nombreux effets négatifs : atténuation des dommages causés par les inondations, gain en matière de séquestration du carbone, diminution des niveaux de stress thermique, réduction de la pollution de l'eau et régulation des rendements agricoles. L'agroforesterie a, par exemple, un effet rafraîchissant qui contribue à réduire le stress thermique du bétail, améliorant ainsi sa production laitière et, par le fait même, les revenus des agriculteurs.

Cette évaluation démontre que l'agroforesterie est un investissement rentable et une composante importante de la stratégie d'adaptation au climat de la commune. La commune ainsi que d'autres parties prenantes peuvent utiliser les résultats de cette analyse afin de consolider les stratégies d'adaptation au climat, de promouvoir davantage les investissements dans l'agroforesterie et d'identifier les nombreuses activités économiques et les flux de revenus que l'agroforesterie peut générer.



Références

Alam, M., Olivier, A., Paquette, A., Dupras, J., Revéret, J., & Messier, C. (2014). A general framework for the quantification and valuation of ecosystem services of tree-based intercropping systems. *Agroforestry systems*, 88(4), 679–691.

<https://doi.org/10.1007/s10457-014-9681-x>

Association pour l'agroforesterie en Wallonie et Bruxelles (2020). *Guide interactive: Mahaie.be – Haie si on plntait ?*

<http://www.awaf.be/haies/brochure/Guide%20interactif.pdf>

Bassi, A., Gallagher, L., & Helsingen, H. (2016). *Green economy modelling of ecosystem services along the “Road to Dawei.”* <https://www.mdpi.com/2076-3298/3/3/19/htm?>

Bassi, A., Wuennenberg, L., & Pallaske, G. (2019, February 28). *Sustainable Asset Valuation Tool: Natural infrastructure.* <https://www.iisd.org/publications/sustainable-asset-valuation-tool-natural-infrastructure>

Bhagabati, N., Barano, T., Conte, M., Ennaanay, D., Hadian, O., McKenzie, E., Olwero, N., Rosenthal, A., Suparmoko, Shapiro, A., Tallis, H., & Wolny, S. (2012). *A green vision for Sumatra: Using ecosystem services information to make recommendations for sustainable land use planning at the province and district level.* World Wildlife Fund and the Natural Capital Project.

Chandler, K. R., Stevens, C. J., Binley, A., & Keith, A. M. (2018). Influence of tree species and forest landuse on soil hydraulic conductivity and implications for surface runoff generation. *Geoderma*, 310, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.011>

CLAL. (2020). *Prices of livestock foods: Fodder and by-products.*

https://www.clal.it/en/?section=conf_foraggi

Copernicus Climate Change. (2020). *Integration of Climate Data in the SAVi Nature-Based Infrastructure Model C3S_428h_IISD-EU: Sustainable Asset Valuation (SAVi): Demonstrating the business case for climate-resilient and sustainable infrastructure.*

Direction de l'Analyse Economique Agricole. (2020). *Performances et rentabilité en agriculture wallonne (Années 2015 à 2018).*

<https://agriculture.wallonie.be/documents/20182/21897/performances+et+rentabilit%C3%A9+en+agriculture+wallonne+2018.pdf/429d15b8-939e-489c-b494-8726e5f75865>

European Commission. (2016). *EIP-AGRI Focus Group: Benefits of landscape features for arable crop production.* https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/eip-agri_fg_ecological-focus-areas_final-report_en.pdf

European Crop Protection. (2020). *Low yield report II: Cumulative impact of hazard-based legislation on crop protection products in Europe.*

https://issuu.com/cropprotection/docs/low_yield_report_ii



European Milk Board. (2016). https://www.europeanmilkboard.org/home.html?no_cache=1

FAOSTAT. (2020). <http://www.fao.org/faostat/en/>

Forrester, J. W. (1961). *Industrial dynamics*. MIT Press.

Hirons, A. D., & Sjöman, H. (2018) *Tree species selection for green infrastructure: A guide for specifiers*. Trees & Design Action Group.

<https://nx3.cloudlws.com/s/jfMnJYF3NBai5CQ#pdfviewer>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Institute for Global Environmental Strategies.

Lewandrowski, J., Peters, M., Jones, C., House, R., Sperow, M., Eve, M., & Paustian, K. (2004). *Economics of sequestering carbon in the US agricultural sector* (No. 1488-2016-124704). United States Department of Agriculture.

https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/47467/17126_tb1909_1_.pdf?v=0

Mills, J. (2002). More than biodiversity: The socio-economic impact of implementing biodiversity action plans in the UK. *Journal of Environmental Planning and Management*, 45(4), 533–547. <https://doi.org/10.1080/09640560220143549>

Morrone, R. (2019). *Using Sentinel-2 derived deforestation maps of the primeval Bialowieza forest to map habitat degradation with the InVEST ecosystem service model*. <https://valuing-nature.net/sites/default/files/documents/AnnualConf/Morrone%2C%20Rosalinda.pdf>

Motes, J. (2019, August 8). *The effects of evaporation on agricultural production*. Career

Trend. <https://careertrend.com/the-effects-of-evaporation-on-agricultural-production-13660524.html>

Preisner, M., Neverova-Dziopak, E., & Kowalewski, Z. (2020). An analytical review of different approaches to wastewater discharge standards with particular emphasis on nutrients. *Environmental Management*, 66(4), 694–708. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01344-y>

Renard, K. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. United States Government Printing.

Roberts, N., Andersen, D., Deal, R., Garet, M., & Shaffer, W. (1983). *Introduction to computer simulation: The system dynamics approach*. Addison-Wesley.

Rosenberger, R. S., White, E., Kline, J., & Cvitanovich, C. (2017). *Recreation economic values for estimating outdoor recreation economic benefits from the National Forest System* (Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-957). US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_gtr957.pdf



StatBel. (2019). *Agricultural data for 2019*. <https://statbel.fgov.be/en/themes/agriculture-fishery/farm-and-horticultural-holdings#figures>

Stross, A. (2020, April 1). *10 reasons to plant a hedgerow*. Tenth Acre Farm.

<https://www.tenthacrefarm.com/10-reasons-to-plant-a-hedgerow/>

Sulistiyawan, B., Eichelberger, B., Verweij, P., Hardian, O., Adzan, G., & Sukmantoro, W. (2017). Connecting the fragmented habitat of endangered mammals in the landscape of Riau–Jambi–Sumatera Barat (RIMBA), central Sumatra, Indonesia (connecting the fragmented habitat due to road development). *Global Ecology and Conservation*, 9, 116–130. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.12.003>

Tamburini, E., Soana, E., Monti, M., Fano, E., & Castaldelli, G. (2020). Introducing life cycle assessment in costs and benefits analysis of vegetation management in drainage canals of lowland agricultural landscapes. *Water*, 12(8), 2236. <https://doi.org/10.3390/w12082236>

Tapaneeyakul, S. (2015). *Spatial valuation of ecosystem services in agricultural lands* [Doctoral dissertation, Texas A&M University].

<https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/156304/TAPANEEYAKUL-DISSERTATION-2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

TermotecnicaPericoli. (2018). *Temperature Humidity Index: What you need to know about it*. <https://www.pericoli.com/EN/news/120/Temperature-Humidity-Index-what-you-need-to-know-about-it.html>

Terrado, M., Sabater, S., Chaplin-Kramer, B., Mandle, L., Ziv, G., & Acuña, V. (2016). Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. *Science of the total environment*, 540, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.064>

United Nations Environment Programme (UNEP). (2014). *Using models for green economy policymaking*. http://www.un-page.org/files/public/content-page/unep_models_ge_for_web.pdf

Van Raffe, J., & De Jong, J. (2014). *Normenboek Natuur, Bos en landschap 2014, Tijd- en kostennormen voor inrichting en beheer van natuurterreinen, bossen en landschapselementen* [in Dutch]. Software, Alterra, Wageningen-UR.

Wallace, J. S., Jackson, N. A., & Ong, C. K. (1999). Modelling soil evaporation in an agroforestry system in Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94(3–4), 189–202. [https://doi.org/10.1016/s0168-1923\(99\)00009-x](https://doi.org/10.1016/s0168-1923(99)00009-x)

Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.



Wu, L., Long, T.-, Liu, X., & Guo, J.-. (2012). Impacts of climate and land-use changes on the migration of non-point source nitrogen and phosphorus during rainfall-runoff in the Jialing River Watershed, China. *Journal of Hydrology*, 475, 26–41.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.022>

Zhou, R., Li, W., Zhang, Y., Peng, M., Wang, C., Sha, L., Liu, Y., Song, Q., Fei, X., Jin, Y., Gao, J., Lin, Y., Grace, J., & Wang, S. (2018). Responses of the carbon storage and sequestration potential of forest vegetation to temperature increases in Yunnan Province, SW China. *Forests*, 9(5), 227.

<https://doi.org/10.3390/f9050227>

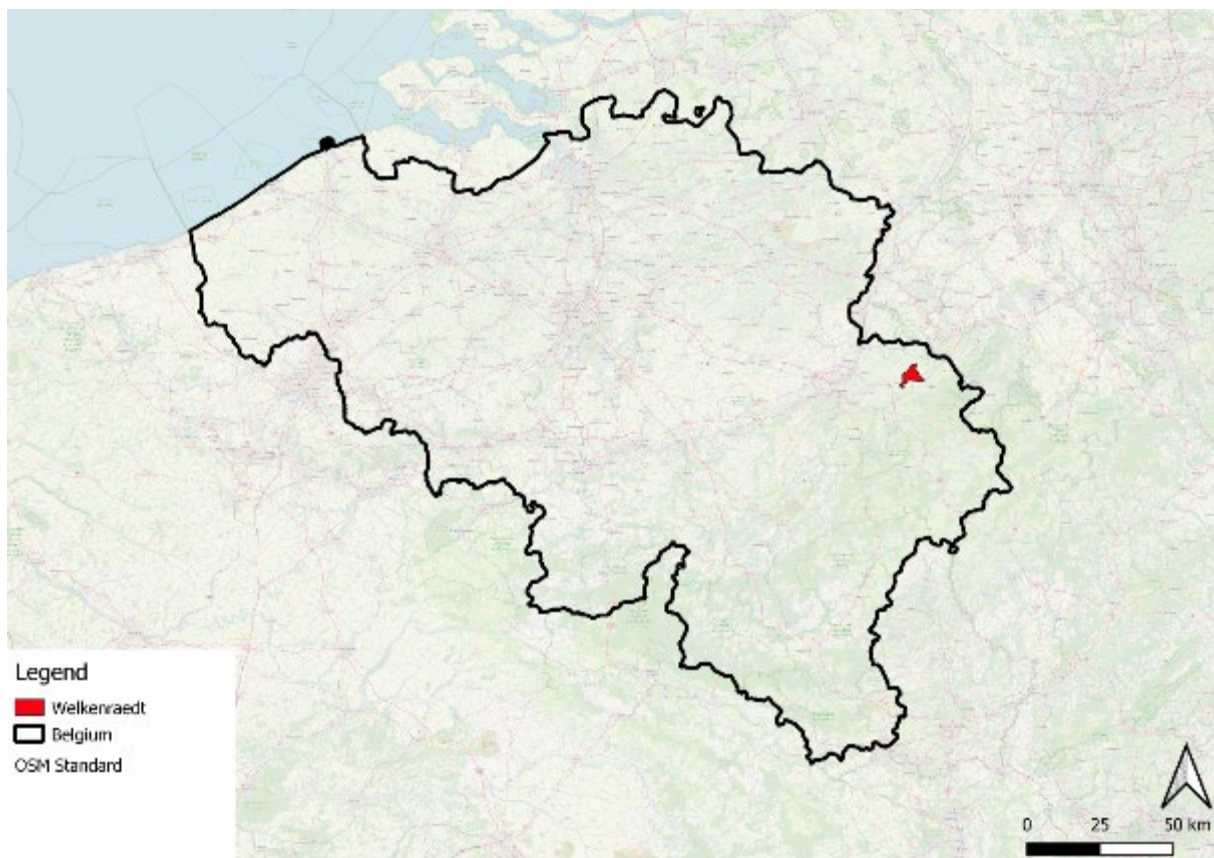
Annex A. Assessing Ecosystem Services Supply in Belgium by applying the Invest Tool

1. Model Set Up

a. Study Area

The study area of this analysis is the municipality of Welkenraedt in Belgium (Figure A1).

Figure A1. Location of Welkenraedt





b. Coordination System

Based on world project coordinate system called “V WGS 84 / Pseudo-Mercator -- Spherical Mercator – ESPG: 3857”

Here is the detail of the coordinate system:

```
PROJCS["WGS 84 / Pseudo-Mercator",
  GEOGCS["WGS 84",
    DATUM["WGS_1984",
      SPHEROID["WGS 84",6378137,298.257223563,
        AUTHORITY["EPSG","7030"]],
      AUTHORITY["EPSG","6326"]],
    PRIMEM["Greenwich",0,
      AUTHORITY["EPSG","8901"]],
    UNIT["degree",0.0174532925199433,
      AUTHORITY["EPSG","9122"]],
      AUTHORITY["EPSG","4326"]],
    PROJECTION["Mercator_1SP"],
    PARAMETER["central_meridian",0],
    PARAMETER["scale_factor",1],
    PARAMETER["false_easting",0],
    PARAMETER["false_northing",0],
    UNIT["metre",1,
      AUTHORITY["EPSG","9001"]],
    AXIS["X",EAST],
    AXIS["Y",NORTH],
    EXTENSION["PROJ4","+proj=merc +a=6378137 +b=6378137 +lat_ts=0.0 +lon_0=0.0 +x_0=0.0 +y_0=0 +k=1.0 +units=m +nadgrids=@null +wktext +no_defs"],
    AUTHORITY["EPSG","3857"]]
```

c. Administrative Boundary

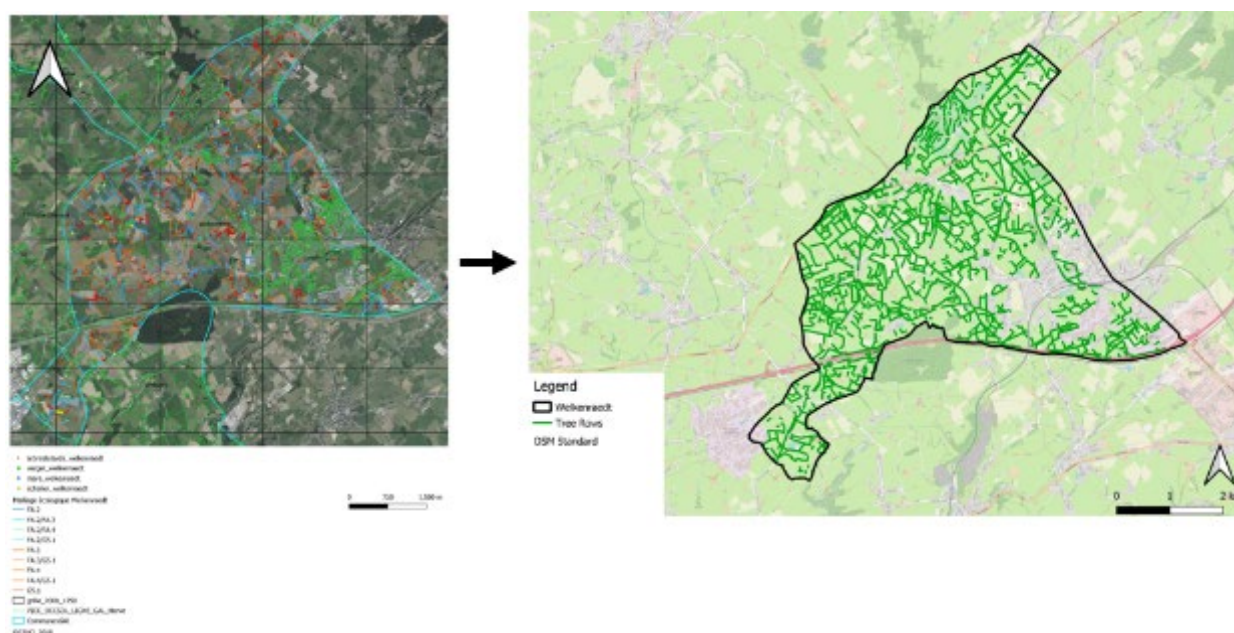
The boundaries of the Welkenraedt municipality have been downloaded from: <https://hub.arcgis.com/datasets/esribeluxdata::belgium-municipalities-1/data?geometry=-4.905%2C49.273%2C13.859%2C51.719>

d. Rationale

This study aims to assess the delivery of ecosystem services in the study area using different InVEST models. Different models require different inputs, which are described in the next sections. However, each model needs land-use/land cover maps (LULC) as inputs. Therefore, for each model we used two different LULC maps depending on two different scenarios that have been considered in this analysis:

- Business as usual (BAU): the original LULC map has been used (see section “e”).
- Tree Rows (ROWS): we added tree rows that separate crop fields to the original LULC map and can be found in the study area. The original project shows different categories of tree rows. Here, we considered all the tree rows that can be found outside urban areas, as Figure A2 shows.

Figure A2. Tree rows considered in this analysis



e. Land Cover Maps

The Land Cover Map of Europe 2017, a product resulting from Phase 2 of the S2GLC project, was used for this analysis. The LULC has an original resolution of 10 meters and 13 land cover classes. More information can be found here: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/03/Europe_land-cover_mapped_in_10_m_resolution

The original map has been reclassified to 0.65-metres resolution and three to four additional classes have been added depending on scenarios. For the BAU scenario, we added streams, ponds, and roads, which can be downloaded from OpenStreet Map. For the ROWS scenario, we also added tree rows (see section 1d).

Figure A3 and Figure A4 illustrate the LULC maps that have been used for each scenario, including a zoom in the same location to show parts of a stream and a road, a pond, and in the case of Figure A4, some tree rows.

Figure A3. LULC map – BAU scenario

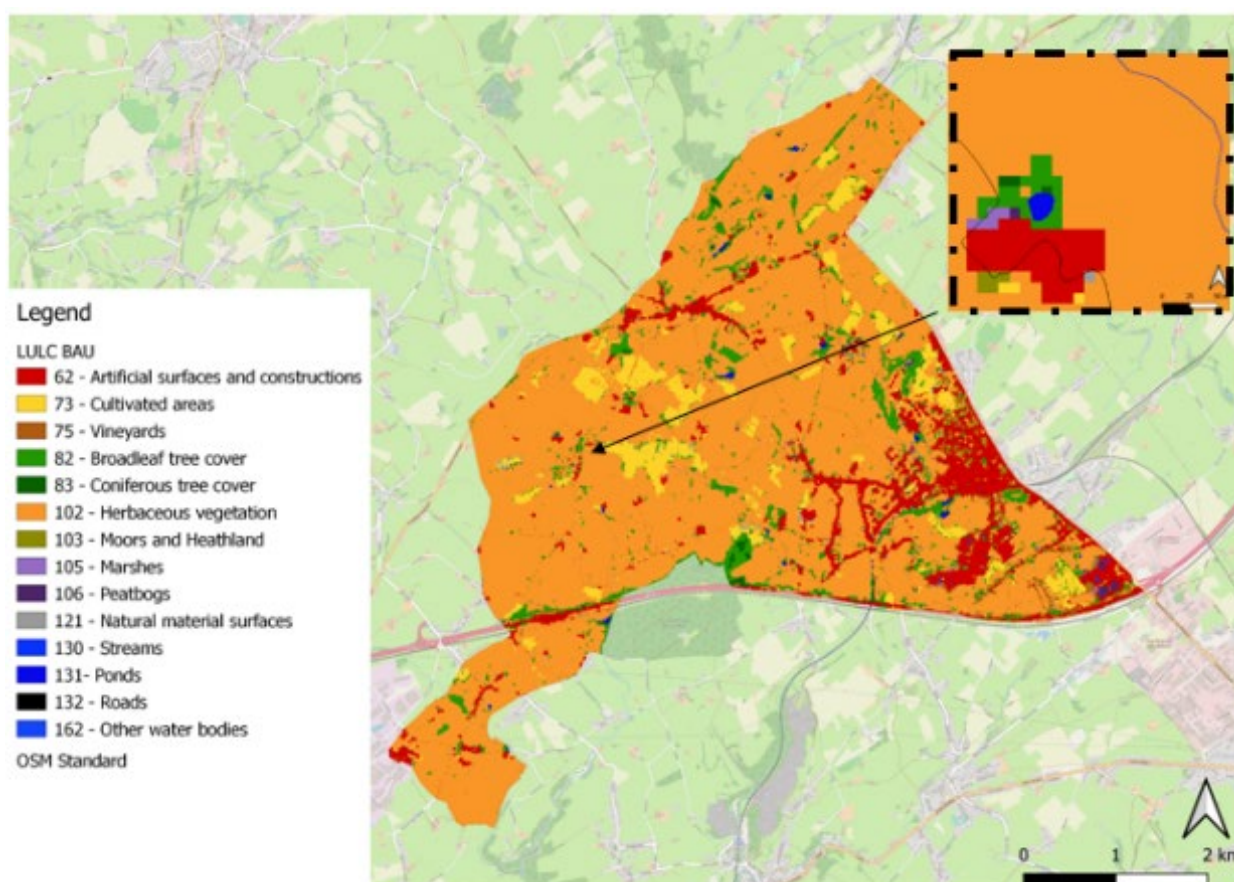
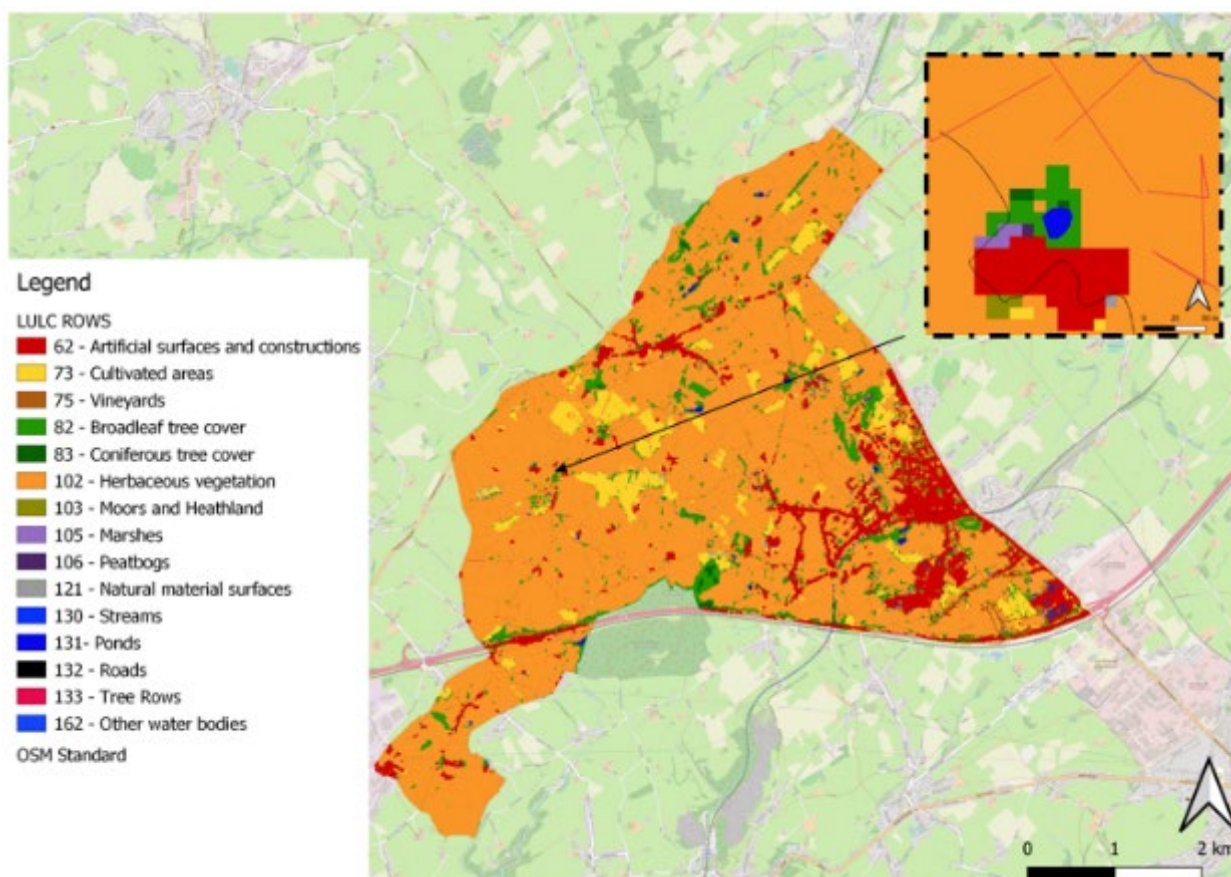


Figure A4. LULC map – ROWS scenario



f. Software and simulation

The ecosystem services map simulation has been performed using InVEST Software V.3.8.0 (<https://naturalcapitalproject.stanford.edu/invest/>). The inputs spatial data for the InVEST model have been prepared by utilizing QGIS-OSGeoW-3.4.2-1 (qgis.org/downloads/). The tabulated data will be managed and prepared in Ms. Excel V. 2016.



2. Carbon Storage

2.1 Input Data Preparation and Processing

1. Land use/land cover maps – The LULC maps described in section 1e have been utilized. Please note that in this case we assumed that the LULC ROW map shows the landscape after 9 years from the landscape described by the LULC BAU map. The reason for this choice is the fact the carbon model requires the user to define a specific interval to calculate carbon sequestration over time. In other words, the LULC BAU map can describe the landscape as of 2021, while the LULC ROWS map can show the landscape as of 2030.

2. Carbon Pools – Table of LULC classes, containing data on carbon stored in each of the four fundamental pools for each LULC class

- Carbon above ground: The values of carbon density in aboveground mass (Mg/ha or tonnes/ha) of each land-use type are shown in Table A1
- Carbon below ground: The values of carbon density in belowground mass (Mg/ha) of each land use-type are shown in Table A1,
- Carbon stored in organic matter: The values of carbon density in dead mass (Mg/ha) of each land-use type are shown in Table A1.
- Carbon stored in soil: The values of carbon density in dead mass (Mg/ha) of each land-use type are shown in Table A1.

The unit of measurement for these coefficients is Mg/ha. Average carbon coefficients values have been found in the *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* report, Chapter 4, “Agriculture, Forestry and Other Land Use” (IPCC, 2006). Please note that for classes 103, 105, and 106, we integrated the carbon pools derived by the IPCC with the InVEST Blue Carbon model inventory, in order to improve the estimates of carbon sequestered into soil from these classes.



Table A1. Carbon pools

lucode	LULC_Name	C_above	C_below	C_soil	C_dead
62	lc_62	0	0	0	0
73	lc_73	18.8	6.204	0.68	0
75	lc_75	23.5	5.405	0.68	0
82	lc_82	94	21.62	0.68	0
83	lc_83	94	21.62	0.68	0
102	lc_102	0.799	3.055	0.68	0
103	lc_103	14.1	54.05	0.68	0
104	lc_104	7.05	1.6215	0.68	0
105	lc_105	14.1	54.05	0.68	0
106	lc_106	14.1	54.05	0.68	0
121	lc_121	7.05	1.6215	0.68	0
123	lc_123	0	0	0	0
130	lc_130	0	0	0	0
131	lc_131	0	0	0	0
132	lc_132	0	0	0	0
133	lc_133	28.2	6.486	0.68	0
162	lc_162	0	0	0	0

2.2 Results

Figure 5 and Figure 6 show the amount of carbon stored in Megagrams (Mg) in each pixel in both the BAU and ROWS scenarios. They are a sum of all the carbon pools provided by the biophysical table.

Figure A5. Carbon stored (Mg/Pixel) – BAU scenario

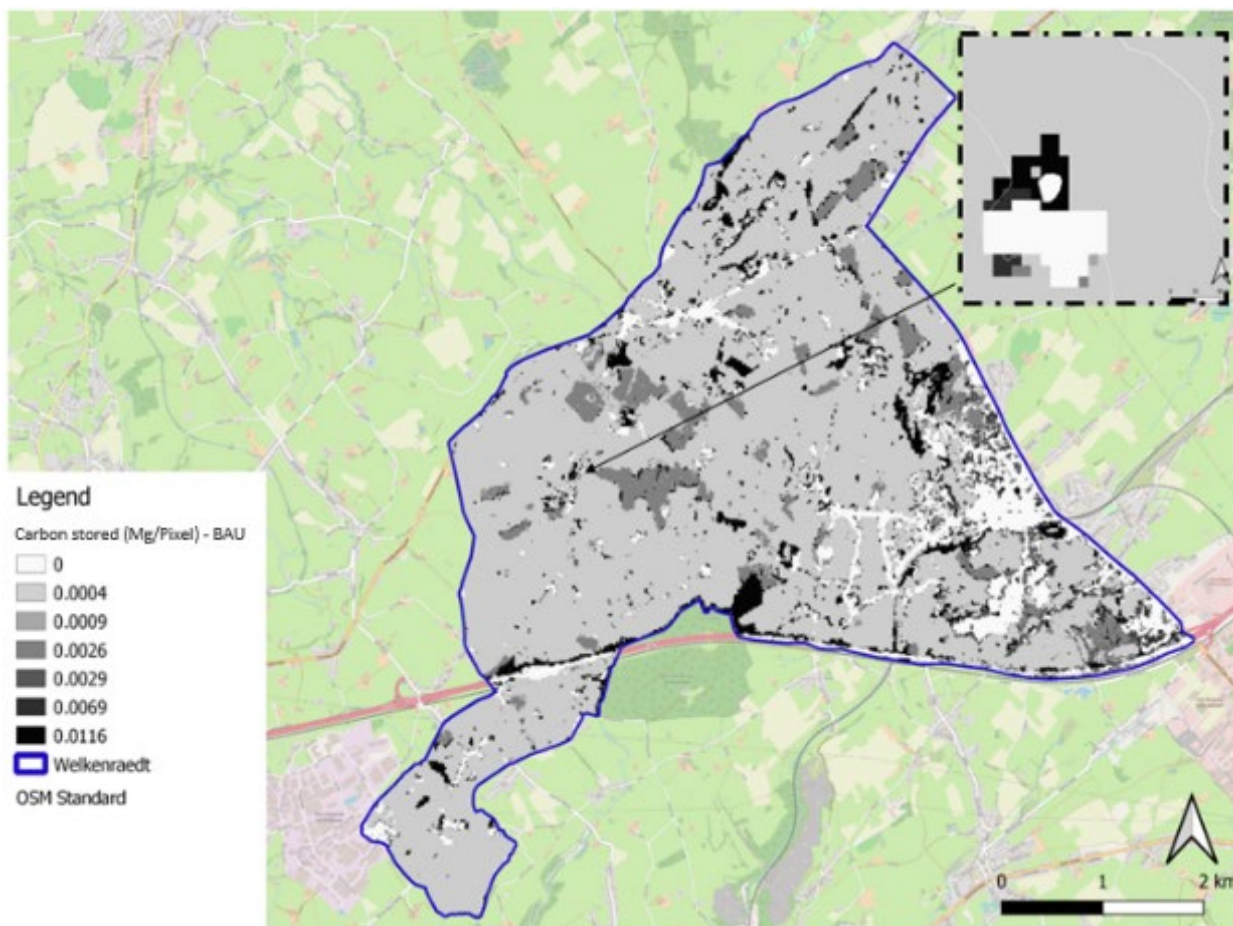


Figure A6. Carbon stored (Mg/Pixel) – ROWS scenario

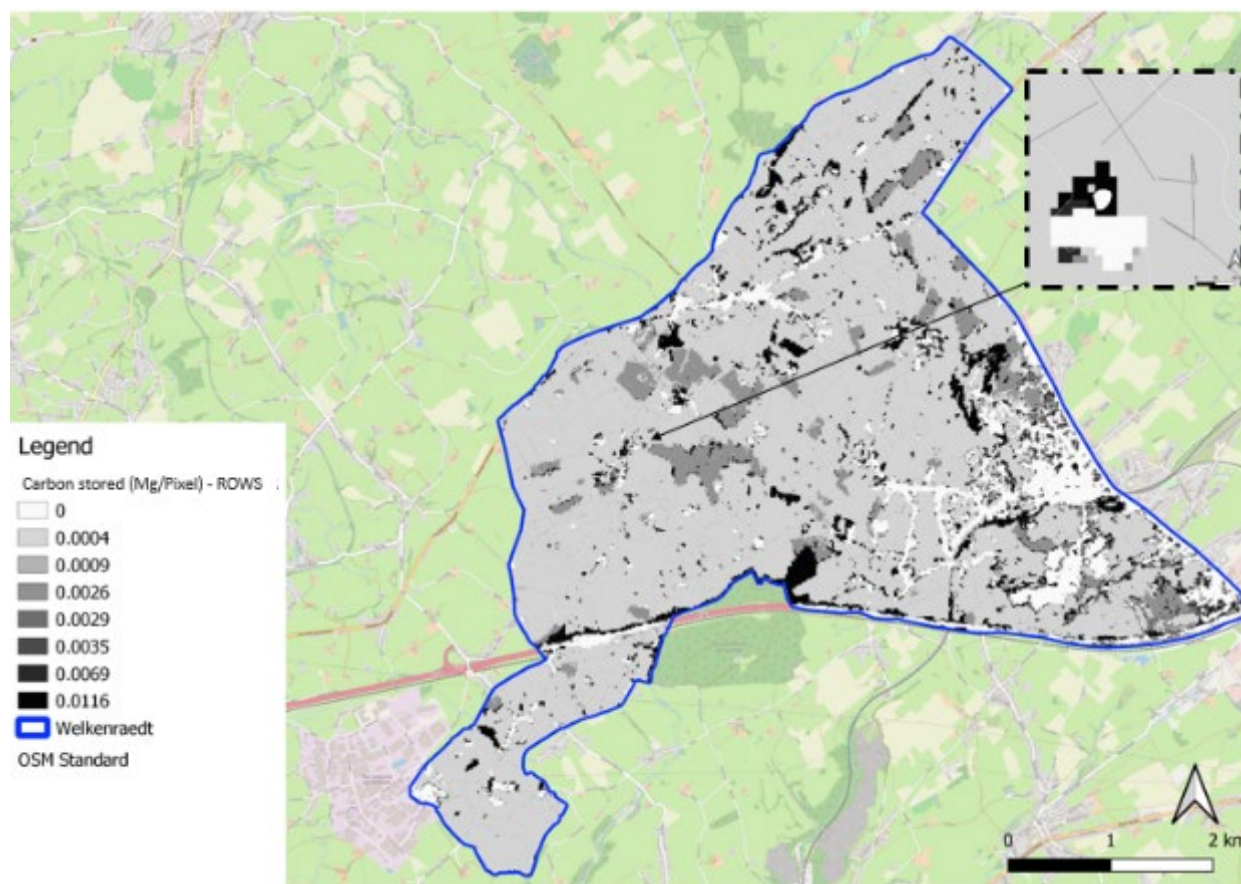


Table A2. Carbon pool statistics

	Sum (Mg)	Change from the current scenario %
BAU Scenario	85,789	0.5
ROWS Scenario	86,198	

As Table A2 shows, under the BAU scenario, the landscape of the Welkenraedt municipality would sequester 85,789 Mg of carbon in the first year, with no tree rows that divide agricultural fields. Under the ROWS scenario the same area would sequester 86,198 Mg of carbon at the end of the 9-year period. In other words, the landscape would be able to sequester +410 Mg of carbon thanks to the additional tree rows, an increase of roughly +0.5% from the BAU Scenario.



3. Habitat Quality

3.1 Input Data Preparation and Processing

- 1. Land use/land cover maps** – See section 1e. Please note that in this model we used a larger study area (15km x 20km) that contains the municipality of Welkenraedt. The reason for this choice was to avoid that locations near the edge of the area of interest had inflated habitat quality scores; otherwise, threats outside the area of interest would not have been properly accounted for. The resolution was also changed to 10 m to improve the speed of the analysis.
- 2. Threat Data** – Urban areas and road networks have been identified as the threat sources to the natural habitat and biodiversity. See table below (Table A3). See Table A4 for data sources

Table A3. Table of threats (maximum distance, weighted value, and decay function) for InVEST simulation

N.	Threat name	Max_Distance	Weighted value	Decay function
62	Urban Areas	5 km	1	Linear
132	Road	2 km	0.6	Linear

Table A4. Habitat Quality model – references “threat table”

Threat	Max distance	Max_distance Adopted sources	Weighted value	Weight value Adopted sources	Decay function	Decay func. Adopted sources
Urban areas	5 km	(Tapaneeyakul, 2015)	1	(Tapaneeyakul, 2015)	Linear	(Tapaneeyakul, 2015)
Roads	2 km	(Morrone, 2019)	0.6	(Morrone, 2019)	Linear	(Morrone, 2019)



Table A5. Habitat Quality model – references “threat sensitivity table”

Value	Habitat	Habitat Adopted sources	Sensitivity to urban areas sources	Sensitivity to urban area Adopted sources	Sensitivity to paved road	Sensitivity to paved road Adopted sources
62	0	(Tapaneeyakul, 2015)	0	(Tapaneeyakul, 2015)	0	(Sulistyawan, et al., 2017)
73	0.4	(Terrado, et al., 2016)	0.5	(Tapaneeyakul, 2015)	0.59	(Terrado, et al., 2016)
75	0.4	(Terrado, et al., 2016)	0.5	(Tapaneeyakul, 2015)	0.59	(Terrado, et al., 2016)
82	1	(Bhagabati, et al., 2012)	0.7	(Tapaneeyakul, 2015)	0.7	(Morrone, 2019)
83	1	(Bhagabati, et al., 2012)	0.7	(Tapaneeyakul, 2015)	0.7	(Morrone, 2019)
102	0.5	(Bhagabati, et al., 2012)	0.5	(Tapaneeyakul, 2015)	0.59	(Terrado, et al., 2016)
103	1	(Bhagabati, et al., 2012)	0.5	(Tapaneeyakul, 2015)	0.59	(Terrado, et al., 2016)
104	1	(Bhagabati, et al., 2012)	0.5	(Tapaneeyakul, 2015)	0.59	(Terrado, et al., 2016)
105	1	(Bhagabati, et al., 2012)	0.5	(Tapaneeyakul, 2015)	0.59	(Terrado, et al., 2016)
106	1	(Bhagabati, et al., 2012)	0.5	(Tapaneeyakul, 2015)	0.59	(Terrado, et al., 2016)
121	0.4	(Terrado, et al., 2016)	0.5	(Tapaneeyakul, 2015)	0.59	(Terrado, et al., 2016)
123	0	Assumed	0	Assumed	0	Assumed
130	1	(Morrone, 2019)	0.85	(Morrone, 2019)	0.5	(Morrone, 2019)
131	1	(Morrone, 2019)	0.85	(Morrone, 2019)	0.5	(Morrone, 2019)
132	0	Assumed	0	Assumed	0	Assumed
133	1	(Bhagabati, et al., 2012)	0.7	(Tapaneeyakul, 2015)	0.7	(Morrone, 2019)
162	1	(Morrone, 2019)	0.85	Morrone	0.5	(Morrone, 2019)



3. Sensitivity of land cover types to each threat – Table A6 characterizes each LULC type to be habitat or non-habitat and the type's sensitivity to the threats (see Table A5 for data sources). The table contains the following fields:

3.1 LULC – codes identify each LULC class

3.2 Name – abbreviation of each LULC class

3.3 Habitat – score characterizing each LULC as habitat or non-habitat. The values of 0 and 1 are used for the purpose, in which 0 for non-habitat class and 1 for habitat class of LULC.

3.4 L_urb_62, L_rd_132– these are columns for the relative sensitivity of LULC classes to the threat. In this case, L_urb_62 and L_rd_132 contain the value for the sensitivity of each LULC class to urban areas and roads respectively.

Table A6. Table of Sensitivity of land cover types to each threat for InVEST simulation

LULC	NAME	HABITAT	L_urb_62	L_rd_132
62	lc_62	0	0	0
73	lc_73	0.4	0.5	0.59
75	lc_75	0.4	0.5	0.59
82	lc_82	1	0.7	0.7
83	lc_83	1	0.7	0.7
102	lc_102	0.5	0.5	0.59
103	lc_103	1	0.5	0.59
104	lc_104	1	0.5	0.59
105	lc_105	1	0.5	0.59
106	lc_106	1	0.5	0.59
121	lc_121	0.4	0.5	0.59
123	lc_123	0	0	0
130	lc_130	1	0.85	0.5
131	lc_131	1	0.85	0.5
132	lc_132	0	0	0
133	lc_133	1	0.7	0.7
162	lc_162	1	0.85	0.5

1. Half-saturation constraint – the default value of 0.5 was used

3.2 Results

Figure A7 and Figure A8 show the relative level of habitat quality in the study area considering all scenarios. Higher numbers indicate better habitat quality vis-a-vis the distribution of habitat quality across the rest of the landscape. Areas on the landscape that are not habitat get a quality score of 0. The habitat score values range from 0 to 1, where 1 indicates the highest habitat suitability.

Figure A7. Scores of habitat quality (BAU)

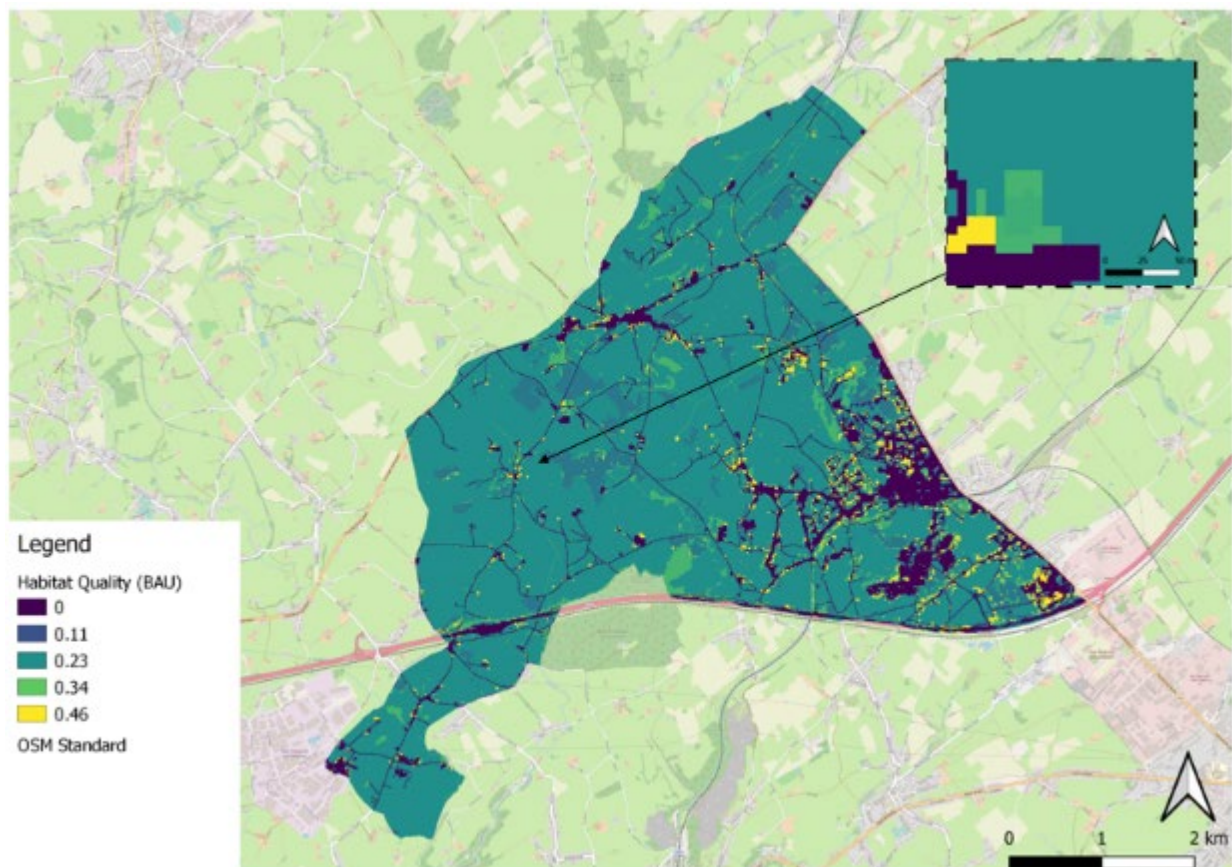


Figure A8. Scores of habitat quality (ROWS)

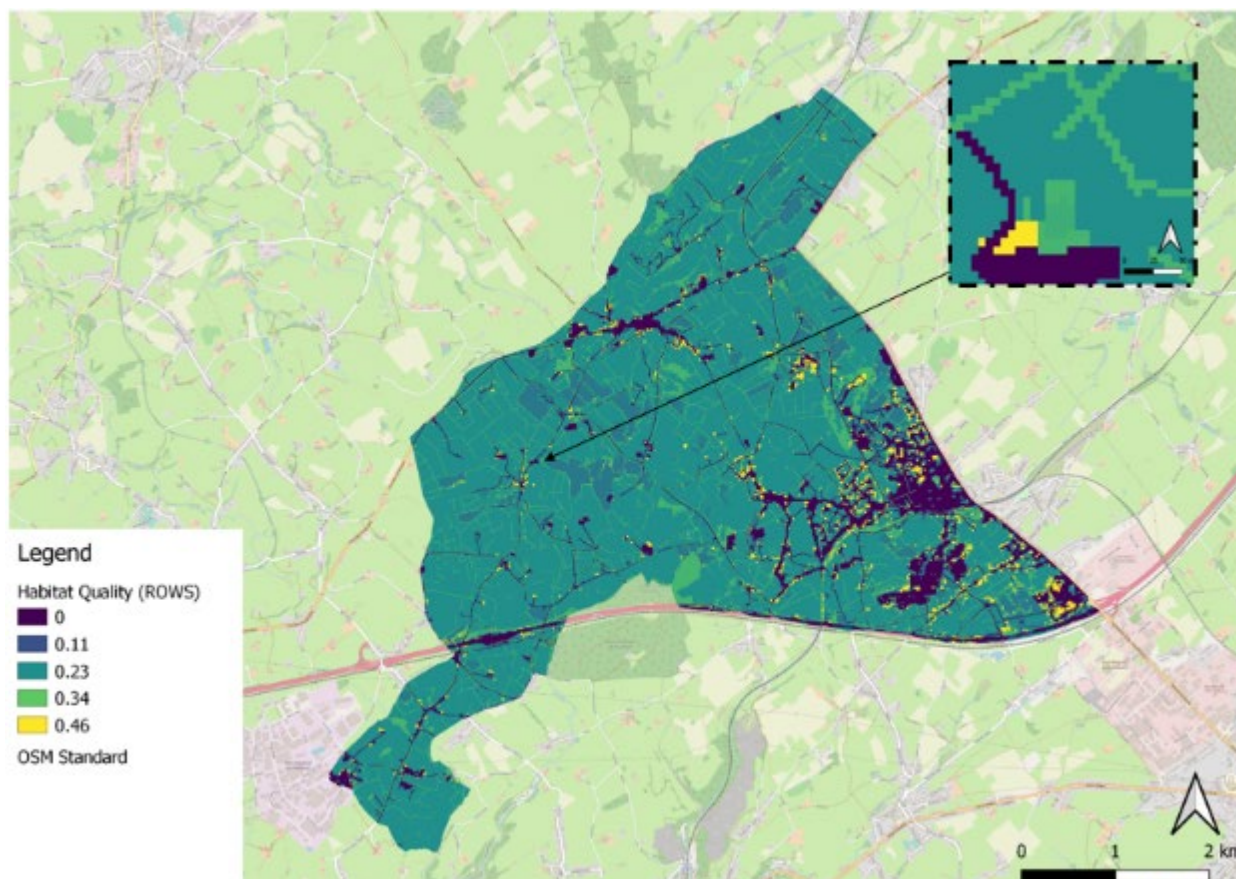
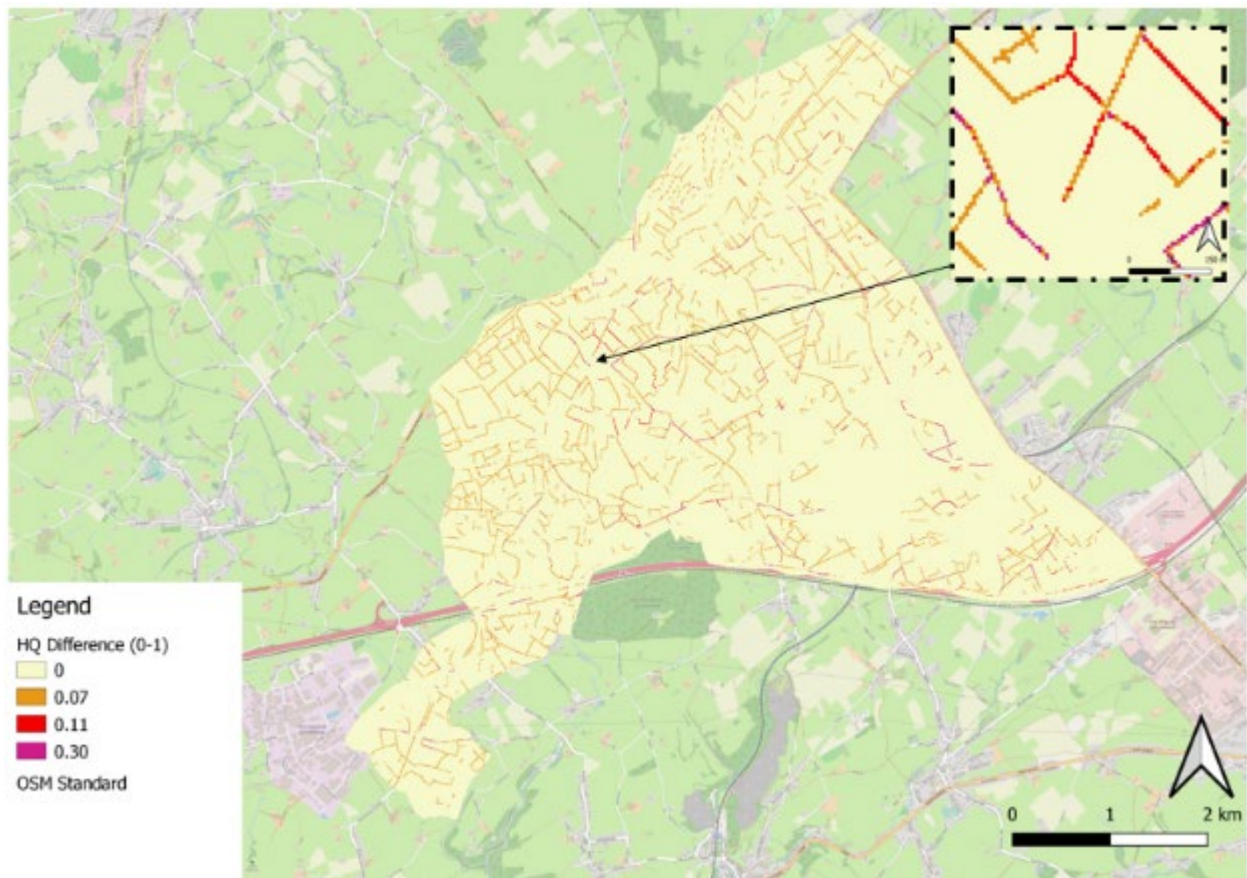


Table A7. Habitat quality statistics

	Mean (from 0 to 1)	Change from the current scenario %
BAU Scenario	0.211	1.896
ROWS Scenario	0.215	

As Table A7 shows, the mean of habitat quality in the study area is 0.211 out of 1 (BAU scenario). In the ROWS scenario this value would increase by almost 2%, reaching a mean of 0.215 per pixel. It is worth noting that the areas with the highest scores of habitat quality roughly correspond with the ones that capture more carbon (see “results” – Carbon storage), proving the consistency of these results. Figure A9 allows a visualization of the locations where the score of habitat quality will increase.

Figure A9. Habitat Quality – difference between ROWS and BAU scenarios





4. Crop Pollination

4.1 Input Data Preparation and Processing

1. **Land use/land cover maps** – See section 1e. Please note that in this model the resolution was changed to 10 m to improve the speed of the analysis.
2. **Guild Table** – A table containing information on each species or guild of pollinator to be modelled. “Guild” refers to a group of bee species that show the same nesting behaviour, whether preferring to build nests in the ground, in tree cavities, or other habitat features. We used INVEST sample data for the species “Apis” (Table A8). Each row is a unique species or guild of pollinator and columns must be named and defined as follows:
 - 2.1 **Species:** Name of species or guild (Species names can be numerical codes or strings.)
 - 2.2 Any number of **nesting_suitability_index** columns, one for each SUBSTRATE defined: Values must be entered as a floating point number between 0 and 1, with 1 indicating a nesting substrate that is fully utilized and 0 indicating a nest substrate that is not utilized at all. Substrates are user defined, but might include ground nests, tree cavities, etc. The SUBSTRATE string must match a nesting_availability_index in the Land Cover Biophysical Table.
 - 2.3 Any number of **foraging_activity_[SEASON]_index** columns, one for each SEASON defined: Pollinator activity by floral season (i.e., flight season). Values must be entered as a floating point number between 0 and 1, with 1 indicating the season of greatest activity for the guild or species, and 0 indicating a season of no activity. Seasons are user defined but might include spring, summer, fall; wet, dry, etc. The SEASON string must match a floral_resources_[SEASON]_index column in the Land Cover Biophysical Table.
 - 2.4 **Alpha** – Average distance each species or guild travels to forage on flowers, specified in integer metres. The model uses this estimated distance to define the neighbourhood of available flowers around a given cell and to weigh the sums of floral resources and pollinator abundances on farms.
 - 2.5 **relative_abundance:** A floating point value indicating the weighted relative abundance of the species’ contribution to pollinator abundance. Setting this value to the same value for each species will result in each species being weighted equally.



Table A8. Guild table used in this analysis

SPECIES	nesting_suitability_cavity_index	nesting_suitability_ground_index	foraging_activity_spring_index	foraging_activity_summer_index	alpha	relative_abundance
Apis	1	1	1	1	500	0.75

3. Land Cover Biophysical Table – A table containing model information corresponding to each of the land-use classes in the Land Cover Map. All LULC classes in the Land Cover raster must have corresponding values in this table. Data needed are relative indices (0-1). Data can be summarized from field surveys, or obtained by expert assessment if field data is unavailable. In this analysis, we used the sample data provided by INVEST (Table A9). Each row is a land use/land cover class and columns must be named and defined as follows:

3.1 lcode: Land use/land cover class code. LULC codes must match the “value” column in the Land Cover Map raster and must be integer or floating point values, in consecutive order, and unique.

3.2 nesting_availability_index: Relative index of the availability of the given nesting type within each LULC type, on a floating point scale of 0-1. The SUBSTRATE name must exactly match a substrate given in the Guild Table.

3.3 floral_resources_[SEASON]_index: Relative abundance (floating point value 0-1) of flowers in each LULC class for the given season. There are two aspects to consider when estimating the relative floral abundance of each LULC class: % floral abundance or % floral coverage, as well as the duration of flowering during each season. For example, a land cover type comprised 100% of a mass flowering crop that flowers the entire season with an abundance cover of 80% would be given a suitability value of 0.80. A land cover type that flowers only half of the season at 80% floral coverage would be given a floral suitability value of 0.40. The SEASON name must exactly match a season given in the Guild Table.



Table A9. Biophysical table – crop pollination

luc ode	LULC_ Name	nesting_cavity_ava ilability_index	nesting_ground_av ailability_index	floral_resources_ spring_index	floral_resources_s ummer_index
62	lc_62	0.1	0.1	0.2	0.2
73	lc_73	0.3	0.2	0.3	0.3
75	lc_75	0.3	0.2	0.3	0.3
82	lc_82	0.6	0.7	0.3	0.3
83	lc_83	0.6	0.7	0.3	0.3
102	lc_102	0.3	0.2	0.3	0.3
103	lc_103	0.3	0.3	0.3	0.3
104	lc_104	0.3	0.3	0.3	0.3
105	lc_105	0.3	0.3	0.3	0.3
106	lc_106	0.3	0.3	0.3	0.3
121	lc_121	0.3	0.3	0.3	0.3
123	lc_123	0	0	0	0
130	lc_130	0	0	0	0
131	lc_131	0	0	0	0
132	lc_132	0	0	0	0
133	lc_133	0.4	0.7	0.3	0.3
162	lc_162	0	0	0	0

4.2 Results

The main output of this model is the following:

- **pollinator_supply_[SPECIES]_[Suffix]** – Per-pixel index of pollinator [SPECIES] that could be on a pixel given its arbitrary abundance factor from the table, multiplied by the habitat suitability for that species at that pixel, multiplied by the available floral resources that a pollinator could fly to from that pixel.

Figure A10 and Figure A11 show the per-pixel index of *Apis* in the BAU and ROWS scenarios respectively.

Figure A10. Apis supply per pixel (BAU)

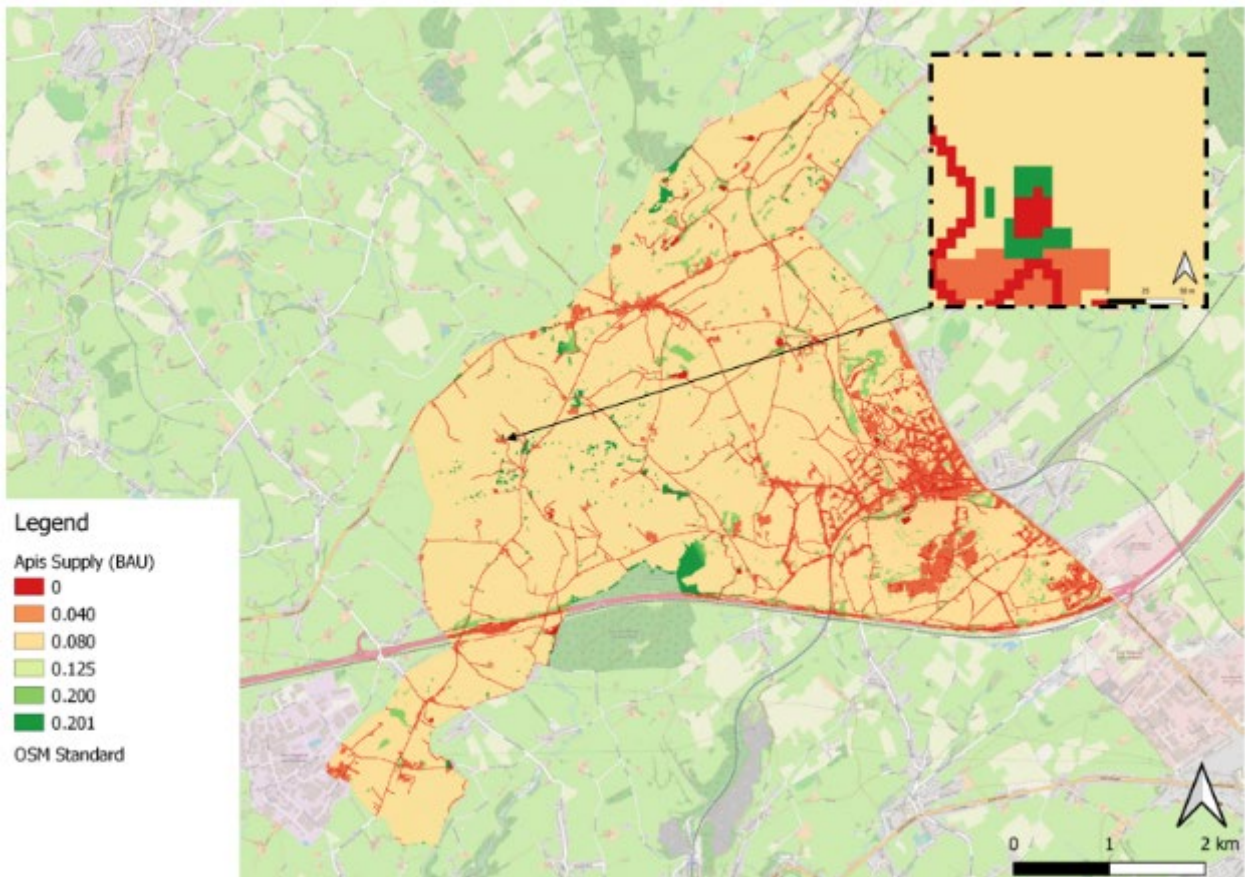


Figure A11. Apis supply per pixel (ROWS)

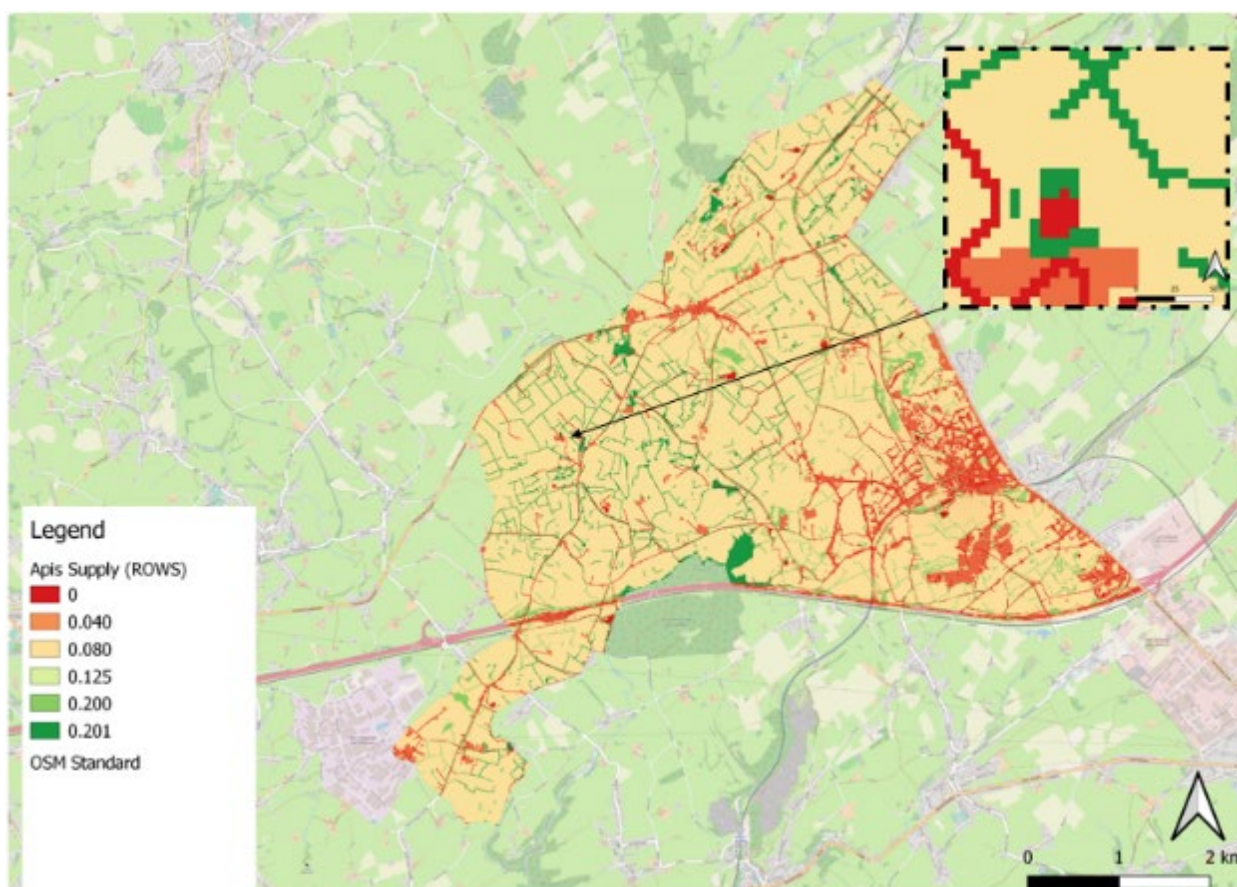


Table A10. Crop pollination statistics

	Mean	Change from the current scenario %
BAU Scenario	0.08	8.06
ROWS Scenario	0.09	

As Table A10 shows, the mean of Apis supply per pixel in the study area is 0.08 (BAU scenario). In the ROWS scenario this value would increase by more than 8%, reaching a mean of 0.09 per pixel. It is worth noting that the areas with the highest scores of Apis supply roughly correspond with the ones indicated by both the Carbon Storage and Habitat Quality models, proving the consistency of these results.



5. Annual Water Yield

5.1 Input Data Preparation and Processing

1. **Precipitation** – A GIS raster dataset with a non-zero value for average annual precipitation for each cell. Its value is expressed in millimetres. The average precipitation (in mm) from 1970 to 2000 downloaded from WorldClim version 2 (www.worldclim.com) was used for this study. The dataset was released on the first of June 2016. The original spatial resolution of the data is 30 seconds x 30 seconds (which is approximately 1 km²).
2. **Average annual reference evapotranspiration (ET₀)** – A GIS raster dataset with an annual average evapotranspiration value for each cell in millimetres. Reference evapotranspiration is the potential loss of water from the soil by both evaporation from the soil and transpiration by healthy alfalfa (or grass) if sufficient water is available. Its value is in millimetres. In this study, the global evapotranspiration of reference crops was adopted from “Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration (ET₀) Climate Database v2.” The spatial resolution of the data is 30 arc-seconds (approximately 1km at the equator). The dataset can be found here:

https://figshare.com/articles/Global_Aridity_Index_and_Potential_Evapotranspiration_ET0_Climate_Database_v2/7504448/3

3. **Root restricting layer depth** – These terms were defined as an average root restricting layer depth value for each cell. It is the soil depth at which root penetration is strangled inhibited because of physical or chemical characteristics. Root restricting layer depth may be obtained from some soil maps. If a root restricting layer depth is not available, soil depth can be used as a proxy. If several soil horizons are detailed, the root restricting layer depth is the sum of the depths of non-restrictive soil horizons. Its value is in millimetres. In this study, the absolute depth to bedrock downloaded from soilgrid.org stored in cm was used to present for root restricting layer depth.
4. **Plant Available Water Content** – Plant available water content (PAWC) is the fraction of water that can be stored in the soil profile that is available for plants’ use. PAWC can be measured from 0 to 1. The format of PAWC for the model is a GIS raster dataset.

PAWC is a fraction obtained from some standard soil maps. It is defined as the difference between the fraction of volumetric field capacity and permanent wilting point. The PAWC is often available as a volumetric value (mm). To obtain the fraction it is necessary to divide it by soil depth. Soil characteristic layers are estimated by performing a weighted average from all horizons within a soil component. If PAWC is not available, raster grids obtained from polygon shapefiles of weight average soil texture (%clay, %sand, %silt) and soil porosity will be needed. In this study, the average calculation of available soil water capacity of the volumetric fraction of 2.0 (pF 2.0)



from 0 to 2 m was used to represent the plant available water contents for water yield model simulation.

5. **Land use/land cover maps** – See section 1e
6. **Watersheds** – This is the polygon shapefile representing the watershed that can be found in the study area. While different levels of watersheds can be downloaded from open sources, the municipality of Welkenraedt is too small and none could be found. We decided to use the InVEST tool DelineateIt, which allows the specification of areas from which the watersheds should be delineated. We considered only one watershed that surrounds the city (see Figure A12).
7. **Biophysical Table** – A table of land use/land cover (LULC) classes, containing data on biophysical coefficients used in this tool. These data are attributes of each LULC class rather than attributes of individual cells in the raster map. This table contains 5 variables included: [1] *lucode* (*Land use code*), [2] *LULC_desc*, [3] *LULC_veg*, [4] *root_depth*, and [5] K_c . Table 9 shows the biophysical table used in this study. Values have been derived from Tapaneeyakul (2015).

7.1 Lucode (Land use code): Unique integer for each LULC class (e.g., 1 for forest, 3 for grassland, etc.) must match the LULC raster above.

7.2 LULC_desc: Descriptive name of land use/land cover class (optional).

7.3 LULC_veg: Values must be 1 for vegetated land use except for wetlands, and 0 for all other land uses, including wetlands, urban, water bodies, etc.

7.4 root_depth: The maximum root depth for vegetated land use classes, given in integer millimetres. This is often given as the depth at which 95% of a vegetation type's root biomass occurs. For land uses where the generic Budyko curve is not utilized (i.e., where evapotranspiration is calculated based on the equation below, rooting depth is not needed). In these cases, the rooting depth should be set to NA. The equation can be found here in:

$$AET(x) = \text{Min}(K_c(\ell x) \cdot ET_0(x), P(x))$$

where

$ET_0(x)$ is the reference evapotranspiration,

$K_c(\ell x)$ is the evaporation factor for each land use and land cover.

Kc factor is the plant evapotranspiration coefficient for each LULC class. It is used to convert from reference evaporation to potential evaporation for each land use.



7.5 Kc: The plant evapotranspiration coefficient for each LULC class, used to obtain potential evapotranspiration by using plant physiological characteristics to modify the reference evapotranspiration, which is based on alfalfa. The evapotranspiration coefficient is thus a decimal in the range of 0 to 1.5 (some crops evapotranspire more than alfalfa in some very wet tropical regions and where water is always available).

Table A11. Biophysical table (Water Yield)

lucode	LULC_desc	LULC_veg	root_depth	Kc
62	lc_62	0	0	0
73	lc_73	0.6	700	1
75	lc_75	0.6	700	1
82	lc_82	1	7000	1
83	lc_83	1	7000	1
102	lc_102	0.85	1000	1
103	lc_103	0.7	2000	1
104	lc_104	0.6	700	1
105	lc_105	0.7	2000	1
106	lc_106	0.7	2000	1
121	lc_121	0.6	700	1
123	lc_123	0.2	10	0
130	lc_130	0	2000	1
131	lc_131	0	2000	1
132	lc_132	0	0	0
133	lc_133	1	7000	1
162	lc_162	0	2000	1

Z parameter – Z is an empirical constant that captures the local precipitation pattern and hydrogeological characteristics, with typical values ranging from 1 to 30. It is corresponding to the seasonal distribution of precipitation. This parameter is mainly used for model calibration; however, in this study, there is no observed data for the model calibration. Therefore, the recommended default value of the Z parameter (5) was used.

5.2 Results

The main output of this model is a table containing biophysical output values per watershed, with the following attribute:

- *wyield_vol* (m³): Volume of water yield in the watershed.

Figure A12. Watershed around the municipality of Welkenraedt

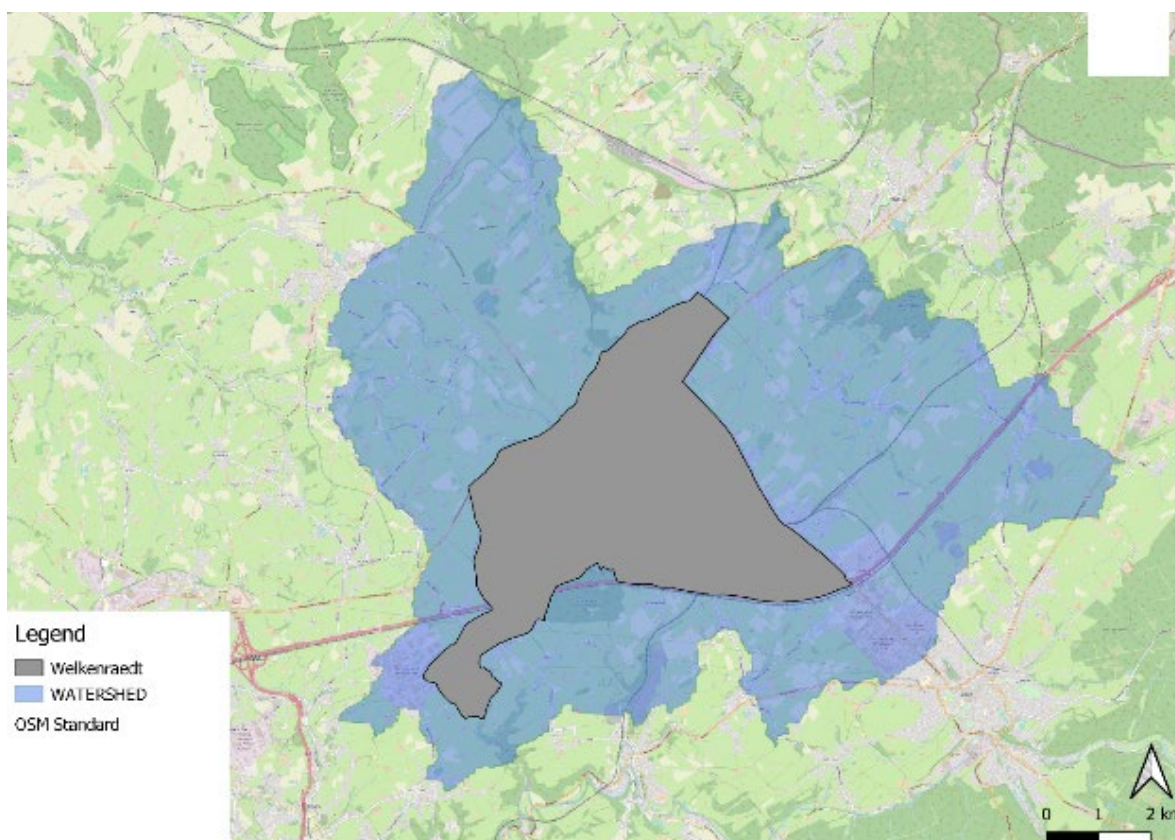


Table A12. Water yield results

	wyield_vol (m3)	Change from the BAU scenario %
BAU Scenario	52,407,189	0.02
ROWS Scenario	52,417,643	

Table A12 shows the volume of water yield (m³) in the selected watershed under the BAU and ROWS scenarios. The InVEST analysis shows that if trees will be planted on the agricultural rows in Welkenraedt the volume of water yield would increase by 0.02%, which roughly corresponds to 10,000 m³ of water.



6. Annual Sediment Delivery Ratio

6.1 Input Data Preparation and Processing

4. **Digital Elevation Model (DEM) Raster** – DEM: the hydrologically conditioned elevation dataset which is distributed by EEA (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eu-dem>) was downloaded on November 13, 2020, for InVEST sediment model input. The data was prepared for hydrological model input purpose mainly for flow direction, accumulation simulation, river network, and basin delineation. The original spatial resolution of the dataset is 25 metres.
5. **Rainfall Erosivity Index (R) Raster** – A GIS raster dataset containing erosivity index for each cell. This variable depends on the intensity and duration of rainfall in the area of interest. The greater the intensity and duration of the rainstorm, the higher the erosion potential. The erosivity index is widely used, but in case of its absence, there are methods and equations to help generate a grid using climatic data. Its value is $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot(\text{ha}\cdot\text{h}\cdot\text{yr})^{-1}$. The R factor dataset in spatial resolution of 25 km downloaded from <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02142-7> was employed for this study. The technical report of the data also can be found here: https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1038%2Fs41467-017-02142-7/MediaObjects/41467_2017_2142_MOESM1_ESM.pdf
6. **Soil Erodibility (K) Raster** – A raster dataset of soil erodability. It is a measure of the susceptibility of soil particles to detachment and transport by rainfall and runoff. Its value is in $\text{T}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}\cdot(\text{ha}\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})^{-1}$. The spatial resolution of 25 km of soil erodability download from <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02142-7> was used in this study.
7. **Land use/land cover maps** – See section 1e.
8. **Watershed Polygons** – See Annual Water Yield Inputs.
9. **Biophysical Table** – A table containing model information corresponding to each of the LULC types (see Table 13). These data were derived from Tapaneeyakul (2015). The table has the following field:
 - 9.1 **Lucode (Land use code)** – Unique integer to identify each LULC class.
 - 9.2 **LULC_desc** – Nominal name for each LULC class.
 - 9.3 **usle_c** – It refers to cover management factor or sometimes called cropping management factor (C factor) for the Universal Soil Loss Equation (USLE). This value is used to calculate the cover management in USLE. The C factor represents the effect of surface cover and roughness on soil erosion. The cover factor is the most common factor used to assess the impact of best management practices on reducing erosion because the C factor represents the effect of land use on soil erosion (Renard, 1997). Erosion control blankets and surface applied best management practices such as blown straw are represented as C factors within RUSLE. By definition, $C = 1$ under standard fallow conditions. As the surface cover is added to the soil, the C factor value approaches zero. For example, a C factor of 0.20 signifies that 20% of the amount of erosion will occur compared to continuous fallow conditions. C factors vary from region to region because they are strongly influenced by different Rainfall Erosivity Index (R factors) (Wischmeier



& Smith, 1978). In the InVEST model, its value is stored in a float value ranging from 0 to 1.

9.4 usle_p – It refers to management practice, support, or conservation practice factor (P factor) in USLE. The P factor reflects the impact of support practices on the average annual erosion rate. P is the ratio of soil loss with a support factor to that with straight row farming up and downslope. Strip-cropping, contouring, and terracing are all activities that are considered support practices by RUSLE. The support factor is unitless and its value is stored in a float value ranging from 0 to 1.

Table A13. Biophysical table annual sediment delivery ratio

lucode	LULC_desc	LULC_veg	usle_c	usle_p
62	lc_62	0.25	0.01	62
73	lc_73	0.5	0.4	73
75	lc_75	0.5	0.4	75
82	lc_82	0.005	0.2	82
83	lc_83	0.005	0.2	83
102	lc_102	0.5	0.4	102
103	lc_103	0.25	0.35	103
104	lc_104	0.5	0.4	104
105	lc_105	0.25	0.35	105
106	lc_106	0.25	0.35	106
121	lc_121	0.5	0.4	121
123	lc_123	0.25	0.01	123
130	lc_130	0	0.01	130
131	lc_131	0	0.01	131
132	lc_132	0.25	0.01	132
133	lc_133	0.005	0.2	133
162	lc_162	0	0.01	162

10. Threshold flow accumulation – The number of upstream cells that must flow into a cell before it is considered part of a stream, which is used to classify streams from the DEM. This threshold directly affects the expression of hydrologic connectivity and the sediment export result: when a flow path reaches the stream, sediment deposition stops and the sediment exported is assumed to reach the catchment outlet. It is important to choose this value carefully so modelled streams come as close to reality as possible. The value of 100 was used in this simulation.



- 11. Borseli K parameter (k_b) and Borseli IC0 parameter (IC_0)** – Two calibration parameters that determine the shape of the relationship between hydrologic connectivity (the degree of connection from patches of land to the stream) and the sediment delivery ratio (percentage of soil loss that actually reaches the stream). The default values of $k_b=2$ and $IC_0=0.5$ were used in the simulation.
- 12. Max SDR value (SDR_{max})** – The maximum SDR that a pixel can reach, which is a function of the soil texture. More specifically, it is defined as the fraction of topsoil particles finer than coarse sand. The default value of 0.8 was used in this simulation.

6.2 Results

The main output of this model are raster files containing biophysical output values per watershed, with the following attribute:

- **sed_export (tons/pixel):** total amount of sediment exported from each pixel that reaches the stream.

Figure A13 shows the total sediment export (tons) for both the BAU and ROWS scenario.

Figure A13. Total sediment export – BAU and ROWS Scenario

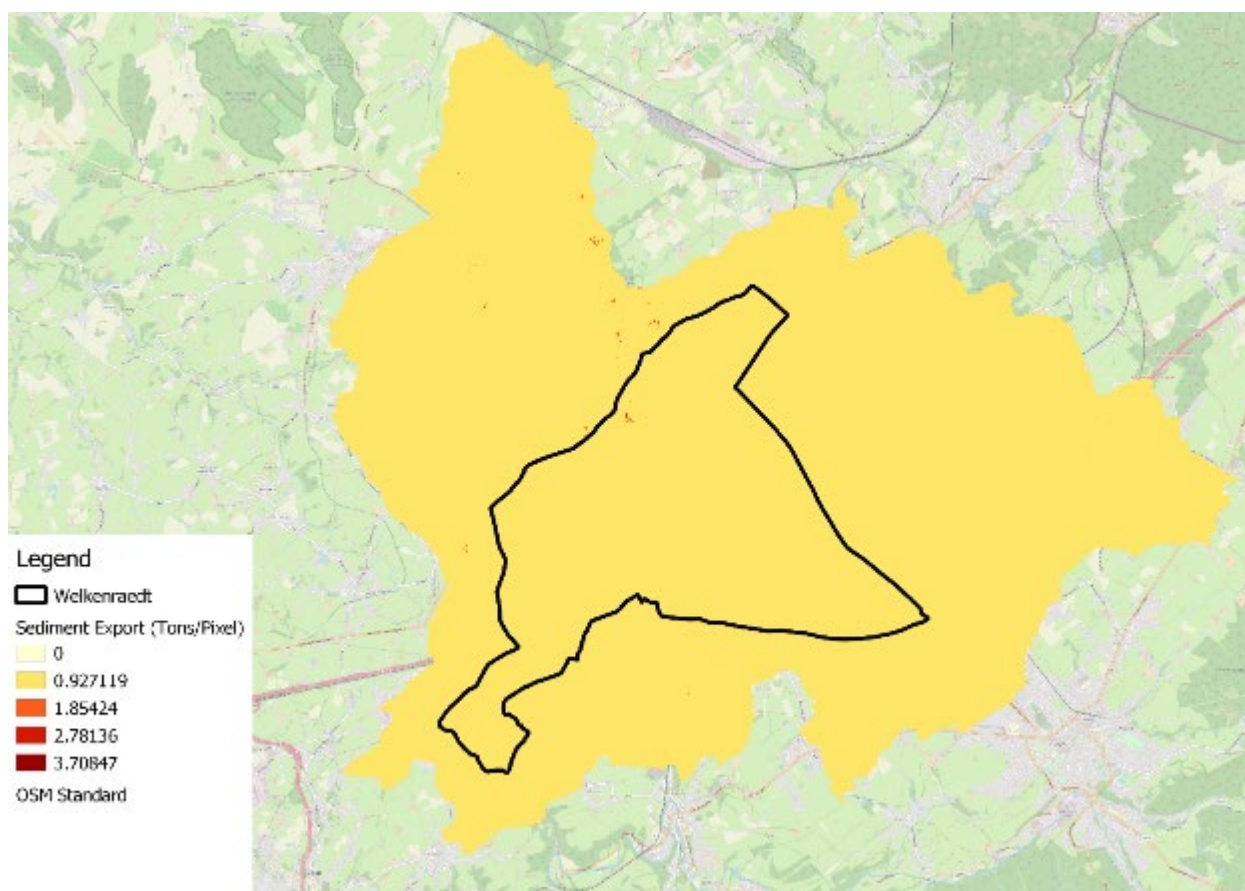


Table A14. Annual sediment delivery ratio statistics

	Sediment exports (Tons)	Change from the BAU scenario %
BAU Scenario	12,606	-0.02
ROWS Scenario	12,604	



Table A14 shows the total sediment export under both the BAU and ROWS scenarios in the whole watershed that surround the municipality. The results indicate that total sediment export will decrease by only 2 tonnes in the ROWS scenario compared to the BAU scenario. In other words, the tree rows that are present only in the ROWS scenario will not produce large changes in the sediment export dynamics in the watershed. However, they may be able to limit the sediment export at a lower level (e.g., banks of local streams).



7. Annual Nutrient Delivery Ratio

71. Input Data Preparation and Processing

1. **DEM Raster** – See input section of Annual Sediment Delivery Ratio
2. **Land use/land cover maps** – See section 1e
3. **Nutrient Runoff Proxy Raster (Precipitation)** – A GIS raster dataset with a non-zero value for average annual precipitation for each cell. Its value is in millimetres. In this study, the data was utilized the same precipitation dataset as employing in water yield model.
4. **Watershed Polygons** – See Annual Water Yield Inputs
5. **Biophysical Table** – A table of LULC classes, containing data on water quality coefficients used in this tool (Table A15). NOTE: these data are attributes of each LULC class rather than attributes of individual cells in the raster map. These data were derived from Tapaneeyakul (2015). The table has the following field:
 - 5.1 **Lucode** – Unique identifier for each LULC class.
 - 5.2 **LULC_desc** – Nominal name for each LULC class.
 - 5.3 **load_n / load_p** – The nutrient loading for each land use. If nitrogen is being evaluated, supply values in load_n, for phosphorus, supply values in load_p. The potential for terrestrial loading of water quality impairing constituents is based on nutrient export coefficients. The nutrient loading values are given as integer values and have units of $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$.
 - 5.4 **eff_n / eff_p** – The vegetation filtering value per pixel size for each LULC class, as an integer percent between zero and 1. If nitrogen is being evaluated, supply values in eff_n, for phosphorus, supply values in eff_p. This field identifies the capacity of vegetation to retain nutrients, as a percentage of the amount of nutrient flowing into a cell from upslope. For example, if the user has data describing that a wetland of 5000 m^2 retains 82% of nitrogen, then the retention efficiency that she/he should input into this field for eff_n is equal to $(82/5000 * (\text{cell size})^2)$. In the simplest case, when data for each LULC type are not available, high values (60 to 80) may be assigned to all natural vegetation types (such as forests, natural pastures, wetlands, or prairie), indicating that 60–80% of nutrients are retained. An intermediary value also may be assigned to features such as contour buffers. All LULC classes that have no filtering capacity, such as pavement, can be assigned a value of zero
 - 5.5 **crit_len_n (and/or crit_len_p)** (at least one is required): The distance after which is assumed that a patch of a particular LULC type retains nutrient at its maximum capacity, given in metres. If nutrients travel a distance smaller than the retention length, the retention efficiency will be less than the maximum value *eff_x*, following an exponential decay.
This value represents the typical distance necessary to reach the maximum retention efficiency. It was introduced in the model to remove any sensitivity to the resolution of the LULC raster. In the absence of local data for land uses that are not forest or grass, it is possible to simply set the retention length constant,



equal to the pixel size: this will result in the maximum retention efficiency being reached within a distance of one pixel only.

5.6 proportion_subsurface_n or p (optional): The proportion of dissolved nutrients over the total amount of nutrients, expressed as floating point value (ratio) between 0 and 1. By default, this value should be set to 0, indicating that all nutrients are delivered via surface flow.

Table A15. Biophysical table – Annual Nutrient Delivery Ratio

lucode	LULC_desc	load_n	eff_n	load_p	eff_p	crit_len_n	crit_len_p	proportion_subsurface_n
62	lc_62	4	0.05	0.001	0.05	200	200	0
73	lc_73	11	0.25	3	0.25	200	200	0
75	lc_75	11	0.25	3	0.25	200	200	0
82	lc_82	1.8	0.7	0.011	0.7	200	200	0
83	lc_83	1.8	0.7	0.011	0.7	200	200	0
102	lc_102	11	0.25	3	0.25	200	200	0
103	lc_103	11	0.4	3	0.4	200	200	0
104	lc_104	11	0.25	3	0.25	200	200	0
105	lc_105	11	0.4	3	0.4	200	200	0
106	lc_106	11	0.4	3	0.4	200	200	0
121	lc_121	11	0.25	3	0.25	200	200	0
123	lc_123	4	0.05	0.001	0.05	200	200	0
130	lc_130	0	0.6	0	0.6	200	200	0
131	lc_131	0	0.6	0	0.6	200	200	0
132	lc_132	4	0.05	0.001	0.05	200	200	0
133	lc_133	1.8	0.7	0.011	0.7	200	200	0
162	lc_162	0	0.6	0	0.6	200	200	0

- **Threshold flow accumulation value** – Integer value defining the number of upstream pixels that must flow into a pixel before it is considered part of a stream. This is used to generate a stream layer from the DEM. This threshold expresses where hydrologic routing is discontinued, i.e., where retention stops and the remaining pollutant will be exported to the stream. The default value of 1,000 was used in this simulation.
- **Subsurface maximum retention efficiency (Nitrogen or phosphorus)** – The maximum nutrient retention efficiency that can be reached through subsurface flow, a value between 0 and 1. This field characterizes the retention due to biochemical degradation in soils. The default value of 0.8 was used for this study.
- **Subsurface_crit_len (Nitrogen or phosphorus)** (in meter) – The distance (travelled subsurface and downslope) after which it is assumed that soil retains nutrients at its



maximum capacity. If dissolved nutrients travel a distance smaller than `subsurface_crit_len`, the retention efficiency is lower than the maximum value defined above. Setting this value to a distance smaller than the pixel size will result in the maximum retention efficiency being reached within one pixel only. The default value of 150 suggested for the model for the spatial resolution lower than 150 m was used in this analysis.

- **Borselli k** parameter – Calibration parameter that determines the shape of the relationship between hydrologic connectivity (the degree of connection from patches of land to the stream) and the sediment delivery ratio (percentage of soil loss that actually reaches the stream). The default value is 2.

7.2 Results – Nitrogen

The main output of this model are raster files containing biophysical output values per watershed, with the following attribute:

- N_export_tot (kg/watershed): total nitrogen export from the watershed

Figure A14 shows the total nitrogen export (Kg/Watershed) for each scenario.

Figure A14. Nitrogen export (kg/pixel)

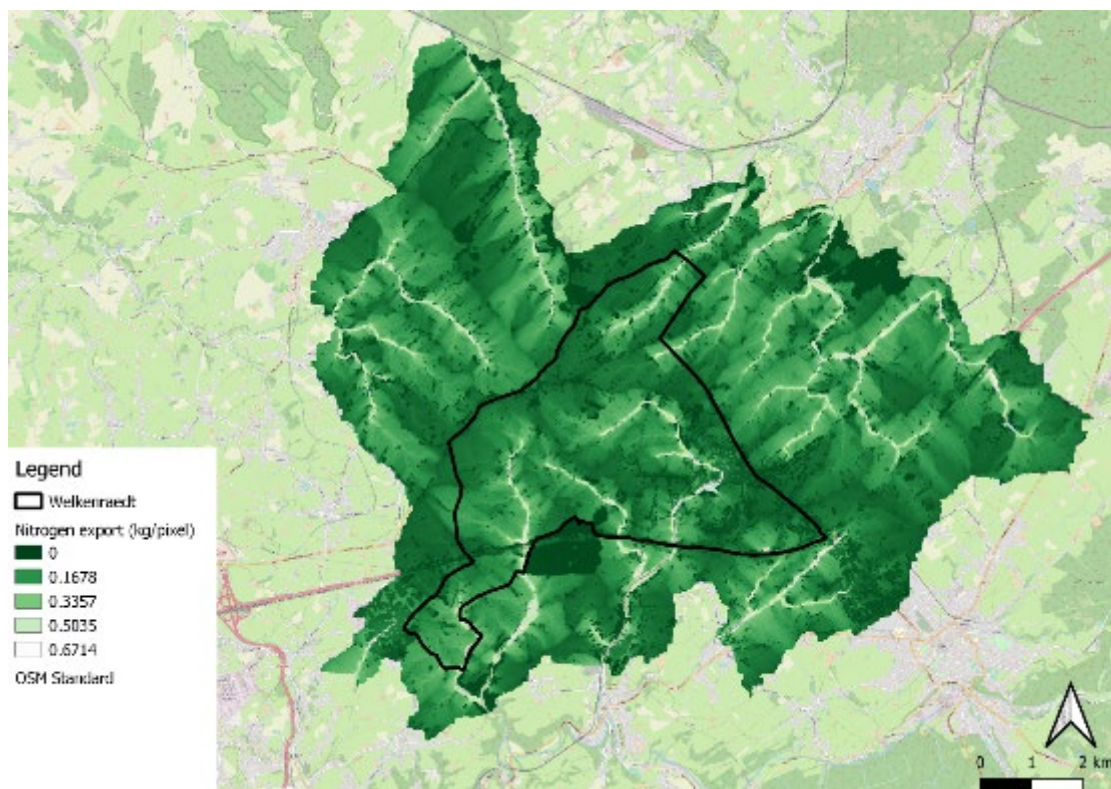




Table A16. Nitrogen Delivery Ratio statistics

	Nitrogen exports (kg)	Change from the BAU scenario %
BAU Scenario	63,438	-0.59
ROWS Scenario	63,061	

Table A16 shows the total Nitrogen export under both the BAU and ROWS scenarios in the whole watershed that surround the municipality. The results indicate that total nitrogen export will decrease by only 377 kg in the ROWS scenario compared to the BAU scenario. In other words, the tree rows that are present only in the ROWS scenario will not produce large changes in the nitrogen export dynamics in the watershed. However, they may be able to limit the nutrient export at a lower level (e.g., banks of local streams).

7.3 Results – Phosphorus

The main output of this model are raster files containing biophysical output values per watershed, with the following attribute:

- P_export_tot (kg/watershed): total Phosphorus export from the watershed

Figure A15 shows the total phosphorus export (Kg/Watershed) for each scenario.

Figure A15. Phosphorus export (kg/pixel)

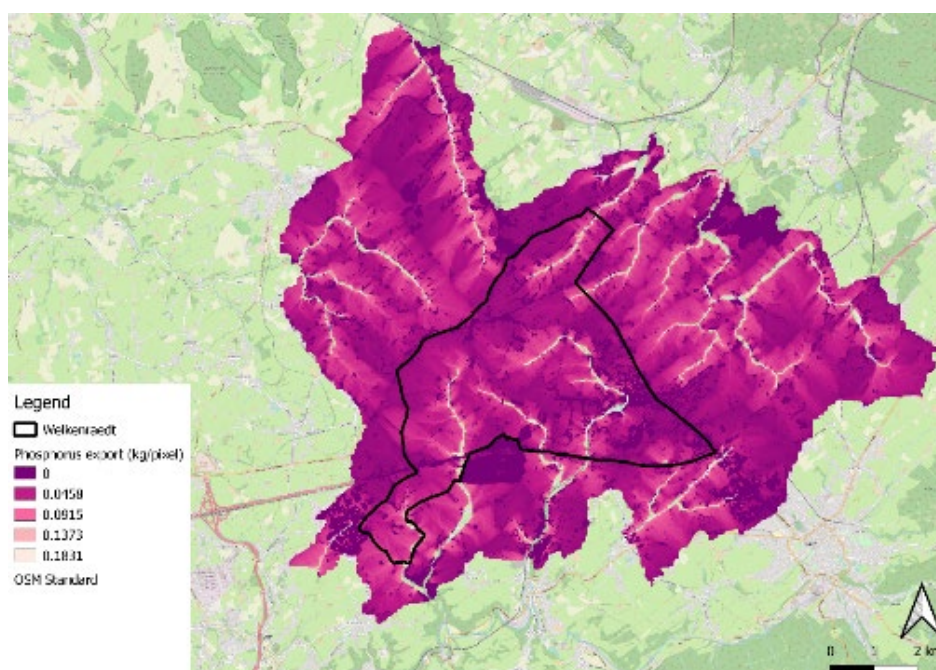


Table A17. Phosphorus Delivery Ratio statistics

	Phosphorus exports (kg)	Change from the BAU scenario %
BAU Scenario	16,646	-0.62
ROWS Scenario	16,543	

Table 15 shows the total phosphorus export under both the BAU and ROWS scenarios in the whole watershed that surround the municipality. The results indicate that total phosphorus export will decrease by only 102 kg in the ROWS scenario compared to the BAU scenario. In other words, the tree rows that are present only in the ROWS scenario will not produce large changes in the phosphorus export dynamics in the watershed. However, they may be able to limit nutrient export at a lower level (e.g., banks of local streams).

