



Diagnostic de vulnérabilités pour augmenter la résilience wallonne à travers l'adaptation aux changements climatiques

Scénarios, impacts et mesures

Rapport du volet 1 - Benchmarking



ICEDD



LIÈGE université
Climatologie



LIÈGE université
Gembloux
Agro-Bio Tech



LEMA



lepur



ISSeP
Institut scientifique
de service public



JETPACK.AI



UNIVERSITÉ
DE NAMUR

Pouvoir adjudicateur :



Wallonie
environnement
Awac



Wallonie
Relance



Auteurs

Manu Harchies - mha@icedd.be
Alain Decrop - alain.decrop@unamur.be
Alice Horevoets – aho@icedd.be
Aurore Degré - aurore.degre@uliege.be
Benjamin Dumont - benjamin.dumont@uliege.be
Clémence Pirlot - clemence.pirlot@uliege.be
Coraline Wyard - c.wyard@issep.be
Eric Hallot - e.hallot@issep.be
François Tamigneaux - fta@icedd.be
Grégory Mahy - g.mahy@uliege.be
Hugues Claessens - hugues.claessens@uliege.be
Jacques Teller - Jacques.Teller@uliege.be
Julian Jacquemin – Julian.jacquemin@uliege.be
Jérôme Bindelle - jerome.bindelle@uliege.be
Marc Dufrene - marc.dufrene@uliege.be
Marie Dury - m.dury@issep.be
Réginald Fettweis - Reginald.Fettweis@uliege.be
Sarah Habran - s.habran@issep.be
Yasmina Loozen - y.loozen@issep.be
Yves Marenne - yes.marenne@icedd.be

Comité de relecture

François Ridremont - fri@icedd.be
Jean-Philippe Lens - jpl@icedd.be
Nadège Meister - nm@icedd.be
Oriane Braconnier - obr@icedd.be

Personne de contact

Manu Harchies, Responsable d'équipe - mha@icedd.be

Photo de couverture : Jonas Jaeken from Unsplash

Namur, le 31 octobre 2023

Comment citer ce rapport

Harchies, M et al. (2023). *Etat des lieux et benchmarking des outils, données et initiatives en Wallonie, Belgique et Europe permettant de caractériser la vulnérabilité du territoire et élaborer des mesures d'adaptation*. Service Public de Wallonie (SPW) - Agence Wallonne de l'Air et du Climat (AWAC).



ICEDD est certifié ISO 9001 :2015



Table des matières

PARTIE A : Introduction et concepts	3
1. Introduction	4
2. Concepts	5
3. Approche générale de l'étude	9
PARTIE B : Benchmarking	14
Chapitre 1) Nature, Biodiversité, Services-Ecosystémiques et Forêts	15
Chapitre 2) Eau (inondations et sécheresses)	26
Chapitre 3) Sol	37
Chapitre 4) Agriculture	46
Chapitre 5) Social	57
Chapitre 6) Economique	67
Chapitre 7) Villes	73
1.1. Arbres	73
1.2. Pollution de l'air	79
1.3. Ilots de chaleur urbains	84
1.4. Logement et vagues de chaleur	91
1.5. Logement et inondations	96
1.6. Incendies	101
Chapitre 8) Infrastructures	106
Chapitre 9) Santé	117
Chapitre 10) Energie	124
Chapitre 11) Tourisme et Patrimoine	132
PARTIE C : Calendrier	Erreur ! Signet non défini.
PARTIE D : Glossaire	138
PARTIE E : Bibliographie	142
Annexes	164



PARTIE A : Introduction et concepts

1. Introduction

1.1. Contexte

Dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) a présenté l'atténuation et l'adaptation comme deux réponses conjointes au changement climatique. **L'atténuation vise à limiter l'accroissement des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. L'adaptation vise à réduire la vulnérabilité des systèmes ou territoires par des actions** qui permettent de réduire les impacts effectifs du changement climatique ou d'améliorer la capacité de réponse de la société. Les travaux du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) ont montré que les émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines étaient responsables du changement climatique en cours. Dans son dernier rapport analysant l'écart entre les besoins et les perspectives en matière d'émission (UNEP 2020), le programme des nations unies pour l'environnement identifiait que **malgré une légère baisse des émissions suite à la crise du COVID-19, le monde continue de se diriger vers un réchauffement planétaire de +3°C**. Même si tout était mis en œuvre pour atteindre les engagements, la somme des objectifs nationaux nous conduiraient vers un réchauffement de +2,5°C au mieux. Les auteurs mettaient tous leurs espoirs sur une reprise socio-économique après la pandémie qui soit à faible teneur en carbone, afin de pouvoir à nouveau envisager un réchauffement limité à +2°C, malheureusement un rebond des émissions a été rapidement observé. **Les conséquences sociales, économiques et environnementales d'un réchauffement de +1,5°C sont décrites comme importantes** (IPCC, 2018). Cependant, les conséquences d'un réchauffement de +2°C sont sans commune mesure, les impacts n'étant en effet pas linéaires. Il aurait pour conséquence de mettre en péril de nombreuses populations (engendrant des déplacements), et occasionnerait des coûts matériels et humains importants. Des plans d'adaptation ont donc commencé à voir le jour au niveau européen et belge. En Wallonie, le cadre juridique est donné par le Décret Climat de 2014 et le principal outil de mise en œuvre est le PACE (Plan Air-Climat-Energie) qui inclut un chapitre spécifique consacré à l'adaptation. La plateforme Wallonne pour le GIEC a publié en mai 2022 un état des lieux et cadre de référence scientifique des études existantes en Wallonie sur l'adaptation aux changements climatiques en vue d'émettre des recommandations et suggestions sur les éléments à prendre en compte dans la présente étude.

1.2. Objectifs

L'objectif de la présente étude est de faciliter le passage de la compréhension du phénomène climatique à la mise en œuvre concrète des mesures et actions d'adaptation. Pour cela l'étude visera à :

- actualiser les projections climatiques régionales,
- évaluer dans différents domaines et de manière holistique les vulnérabilités de la Wallonie face aux changements climatiques,
- identifier et prioriser des pistes concrètes d'adaptation.

Ce rapport survient au terme de la première phase du projet qui visait à compléter l'état des lieux des outils et ressources en Wallonie et en Europe sur les questions de vulnérabilité et d'adaptation aux changements climatiques. Ce rapport décrit l'approche méthodologique d'analyse de la vulnérabilité dans les différentes thématiques cibles qui sera menée dans les prochains mois de l'étude et les indicateurs de visualisation qui en découleront.

2. Concepts

Les concepts qui suivent doivent être compris dans le contexte de l'étude, c'est-à-dire la vulnérabilité et l'adaptation aux changements climatiques.

2.1. Le concept de risque et ses composants

Le **risque** est le résultat de la présence d'un *danger* (inondations, sécheresses...), de l'*exposition* (d'un système, d'une population, d'infrastructures) et de la *vulnérabilité* (de l'élément exposé) au danger (IPCC, 2022).

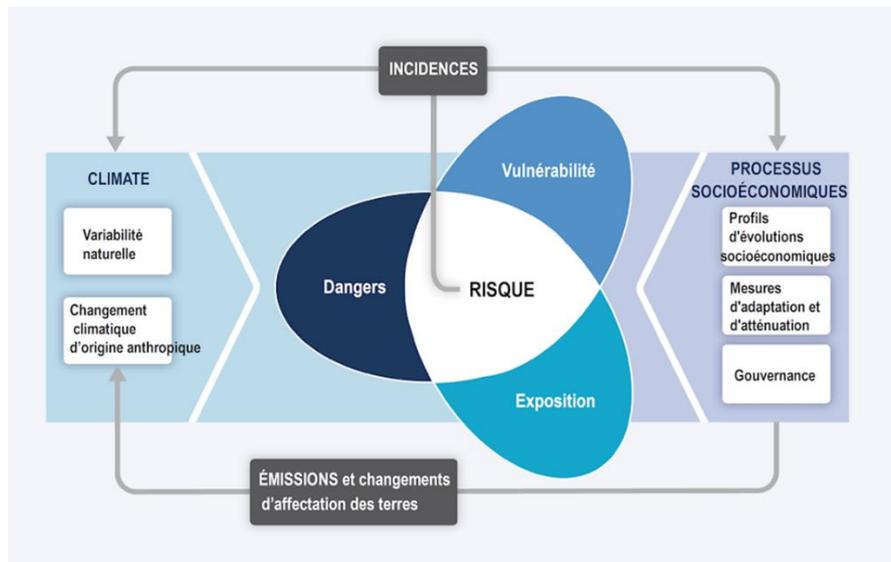


Figure 1 – Composantes du risque (IPCC, 2022)

Le danger

Définition : Un événement d'origine naturelle ou humaine susceptible de causer des pertes humaines, des dommages ou des dégâts aux infrastructures, à la biodiversité...

Caractéristiques : sévérité, durée, fréquence.

L'exposition

Définition : la présence d'éléments à risque dans le champ géographique d'un danger.

Evaluation : superposition spatiale de la zone géographique du danger et de la présence d'éléments potentiellement vulnérables.

Caractéristiques : éléments exposés (nombre de personnes exposées, valeurs des infrastructures...).

Vulnérabilité

Définition : le degré auquel un système est sensible et incapable de faire face au danger.

Dimensions : physique, technologique, humaine, socio-économique...

La vulnérabilité est composée de deux éléments :

- La *sensibilité* : la prédisposition des éléments exposés à être affecté négativement, c'est-à-dire à subir des dommages.
- La *capacité adaptative* : les ressources et caractéristiques qui aident les éléments à s'adapter au danger, à diminuer les impacts potentiels.

La sensibilité a donc un effet négatif et la capacité adaptative un effet positif sur le niveau de vulnérabilité.

Les solutions d'adaptation visent à diminuer le niveau de risque (via une réduction de la probabilité d'occurrence du danger, une réduction des éléments exposés ou une réduction de leur vulnérabilité). Les mesures d'atténuation (limitation des émissions de gaz à effet de serre) contribuent donc à l'adaptation au travers de la réduction du danger.

2.2. Les impacts

Les impacts sont la conséquence de la combinaison des différentes dimensions du risque.

Les impacts peuvent être direct ou indirect et sont souvent en cascade (exemple : le danger de sécheresse impacte la productivité agricole qui indirectement impacte le secteur alimentaire qui lui-même impacte la santé).

Le cadre conceptuel du risque est généralement appliqué à l'aide de chaînes de causes à effets.

Les étapes sont les suivantes :

1. Identifier les principaux dangers, expositions, vulnérabilité et impacts du système à risque.
2. Etablir les chaînes de causes à effets.
3. Retenir les principaux éléments identifiés à l'étape 1.
4. Sélectionner des indicateurs pour l'ensemble des facteurs identifiés.

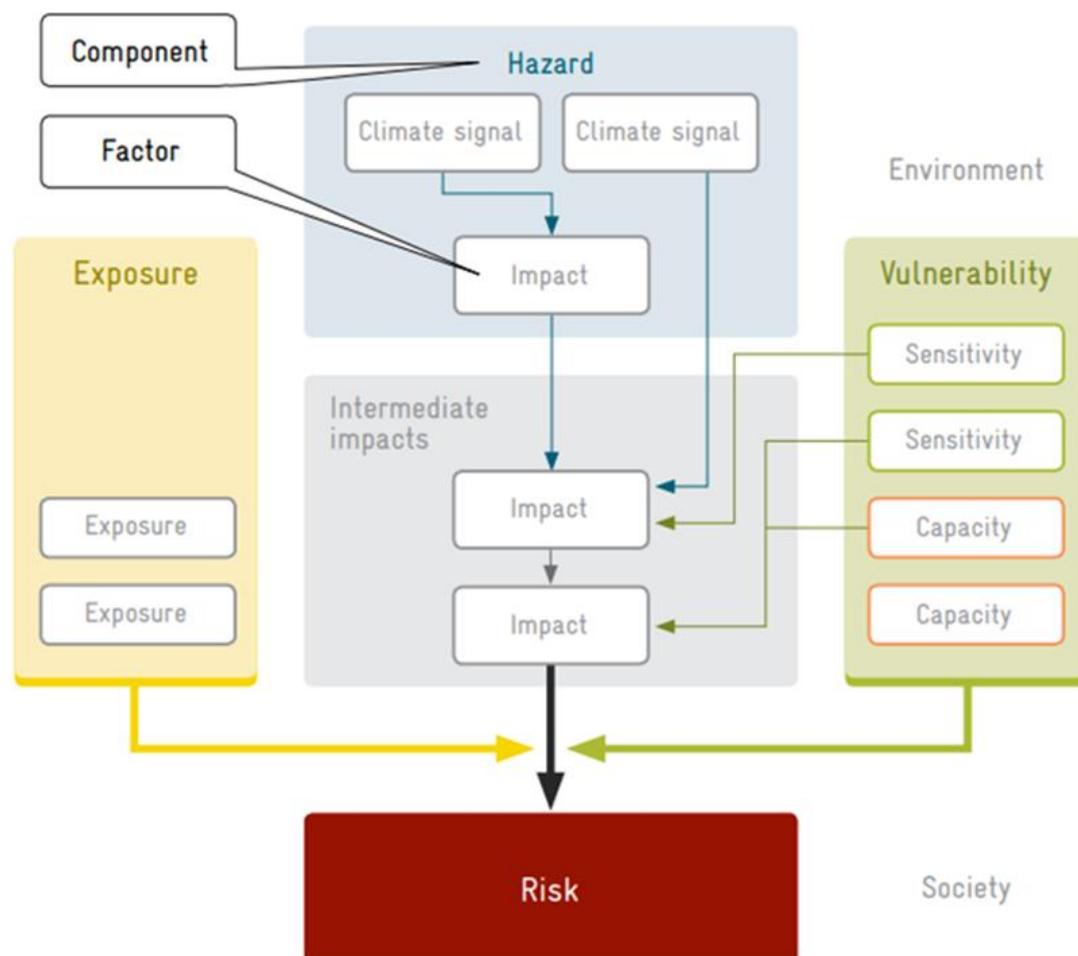


Figure 2 – Chaîne d'impact et composantes du risque (GIZ, 2017)

L'exemple suivant montre l'application du schéma précédent au risque de sécheresse sur les agriculteurs.

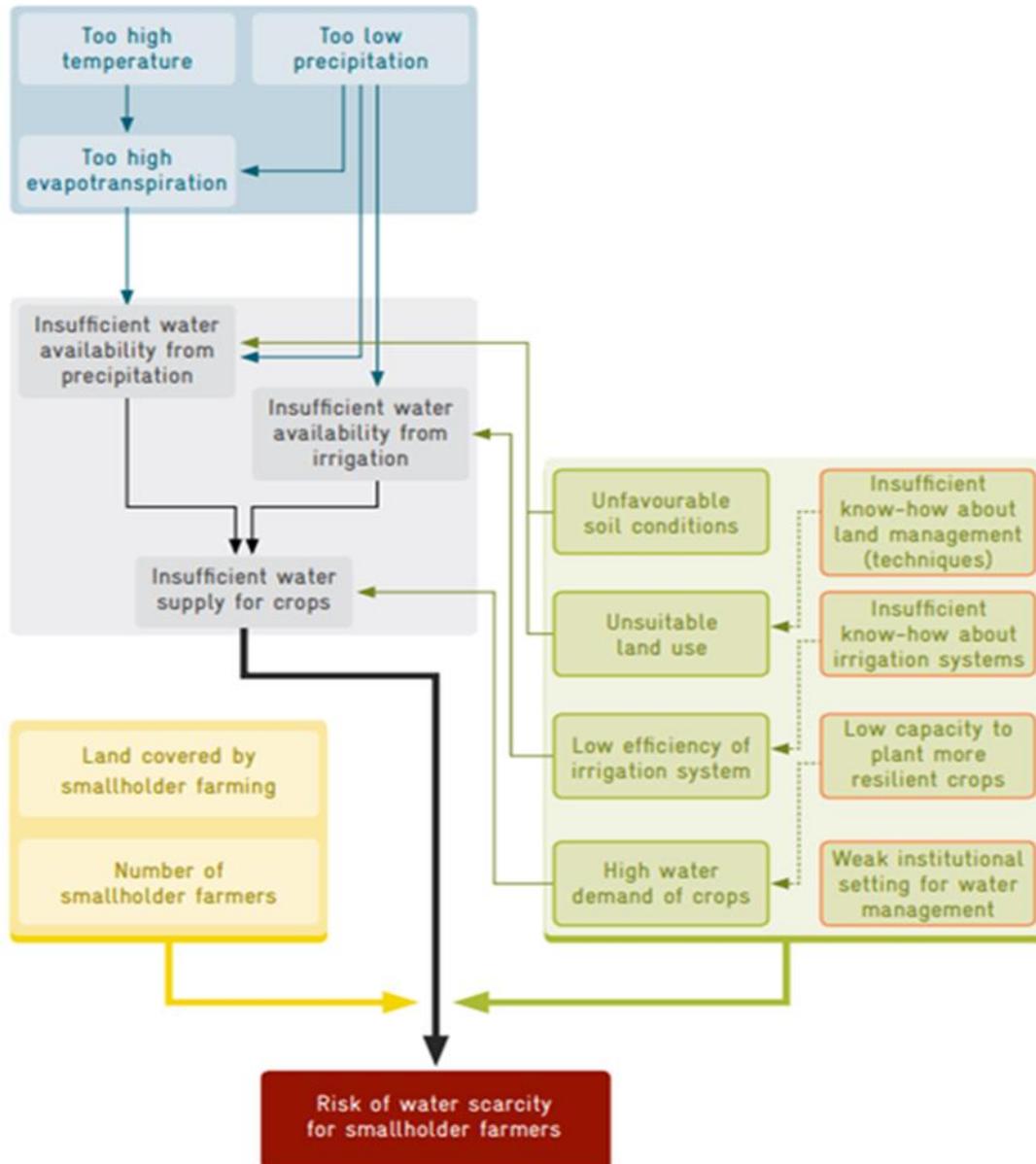


Figure 3 – exemple de chaîne d'impact au départ du danger de « sécheresse » (Vulnerability Source Notebook, GIZ 2017)

Légende :

- Le cadre bleu représente le danger.
- Le cadre gris représente les impacts intermédiaires.
- Le cadre jaune représente l'exposition.
- Le cadre vert représente la vulnérabilité au sein duquel les cadres verts représentent la sensibilité et les cadres rouges le manque de capacité adaptative.

2.3. L'adaptation et la résilience

L'adaptation est le processus d'ajustement au climat actuel ou prévu et à ses effets, afin d'atténuer les dommages ou d'exploiter les opportunités bénéfiques.

L'adaptation a souvent cinq étapes : (a) la prise de conscience, (b) l'évaluation, (c) la planification, (d) la mise en œuvre et (e) le suivi et l'évaluation.

S'il s'agit de mesures d'adaptation qui visent à poursuivre de manière plus prononcée des solutions/mesures déjà existantes, il s'agit d'adaptation « incrémentale ». Si au contraire les mesures d'adaptation envisagées n'existent pas actuellement dans le système étudié, on parle alors d'adaptation transformative.

Pour certains risques, les mesures d'adaptation peuvent être limitées. Ces limites peuvent être de deux types : *soft* ou *hard*.

- *Hard limit* : Aucune mesure d'adaptation n'est possible pour éviter les risques intolérables.
- *Soft limit* : Des options peuvent exister mais ne sont pas actuellement disponibles pour éviter des risques intolérables par des mesures d'adaptation.

La combinaison de ces notions est présentée dans le schéma ci-dessous.

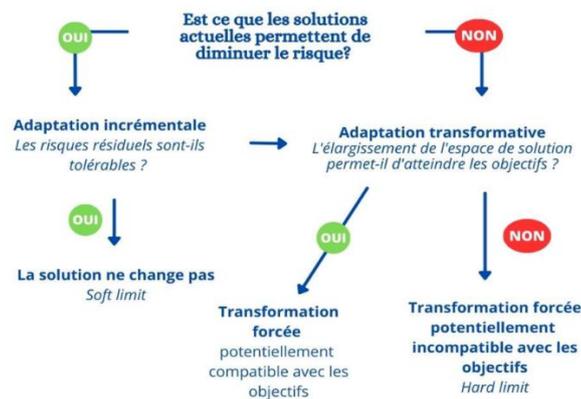


Figure 4 – Schéma des limites soft/hard de l'adaptation incrémentale/transformatrice

La résilience est la capacité des systèmes sociaux, économiques et environnementaux à faire face à un événement dangereux en réagissant ou en se réorganisant de manière à préserver leur fonction, leur identité et leur structure essentielles.

On distingue généralement les étapes suivantes participant à la résilience d'un système face à un choc : (a) résistance au choc, (b) capacité du système à fonctionner en mode dégradé durant le choc, (c) vitesse de récupération du système après le choc, (d) nouvel équilibre du système.

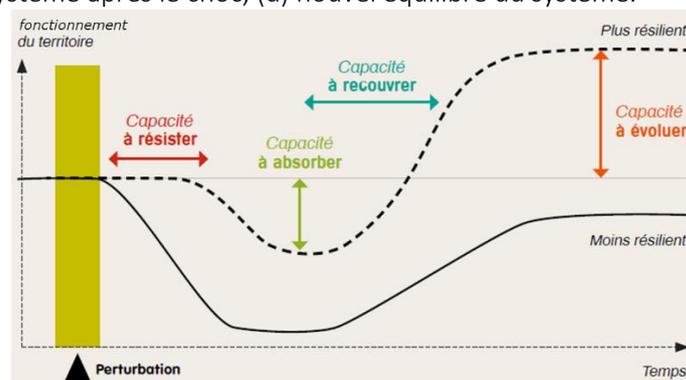


Figure 5 – courbe de la résilience (CEREMA, 2020)



3. Approche générale de l'étude

La présente étude répond à un cahier des charges dans lequel une série d'attentes ont été formulées, réparties en quatorze « domaines d'analyse » :

- Services écosystémiques
- Eau (inondations/sécheresses)
- Sol, indépendamment de l'usage du sol
- Agriculture
- Nature et biodiversité
- Forêts
- Socio-économique
- Villes
- Infrastructures
- Santé
- Santé environnementale
- Énergie
- Tourisme
- Patrimoine

La liste détaillée des attentes est reprise en annexe avec notre appréciation de la capacité de l'étude à y répondre. Ces attentes et domaines d'analyse mêlent différents concepts vus précédemment : danger, vulnérabilité, exposition, impacts directs et indirects, mesures d'adaptation, etc. Certains « domaines » sont en réalité des secteurs impactés, d'autres sont des dangers ou impacts intermédiaires, le domaine socio-économique fait partie de la composante de vulnérabilité transversale à tous les autres domaines, ...

En reprenant le cadre conceptuel des chaînes d'impacts et en y replaçant les attentes et domaines on peut distinguer trois grands ensembles cohérents :

- Les chaînes d'impacts autour des systèmes dits « naturels » (y compris les ressources eau, sol, biodiversité, mais également leur exploitation au travers de l'agriculture et des services écosystémiques)
- Les chaînes d'impacts autour des systèmes humains (y compris santé, socio-économie et tourisme)
- Les chaînes d'impacts autour des infrastructures (y compris villes et énergie)

Ces systèmes étant bien entendus eux-mêmes reliés.



Voir :

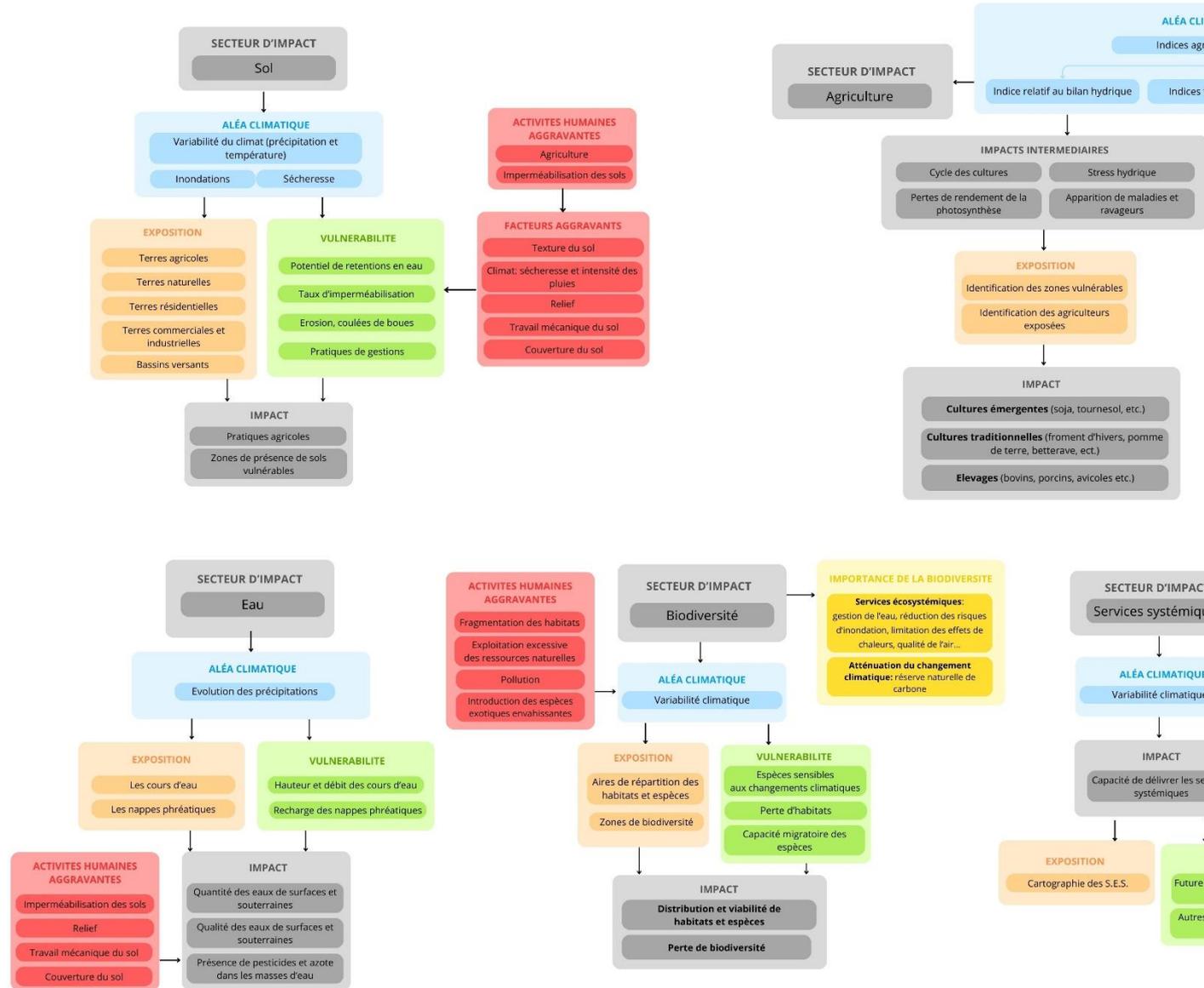


Figure 6,

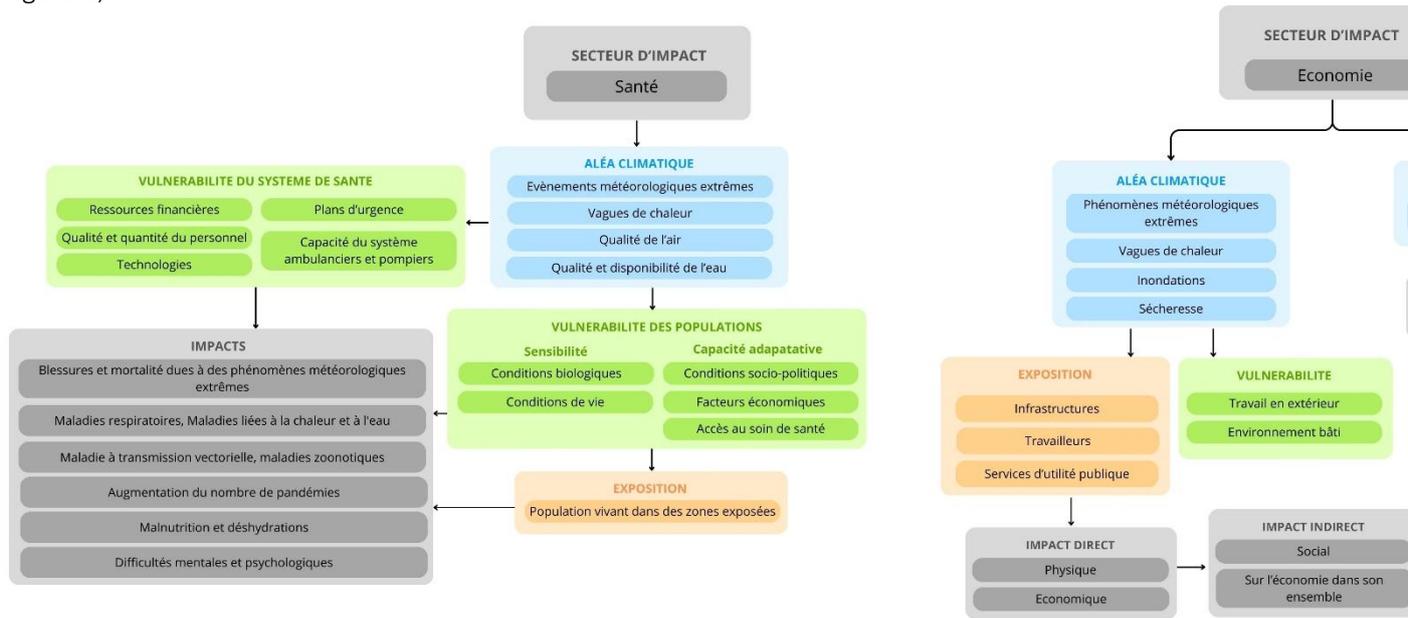


Figure 7 et

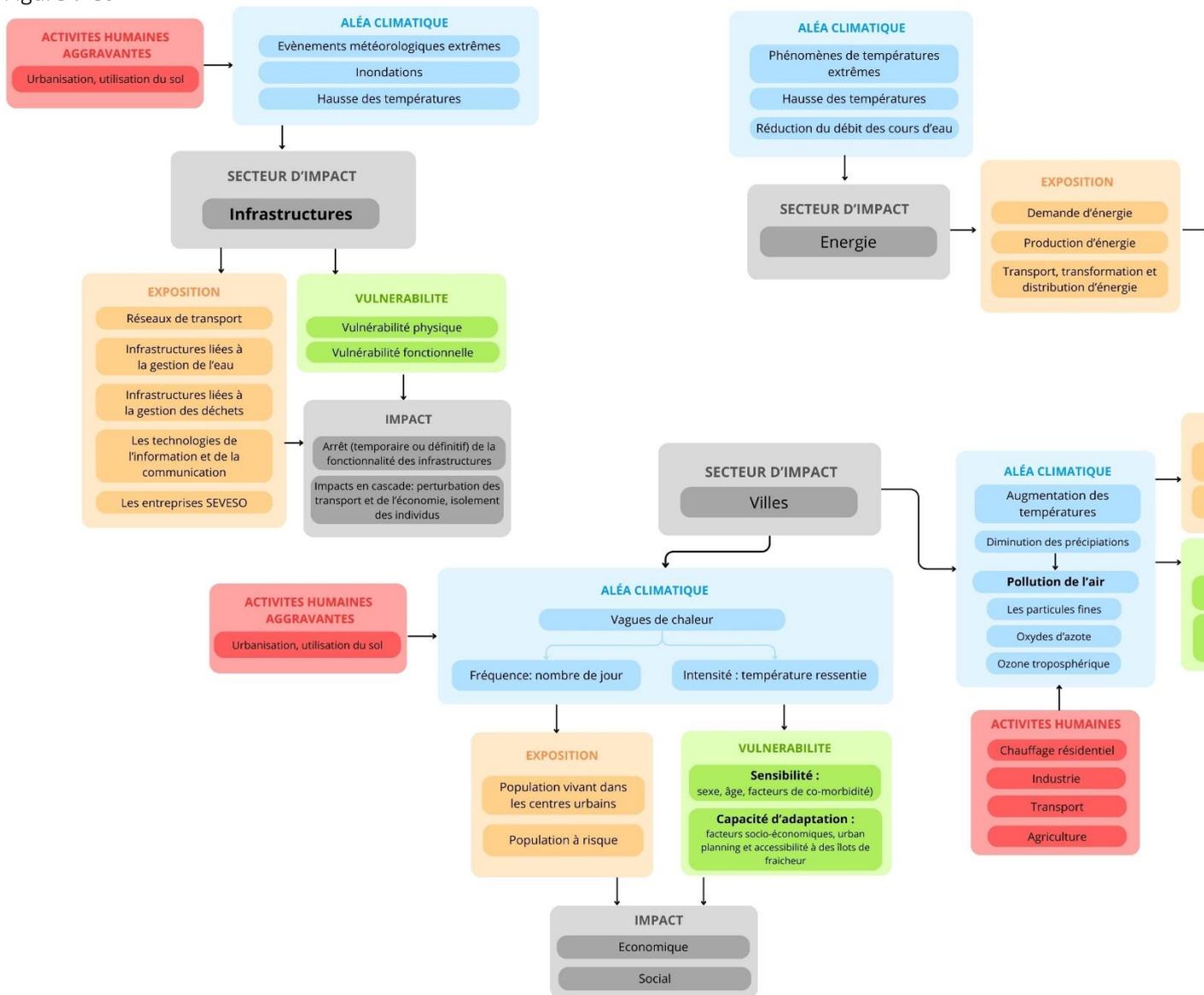


Figure 8, dans les pages suivantes.

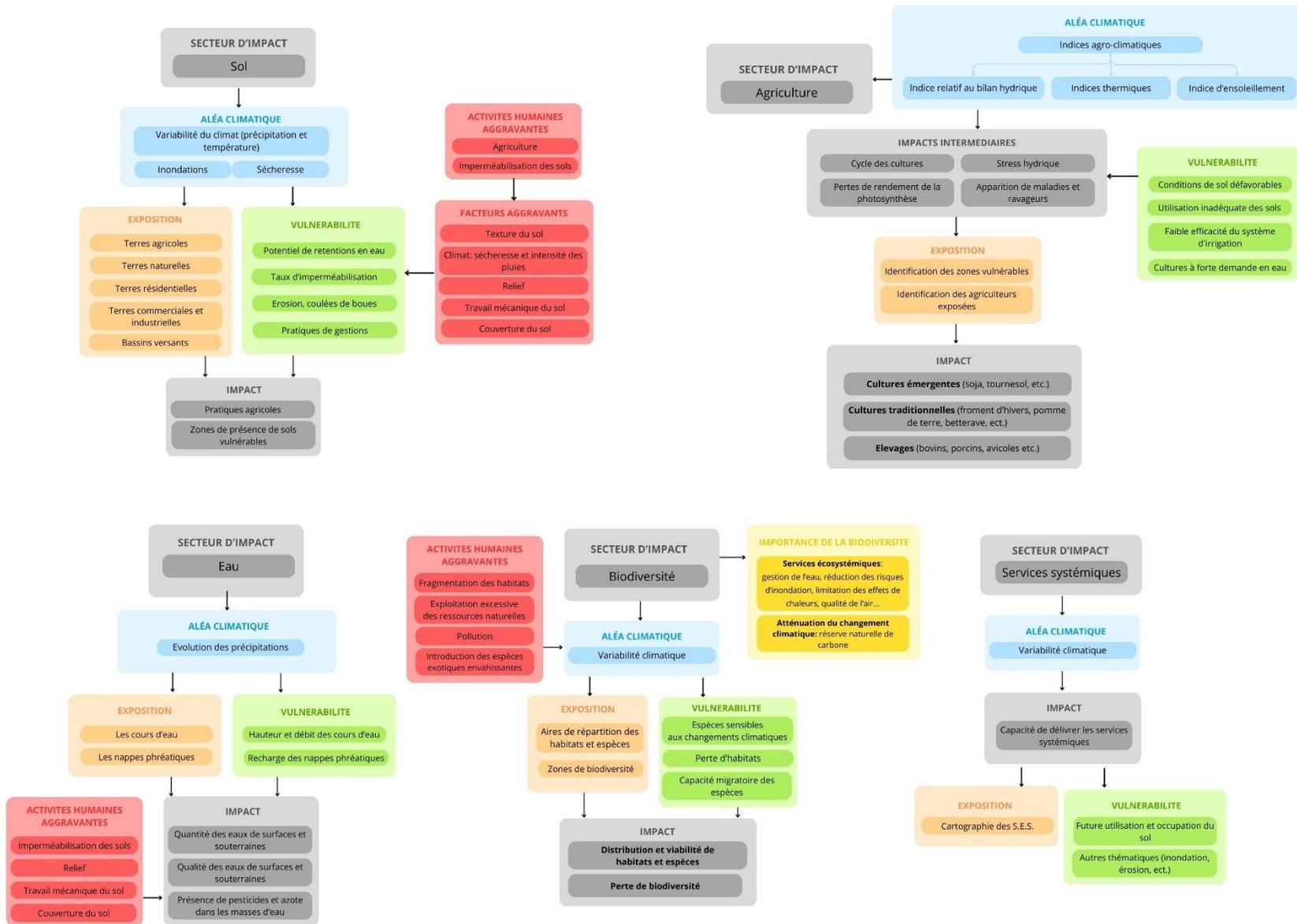


Figure 6 – ensemble des chaînes d'impacts autour des systèmes dits « naturels »

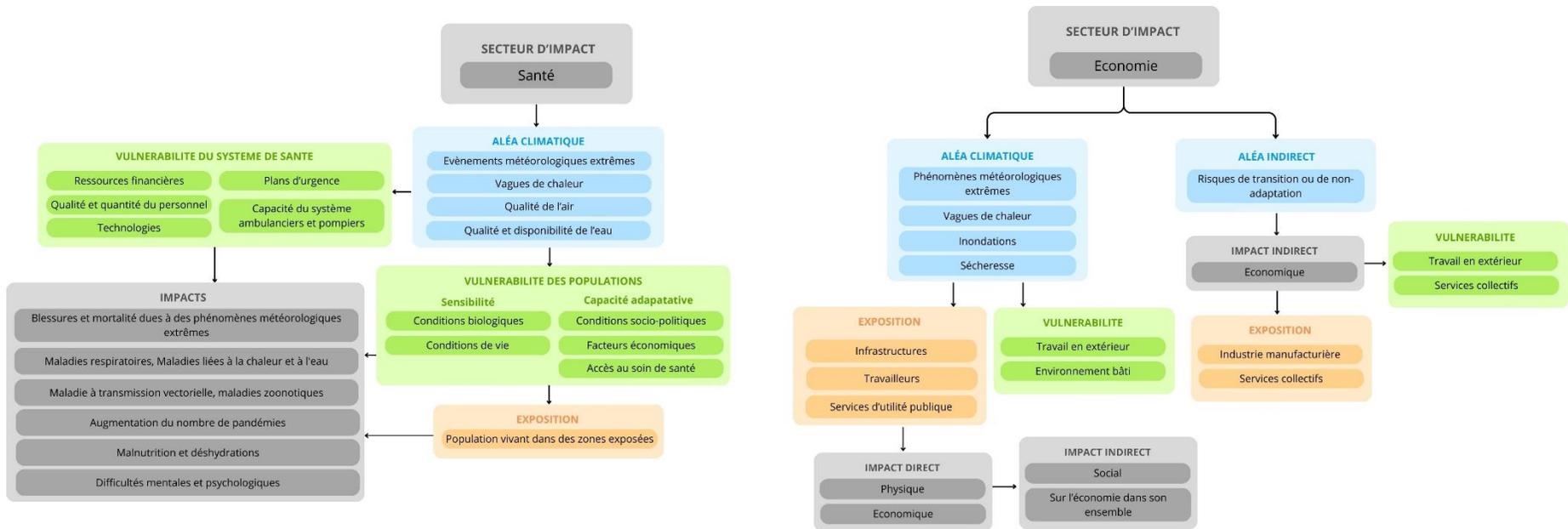


Figure 7 – ensemble des chaînes d'impacts autour des systèmes humains

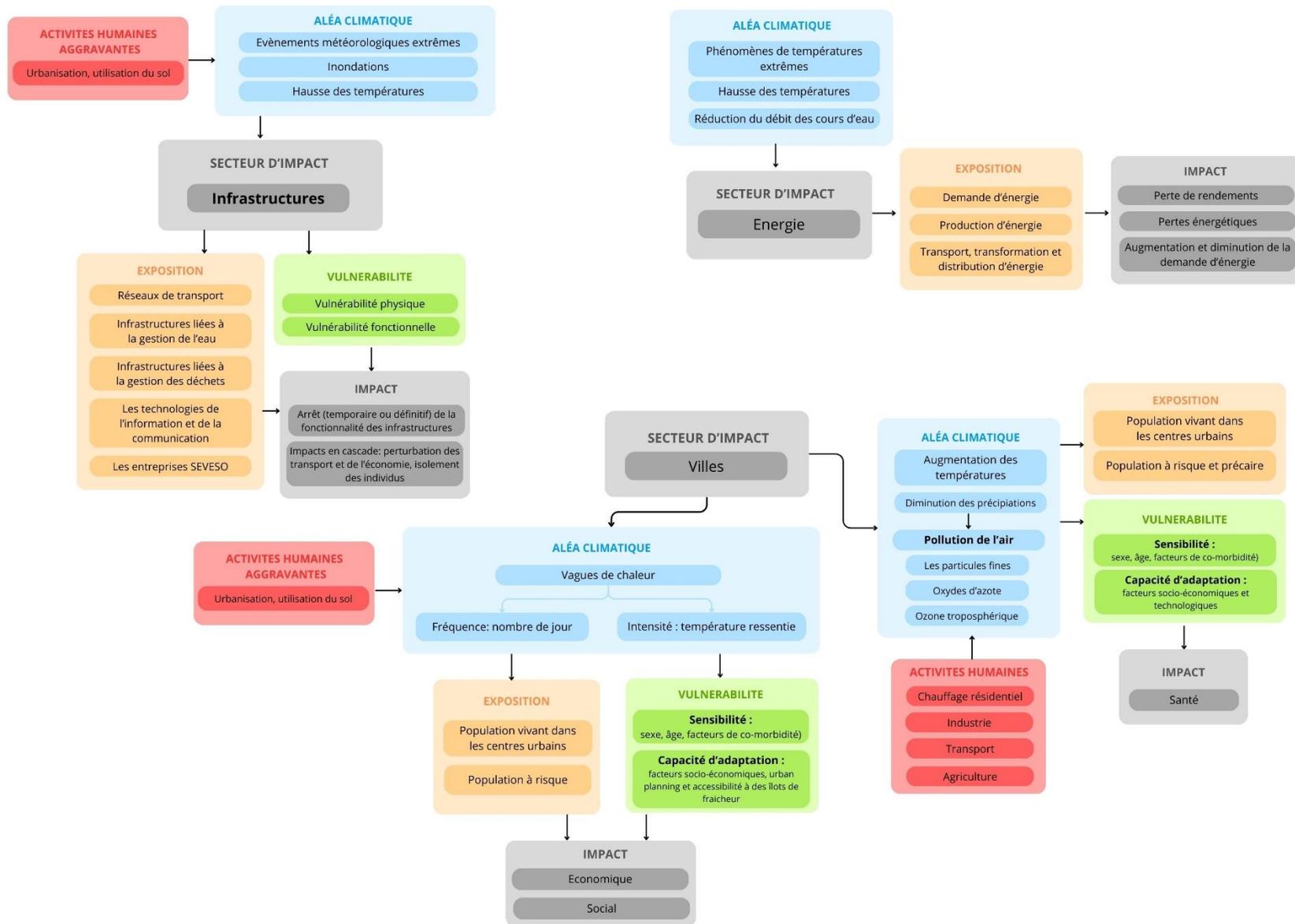


Figure 8 – ensemble des chaînes d'impacts autour des infrastructures



Dans ce premier rapport nous nous concentrons sur l'analyse de risque et n'abordons que très partiellement les mesures d'adaptation. Pour plus de fluidité, en fonction des approches méthodologiques d'analyse de risque, certains regroupements ont été fait et la suite du rapport se structure donc en 11 chapitres :

1. Nature, biodiversité, services écosystémiques et forêts
2. Eau (inondations/sécheresses)
3. Sol
4. Agriculture
5. Social
6. Economique
7. Villes
8. Infrastructures
9. Santé
10. Energie
11. Tourisme et patrimoine

Chaque chapitre se structure comme suit :

- Définition du périmètre
- Etat des lieux des outils et ressources sur la vulnérabilité dans ce domaine en Wallonie et en Europe.
- Proposition d'approche méthodologique pour l'analyse de risque, l'identification des indicateurs de vulnérabilité et de représentation des zones à risque
- Données requises pour l'analyse
- Des pistes concernant les mesures d'adaptation qui seront développées dans les prochaines phases du projet



PARTIE B : Benchmarking

Chapitre 1) Nature, Biodiversité, Services-Ecosystémiques et Forêts

Zones à risques et indicateurs

Nonante-cinq pourcent (95%) des types d'habitats naturels sont en **état de conservation défavorable** en Wallonie. Sur les 1322 espèces de plantes vasculaires présentes en Wallonie, 448 sont considérées comme menacées (34 %). Pour les carabidés, cela concerne 34 % des espèces ; pour les papillons de jour, 40 % ; pour les libellules, 26 % ; pour les poissons, 42 % ; pour les amphibiens, 17 % ; pour les reptiles, 43 % ; pour les oiseaux, 32 % ; et pour les chauves-souris, 40 %.

Les principales pressions sur les milieux et les espèces sont la **perte directe des surfaces d'habitat** et leur **fragmentation**, **l'intensification des pratiques agricoles et sylvicoles**, la **pollution** (engrais azotés, pesticides, lumineuse) et les **espèces exotiques envahissantes**. A ces moteurs de perte de biodiversité se superpose celui des **changements climatiques**, aggravant les pressions pesant sur les écosystèmes.

Identifier les vulnérabilités des systèmes naturels face au changement climatique est une étape essentielle pour prioriser les actions visant à améliorer leur résilience. La stratégie « Biodiversité 360 » de la Région wallonne vise notamment à « Préserver la biodiversité et restaurer les populations d'espèces et les habitats naturels dégradés ». Or, le rapport d'avril 2022 de la plateforme wallonne pour le GIEC identifie plusieurs risques et impacts du changement climatique sur la biodiversité : modification des aires de distribution des espèces, modification des interactions entre espèces dues aux changements phénologiques, naturalisation et invasion d'espèces exotiques envahissantes... les événements extrêmes de sécheresse et canicule impacteraient plus particulièrement certains habitats tels que les tourbières ou prairies de fauches, et les espèces des milieux froids (plateaux ardennais). Certaines des principales essences de production de bois en Wallonie (hêtre, épicéa, chêne pédonculé...) sont également susceptibles de subir des dépérissements et déplacements d'aires à cause des modifications de régime hydrique induites par le CC. Il est donc important de tenir compte des modifications d'aires et des vulnérabilités des habitats naturels dans les stratégies régionales. Ainsi des mesures de gestion peuvent être proposées pour réduire la fragmentation des habitats, augmenter la connectivité et l'hétérogénéité des habitats naturels, maintenir la diversité taxonomique, phylogénétique et fonctionnelle, et augmenter la résilience des écosystèmes aux événements extrêmes.

Si le changement climatique est une pression complémentaire non négligeable sur la biodiversité extraordinaire, il est également susceptible d'impacter négativement la biodiversité dite « ordinaire » et la capacité des habitats à fournir des services écosystémiques tels que le stockage de carbone dans le sol, la pollinisation, la valeur récréative et sanitaire... Notamment, les zones urbaines et agricoles peuvent abriter une biodiversité importante et agir comme corridors au sein du réseau écologique

Cette première étape fait l'état des lieux des initiatives proposées en Région Wallonne ainsi que des bases de données et outils disponibles. L'état des lieux porte également sur les analyses de vulnérabilité et stratégies d'adaptation dans ce domaine, proposées en Belgique au niveau régional (région Bruxelles-Capitale, région flamande) et national, ainsi que dans les pays voisins.

Les attentes spécifiques relatives au projet pour la thématique « **Services écosystémiques (SES)** », « **Nature et Biodiversité** » et « **Forêts** », ainsi que la manière dont le projet pourra y répondre sont reprises en Annexe 1.

Dans ce rapport, nous rassemblons les trois thématiques « Nature et Biodiversité », « Services écosystémiques » et « forêts » au vu des similarités des thématiques, car l'approche est généralement très similaire, que ce soit au niveau des outils ou des méthodologies. La figure suivante rassemble tous les éléments présentés ci-dessus dans le cadre conceptuel des chaînes d'impacts.

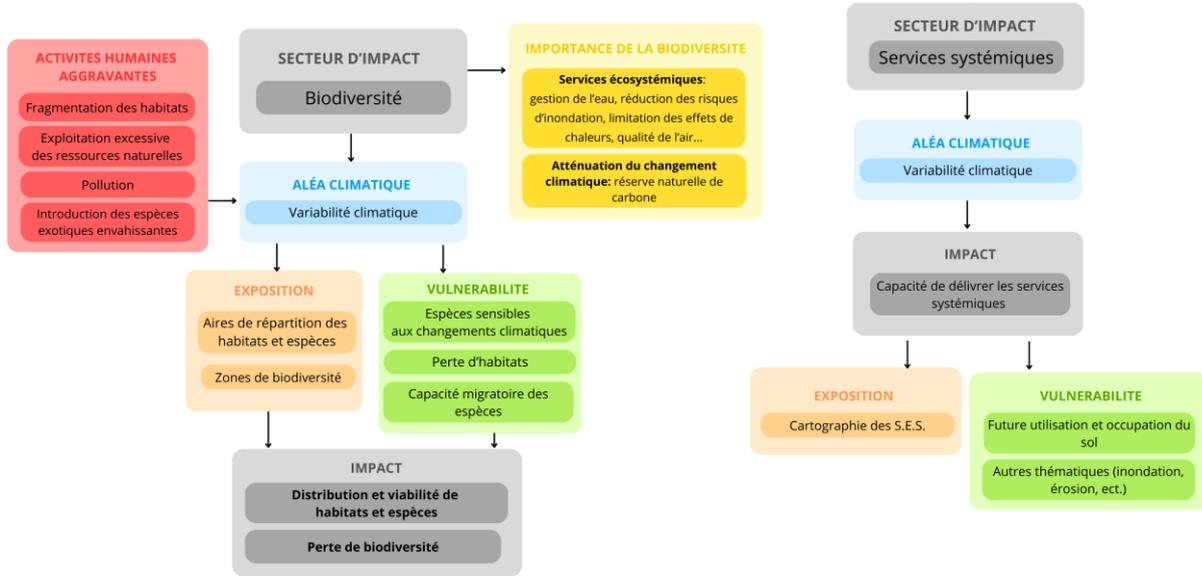


Figure 9 – chaînes d'impacts pour le chapitre 1 - biodiversité

1.1. Etat des lieux

Synthèse

Législations, stratégies régionales, nationales et européennes :

Titre	Échelle	Description	Lien
Green Deal	Europe	Propositions visant à faire de l'Europe le premier continent neutre pour le climat. La Commission propose de restaurer les forêts, les sols, les zones humides et les tourbières d'Europe, afin d'accroître l'absorption du CO2 et de rendre notre environnement plus résilient face au changement climatique.	https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/
Natura 2000	Europe	Le réseau Natura 2000 vise à assurer, en conciliation avec les activités humaines, le maintien ou le rétablissement des habitats naturels et des espèces de faune et de flore sauvages d'intérêt communautaire dans un état de conservation favorable via la mise en œuvre d'un réseau de sites naturels interconnectés, en application des directives européennes "Oiseaux" (79/409/CEE) et "Habitats-Faune-Flore" (92/43/CEE).	http://biodiversite.wallonie.be/fr/natura-2000.html?IDC=829



Stratégie Biodiversité 360	Wallonie	La Stratégie Biodiversité 360° comporte divers objectifs stratégiques et opérationnels ayant pour objectif : 1) Préserver la biodiversité et restaurer les populations d'espèces et les habitats naturels dégradés ; 2) Intégrer la biodiversité dans les logiques de développement et les activités économiques et favoriser une utilisation durable de la biodiversité ; 3) Valoriser la biodiversité et mobiliser l'ensemble des acteurs de la société en sa faveur ; 4) Déployer les actions au niveau local et rayonner à l'international ; 5) Connaître la biodiversité et encadrer les activités sur le terrain.	http://environnement.wallonie.be/enquetes-publiques/biodiversite/
Code forestier wallon 2008	Wallonie	Promeut des pratiques sylvicoles visant à diversifier les forêts et atténuer les effets négatifs du changement climatique.	http://environnement.wallonie.be/legis/dnf/forets/foret025.htm

Outils et projets en Wallonie et en Europe :

Thématique	Nom projet	Description	Lien
Biodiversité	Réseau écologique wallon	Mise en place du réseau écologique wallon : cibler les zones d'intérêt biologique à fonctions spécifiques (zones noyaux, zones de liaison, zones tampons) et pour lesquelles des actions sont à mettre en œuvre (zones centrales, zones de développement) dans un principe de connectivité, et en interaction avec la matrice paysagère.	Disponible début 2024
Biodiversité	TriAS – Tracking Invasive Alien Species	Mise en place d'un cadre de mobilisation des données relatives aux espèces exotiques issues de diverses sources de données et élaboration de procédures d'évaluation des risques qui s'appuient sur la modélisation, la cartographie et l'analyse des risques. Permet d'identifier les espèces émergentes et d'évaluer le risque que présente ces espèces exotiques pour la Belgique aujourd'hui et dans une perspective de changement climatique.	https://osf.io/7dpgr/
Biodiversité	TRANSLOC	Projet Biodiversa+. L'objectif principal est d'étudier et de quantifier comment les translocations de conservation (déplacement d'individus pour renforcer les populations), programmes de réintroduction et migrations assistées affectent les trajectoires écologiques de la restauration. Il mélangera différentes approches	https://www.biodiversa.eu/2022/10/25/transloc/



		depuis la mise en œuvre et les analyses de bases de données jusqu'à la modélisation, le suivi sur le terrain et les expériences. La cohérence de ces actions avec les effets attendus du CC sera également analysée, un des objectifs étant d'évaluer l'impact du CC sur les introductions d'espèces sauvages afin d'en tenir compte à l'avenir.	
Biodiversité	Life B4B	Le projet LIFE B4B – « Belgium for Biodiversity » est un projet LIFE intégré et stratégique qui contribue à atteindre les objectifs de Natura 2000 en matière de conservation de la nature. Vise à renforcer la protection des espèces et des habitats les plus précieux et les plus menacés en Belgique.	https://www.natagriwal.be/autres-missions/life-b4b/
Biodiversité	Frichnat	Projet du plan de relance de la RW : objectivation du rôle des friches industrielles dans la conservation de la biodiversité en Région wallonne.	https://cercles-naturalistes.be/frichnat-appel-naturalistes-benevoles/
Biodiversité	Yes We Plant	Programme opérationnel lancé par le Gouvernement wallon pour planter 4000 km de haies en milieu ouvert et/ou d'un million d'arbres sur le territoire wallon d'ici 2024, afin de renforcer le maillage écologique et faire un geste pour le climat.	https://yesweplant.wallonie.be/home.html
Biodiversité et SES	Plan Canopée de la ville de Liège	Le Plan Canopée vise à augmenter le patrimoine arboré de la Ville de Liège par la plantation de 8000 arbres en domaine public et 16000 arbres en domaine privé à l'horizon 2030. C'est un projet qui place les arbres urbains au centre de la stratégie d'adaptation de Liège au changement climatique global. D'autres plans canopée existent également à Bruxelles (2020-2030), Verviers, Lyon, etc.	https://canopee.liege.be/ https://www.bruxelles.be/plan-canopee-2020-2030
Biodiversité	BiodiverCité	Projet lancé à l'initiative du cabinet de la Ministre Tellier. Subventions qui visent à soutenir les communes qui veulent mener des actions locales pour développer la nature et la biodiversité sur leur territoire. Les thématiques sont variées : protection des espèces et des habitats, milieux humides et cours d'eau, actions en faveur des pollinisateurs, chemins et sentiers, biodiversité dans le bâti, « cimetières nature », plantations indigènes, lutte contre les espèces exotiques	http://biodiversite.wallonie.be/fr/subvention-biodivercite.html?IDC=6394



		envahissantes et sensibilisation à la nature.	
Biodiversité	PYRAMIDE (Natagriwal)	Outil d'accompagnement développé par l'asbl Natagriwal pour évaluer et comprendre l'impact des pratiques agricoles sur la biodiversité. Cet outil est destiné à accompagner les agriculteur·rice·s vers des pratiques plus favorables à la biodiversité dans leurs exploitations.	https://www.natagriwal.be/pyramide-un-outil-daccompagnement-pour-evaluer-et-comprendre-limpact-des-pratiques-agricoles-sur-la-biodiversite/
Biodiversité et SES	Terraé	Outil d'accompagnement de la transition agroécologique : communication sur les pratiques agroécologiques, inventaires biodiversité, analyses socio-économiques...	https://www.terrae-agroecologie.be/
Biodiversité et SES	ClienNFarms	ClienNFarms est un projet d'Action d'Innovation financé par la Commission européenne pour soutenir le Green Deal européen. Il vise à codévelopper des solutions systémiques, pertinentes localement, pour promouvoir des exploitations agricoles neutres sur le plan climatique et résilientes à travers l'Europe.	https://clienfarms.eu/
Forêt	Forêt résiliente	Le projet pilote « Forêt résiliente » a pour objectif d'encourager les propriétaires forestiers à réfléchir différemment leur gestion pour régénérer leurs forêts et les orienter vers une forêt plus résiliente aux changements climatiques.	https://foretresiliente.be/
Forêt	Trees for future	Projet initié par la Société Royale Forestière de Belgique dans l'objectif d'identifier les essences et provenances forestières qui participeront à l'adaptation des forêts aux changements climatiques (indigènes, mais aussi exotiques). Encourage la migration assistée d'essences (accélération artificielle des vitesses de migration des espèces).	https://www.treesforfuture.be/
Forêt	Fichier écologique des essences	Outil d'aide à la décision pour le gestionnaire d'un espace forestier ou d'un espace naturel. Fournit une aide pour le choix des essences et/ou d'un diagnostic sur l'adéquation entre une parcelle et son usage (production de bois, protection du sol ...).	https://www.fichierecologique.be/

Forêt	Le changement climatique et ses impacts sur les forêts wallonnes – recommandations aux décideurs, propriétaires et gestionnaires	Propose une synthèse sur les évolutions prévisibles des paramètres climatiques en Wallonie et leurs conséquences sur les forêts, propose des actions concrètes à l'échelle du gestionnaire pour augmenter la résilience des forêts au changement climatique.	http://biodiversite.wallonie.be/servlet/Repository/changements-climatiques-brochure-recommandations-2017.pdf?ID=38830
Forêt	Assises de la forêt	74 résolutions pour une forêt multifonctionnelle dans le respect de son écosystème.	http://environnement.wallonie.be/assisesdelaforet/
Forêt	Observatoire wallon de la santé des forêts	Créé en 2011, l'OWSF a pour objectif de centraliser les données et les connaissances relatives à la santé des forêts relative au territoire wallon et bruxellois. Dispositif complexe destiné à informer efficacement les acteurs du secteur forestier sur les risques sanitaires de nos forêts.	http://owsf.environnement.wallonie.be/fr/lowsf.html?IDC=5663
SES	Matrice des capacités des SES en Wallonie	Convention visant à doter la Wallonie d'un outil d'aide à la décision qui vise à évaluer l'impact d'un changement d'utilisation du sol sur la provision des services écosystémiques. Cette convention regroupe des acteurs du SPW, de l'ULiege et du VITO.	https://services-ecosystemiques.wallonie.be/
SES	Guide pour la prise en compte des services écosystémiques dans les évaluations des incidences sur l'environnement.	Etude de la DREAL Hauts-de-France et de l'INRAE qui présente une méthodologie claire et opérationnelle pour intégrer les services écosystémiques dans les études d'incidences sur l'environnement des projets, plans et programme L'intérêt de cette étude réside en la mise en place de plusieurs matrices de capacité selon la condition structurelle et biologique des habitats.	https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/?Evaluer-les-services-ecosystemiques
Transversal	JRC PESETA IV	Projet européen visant à calculer le coût de l'inaction climatique, la vulnérabilité de plusieurs secteurs et la réduction d'effets négatifs via des mesures de mitigation et d'adaptation. Pour les écosystèmes forestiers, analyse de la vulnérabilité aux incendies, chablis et infestations d'insectes ravageurs.	https://joint-research-centre.ec.europa.eu/system/files/2020-05/pesetaiv_summary_final_report.pdf
Transversal	Adapte ta commune	Outil dédié aux communes développé par l'AwAC, leur permettant d'établir un diagnostic de la vulnérabilité de leur territoire aux effets des changements climatiques et d'orienter la politique à mettre en place au regard des priorités identifiées.	https://awac.be/wp-content/uploads/2021/08/Guide-utilisateur_Adapte-ta-commune_V1.1_juillet-2017.pdf

Etudes de vulnérabilité dans d'autres pays :

Pays	Sujet	Méthodo	Lien
Pays-Bas	Test de résistance climatique pour les zones naturelles et agricoles au-dessus du canal de la mer du Nord.	Matrices de vulnérabilité sur avis d'experts et cartographie	https://klimaatadaptatienederland.nl/@236345/klimaats-tresstest-natuur-landbouw-noordzeekanaal/
France	Outil de diagnostic de vulnérabilités et d'adaptation des modes de gestion des espaces naturels en vue des changements climatiques	Matrice d'exposition-sensibilité sur base d'un questionnaire	https://naturadapt.com/
Allemagne	Analyse de l'impact et des risques climatiques 2021 pour l'Allemagne.	Identification de risque sur matrices, basée sur avis d'experts.	http://www.umweltbundesamt.de/publikationen
Région Bruxelles-Capitale	L'adaptation au changement climatique en Région de Bruxelles-Capitale : Élaboration d'une étude préalable à la rédaction d'un plan régional d'adaptation. 2012	Synthèse bibliographique et identifications des vulnérabilités sur le territoire Bruxellois (sans cartographie), identification des législations, services, outils existants et acteurs.	https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/Airclimat%20Etude%20ChgtClimatiqueRBC
International	Connecting biodiversity and climate change mitigation and adaptation: report of the second ad-hoc technical expert group on biodiversity and climate change. Secretariat of the Convention on Biological Diversity – 2009.	Document reprenant, à échelle globale, les impacts potentiels du CC sur la biodiversité et les écosystèmes, ainsi que des propositions de mesures d'adaptation.	https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-41-en.pdf

Critique

Les projets d'analyse de vulnérabilité et de propositions d'adaptations en Belgique et chez les pays voisins concernent principalement les thématiques agricoles, forestières et de santé. Peu de modélisations ou analyses de vulnérabilité ont été réalisées sur les habitats naturels, et il s'agit principalement d'analyses non quantitatives, basées sur avis d'expert.

Concernant les espèces exotiques envahissantes (EEE), des modélisations ont déjà été réalisées en région wallonne dans le cadre du projet TRIAS, et à échelle Européenne par différents centres de recherche. Ces modèles restent à ce jour relativement rares, et ont été réalisés avec des méthodologies et échelles très différentes. De plus, l'impact du changement climatique sur les EEE ne se limite pas qu'aux modifications d'aires de répartition, mais concerne également la dette d'invasion sur le territoire et la magnitude des impacts potentiels des espèces. Une cartographie globale à l'échelle de la RW n'est pas possible actuellement avec les données à notre disposition, mais nous proposons de réaliser un état des lieux des connaissances sur le lien entre CC et EEE, basé sur une review de la littérature et des avis d'experts. Cette review abordera également la problématique des organismes ravageurs (scolytes, insectes défoliateurs, champignons...) exotiques et le risque d'impacts négatifs exacerbés par un réchauffement du climat, notamment sur les forêts et les récoltes.

1.2. Méthodologie d'analyse de vulnérabilité

Approche générale

Nous proposons pour la Wallonie de développer une approche qui fournit aux acteurs de terrain une cartographie des zones à risques sur base de données régionales. Ces cartographies pourront ensuite servir de matière pour une analyse locale plus fine sur base d'avis d'experts comme proposé dans les autres régions/pays. En Wallonie la cartographie du réseau écologique (RE) wallon avec modélisation des habitats naturels a été réalisée. Il existe également une cartographie du potentiel de services écosystémiques. Intégrer les différents scénarios de projections des paramètres climatiques dans ces deux cartographies nous permettra de fournir une base pour les analyses de vulnérabilité.

Attention certaines attentes du cahier des charges portaient sur un niveau très fin d'analyse, comme l'impact des changements climatiques au niveau des haies. L'approche proposée ici fournira des informations plus génériques, mais qui pourront être utilisées dans des diagnostics d'expert au niveau local adressant un niveau de détail aussi fin.

Deux approches cartographiques seront utilisées pour les trois thématiques concernées, selon qu'on identifie les risques qui pèsent sur les habitats ou les risques qui pèsent sur les services que nous rendent les écosystèmes naturels.

La thématique « forêts » sera intégrée aux deux autres thématiques. De plus, une méthodologie de monitoring des actions déjà mises en place pour augmenter la résilience des écosystèmes forestiers au changement climatique sera proposée. Celle-ci pourra se baser sur les données de l'inventaire forestier wallon pour quantifier la part d'essences en adéquation stationnelle, ainsi que l'évolution de l'état de conservation des habitats forestiers en N2000.

Approche « Espèces et habitats protégés / rares »

Une modélisation des aires de répartition futures d'une sélection d'habitats et d'espèces sera réalisée (comme suggéré dans le document technique du Secrétariat de la Convention sur la Biodiversité Ecologique, 2009). Les habitats seront sélectionnés au sein de la liste des végétations naturelles potentielles (VNP), dont au moins un habitat forestier et un habitat lié à l'agriculture. Seront sélectionnés les VNP susceptibles d'être fortement impactés par le changement climatique (en répartition ou en qualité d'habitat) en raison des conditions écologiques extrêmes qui les caractérisent. La priorité sera donnée aux habitats prioritaires.

La vulnérabilité de chaque VNP au changement climatique sera quantifiée sur base de modélisations avec variation des variables climatiques en fonction des différents scénarios, toute autre chose restant égale. Les modèles utilisés seront ceux mis au point dans le cadre du projet « Réseau écologique wallon ». Les résultats seront soumis à l'avis d'experts.

Comme pour les habitats, une sélection d'espèces protégées sensibles au changement climatique sera réalisée. Ces espèces seront choisies en lien avec les habitats repris dans la première sélection.

Une modélisation sera faite de l'aire de distribution spatiale (SDM) des espèces sélectionnées dans un contexte des nouvelles variables climatiques selon différents scénarios de changements climatiques. Les résultats seront à nouveau soumis à l'avis d'experts.

Une analyse de la connectivité Sud-Nord du réseau écologique pour les habitats et espèces sélectionnés (sur modélisation en fonction des distances de dispersion et sur avis d'expert) sera réalisé. Cette analyse intégrera des scénarios de changement d'occupation du sol et identifiera les grandes zones de rupture de la connectivité.



Enfin, un état des lieux sera fait des connaissances et projections déjà effectuées à l'échelle belge ou européenne pour des espèces exotiques envahissantes par rapport aux changements climatiques. Mobilisation d'experts pour identifier des espèces à risque. Si possible, estimation de la dette d'invasion (espèces déjà introduites en voie d'invasion) en utilisant des listes d'espèces naturalisées pour certains groupes taxonomiques et en quantifiant la proportion à risque de devenir invasive suite aux changements climatiques.

Approche « Services Ecosystémiques »

La récente cartographie wallonne des services écosystémiques servira de base d'analyse.

Cette cartographie sera reproduite pour différentes situations futures, sur base :

- De nouveaux paramètres climatiques selon les scénarios de changements climatiques
- Des scénarios de modification d'occupation du sol

Ces situations futures seront réalisées grâce à une matrice des services écosystémiques révisée en y ajoutant une dimension pour chaque contexte projeté (avis d'expert).

Projection des valeurs de la matrice sur les cartographies en fonction des divers scénarios (notamment les variations de distribution des habitats identifiés dans la partie « biodiversité »). Certaines de ces projections ne pourront se faire qu'à l'échelle de grandes zones bioclimatiques de Wallonie, en fonction des informations dont nous disposerons en termes de modifications d'occupation du sol.

Pour une sélection de services, des analyses plus poussées d'impacts seront menées en lien avec d'autres thématiques, afin d'identifier des zones à risque (ZAR) et des zones d'intervention prioritaire (ZIP).

Données

Les données nécessaires à ces approches sont les suivantes :

- Données du projet « Réseau écologique wallon » : modèles des VNP, SDM d'espèces, cartographie du réseau.
- Modélisations d'espèces exotiques envahissantes du projet TRIAS
- Données climatiques
- Parcellaire agricole anonyme (2022) – Service Public de Wallonie
- Données du projet « Réseau écologique wallon » : cartographie du réseau, écotopes.
- Parcellaire agricole anonyme (2022) – Service Public de Wallonie
- Cartographie des SES et Matrice des SES.
- Données climatiques
- Scénarios de changements d'occupation du sol modélisés dans le projet ReCOVeR (ISSEP – VITO) en 2021.

La plupart des données nécessaires sont disponibles publiquement ou au sein de l'équipe Biodiversité et Paysage ULiège. Les données du réseau écologique seront rendues publiques début 2024. Cependant, une série d'indicateurs climatiques mis à jour en fonction de différents scénarios est nécessaire et pourrait être obtenue auprès du département climatologie de l'ULiège, dans le cas où le jeu de donnée n'est plus à jour sur les derniers scénarios climatiques ou ne correspond pas aux scénarios sélectionnés pour l'étude (échelle 1x1 km)¹ :

- Annual Mean Temperature (°C)
- Annual Amount of Precipitation (mm year⁻¹)
- Annual Variation of Precipitation (coefficient of variation)
- Annual Variation of Temperature (stdev)

¹ https://zenodo.org/record/3694065?fbclid=IwAR2tnsFL1cDfOkRqKixJz9JCsRai7GYdLa_Y7zibpojB3Qs2X6p-C2lJHY



- Maximum Temperature of the Warmest Month (°C)
- Minimum Temperature of the Coldest Month (°C)
- Temperature Annual Range (°C)
- Precipitation of the Wettest Month (mm)
- Precipitation of the Driest Month (mm)
- 30 yr Mean Annual Cumulated GDD Above 5 degrees C (°C days)
- Annual Mean Potential Evapotranspiration (mm day⁻¹)
- Annual Mean Solar Radiation (W m⁻²)
- Annual Variation of Solar Radiation (stdev)

Pour les avis d'experts, différents groupes de travail seront établis. Ceux-ci impliqueront d'autres partenaires internes du consortium, ainsi que le SPW DEMNA, des associations naturalistes, la Belgian Biodiversity Platform, l'Observatoire Wallon pour la Santé des Forêts, LifeWatch, etc.

Indicateurs et zones à risque

Le résultat escompté est la possibilité de visualiser :

- Cartographie du taux de réduction de surface d'habitats d'intérêt communautaire.
- Cartographie du taux de réduction de l'aire potentielle d'espèces protégées sélectionnées.
- Taux d'expansion de l'aire potentielle d'EEE à risque.
- Cartographie des taux de réduction du potentiel à fournir certains services écosystémiques

Les seuils de ces différents indicateurs seront à définir sur base de groupe d'experts.

Ceux-ci permettront alors d'identifier sur les cartographies les zones à risques suivantes :

- Zones centrales ou de liaison du réseau écologique avec forte diminution de l'aire potentielle d'habitats d'intérêt communautaire.
- Pour une sélection de services écosystémiques, croisement avec l'exposition à l'aléa correspondant (risque pour habitants, perte économique...), par exemple :
 - Services de protection contre les inondations x aléas d'inondation
 - Service de protection contre l'érosion x importance économique des grandes cultures
 - Service de production de bois d'œuvre x importance des revenus de la vente de bois au niveau communal

Liens avec les autres chapitres

Ce chapitre a bien entendu un lien fort avec tous les autres, ne serait-ce que par l'attention particulière qui est demandée d'avoir des mesures d'adaptation basées sur les solutions naturelles dans tous les secteurs.

Les liens suivants sont toutefois particulièrement soulignés :

1. **Transversal – Aménagement du territoire** : pour l'évaluation de la capacité des écosystèmes à fournir des SES en fonction des changements attendus d'utilisation et d'occupation du sol dans les scénarios prospectifs (projection de la matrice des SES en fonction des différents scénarios de changement d'occupation du sol x scénarios climatiques).
2. **Ville** : pour évaluer la qualité des connexions écologiques.
3. **Eau (sécheresse / inondations)** : pour quantifier la vulnérabilité des habitats au changements climatique (changements de régime hydrique) et pour la définition des zones à risque liées au service de protection contre les inondations.
4. **Agriculture** : pour les projections de fourniture de SES (érosion, production alimentaire), pour la définition des zones à risque liées au service de protection contre l'érosion du sol, pour la modélisation des habitats d'intérêt communautaire de type agricole (prairies à haute valeur biologique).

5. **Tourisme** : pour l'influence des modifications de distribution / qualité des habitats naturels sur la provision de SES culturels liés au tourisme.

1.3. Mesures d'adaptation

De manière générale, une approche « sans regret » encouragée par la Commission Européenne est celle basée sur « **l'adaptation fondée sur les écosystèmes** » (AfE). Il s'agit d'une stratégie d'adaptation au changement climatique qui s'appuie sur des solutions fondées sur la nature (NBS, voir glossaire) et sur les services écosystémiques.

Les effets du changement climatique sur la répartition et la qualité des habitats naturels et les services qu'ils fournissent est difficile à quantifier. D'une manière générale, augmenter la part d'habitats en bon état de conservation est une priorité pour conserver les espèces et SES fournis. Pour cela, il faut encourager les programmes de **restauration écologique** et prioriser les actions sur les zones centrales et de rupture du réseau écologique, afin de favoriser l'accueil et faciliter les migrations d'espèces.

De même, il est important de **réduire les autres pressions sur les écosystèmes**, telles que la surexploitation, la pollution, la fragmentation et les espèces exotiques envahissantes (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2009).

Les espèces exotiques envahissantes notamment ont été désignées par l'IPBES comme étant une des causes principales de perte de la biodiversité. Il est donc crucial de mettre en place des **programmes de détection et de gestion rapide des espèces exotiques envahissantes** émergentes, une gestion efficace n'étant possible qu'en début d'invasion.

Des programmes de **translocation ou de migration assistée** peuvent également, en dernier recours, permettre la sauvegarde d'espèces ou de communautés incapables de migrer assez rapidement vers de nouvelles zones favorables, en raison d'une fragmentation trop importante des habitats ou de vitesses de dispersion trop lentes.

Les actions en faveur de la biodiversité ne doivent pas seulement être réalisées dans des **zones protégées** (réserves, Natura 2000), mais également encouragées dans les **zones agricoles** et dans **l'espace urbain**. Une renaturation des espaces fortement anthropisés permet de créer des corridors écologiques tout en augmentant les services de régulation et culturels. De plus, certaines espèces protégées ou habitats communautaires dépendent de l'activité agricole (prairies maigres de fauche, espèces liées au bocages, flore messicole...).

Il est aussi important de mentionner que les critères utilisés pour définir la qualité d'un habitat sont généralement basés sur des listes d'espèces datant de plusieurs décennies. Or, les changements climatiques impacteront très certainement les assemblages d'espèces. Par exemple, la plupart des hêtraies de Wallonie laisseront petit à petit place à des chênaies de substitutions, au vu du déplacement de l'aire de répartition du hêtre vers le nord et en altitude. Ces chênaies peuvent être tout aussi intéressantes, voir plus, en termes de capacité d'accueil de biodiversité et de SES rendus. Une **révision des critères de qualité de certains habitats naturels** devrait donc être réfléchiée pour tenir compte de l'évolution des communautés spécifiques.

Au niveau forestier, de nombreuses guidelines régionales et européennes existent déjà pour augmenter la résilience des écosystèmes forestiers face au changement climatique, tout en favorisant la biodiversité. Ces mesures consistent, entre autres, à **diversifier les essences**, favoriser une sylviculture plus proche de la nature en favorisant la **régénération naturelle**, tester la migration assistée d'essences et de provenances.

En résumé, une stratégie de conservation de la nature visant à augmenter sa résilience au CC doit être réfléchiée de manière intégrée, reposant à la fois sur les objectifs de conservation d'habitats et d'espèces et sur les SES fournis par les écosystèmes, prenant en compte aussi bien la biodiversité exceptionnelle et ordinaire, en milieux naturels comme en milieux fortement anthropisés.

Chapitre 2) Eau (inondations et sécheresses)

1.1. Introduction

Les vulnérabilités actuelles liées à l'eau en Wallonie doivent être estimées en prenant en compte l'aspect **quantitatif** ainsi que l'aspect **qualitatif**. Les projections climatiques nous indiquent une accentuation des phénomènes climatiques extrêmes comme les inondations ou les sécheresses ainsi qu'une saisonnalité plus marquée. Les **différents types de sécheresses** (météorologique, édaphique et hydrologique) vont engendrer des risques pour les cultures, une **réduction du niveau des nappes** et du **débit d'étiage** ainsi qu'une **augmentation des demandes** en eau de différents secteurs (consommation humaine, refroidissement industriel, irrigation, tourisme, ...) durant une même période. Les **fortes pluies** hivernales vont au contraire engendrer du **ruissellement** et du **lessivage** (nitrate, pesticides). Les pluies plus intenses vont générer davantage de ruissellement et une **érosion** hydrique importante pouvant mener à des **inondations** et des **coulées boueuses** ainsi qu'à une **dégradation des sols et de la qualité des eaux de surface**. Les impacts sont d'ordre environnemental mais aussi socio-économique et géopolitique (Maes et al., 2020).

Plusieurs dispositifs sont mis en place en Wallonie comme la cellule « Sécheresse » pilotée par le Centre régional de crise en Wallonie qui propose des mesures de gestion de l'eau, le « Dispositif sécheresse pour la Wallonie » qui vise à protéger les ressources hydriques et limiter les usages en eau ou encore le Schéma Régional des ressources en eau 2.0 lancé en 2020 qui vise à mieux prendre en compte l'évolution du climat au niveau de la gestion de l'offre et de la demande. Cependant, le rapport de 2022 de la plateforme wallonne pour le GIEC a mis en évidence plusieurs risques et impacts du changement climatique sur l'eau (Lamarque et al., 2022). Il est donc important d'identifier les vulnérabilités actuelles en eau afin de favoriser les mesures d'adaptation aux changements climatique et améliorer la résilience de la Wallonie.

Les attentes spécifiques au projet pour la thématique « Eau », ainsi que la manière dont le projet pourra y répondre sont reprises en Annexe 1.

L'eau peut donc elle-même être considérée comme sujet d'impact des changements climatiques car sa qualité sera affectée (voir figure ci-dessous). Elle est toutefois surtout considérée au travers des sécheresses et inondations comme un impact intermédiaire dans de nombreuses chaînes d'impacts (sols, agriculture, santé, économie, tourisme, infrastructures, énergie, villes).

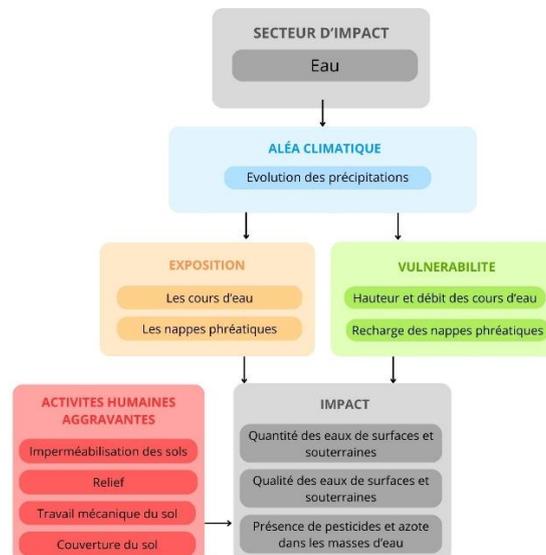


Figure 10 – chaîne d'impacts de l'eau en tant que sujet du risque



1.2. Etat des lieux

Synthèse

Stratégies et plans :

Nom projet	Échelle	Description	Liens
Stratégie intégrale sécheresse (SIS) de 2021	Wallonie	<p>La Stratégie intégrale sécheresse de 2021 reprend plusieurs mesures visant à adapter la Wallonie au stress hydrique et repose sur la mise en place du SRRE et du dispositif de résilience du SPW ARNE :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Axe éco-résilience hydrique : retenir et conserver l'eau pour mieux résister à la sécheresse 2) Axe analyse et gestion de la demande : gérer la demande et eau et réduire les fuites 3) Axe renforcement et mobilisation de la ressource : mieux répartir la ressource eau et mobiliser des nouvelles ressources comme les eaux usées <p>Au total, 76 mesures sont programmées selon ces trois axes.</p>	<p>http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorshets/RESS%202.html</p> <p>https://tellier.wallonie.be/home/presse-actualites/actualites/actualites/la-strategie-integrale-secheresse-en-wallonie.html</p> <p>http://etat.environnement.wallonie.be/home/Infographies/eau.html</p>
APlans de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI) 2022-2027	Wallonie	<p>Plans stratégiques qui fixent des objectifs communs en matière de gestion des inondations et qui planifient des mesures associées afin de réduire les conséquences négatives des inondations. Ces plans sont conçus sur base des Districts Hydrographiques Internationaux à savoir la Meuse, l'Escaut, le Rhin et la Seine. Le 2^{ème} cycle (2022-2027) prévoit 41 mesures globales ainsi que 929 projets sur la lutte contre le débordement des cours d'eau, la lutte contre le ruissellement et des projets généraux.</p>	<p>https://inondations.wallonie.be/home/directive-inondation/plans-de-gestion-des-risques-dinondation.html</p>
Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA 4) Avril 2024	Wallonie	<p>La directive Nitrate est appliqué au travers du PGDA qui établit différentes mesures dans le but de préserver la qualité des eaux et de limiter les contaminations en nitrate. Les nouvelles mesures du programme 4 incluent un taux de liaison au sol revu, des restrictions sur le stockage des engrais à la ferme, de nouvelles conditions d'épandage, des conditions sur les mélanges de graines des CIPAN et des conditions le travail du sol sur prairie.</p>	<p>http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/AGRI%209.html</p> <p>https://agriculture.wallonie.be/home/actualites/actualites/le-nouveau-programme-de-gestion-durable-de-lazote-ou-pgda-4.html</p>
Bonnes conditions agricoles et environnementales (BCAE)	Wallonie	<p>Aides pour l'adoption de bonnes conditions agricoles et environnementales avec le BCAE 1 pour le maintien des prairies permanentes, BCAE2 pour la protection des zones humides, BCAE 5 pour la protection du sol contre l'érosion et BCAE 6 pour la couverture des sols.</p>	<p>https://agriculture.wallonie.be/home/aides/pac-2023-2027-description-des-interventions/conditionnalite-renforcee.html</p>
Directive Inondation 2007	Europe	<p>Directive de l'Union Européenne ayant pour objectif d'établir un cadre pour l'évaluation et</p>	<p>https://eur-lex.europa.eu/legal-</p>



		la gestion des risques des inondations sur la santé humaine, l'environnement, le patrimoine culturel et l'activité économique. Sa mise en œuvre est réalisée par le Groupe Transversal Inondation (GTI).	content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007L0060&from=EN
--	--	--	---

Projets et outils :

Nom projet	Échelle	Description	Références/liens
Modèles WOLF	Wallonie/C E de 1ere catégorie	Le système de modélisation intégrée WOLF comprend un modèle hydrologique conceptuel et des modèles hydrauliques 1D, 2D et 3D.	https://www.uee.uliege.be/cms/c_2383459/fr/wolf
Modèle EPICgrid	Bassin versant/ Wallonie	Ce modèle hydrologique physiquement basé permet de fournir l'évolution de différentes variables ayant trait notamment aux ressources en eau (flux vers les eaux de surface et souterraines, stock d'eau dans les sols et besoin en eau d'irrigation), aux pressions diffuses d'origine agricole sur les eaux de surface et sur les eaux souterraines (azote, pesticides) et aux flux de sédiments avec un pas de temps journalier et une échelle spatiale de 1km ² . La réalisation de simulations prospectives (jusqu'en 2050) a nécessité de réaliser un certain nombre d'hypothèses liées à l'évolution du climat (hypothèses climatiques) ainsi qu'à l'évolution de l'occupation du sol et des pratiques agricoles (hypothèses agronomiques).	(Degré and Sohier, 2020) https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/217863/1/presentationEpic.comEscout.pdf
Projet MODREC Vesdre	Bassin versant de la Vesdre	Ce projet a permis une analyse statistique des débits de pointe incluant l'événement de juillet 21. Le projet vise à fournir un modèle intégré hydrologie conceptuelle et hydraulique pour permettre des modélisations instationnaires. De plus, une modélisation hydrologique physiquement basée a été réalisée dans trois sous bassins afin de quantifier l'effet hydrologique de différentes mesures de restauration des bassins versants.	(Barcellona-Corte et al., 2022) https://vallee-vesdre.be/contexte-general/
Cartographie des aléas d'inondations 2021	Wallonie	Carte permettant de délimiter les périmètres à caractère inondable, par débordement et par ruissellement. Elle se base sur les données statistiques hydrologiques complétées par des simulations hydrauliques, des observations de terrain, la carte pédologique et la carte géologique. Pour les inondations par débordement, une modélisation des débits (hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement) est réalisée pour différentes périodes de retour (25, 50, 100 ans et extrême). Pour les inondations par ruissellement, la modélisation prend en compte les coefficients de Montana locaux issus des courbes IDF qui permettent de simuler différentes pluies. Les débits de pointe sont estimés pour ces pluies en chaque point d'entrée du réseau hydrographique puis redistribués en chaque maille de leur bassin versant respectif en fonction de la topographie en amont. La dernière mise à jour a été réalisée en mars 2021. Cependant, certains éléments importants ne sont pas pris en compte dans cette carte comme le changement d'occupation des sols, l'imperméabilisation des sols	(Ancion and Reyskens, 2020; SPW, 2020)



		ainsi que les réseaux d'égouttage et autres aménagements.	
Hydrotrend I et II	Wallonie	Ces projets ont permis l'analyse des débits maximums extrêmes, l'observation d'une éventuelle tendance à un retour plus fréquents de certains hauts débits et l'évolution de la fréquence et des débits de crue en Wallonie grâce aux données de 16 stations limnimétriques. Les résultats montrent une instationnarité des débits de crue dans certains bassins versants qui doit être prise en compte lors des analyses hydrologiques.	(Grandry, 2020, 2018).
Projet AQUAMOD 2016-2021	Wallonie	Projet de modélisation sur EPICgrid de l'impact du changement climatique sur les bilans hydrologiques et la qualité des eaux de surface et souterraines en fonction du contexte pédologique, géologique, topographique et climatique et de scénarios d'évolution de l'agriculture pour l'ensemble de la Wallonie.	(Degré and Sohier, 2021) https://hdl.handle.net/2268/268297
Modèle Pégase	Wallonie	Modélisation permettant d'estimer l'évolution des flux d'eau et des charges en polluants des eaux de surface en fonction des rejets et apports de polluants pour des situations hydrologiques non-stationnaires et/ou permanentes	(Deliège et al., 2011, 2009)
Bactéri'eau I et II 2021	Bassins versants en Wallonie	Projets qui ont permis d'analyser des flux bactériens à l'échelle de bassins versants contributeurs de six zones de baignade grâce au logiciel Storm Water Management Model (SWMM) et au logiciel EPICgrid.	(Grandry and Degré, 2021)
Projet MARWAL 2023	Wallonie	Etude de faisabilité de la recharge maîtrisée des nappes d'eau souterraines pour une utilisation ultérieure grâce aux eaux pluviales, aux eaux usées traitées ou encore aux eaux de surface.	(Brouyère, 2023)
Projet méthode APSÛ 2019	Wallonie	Projet sur la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines aux risques de pollution. La vulnérabilité est évaluée sur base de l'aléa de surface (capacité d'infiltration) et de la capacité d'atténuation souterraine. Mis en application pour les eaux souterraines de la région du Néblon.	(Popescu et al., 2019)
Projet de l'impact du CC sur les ressources en eau souterraines de Wallonie 2022	Wallonie	Observations de l'évolution présente et future du climat et modélisations (plusieurs modèles) de l'impact du CC sur l'état quantitatif des ressources en eau pour plusieurs bassins versants en Wallonie. Analyse des bilans hydrologiques et des tendances futures.	Serge Brouyère 2022 Uliège, hydrogéologie et géologie de l'Environnement
Etat des lieux de l'environnement wallon de 2017	Wallonie	Rapport sur l'état de l'air, de l'eau, des sols, des forêts et de la biodiversité en Wallonie, leurs évolutions et les actions mises en place pour améliorer la situation. Le chapitre 2 de la partie 5 reprend l'état de l'eau et de l'environnement aquatique avec l'état des masses d'eau, les débits des cours d'eau, l'état biologique des masses d'eau et les charges de polluants et de sédiments.	(SPW - DGO3 - DEMNA - DEE, 2017) https://www.wallonie.be/fr/publications/rapport-sur-letat-de-lenvironnement-wallon-2017
Rapport plateforme wallonne pour le GIEC 2022	Wallonie	Le rapport synthétise ce qui existe en terme d'adaptation au CC de la Wallonie et propose des recommandations pour la conception de l'étude des vulnérabilités et de la mise en place de mesures	(Lamarque et al., 2022)

		d'adaptation. Le rapport précise les impacts observés, les risques futurs ainsi que les options d'adaptation pour différentes thématiques.	
Cahier de prospectives de l'IWEPS n°4	Wallonie	Rapport sur le risque de raréfaction des ressources en eau sous l'effet du CC qui met en évidence la diversité des enjeux (environnementaux, socio-économiques, politiques et géopolitiques). Une approche systémique est recommandée pour arriver à un partage optimal de la ressource eau tout en garantissant la préservation et le bon fonctionnement des écosystèmes.	(Maes et al., 2020)

Autres régions et pays :

Nom projet	Échelle	Description	Références/liens
Projet Interreg Emfloodresilience	Europe (Belgique, Allemagne, Pays-Bas)	Projet européen avec des partenaires de Belgique, Allemagne et Pays-Bas pour limiter l'impact des inondations et améliorer la sécurité de l'eau. L'objectif est d'améliorer la coopération entre les services publics de gestion des rivières entre les pays pour être mieux préparé aux prochains événements pluvieux extrêmes et réduire les dommages socio-économiques.	https://emfloodresilience.eu/
Projet « How to deal with flooding »	Flandre	Plan de gestion du risque d'inondations pour les bassins des rivières Dijle et Woluwe. Ils ont évalué l'effet des précipitations extrêmes sur le risque d'inondations et les impacts économiques, sociaux et écologiques grâce à des modélisations et à des cartes d'inondations historiques.	https://en.vmm.be/publications/how-to-deal-with-flooding
Plan de Gestion de l'Eau 2022-2027 de la Région de Bruxelles-Capitale	Bruxelles	Politique régionale d'adaptation définie par le Plan de Gestion de l'Eau (PGE) qui résume les pressions de la ressource eau et identifie les zones à protéger. Parmi les mesures d'adaptation phares figurent la réduction de l'exposition de la population au risque d'inondation, la lutte contre les effets dommageables de l'imperméabilisation des sols sur l'environnement, le développement des maillages vert, bleu (réseau hydrographique de surface) et gris (réseau d'égouttage).	https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/projet_plan_de_gestion_de_l_eau_2022_2027.pdf
JRC PESETA IV 2020 : Climate change impacts and adaptation in Europe	Europe	Ce rapport montre l'impact du CC sur les écosystèmes, les populations et l'économie en UE pour différentes catégories comme les ressources en eau, les sécheresses, les inondations et les pertes agricoles. Plusieurs modélisations ont été réalisées grâce à des projections climatiques et socio-économiques. Des mesures d'adaptation sont recommandées pour chaque thématique.	https://joint-research-centre.ec.europa.eu/system/files/2020-05/pesetaiv_summary_final_report.pdf
Projet Aquif-FR 2017-2021	France	Evolution des eaux de surfaces et souterraines avec le CC sur le 21 ^e siècle et à l'échelle saisonnière. Projet basé sur la plateforme de modélisation hydrogéologique nationale AQUI-FR qui vise à rassembler les modélisations des bassins versants français dans un modèle hydrogéologique national.	https://www.drias-climat.fr/accompagne/sections/275
Plan national d'adaptation au changement climatique 2 (2018-2022)	France	Plan visant à renforcer la résilience des écosystèmes au CC qui s'appuie sur les capacités des écosystèmes à aider la société à s'adapter. Pour la ressource eau : encourager l'efficacité des usages et réguler en amont la ressource tout en continuant à améliorer la	https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/centre-

		qualité de l'eau et à préserver les écosystèmes aquatiques.	ressources/comprendre-pnacc2
Plan EAU	France	Le plan EAU comprend 53 mesures pour économiser l'eau (Plan d'action pour une gestion résiliente et concertée de l'eau, mars 2023). Plusieurs axes dont la sobriété des usages pour tous les acteurs, optimiser la disponibilité de la ressource en réduisant les pertes, valorisant les eaux non conventionnelles, améliorer et développer le stockage dans les sols, les nappes et les ouvrages et préserver la qualité de l'eau notamment des pollutions diffuses. Chaque bassin versant sera doté d'un plan d'adaptation au changement climatique en 2023.	https://www.ecologie.gouv.fr/dossier-presse-plan-daction-gestion-resiliente-et-concertee-leau
Projet Explore 2070	France	Carte de projection de l'évolution des débits moyens des cours d'eau en 2050 et 2070 du BRGM grâce aux données Explore 2070 (étude scientifique Explore 2070).	https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/centre-ressources/bilan-du-projet-explore-2070-eau-et-changement-climatique
Essai "On Water Based"	Pays-Bas	Adaptation de l'utilisation des terres aux possibilités et aux limites de l'eau et du sol. Cartographie physiographique des goulots d'étranglement incluant les zones humides, sèches, salées, molles, sensibles au tassement et sujettes aux inondations.	https://klimaatadaptatienederland.nl/@249379/essay-op-waterbasis/
Klimaat Effect Atlas	Pays-Bas	Ensemble de cartographies indiquant les conséquences du changement climatique sur 4 thématiques pour les Pays-Bas : les inondations, l'engorgement d'eau, la sécheresse et la chaleur.	https://www.klimaateffectatlas.nl/en/map-narratives
Vision NL2120	Pays-Bas	Carte réalisée par l'Université de Wageningen (WUR) illustrant les Pays-Bas en 2120 s'ils se concentrent sur les solutions fondées sur la nature pour différentes thématiques comme l'agriculture, la biodiversité, l'énergie durable, l'eau ou l'économie circulaire.	https://www.wur.nl/nl/Dossiers/dossier/Nederland-in-2120.htm
Rapport de l'étude intégrée des eaux souterraines aux Pays-Bas	Pays-Bas	Rapport sur les défis, les problèmes et les solutions possibles pour les eaux souterraines à l'échelle nationale. Le rapport se concentre sur cinq thèmes : l'assèchement de la nature, la protection de la qualité des eaux souterraines, la transition énergétique et les eaux souterraines, les zones urbaines et l'approvisionnement en eau douce.	https://klimaatadaptatienederland.nl/@279782/rapport-integrale-grondwaterstudie-nederland/
Stratégie allemande d'adaptation au changement climatique (DAS)	Allemagne	Le DAS vise à identifier et réduire l'exposition de l'Allemagne aux conséquences du CC et à maintenir ou accroître l'adaptabilité des systèmes naturels, sociaux et économiques. La stratégie décrit 16 plans d'actions dont les bilans hydrique et gestion de l'eau, les sols, l'agriculture et la diversité biologique.	https://www.bmuv.de/download/zweiter-fortschrittsbericht-zur-deutschen-anpassungsstrategie-an-den-klimawandel

Critique

La Wallonie dispose des outils de suivi et modèles adéquats pour représenter les risques actuels liés à l'eau. L'intégration de l'impact du changement climatique ou d'analyse de vulnérabilité plus fine est

parfois disponible au niveau local ou sur certaines projections, mais ne forme pas actuellement un tout cohérent dans ces différents outils. Certaines attentes ne pourront pas être directement réalisées dans le cadre de ce projet. Les méthodologies permettant de répondre à ces attentes seront alors définies. L'ensemble des connaissances actuelles sera pris en considération afin de définir les zones de vulnérabilité au CC et des adaptations seront proposées pour ces zones en fonction des besoins et de ce qui est mis en place dans les autres régions/pays.

1.3. Méthodologie d'analyse de vulnérabilité

Trois approches seront utilisées afin d'analyser les vulnérabilités de la Wallonie pour la ressource eau :

Approche « Inondations »

La cartographie actuelle des aléas d'inondations par débordement et par ruissèlement dont la dernière mise à jour date de 2021 sera utilisée. Cette carte sera croisée avec les scénarios climatiques futurs ainsi qu'avec les scénarios de changement d'occupation du sol en prenant en considération l'évolution de l'imperméabilisation des sols. Par sous-bassins versants, des indicateurs de tendance pourront ainsi être dégagés afin d'identifier les zones les plus à risques. L'aggravation de l'aléa d'inondations dû à l'imperméabilisation ainsi que l'aggravation des vulnérabilités déjà présentes dû à l'artificialisation seront prises en compte. Une analyse des tendances des débits maximums et des volumes rechargés totaux au cours du temps sera effectuée. De plus, la carte d'aléas d'inondations actuelle sera critiquée et une méthodologie sera proposée pour la prochaine mise à jour de 2026.

Cela impliquera les tâches suivantes :

- Acquisition des courbes IDF de précipitations actualisées et des paramètres climatiques pour les différents scénarios du projet
- Validation des scénarios d'évolution future d'occupation du sol et donc l'évolution de l'imperméabilisation des sols.
- Définition d'indicateurs de tendance à l'imperméabilisation des sous-bassins versants et la variation de la pluviométrie en Wallonie

Ex : tendance à l'augmentation des précipitations et de l'imperméabilisation d'une zone

- Croisement de la cartographie d'aléa d'inondations par débordement et par ruissellement de 2021 avec ces différentes tendances. Ceci permettra d'identifier les zones d'aléas d'inondation les plus **à risque d'aggravation**.
- L'aggravation des vulnérabilités déjà présentes dû à l'artificialisation seront prises en compte.
- Une analyse des tendances des débits maximums et des volumes rechargés totaux au cours du temps sera effectuée.
- Proposition d'une méthodologie de mise à jour de la carte d'aléa d'inondations avec prise en compte des :
 - IDF actualisés
 - Hauteurs d'eau et emprises de ruissellement le long des axes
 - Interférences par les infrastructures, routes, fossés, ...
 - Reprises de ruissellement par les réseaux d'égouttage
 - Fréquences des débits de crue simulées
 - Changement d'occupation des sols et imperméabilisation des sols

Approche « Sécheresses »

Les nouvelles données climatiques permettront de caractériser les sécheresses météorologiques futures. Ces données alimenteront le travail des équipes du SPW travaillant sur les modèles EPICGrid et PEGASE ainsi qu'à l'équipe de Serge Brouyère afin qu'ils puissent simuler :

- La caractérisation des sécheresses édaphiques ou agricoles (manque d'eau dans les sols qui nuit au développement de la végétation) selon plusieurs itinéraires agricoles – EPICGrid
- L'analyse de recharge et du niveau des nappes – EPICGrid et SUFT3D
- L'analyse de la qualité des cours d'eau - Pegase si le planning des équipes du SPW le permet.

L'analyse de la qualité des cours d'eau dépendra de la collaboration des équipes du SPW utilisant PEGASE. Un premier contact a déjà été établi. Ces simulations dépendront de leur disponibilité et de leur planning. Les évolutions des débits d'étiage et des périodes à risques seront également analysées.

Cela impliquera les tâches suivantes :

- Acquisition des scénarios climatiques futurs déterminés pour le projet
- Détermination des sécheresses météorologiques grâce à l'analyse des données de pluviométrie
- Modélisation hydrologique EPICgrid par le SPW selon les scénarios climatiques et deux itinéraires agricoles : tendances actuelles et scénario de transition avec vers l'agroécologie. Les données seront spatialisées à l'échelle de la Wallonie pour une résolution de 1 km². La modélisation sera réalisée à partir des données des scénarios climatiques utilisées dans ce projet.
- Détermination des sécheresses édaphiques (agricoles) grâce aux sorties du modèle et leur évolution par région agricole avec teneur en eau des sols et évapotranspiration réelle.
- Réalisation des bilans hydrologiques annuels et observation des tendances
- Modélisation du niveau des nappes d'eau souterraines
- Détermination des sécheresses hydrologiques (débits d'étiage des cours d'eau et niveau bas des nappes souterraines) avec les sorties du modèle SUFT3D pour le niveau des nappes d'eau souterraines.
- Synthèse de l'état des nappes exploitées et exploitables en fonction du changement d'occupations des sols

Ex : Augmentation de la densité des populations de certaines régions menant à une plus grande demande en eau

Approche « Pollution de l'eau »

Enfin les projections climatiques et les deux scénarios d'itinéraires agricoles distincts pourront également être intégrées dans le modèle EPICgrid avec d'identifier les futures pollutions diffuses d'origine agricole (nitrate et pesticides) vers les masses d'eau de surface et souterraines pour plusieurs contextes biophysiques représentatif de la Wallonie. Des analyses de tendance seront réalisées par région agricole.

L'impact sur la qualité bactériologique des cours d'eau pourra être évalué en se basant sur les résultats du projet Bacterieau (modélisation pour le compte de la SPGE en amont de 6 zones de baignades en Wallonie). Ceci ne pourra toutefois pas être modélisé sur l'ensemble de la Wallonie en raison du manque de données disponibles facilement exploitables avec les ressources du projet.

Cela impliquera les tâches suivantes :

- Acquisition des scénarios climatiques futurs déterminés pour le projet
- Modélisation hydrologique EPICgrid par l'équipe du SPW selon les scénarios climatiques et deux itinéraires agricoles à l'échelle de la Wallonie pour une résolution de 1 km². Cette modélisation permettra de quantifier les apports agricoles diffus vers les masses d'eau de surface et les masses d'eau souterraines.
- Modélisation EPICgrid par le SPW pour analyser l'impact des scénarios climatiques et de deux scénarios de pratiques agricoles sur la dispersion de l'azote et des pesticides dans les eaux de surface et souterraines en fonction du contexte pédologique, géologique, topographique.
- Proposition d'une méthodologie pour déterminer la qualité bactériologique des cours d'eau sur base du travail réalisé dans le cadre du projet Bacterieau



Données

Les données nécessaires à ces approches sont les suivantes :

- Données climatiques futures spatialisées
- Données météorologiques

- Carte d'aléa d'inondations de 2021
- Carte agrégée des tendances à l'augmentation du risque d'inondation

- Carte numérique des sols de Wallonie (CNSW)
- Carte d'occupation du sol
- Scénarios de changements d'occupation du sol
- Carte d'imperméabilisation des sols
- Taux d'imperméabilisation des sols et cartographie des tendances

- Carte de réserve en eau utile

- Pratiques agricoles de Wallonie
- Application d'engrais et produits phytosanitaires
- Scénarios des pratiques agricoles

L'ensemble des données nécessaires sont disponibles publiquement ou au sein de l'équipe

Pour les avis d'experts, différents groupes de travail seront établis. Ceux-ci impliqueront d'autres partenaires internes du consortium, ainsi que les équipes du SPW travaillant sur les modèles EPICGrid et Pegase.

Indicateurs et zones à risque

Le résultat escompté est la possibilité de visualiser :

- Nombre de jours de fortes précipitations
- Maximum de précipitations cumulées sur 5 jours
- Maximum de précipitations journalières
- Nombre de jours sans précipitations
- Teneur en eau des sols
- Réserve en eau utile
- Evapotranspiration réelle
- Evolution du volume de recharge des nappes
- Evolution du niveau des nappes
- Evolution du débit d'étiage des cours d'eau
- Importance des prélèvements industriels, agricoles et domestiques par rapport à l'eau « utile »
- En fonction des retours possibles des équipes de modélisation EPICGrid et Pegase, les projections futures selon les scénarios climatiques des :
 - Cartographie du temps de transfert et du taux de restitution de différentes substances exemplatives jusque dans les eaux souterraines
 - Concentration en nitrate des eaux de surface et souterraines
 - Concentration de certains polluants des eaux de surface et souterraines

Les seuils de ces différents indicateurs seront à définir sur base de groupe d'experts.

Ceux-ci permettront alors d'identifier sur les cartographies les zones à risques suivantes :

- Zones d’aléas d’inondation actuelles **à risque d’aggravation**. Il est à noter que dans le chapitre sol seront identifiées des zones étroitement reliées à celles-ci. Ce sont les zones qui, si elles sont imperméabilisées, contribueront fortement à aggraver ce risque d’inondation et qu’il faudrait donc préserver.
- Zones à risques de sécheresses édaphiques en fonction de l’évolution de la teneur en eau et du stress hydrique. Ces zones seront mises en relation avec la carte des réserves en eau utile du sol.
- Nappes d’eau à risques de sécheresse hydrologique en fonction de l’évolution du niveau des nappes d’eau.
- Cours d’eau à risques d’étiage sévère en fonction de l’évolution de débits et des périodes à risques.
- Zones à risques d’approvisionnement en eau par conflit d’usages (agricole, industriel, domestique).
- Zones à risques de pollutions des nappes d’eau d’origine agricole et des cours d’eau par certains polluants selon les scénarios climatiques futurs.

Liens thématiques et parties prenantes

Comme indiqué en introduction du chapitre, l’eau au travers des sécheresses et inondations est un impact intermédiaire qui devient danger dans de nombreux secteurs. Ce chapitre a donc un lien très fort avec tous les autres.

Les liens suivants sont toutefois particulièrement soulignés :

1. **Biodiversité – services écosystémiques – forêts** : Impacts des inondations et des sécheresses sur certains habitats pouvant impacter la biodiversité et les services écosystémiques. Prise en compte cette composante dans l’impact des inondations, des sécheresses et de la pollution des eaux pour la définition des ZAR et des ZIP.
2. **Aménagement du territoire** : Evaluation de l’évolution des zones à risques en fonction des changements attendus d’utilisation et d’occupation du sol dans les scénarios prospectifs
3. **Infrastructures et Ville** : Dommages d’inondation aux infrastructures en particulier dans les villes où ces infrastructures sont concentrées. Le développement des villes et l’étirement du bâti sont également à prendre en compte dans la définition des ZAR car ils peuvent mener à des inondations plus importantes.
4. **Sols** : Impact des pluies intenses sur l’érosion hydrique des sols à prendre en considération
5. **Agriculture** : Définition de prospections des pratiques agricoles et prise en compte de l’impact des inondations/sécheresse sur le rendement des cultures et la dégradation des sols dans la définition des ZAR / ZIP.
6. **Tourisme** : Impacts des inondations/sécheresses/qualité des eaux sur l’activité touristique d’une région.
7. **Santé** : au travers de la qualité de l’eau
8. **Energie** : au travers de la réduction de la disponibilité de l’eau pour le refroidissement des centrales dans des périodes de chaleur où ce refroidissement est d’autant plus nécessaire.
9. **Economie** : de manière indirecte au travers de tous ces impacts.

1.4. Mesures d’adaptation

L’état des lieux des vulnérabilités liées à l’eau en Wallonie montre qu’il faut considérer l’aspect **quantitatif** (excès et manque d’eau) ainsi que l’aspect **qualitatif**. Nous listons ici quelques premières pistes d’adaptation orientées « sans regret » et basées sur la nature en prenant en compte l’aspect environnemental, social et économique.

Une première piste d’adaptation, utile tant face aux crues qu’en prévision de sécheresses est de **freiner le ruissellement** des eaux au sein des bassins versants et de **favoriser l’infiltration** de l’eau dans les sols

puis vers les nappes. Afin de favoriser l'infiltration de l'eau, des **aménagements du paysage** au sein des bassins versants peuvent être mis en place comme les **noues**, les **fossés**, les **puits d'infiltration**, les **zones humides** ou encore des **haies**. Ces zones peuvent également servir de zones de développement de biodiversité. L'augmentation de l'infiltration de l'eau passe également pour une **diminution du taux d'artificialisation et d'imperméabilisation des sols** en Wallonie. En ville, l'utilisation de matériaux de construction plus perméable et la mise en place d'infrastructure végétalisée et de zones perméables comme des **jardins de pluies** ou des **bassins d'infiltration** sont à prioriser. Les dispositifs d'infiltration ou de temporisation des eaux peuvent être intégrés aux infrastructures à construire ou existantes et générer des co-bénéfices pour la biodiversité, la fraîcheur et l'esthétique. Les autorisations de construction et de changements d'occupation du sol doivent prendre en considération leurs impacts sur les inondations. L'analyse des zones à risque permettra de déterminer les zones nécessitant des adaptations pour lutter contre les inondations.

Au niveau des périodes de sécheresse, l'augmentation des demandes en eau de différents secteurs durant une même période, amenant potentiellement à des **conflits d'usage de l'eau**, appellent à des **mesures de sobriété** dans l'utilisation des eaux. Dans ce sens, une recherche d'**alternatives aux cultures hautement consommatrices d'eau** doit également être soutenue. La **diversification des sources d'eau** comme les eaux de pluie, les eaux de sorties des stations d'épuration pour l'agriculture ou de certaines eaux industrielles doit être favorisée.

Dans les zones déjà trop imperméabilisées où la rétention pour l'infiltration d'eau vers les nappes phréatiques n'est pas aisée, la collecte et le **stockage de l'eau de pluie en vue de sa réutilisation locale** est une solution à privilégier. Au niveau du Schéma Régional des Ressources en Eau, l'approvisionnement des régions vulnérables au manque d'eau (comme l'Ardenne) est amélioré grâce à la construction de plusieurs centaines de kilomètres de conduites d'interconnexion entre les réseaux de distribution par la SWDE. La **surveillance** de l'évolution des ressources en eau de surface et souterraines doit se poursuivre. La **coopération transfrontalière** est également importante dans la stratégie d'adaptation du secteur eau.

Afin d'améliorer la qualité des eaux souterraines et de surface, les pratiques agricoles permettant de limiter les contaminations en polluants des eaux doivent être privilégiées. Les actions entreprises dans le cadre des plans de gestion de la Directive Cadre et du **Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA)** doivent se poursuivre. Les pollutions des eaux de surface et souterraines peuvent également être dues aux activités domestiques et industrielles. Plusieurs mesures sont prises dans les plans de gestion des districts hydrographiques (PGDH) afin de limiter la pollution des eaux due aux rejets d'eaux usées domestiques et industrielles. Ces mesures incluent l'installation de **stations d'épuration**, la **révision des permis**, le **contrôle des rejets industriels** ou l'ajout de conditions pour certaines substances dangereuses pour les eaux. De plus, l'**amélioration des connaissances** sur les pollutions dues aux rejets industriels et domestiques est nécessaire.

Chapitre 3) Sol

1.1. Introduction

L'augmentation des phénomènes climatiques extrêmes et la saisonnalité plus marquée vont engendrer des sécheresses édaphiques plus importantes. Ceci impliquera une **diminution de la réserve en eau disponible pour les plantes** et potentiellement une **diminution du rendement des cultures**. La réserve en eau utile (REU) des sols dépend de plusieurs facteurs dont le type de sol, la teneur en matière organique (MO) et la structure des sols. Les sols de plus faible profondeur et à faible capacité de rétention d'eau du sud de la Wallonie seront par exemple plus sensibles au stress hydrique. Les fortes pluies vont quant à elles engendrer de **l'érosion** et du ruissellement, lui aussi potentiellement érosif. Ce risque est d'autant plus élevé que les pluies se produisent sur des sols nus (début de saison pour les cultures de printemps) ou sur des cultures sarclées (faible couverture des sols). L'érosion hydrique des sols est une menace importante pour la sécurité alimentaire, l'environnement et les villes. En fonction du type de sol, du taux de MO et des pratiques de gestion, les sols peuvent être plus ou moins sensibles à cette érosion. Ainsi, les sols des régions limoneuses et sablo-limoneuses en grandes cultures sont des zones sensibles à l'érosion et à la diminution des teneurs en carbone organique. Les fortes précipitations vont également participer aux **lessivages des intrants** comme le nitrate et les pesticides vers les eaux. Les sols artificialisés, en combinaison des pluies plus intenses peuvent augmenter les risques d'inondations.

Plusieurs dispositifs sont mis en place en Wallonie comme la cellule « Sécheresse » qui proposent des mesures de gestion de l'eau, des mesures agri-environnementales et climatiques (MAEC), des Plans de gestion du risque d'inondations, la cellule de Gestion Intégrée Sol, Érosion, Ruissellement (GISER) pour lutter contre l'érosion des sols et les plans de gestion de la Directive Cadre Eau et du Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) qui visent à améliorer la qualité des eaux souterraines et de surface notamment vis-à-vis des pollutions issues de l'agriculture. Cependant, le rapport de 2022 de la plateforme wallonne pour le GIEC a mis en évidence plusieurs risques et impacts du changement climatique sur les sols (Lamarque et al., 2022). Il est donc important d'identifier les vulnérabilités actuelles au niveau des sols wallons afin de favoriser les mesures d'adaptation aux changements climatiques et améliorer la résilience de la Wallonie.

Les attentes spécifiques au projet pour la thématique « **Sol** », ainsi que la manière dont le projet pourra y répondre sont reprises en Annexe 1. Ont également été reprises dans ce chapitre deux attentes qui étaient catégorisées « **Agriculture** ».

Tout comme l'eau, le sol peut donc lui-même être considérée comme sujet d'impact des changements climatiques car sa qualité sera affectée (voir figure ci-dessous). Il est toutefois surtout considéré au travers des sécheresses édaphiques et de l'érosion comme un impact intermédiaire ou un facteur de vulnérabilité/aggravant dans les chaînes d'impacts de l'eau, la biodiversité et l'agriculture.

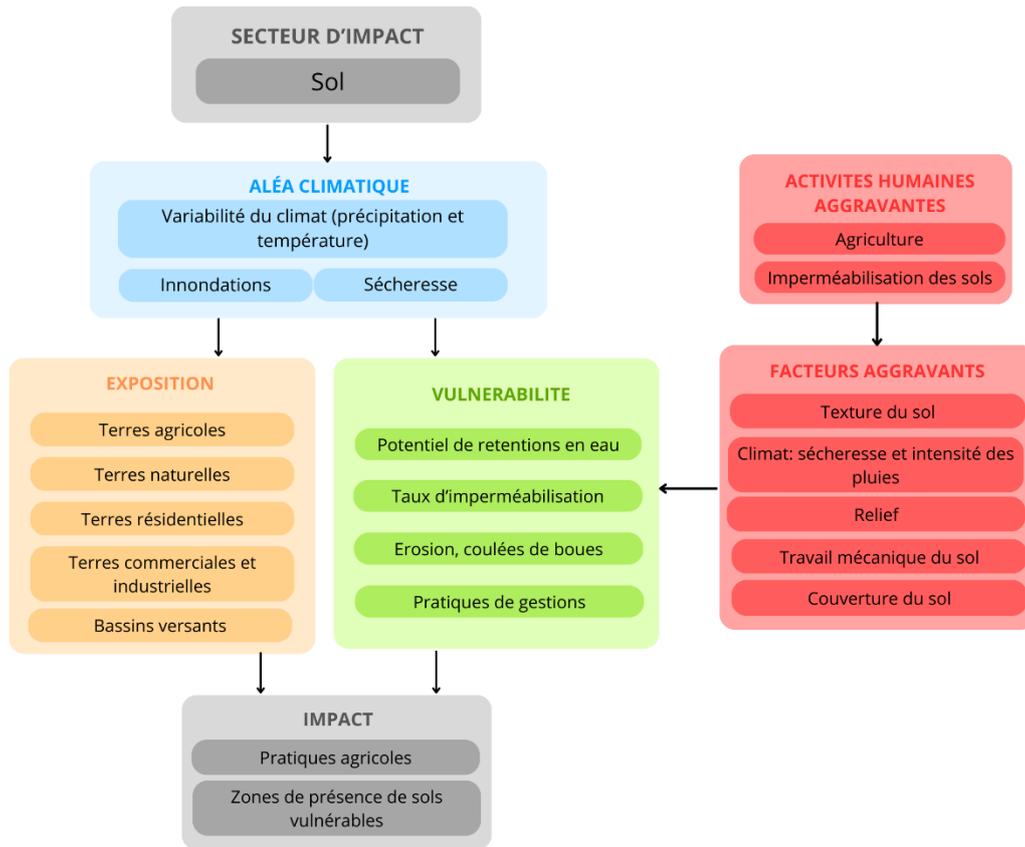


Figure 11 – chaîne d’impacts du sol en tant que sujet du risque

1.2. Etat des lieux

Synthèse

Au vu des liens importants entre le sol et l’eau, un certain nombre de ressources ont déjà été analysées et résumées dans le chapitre eau, qui sont également pertinente pour les sols. Il s’agit de :

- Plans de Gestion des Risques d’Inondation (PGRI) 2022-2027
- Programme de Gestion Durable de l’Azote (PGDA 4) Avril 2024
- Bonnes conditions agricoles et environnementales (BCAE)
- Modèle EPICgrid
- Cartographie des aléas d’inondations 2021
- Projet AQUAMOD 2016-2021
- Etat des lieux de l’environnement wallon de 2017
- Rapport plateforme wallonne pour le GIEC 2022
- Vision NL2120
- Stratégie allemande d’adaptation au changement climatique (DAS)

Les autres ressources pertinentes pour le sols sont présentées ci-après.

Stratégies et plans :

Nom projet	Échelle	Description	Liens
Mesures agri-environnementales et climatiques (MAEC)	Wallonie	Mesures volontaires pour répondre voire anticiper les conséquences de certains phénomènes climatiques extrêmes ou contrecarrer leur amplitude.	https://agriculture.wallonie.be/home/aides/pac-2023-2027-description-des-interventions/mesures-agro-environnementales-et-climatiques.html



Projets et outils :

Nom projet	Échelle	Description	Références/liens
Carte de sensibilité à l'érosion du SPW 2023	Wallonie	Carte réalisée par la méthodologie RUSLE 3D (Revised Universal Soil Loss Equation) avec une résolution de 10 m. Elle prend en compte la sensibilité du sol (érodibilité), la topographie des parcelles et l'érosivité des pluies. De plus, les sédiments sont partiellement retenus au sein de la parcelle pour prendre en compte la connectivité entre les parcelles. Une connectivité de 30% a été retenue pour être cohérent avec la méthode appliquée en Région flamande. Elle ne prend pas en compte la couverture du sol et les éventuels aménagements antiérosifs déjà mis en place.	(Wallonie environnement SPW et al., 2023).
Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW)	Wallonie	Reproduction numérique des planchettes de la Carte des Sols de la Belgique couvrant le territoire wallon. Cette carte est définie par 3 ou 4 caractéristiques majeures : texture, drainage naturel, présence d'un horizon diagnostique et nature et importance de la charge en éléments grossiers. La dernière version est celle de février 2021.	https://geoportail.wallonie.be/catalogue/38c2a87e-d38a-4359-9899-9d4a6b9f0c2a.html
Carbiosol	Wallonie	Série de couche reprenant l'ensemble des informations relatives à la cartographie des teneurs et stocks de Carbone Organique Total (COT) des sols agricoles de Wallonie.	https://geoportail.wallonie.be/catalogue/47e4ea34-fe00-4712-b795-4a85fdab7dd7.html
Cellule GISER	Wallonie	La cellule GISER (Gestion Intégrée Sol, Érosion, Ruissellement) évalue le risque d'érosion diffuse et de ravinement en zone agricole en Wallonie. Cette cellule a un rôle de conseil pour les communes afin de limiter les dommages liés aux inondations et aux coulées de boue. Ils ont aussi pour mission de rentrer un avis préventif sur les demandes de permis d'urbanisme quand il y a un risque d'inondation par ruissellement.	https://www.giser.be/risque-erosion-parcelle/ (Bienders et al., 2016; Cellule GISER, 2015)
Projet Intell'eau	Wallonie	Projet visant à construire un outil d'aide à la décision qui permettra de simuler l'impact des mesures intra et inter-parcellaires des aménagements antiérosifs. Ce projet quantifie l'effet hydrologique et antiérosif des pratiques agricoles et étudie l'impact sur la capacité d'infiltration et le frein hydraulique des barrières interparcellaires comme le miscanthus, saules,	https://intelleau.wixsite.com/projet
Projet CASIM 2015	Wallonie	Le projet CASIM (Cartographie des Surfaces Imperméables) en Wallonie a permis de développer des méthodes pour cartographier les surfaces imperméables à partir des données géographiques pour la Wallonie et des données de télédétection pour un sous-bassin versant. Les cartes topo ING, CadMap et la carte numérique d'occupation des sols de Wallonie (COSW) sont utilisées.	https://www.issep.be/wp-content/uploads/6.-E.-WOLF-1.pdf
Projet AIL4WaterQuality 2020-2024	Wallonie	Analyse de l'impact de différents systèmes de productions agricoles reprenant des pratiques agricoles innovantes (rotations longues, travail du sol réduit, apport de MO de différentes sources, ...)	https://www.gembloix.uliege.be/cms/c_5079794/fr/projet-ail-for-water-quality



		sur le potentiel de rétention en eau du sol et sur la lixiviation du nitrate et des pesticides.	
Modèle LandSoil (landscape design for soil conservation under Land use and climate change)	/	Modélisation des dépôts de sédiments grâce à un parcellaire avec l'état de la surface du sol (couverture, rugosité, ...) et des connaissances des rotations et des variations de l'état du sol. Ce modèle prend également en compte les limites des parcelles ainsi que les données topographiques. Ce modèle a été utilisé et validé dans le contexte d'un des bassins versant expérimentaux GISER et a montré l'importance de la connectivité hydrologique comme proxy du rendement en sédiment d'un bassin versant.	(Cantreul et al., 2019)
Travail de recherche sur la validation des modélisations de l'érosion des sols	Wallonie	Thèse de doctorat ayant exploré différentes pistes de validation des cartographies de risque d'érosion des sols (cartographie diachronique des sols, approche par drones, ...)	(Pineux, 2018; Pineux et al., 2017)

Autres régions et pays :

Evaluation de l'imperméabilisation des sols 2019	Europe	Agence Européenne pour l'environnement a réalisé une évaluation de l'imperméabilisation des sols grâce à l'utilisation d'images satellites.	https://www.eea.europa.eu/en/datahub/databitem-view/e613abf4-c655-4bd2-a5d4-7770dc32da9c
Carte d'érosion des sols pour l'Europe de 2016	Europe	Une version de l'équation RUSLE pour estimer les pertes annuelles en sol adaptée à l'Europe a vu le jour en 2015. Les cartes d'érosion ont été actualisées en 2016 pour l'ensemble de l'Europe.	(Panagos et al., 2015) (Panagos et al., 2020)
Carte mondiale de l'évolution de l'érosivité des sols pour 2050 et 2070	Monde	Carte mondiale de l'évolution de l'érosivité des sols pour 2050 et pour 2070 selon plusieurs scénarios climatiques avec une résolution de 1 km ² . Une augmentation de l'érosivité moyenne entre 26,2 et 28,8% est attendue en 2050.	(Panagos et al., 2022)
Etude sur les prédictions des taux d'érosion mondiaux	Monde	Etude de 2020 sur les prédictions des taux d'érosion en utilisant 3 scénarios SSP-RCP = 2.6, 4.5 et 8.5. Les prédictions se basent sur l'équation RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) et le modèle semi-empirique GloSEM. Les projections climatiques montrent une tendance à un cycle hydrologique plus intense qui pourrait augmenter l'érosion des sols de 30 à 66%. GloSEM a permis de prédire l'érosion des sols et identifier les zones les plus vulnérables à l'échelle planétaire ainsi que de prédire les variations futures en se basant sur les changements d'utilisation des sols, les pratiques de conservation des sols et le changement climatique	(Borrelli et al., 2020).
Plan national d'adaptation au changement climatique 2 (2018-2022)	France	Plan visant à renforcer la résilience des écosystèmes au CC qui s'appuie sur les capacités des écosystèmes à aider la société à s'adapter. Pour la ressource sol : résilience des sols avec la régulation de la ressource eau et de la séquestration du carbone organique. Un objectif principal est de limiter l'artificialisation et l'imperméabilisation des sols.	https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/centre-ressources/comprendre-pnacc2

Critique

L'ensemble des connaissances actuelles seront prise en considération afin de définir les zones de vulnérabilité aux changements climatiques et des adaptations seront proposées pour ces zones en fonction des besoins et de ce qui est mis en place dans les autres régions/pays.

Suite à cet état des lieux on peut noter que :

- En matière de techniques culturales et de la dispersion de l'azote et des pesticides, nous disposons en Wallonie des outils pour produire un ensemble de modélisations 1D illustrant la sensibilité à la gestion des sols à court et long terme de différents indicateurs (sécheresse édaphique, transferts vers les eaux de surface et souterraines).
- Les différentes cartes sont généralement disponibles à l'échelle régionale et avec une résolution qui permet de cibler les zones les plus sensibles. Les modèles en revanche sont souvent calibrés et validés sur des sites spécifiques. L'enjeu de la validation globale est énorme et impose de passer par une étape de collecte de données de terrain réaliste à l'échelle régionale. Les techniques de télédétection sont prometteuses à cet égard.
- Les types d'érosion ne sont pas tous pris en compte. La plupart des études se centrent sur l'érosion hydrique diffuse. Peu de données existent concernant le ravinement (érosion hydrique concentrée). A notre connaissance, aucune donnée consolidée n'existe pour l'érosion aratoire (déplacement de terre au sein de la parcelle du fait des travaux agricoles) ni pour l'érosion de récolte (exportation de terre lors des récoltes de racines ou tubercules).
- La protection des sols et l'accès au foncier notamment pour les agriculteurs est un enjeu important (plan de secteur, accès à la terre), les pratiques des pays voisins seraient à analyser (exemple de la suisse qui protège tous les sols dont la profondeur est supérieure à un seuil donné et de la France, dont la SAFER permet un accès privilégié aux terres agricoles pour les jeunes agriculteurs).

1.3. Méthodologie d'analyse de vulnérabilité

Trois approches seront utilisées afin d'analyser les vulnérabilités de la Wallonie pour la ressource sol :

Approche « Sécheresse »

L'objectif ici est d'identifier les sols les plus sensibles aux sécheresses.

La cartographie des réserves en eau utile en fonction du type de sol sera croisée avec les scénarios climatiques futurs, les scénarios de changements d'occupation des sols et la cartographie de la matière organique des sols. Le croisement de ces informations permettra de définir des indicateurs de tendance et d'identifier les zones les plus à risques.

L'impact de différentes pratiques agricoles comme l'installation d'une prairie permanente, la couverture du sol, des cultures différenciées, la gestion des mauvaises herbes ou encore le retour des résidus de culture au sol sur le potentiel de rétention en eau des sols sera analysé grâce aux données du projet AIL4WaterQuality et en concertation avec l'équipe chargée du chapitre « agriculture ».

Une cartographie de la diversité des potentiels d'infiltration et de rétention en eau des sols sera réalisée grâce à la carte numérique des sols pour les bassins versants de Wallonie comme cela a déjà été réalisé pour le bassin versant de la Vesdre.

Cela impliquera les tâches suivantes :

- Cartographie de la diversité des potentiels d'infiltration et de rétention en eau des sols réalisée grâce à la carte numérique des sols pour les bassins versants de Wallonie
- Création des cartes de réserves en eau utile intégrant la carte de carbone organique des sols
- Croisement de ces cartes avec les différents scénarios climatiques et d'occupation du sol pour définir des indicateurs de tendance et identifier les zones à risque
- Etude de l'impact de différentes pratiques agricoles sur le potentiel de rétention en eau des sols avec les données AIL4WaterQuality

- Recommandations sur la standardisation des mesures d'infiltration en Wallonie ainsi que leur collecte dans l'objectif de créer une base de données spatiale enrichie. Ceci permettra d'avoir des mesures locales fiables afin de confronter les fonctions de pédotransfert utilisées dans les modèles ci-dessus et permettra une cartographie plus fine de la diversité des potentiels d'infiltration et rétention d'eau des sols.

Approche « Inondations »

Dans le chapitre eau sont identifiées les zones à risque d'aggravation de l'aléa d'inondation. Il s'agit ici d'identifier les zones de sol qui contribuent positivement ou négativement aux ruissellement et inondations qui se produisent en aval en fonction de leur capacité à retenir et infiltrer l'eau et du risque que ceux-ci ne soient imperméabilisés dans le futur. Il ne s'agit donc pas tout à fait d'identifier des zones à « risque », mais plutôt des zones stratégiques à préserver.

Cela impliquera les tâches suivantes :

- La carte d'aléa d'inondation sera croisée avec les scénarios climatiques futurs ainsi qu'avec les scénarios de changement d'occupation du sol en prenant en considération l'évolution de l'imperméabilisation des sols pour définir les zones stratégiques à risque d'être imperméabilisées.
- Une méthodologie pour intégrer l'imperméabilisation des sols dans l'hydrologie des bassins versants sera alors proposée. Ceci afin que les risques de ruissellement en aval de l'imperméabilisation d'une parcelle puissent être pris en compte lors des avis sur les permis de construction.

Approche « Agriculture »

L'objectif ici est de fournir aux analyses de vulnérabilité de la thématique agriculture les zones où il y a un risque que les sols perdent leur qualité agronomique.

Cela impliquera les tâches suivantes :

- La carte de sensibilité à l'érosion des sols du SPW de 2023 sera croisée avec les autres cartes de vulnérabilité (carte de ruissellement, carte de teneur en MO, carte d'occupation des sols) et avec la sensibilité des cultures à l'érosion afin de définir des zones de sol à risques d'être fortement érodés dans le futur.
- Recherche sur la sensibilité des cultures à l'érosion.
- Analyse des tendances du SIGEC (Système intégré de gestion et de contrôle des terres agricoles) et calcul par région agricole des tendances à l'augmentation des cultures à risques.
- Croisement de cette cartographie par région agricole de sensibilité à l'érosion avec les autres cartes de vulnérabilité pour définir des indicateurs de tendance et identifier les zones à risque.
- Modélisation de l'érosion des sols et des flux de polluants issu de l'agriculture avec EPICgrid par l'équipe du SPW pour les projections climatiques et selon deux itinéraires agricoles afin de définir des zones à risque et des pratiques agricoles plus sensibles à l'érosion. L'impact de plusieurs pratiques agricoles pourra être étudié et discuté.
- Proposition d'une méthodologie de mise à jour de la carte de sensibilité à l'érosion intégrant :
 - Les aménagements anti-érosifs existants
 - La couverture des sols
 - La redéposition des sédiments
 - La connectivité entre les parcelles
 - Les différents types d'érosion (hydrique, aratoire et de récolte)Une recherche sera effectuée sur l'érosion aratoire (liée au travail du sol) et sur l'érosion de récolte (arrachage des cultures) qui ne sont pas pris en compte pour l'instant. L'impact des aménagements du paysage sur l'érosion des sols et l'hydrologie des bassins versants est en cours d'étude et ces connaissances seront utilisées pour définir des adaptations.



- Modélisation 1D de la dispersion de l'azote et des pesticides en lien avec le fonctionnement hydrodynamique des sols et selon plusieurs techniques culturales

Données

Les données nécessaires à ces approches sont les suivantes :

- Données climatiques futures spatialisées
- Scénarios de changements d'occupation du sol
- Pratiques agricoles de Wallonie
- Données projet AIL4WaterQuality (teneurs en eau et potentiels hydrique)
- Données cadastrales
- Plan de secteur
- Carte numérique des sols de Wallonie (CNSW)
- Carte de carbone organique des sols (teneurs, stocks) du Géoportail
- Carte d'aléa d'inondations de 2021
- Carte d'imperméabilisation des sols
- Carte de sensibilité à l'érosion de 2023
- Analyse des tendances du SIGEC (Système intégré de gestion et de contrôle des terres agricoles) et calcul par région agricole des tendances à l'augmentation des cultures à risques

La plupart des données nécessaires sont disponibles publiquement ou au sein de l'équipe. Les données cadastrales, de plan secteur, de pratiques agricoles devront être acquises au début du projet.

Pour les avis d'experts, différents groupes de travail seront établis. Ceux-ci impliqueront d'autres partenaires internes du consortium, ainsi que l'équipe du SPW travaillant sur le modèle EPICGrid.

Indicateurs et zones à risque

Le résultat escompté est la possibilité de visualiser :

- Nombre de jours sans précipitation
- Durée des sécheresses
- Tendance de l'évolution de la teneur en eau et du potentiel d'infiltration des sols
- Réserve en eau utile
- Zones à risques d'inondations par ruissellement
- Maximum de précipitations journalières et sur 5 jours des scénarios futurs
- Indicateur de la sensibilité à l'érosion
- Pertes en sol (t/ha)
- Lixiviation de l'azote et des pesticides vers les eaux

Les seuils de ces différents indicateurs seront à définir sur base de groupes d'experts.

Ceux-ci permettront alors d'identifier sur les cartographies les zones à risques suivantes :

- Zones à risques des sols les plus sensibles à la sécheresse et définition des sols à protéger.
- Zones à risques de ruissellement et de coulées boueuses
- Zones à risques en fonction de la sensibilité des sols à l'érosion.
- Zones à risques de lixiviation des polluants vers les eaux.

Liens thématiques

Ville et infrastructure : Imperméabilisation des sols due au développement des villes et à l'étirement du bâti à prendre en considération au niveau des inondations. Les zones résidentielles et les infrastructures pourront être prises en compte dans la définition des zones à risque des inondations et coulées boueuses. Ne pas oublier l'aggravation de l'aléa lié à l'artificialisation.



Aménagement du territoire : le changement de l’usage des sols et son artificialisation est la première cause de l’accélération de l’érosion des sols avec des conséquences importantes sur le cycle du carbone, la productivité et les conditions socio-économique.

Agriculture : Pratiques agricoles en Wallonie et leurs évolutions à prendre en compte pour leur capacité de rétention en eau des sols, leurs sensibilités à l’érosion et les risques de lixiviation de polluants. La carte de réserve en eau utile, des aléas d’inondation, des sécheresses édaphiques, des zones sensibles à l’érosion et des zones à risques de pollutions des eaux pourrait être croisée avec la carte des zones susceptibles de devenir propices à des cultures déjà cultivées ailleurs sur le territoire ou à accueillir de nouvelles cultures. L’impact des sécheresses édaphique et de l’érosion hydrique des sols pourra être pris en considération pour le rendement des cultures du volet Agriculture. Cela permettrait une approche multidisciplinaire dans la gestion des pratiques culturales. La protection des terres agricoles grâce à un système comme la SAFER en France pourrait être proposé afin de réguler les prix à discuter comme piste d’adaptation.

Biodiversité – services écosystémiques – forêts : Prise en considération de l’impact des inondations, du manque d’eau, des pertes en sol et de la sédimentation des cours d’eau sur les habitats et les services écosystémiques dans la détermination des zones à risques. Aire de répartition des milieux humides, forêts, ... à mettre en lien avec la carte des réserves en eau utile.

Eau : Définition des zones à risque en fonction de celles de la thématique eau afin d’optimiser les adaptations aux deux thématiques.

1.4. Mesures d’adaptation

Le potentiel de rétention en eau des sols va dépendre de leur réserve en eau utile (REU) et de la profondeur de sol explorée par les racines (donc des choix de cultures). La REU des sols va résulter de plusieurs facteurs dont le type de sol, la teneur en matière organique et la structure du sol. La réalisation d’une cartographie de la diversité des potentiels d’infiltration et de rétention en eau des sols permettra d’identifier les sols à protéger et à régénérer. Les **pratiques agricoles** permettant une aération des sols, la formation d’agrégats et une augmentation ou un maintien de la teneur en matière organique doivent être privilégiées. Les cultures alternatives moins consommatrices d’eau et plus couvrantes et à l’enracinement plus profond devraient être favorisées. De plus, les terres ayant un potentiel de rétention en eau élevées doivent être **protégées du changement d’occupation des sols et de l’artificialisation**. Or, à l’heure actuelle, lors d’une nouvelle construction, aucun avis sur le risque de manque d’eau des sols et de production de ruissellement n’est donné. Une protection de ces zones devra être mise en place.

L’imperméabilisation des sols entraîne une production de ruissellement lors de pluies importantes et provoque des inondations. La limitation du taux d’imperméabilisation est essentielle en Wallonie. Lorsqu’une construction est nécessaire, les sols déjà artificialisés devraient être remobilisés en priorité plutôt que de « consommer » nouvelles terres. La Commission européenne a invité les États membres à prendre des mesures pour limiter l’imperméabilisation. Elle a ainsi notamment recommandé d’atteindre en 2050 le no net land take, et invité les autorités nationales à établir des objectifs contraignants en matière d’occupation des sols. Des initiatives de **désimperméabilisation** des sols pourraient être entreprises dans les zones à risques de ruissellement et de coulées boueuses, comme c’est déjà le cas en France et aux Pays-Bas.

Afin de limiter l’érosion des sols et les coulées boueuses, une piste d’adaptation, utile également pour lutter contre le ruissellement et les inondations, est de freiner le ruissellement des eaux au sein des bassins versants et de favoriser l’infiltration de l’eau dans les sols puis vers les nappes. Des



aménagements anti-érosifs interparcellaires et intraparcels (haies, tournières enherbées, couverture hivernale des sols) peuvent être mise en place pour réduire les pertes de sol d'une parcelle à l'autre et limiter les coulées boueuses vers les zones urbanisées. Ces aménagements peuvent également servir de zones de développement de biodiversité. L'organisation spatiale du parcellaire doit également être questionnée. Afin d'améliorer l'identification des zones vulnérables à l'érosion, une carte des aménagements anti-érosifs existants devrait être tenue à jour. De plus, la redéposition des sédiments, la connectivité entre les parcelles et les différents types d'érosion (hydrique, aratoire et de récolte) devraient être pris en compte dans la sensibilité des sols à l'érosion. Les pratiques agricoles permettant d'améliorer la teneur en carbone des sols comme la **restitution et l'apport de la biomasse** au sol, via également des effluents d'élevage ou des boues de station d'épuration doivent être généralisées afin de réduire la sensibilité des terres à l'érosion. Une dizaine de mesures de lutte contre l'érosion des sols (**cultures de couverture, travail limité du sol, gestion des rotations**, teneur suffisante en matière organique, aménagements anti-érosifs tels que bandes enherbées...) est déjà promue en Wallonie par l'octroi de subsides. De plus, la **cellule GISER** d'expertise et de conseil a pour mission d'émettre des recommandations en matière de pratiques anti-érosives et de contrôler l'impact de nouvelles constructions sur les risques d'inondation par ruissellement. Le renforcement de la prise en compte du CC dans la définition des mesures agro-environnementales et climatiques (MAEC) est nécessaire avec des mesures spécifiques contre l'érosion. Un travail avec les parties prenantes du secteur agricole (structures d'encadrement, de conseil, ...) est à réaliser afin de protéger les zones à risques définies, de limiter le ruissellement et les coulées boueuses et mieux gérer l'application des intrants agricoles.

<https://www.icedd.be/>

Chapitre 4) Agriculture

1.1. Introduction

L'agriculture et l'élevage sont à la fois contributeurs et victimes de changements climatiques (CC) et de ses effets en Wallonie. En tant que contributeur de GES, les pratiques vont devoir s'adapter pour réduire les émissions et certaines peuvent même contribuer à l'atténuation des effets du CC. Par ailleurs, l'agriculture est également vulnérable aux effets de ce derniers. En effet, en tant qu'activités dépendant fortement des conditions météorologiques, qui conditionnent les rendements. D'une part, les projections indiquent des **effets positifs sur les rendements** des plantes liées aux augmentations des températures (allongement de la période de croissance) et à l'augmentation de l'efficacité de la photosynthèse suite à l'augmentation de la concentration en CO₂ en particulier sur les cultures d'hiver et les prairies. D'autre part, les **événements extrêmes** (sécheresses prolongées, irrégularité des précipitations, inondations, vagues de chaleur) ont des conséquences délétères sur les cultures et les animaux d'élevage avec, entre autres, des **pertes de récolte**, des **pertes de performances** de croissance et de reproduction, une **augmentation de la mortalité** et l'apparition de **nouvelles maladies** qui rendent cette activité vulnérable. Enfin, l'agriculture est un acteur majeur dans l'occupation et l'utilisation du sol qui peut ainsi, en fonction des **pratiques culturelles, favoriser ou impacter négativement la biodiversité, le sol et la ressource eau**, impactant alors fortement le contexte local et les conséquences des phénomènes climatiques extrêmes.

Le territoire agricole wallon est marqué par une diversité importante d'usage de la surface agricole utile en raison des différences topographiques, hydrographiques et pédo-climatiques. On distingue habituellement en Wallonie **dix régions agricoles** en fonction de la plus ou moins forte spécialisation vers les grandes culture ou l'élevage qui y sont pratiquées. Cependant, au sein de chaque région agricole, on observe également une **diversité des conditions pédologiques**. Cette hétérogénéité spatiale du potentiel agricole et de son usage requière une approche spatialisée de l'étude de l'impact du CC en vue de pouvoir caractériser la vulnérabilité de l'agriculture et l'élevage wallons au CC pour ultérieurement guider les agriculteurs dans le choix de nouvelles pratiques et de conseiller les pouvoirs publics sur les mesures de soutien, et ce en fonction des scénarii de CC proposés par le GIEC.

Les attentes spécifiques au projet pour la thématique « **Agriculture** », ainsi que la manière dont le projet pourra y répondre sont reprises en Annexe 1.

La figure suivante rassemble tous les éléments présentés ci-dessus dans le cadre conceptuel des chaînes d'impacts. Nous ne pourrons toutefois pas travailler sur l'ensemble des éléments dans le cadre de cette étude, comme le précise l'état des lieux qui suit.

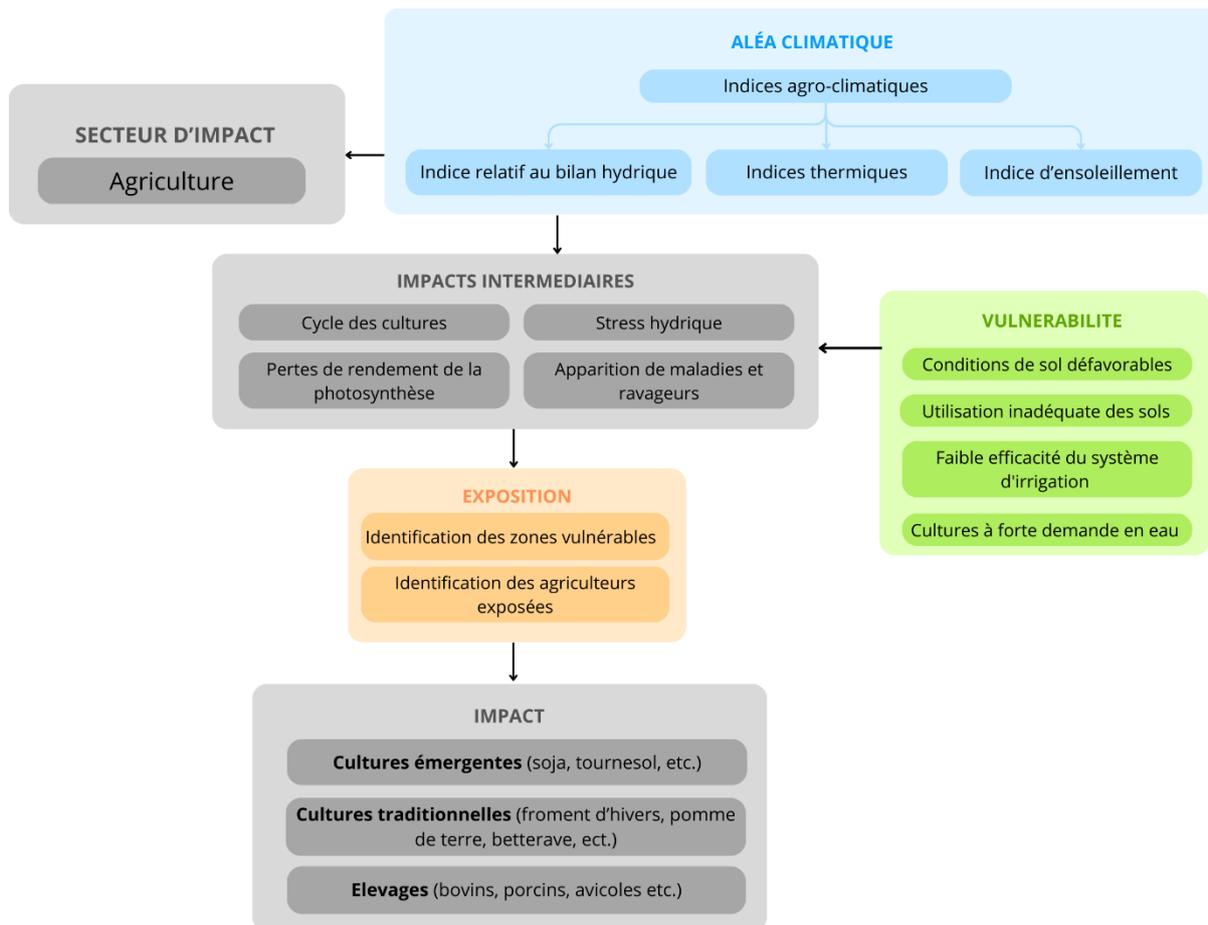


Figure 12 – chaînes d'impacts pour le chapitre 4 - Agriculture

1.2. Etat des lieux

Nous avons étudié ici toutes les ressources nous permettant d'analyser la vulnérabilité de l'agriculture, c'est-à-dire le "degré auquel l'agriculture wallonne apparaît sensible et incapable de faire face aux effets néfastes du réchauffement climatique, y compris dans la variabilité et les extrêmes climatiques". Un ensemble de documents, y incluant ceux suggérés dans le cahier des charges de l'étude, ont été analysés dans cet état des lieux en vue de déterminer si ceux-ci constituent une base pertinente pour transformer les connaissances actuelles scientifiques de cette vulnérabilité en une identification des zones à risques et l'élaboration de mesures d'adaptation.

Synthèse

A. Documents cités dans le cahier des charges

Document 1. Rapport ECORES (Biernaux, 2011)

Ce document inclut une synthèse historique de la production à l'échelle wallonne ainsi qu'un diagnostic territorial de la production. Il inclut une synthèse bibliographique des effets attendus du changement climatique sur les variables météorologiques pertinentes à la thématique agriculture et énumère un ensemble d'effets théoriques attendus sur base d'une synthèse bibliographique. Il propose de manière assez succincte des leviers et pistes d'adaptations. Ce document n'est donc pas *sensu stricto* un diagnostic de vulnérabilité.

Document 2. Projet AMICE (AMICE, s.d.)

Les activités du projet se sont intéressées à la gestion de l'eau dans le bassin versant de la Meuse sans lien concret avec l'agriculture et sa vulnérabilité.

Document 3. Projet Aquamod (Sohier & Degré, 2021)

Ce projet a eu pour objectif la modélisation prospective des impacts des pratiques agricoles sur la qualité du cycle de l'eau en Wallonie. Il inclut une synthèse territoriale pertinente du système agricole wallon, notamment sur les successions culturales par région agricole, ou encore sur les apports de fertilisants organiques et minéraux. Cependant, la méthodologie utilisée repose sur l'emploi d'un modèle de simulation des flux d'eau, de nutriments et de pesticides vers les eaux de surface et vers les eaux souterraines, et se concentre sur l'objectif du diagnostic de la qualité des eaux en Wallonie. Il sera une source d'inspiration du diagnostic territorial, mais il relève surtout de la thématique "Eau".

Document 4. Projet AGRiCAD (Service public de Wallonie, 2021)

Il s'agit d'un projet de recherche scientifique d'appui à la gestion des risques d'inondations par ruissellement en zones rurales, qui se décline en deux projets; Analyses coûts-avantages et aide à la décision (Projet 1) et Analyse des enjeux et quantification des dommages (Projet 2). Dans la thématique "agriculture" (pp 256 – 260), le projet se concentre en priorité sur le cout financier lié aux ruissellements. La méthodologie repose sur des entretiens en face-à-face avec 19 agriculteurs ayant estimé les dommages subis en termes de "Coûts sur le rendement" (nature de la culture lors de l'évènement, la superficie de la parcelle, la perte de rendement brut estimée, la cause de la perte et la fréquence à laquelle ce type d'évènement se produit sur la parcelle) et d' "Autres frais" (les coûts relatifs à des dégâts matériels, des coûts supplémentaires (engrais, semences) ou le temps de travail supplémentaire dû au ruissellement). Ceux-ci ont ensuite été extrapolés à l'échelle wallonne, par bassin versant.

Ce projet a conduit à l'actualisation du plan de gestion des risques d'inondation. Cependant, il ne repose pas sur un modèle mécanistique qui permettrait de se projeter dans des futurs climatiques potentiels, et nous estimons que la méthodologie de travail (entretien avec 19 agriculteurs) n'est pas transposable à un diagnostic à l'échelle territoriale wallonne. De plus, il relève surtout de la thématique "Eau". Finalement, ce projet ne quantifie que des effets potentiels indirects du changement climatique, à travers les dégâts de ruissellement, et pas des effets directs sur les productions animales et/ou végétales

Document 5. Rapport interministériel CGAAER n° 19056 et CGEDD n° 12819-01 : Changement climatique, eau, agriculture - Quelles trajectoires d'ici 2050 ? (Ayphassorho et al., 2020)

Ce rapport analyse les relations entre l'eau et l'agriculture dans le contexte du changement climatique en France. Il explore les voies et moyens d'adaptation de l'agriculture d'ici 2050 en proposant une transition vers l'agroécologie comme socle d'adaptation au changement climatique et prône, pour la gestion de l'eau, une gestion de résilience et non de maximisation des rendements. Ces recommandations sont déclinées en 7 axes majeurs et 23 sous-recommandations. Les thèmes ont été abordés et déclinés dans leur dimension territoriale au moyen de sept études de cas pour prendre en compte une diversité de situations géographiques et de filières agricoles concrètes.

Le rapport ne propose pas d'analyse de vulnérabilité en tant que tel, proposant plutôt au travers de la description des études de cas une mise en perspective des besoins en eau actuels des cultures et des évolutions attendues ainsi qu'une série de défis à relever. Au-delà des recommandations qui pourront servir à l'élaboration des mesures d'adaptation, l'étude de cas sur les cultures industrielles sous contrat dans l'Aisne (bassin de la Serre) pourrait alimenter des éléments de réflexion pour l'analyse qui nous concerne.

Document 6. PRC Peseta IV

Ce projet a évalué, sur base d'une approche quantitative intégrée faisant appel à des modèles climatiques, biophysiques et économiques, comment le changement climatique affectera l'environnement, l'agriculture de l'UE. Ce projet s'est concentré sur les cultures à graines majeures, i.e. l'orge, le maïs, le riz, le blé et le soja. A titre d'exemple, parmi les conclusions majeures, dans ces conditions non irriguées (*rainfed*), des baisses de rendement du maïs de plus de 20% sont prévues pour tous les pays de l'UE, avec des pertes de récoltes allant jusqu'à 80 % pour certains pays du sud de l'Europe. En comparaison, des augmentations de rendement du blé d'environ 5 % en moyenne sont prévues pour le nord de l'Europe (changements dans le régime des précipitations combinés à une augmentation des concentrations atmosphériques de CO₂) tandis que des réductions de rendement moyennes de 12% sont prévues pour le sud de l'Europe.

La double approche climatique et biophysique nous semble pertinente pour réaliser des diagnostics de vulnérabilité et sera une source d'inspiration pour notre méthodologie. Cependant, le modèle employé ici (WOFOST) présente certaines limitations dans les cultures qu'il est capable de simuler, et dans sa formalisation quant aux effets des stress liés aux éléments nutritifs (modèle basé principalement sur la simulation du stress hydrique). L'étude économique conduite dans ce document (sur base du modèle CAPRI) relève de la thématique du chapitre 7 (économique).

Document 7. LIDAXES

LIDAXES est une cartographie des axes de concentration naturels des eaux de ruissellement. LIDAXES met en évidence ces zones à risque d'inondations apparaissant suite à la concentration naturelle des eaux de ruissellement de surface. Il s'agit ici plutôt d'un outil existant, similaire à celui utilisé en amont de l'étude AGRiCAD. Cet outil est l'un des objets d'analyse du chapitre 2 (Eau).

Document 8. Plateforme wallonne pour le GIEC (Lamarque et al., 2022)

La synthèse du GIEC centré sur la Belgique dresse un état des lieux des effets attendus sur notre territoire. Dans cette section, nous nous concentrerons sur les effets attendus en Agriculture.

Des effets positifs sont attendus en moyenne, du fait de la hausse des températures et l'augmentation de la concentration en CO₂: les cultures pourront bénéficier d'une fertilisation par le CO₂, et des températures moyennes plus élevées allongeront la saison de croissance potentielle. Cela pourrait entraîner des gains allant jusqu'à +10 à +20 % par rapport à 1981- 2010. Ces effets seront surtout vrais pour des plantes ayant une photosynthèse dite en "C3" - des cultures comme le maïs (Photosynthèse en C4) bénéficieront beaucoup moins de l'effet fertilisant du CO₂.

Cependant, la récurrence des facteurs limitants va s'accroître (disponibilité en eau, en nutriments, vague de chaud, épisode de sécheresse, etc.), augmentant notre vulnérabilité aux phénomènes météorologiques extrêmes. Ainsi, des périodes de sécheresse prolongées, des "coups de chaud" sur les cultures, des températures trop élevées pourront causer des dommages importants. Les effets positifs évoqués précédemment seront ainsi surtout vrai pour les cultures d'hiver (semées à l'automne), tandis que les cultures de printemps se trouveront des conditions de croissances initiales plus compliquées². Les rendements des cultures telles que la pomme de terre et le maïs pourraient chuter bien en dessous des niveaux minimaux observés dans le passé récent (1981-2010) (diminution de 35 %).

En parallèle d'autres effets sont attendus, tels que dégradation des sols (érosion hydrique, minéralisation excessive du carbone des sols, etc.), saturation des sols en eau (anoxie) et inondation, des crues soudaines ou encore des averses de grêle, mais aussi l'augmentation de la pression des ravageurs, maladies et adventices (intervention sur le terrain limitées/plus compliquées). De plus, les températures élevées et la sécheresse devraient réduire la productivité de l'élevage en raison d'impacts négatifs sur le rendement des prairies et sur la santé (dont augmentation de la pression des parasites)

² Voir aussi Gobin A. (2010)

ou le bien-être animal. Pour la production avicole, bovine et porcine, des pertes de production allant jusqu'à 2 à 5 % sont probables.

Compte tenu de tous ces éléments, d'ici 2050, suivant un scénario RCP8.5, la variation de la valeur totale de la production agricole (végétale et animale) par rapport à 2019 devrait se situer entre :

- une augmentation de 45 M€/an, principalement liée à l'effet fertilisant du CO₂, et
- une diminution de 606 M €/an en tenant compte de la perte de terres liée au climat (par exemple l'érosion, les inondations) et en tenant compte des réductions de prix liées au climat sur le marché international.

Ces éléments seront bien entendus pris en compte pour alimenter nos réflexions et discuter nos résultats.

B. Documents complémentaires

En plus des documents listés dans le CSC, nous avons passé en revue un ensemble de documents et d'outils existants. Face à une bibliographie foisonnante, nous nous sommes ici concentrés sur les documents les plus pertinents pour l'analyse de vulnérabilité de l'agriculture wallonne.

Document 9. Plateforme AgriAdapt (AgriAdpat, s.d.)

La plateforme en ligne AGRIADAPT est le résultat d'un projet LIFE clôturé en 2020. Elle propose trois catégories d'outils pour contribuer à rendre les systèmes de grandes cultures, l'élevage et les prairies plus stables face au changement climatique avec des propositions propres pour les 4 grands ensembles géographiques européens (région méridionale, région atlantique, région continentale et région septentrionale). Le premier outil est un quizz pour tester les connaissances des agriculteurs en matière de changement climatique, d'impacts agricoles du climat sur différentes productions agricoles et de mesures d'adaptation envisageables à l'échelle d'une exploitation agricole.

Le second outil constitue une entrée cartographique proposant la consultation de données agronomiques (rendements) et climatiques (observations et projections) pour différentes localités géographiques sur l'ensemble de l'Europe. Différents indicateurs projetés dans le futur sur l'évolution des conditions agronomiques pour les cultures, l'herbe et les stress pour les animaux. Un seul site wallon est repris dans cet outil ce qui est assez limité pour étudier la vulnérabilité de notre région face au changement climatique dans sa dimension territoriale. Le dernier outil est un ensemble de fiches décrivant des mesures d'adaptation pour les agriculteurs pour les trois grands systèmes étudiés (grandes cultures, élevage et prairies) classées en mesures à court, moyen et long terme. Ces fiches restent assez descriptives et peu quantifiées. En dépit des limites présentées ci-dessus qui la rende peu utile pour notre étude, cette plateforme constitue cependant un modèle intéressant de produit final pour les utilisateurs.

Document 10. CANARI (CANARI, s.d.)³

CANARI est un site web mis en ligne en 2022 qui permet aux acteurs agricoles de visualiser plus d'une centaine d'indicateurs agroclimatiques sur les 30 années passées et leur projection sur les 30 années à venir sur le territoire français. Ces indicateurs sont des essentiels pour comprendre l'impact du changement climatique et désigner les démarches d'adaptation à mettre en œuvre dans les

³ Les documents 9 et 10 (AGRIADAPT et CANARI) sont les seules ressources mentionnées pour le secteur agricole sur le site web du Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique du Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires (<https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/outils-et-methodes>).

exploitations agricoles. Dans le cadre de la présente expertise, ce site Internet permet d'identifier une série d'indicateurs pour alimenter l'étude de la vulnérabilité.

Document 11. Adaptation de l'agriculture aux changements climatiques - Recueil d'expériences territoriales (Réseau action climat - France, 2014).

Cette étude détaille, dans sa première partie, les effets attendus du changement climatique sur l'agriculture et les pratiques agricoles en France, l'état de l'art scientifique, les outils institutionnels déjà existants, les stratégies d'adaptation identifiées ainsi que les rôles possibles des territoires. La seconde partie de cette étude décrit et analyse cinq exemples d'actions concrètes mises en place sur des territoires.

Ce document sera une source d'inspiration, tant pour confronter nos résultats que dans la forme de la restitution faite, pour l'étude de vulnérabilité qui est l'objet du présent CDC. A titre d'exemple, le document propose un tableau de synthèse des atouts et vulnérabilités face au changement climatique des productions agricoles françaises ; celui-ci servira de base de comparaison à notre étude, mais présente aussi une synthèse qui pourra nous guider dans la mise en page du rapport final.

Document 12. Priority for climate adaptation measures in European crop production system (Zhao et al., 2022).

L'évaluation des mesures d'adaptation aux effets du changement climatique sur les systèmes de culture s'est généralement fondée sur des données provenant d'essais en plein champ et de modèles de culture (voir Document 13). Cette stratégie ne permet toutefois d'explorer qu'un nombre restreint d'options avec une étendue spatiale limitée. C'est pourquoi les auteurs de cette étude ont conçu un questionnaire intégrant les aspects qualitatifs et quantitatifs de l'adaptation au changement climatique dans le secteur agricole. Le questionnaire a été distribué à des experts de 15 pays européens afin de cartographier les mesures d'adaptation au climat observées et prévues en général, avec une attention particulière portée sur cinq cultures principales (blé, colza, maïs, pomme de terre et vigne) dans six zones environnementales à travers l'Europe.

Il est attendu que les risques et les mesures d'adaptation associées varient selon les cultures dans les différentes zones climatiques. Dans toute l'Europe, les changements dans les pratiques d'exploitation des champs, le régime de fertilisation, la protection des cultures et la sélection des cultivars devraient être les mesures d'adaptation les plus importantes dans le cadre du changement climatique futur projeté. Une compréhension approfondie des adaptations observées et prévues dans les différentes zones reste toutefois utile pour soutenir la prise de décision au niveau des exploitations et des politiques dans toute l'Europe.

Les risques et les mesures d'adaptation proposées dans ce document serviront de base à nos propres propositions d'adaptation, une fois l'étude de vulnérabilité conduite.

Document 13. Future area expansion outweighs increasing drought risk for soybean in Europe (Nendel et al., 2022)

Cette étude présente des simulations de la production future de soja et des facteurs de risque les plus importants en Europe associés aux changements climatiques. Pour ce faire, l'étude utilise un ensemble de modèles climatiques et de croissance des cultures. Les auteurs utilisent une base de données "sol" spatialisée à l'échelle Européenne, et des projections climatiques selon les scénarios RCP 4,5 et RCP 8,5, elles aussi spatialisées à l'échelle territoriale. Ils étudient, à travers les modèles de culture, les effets interactifs des conditions de croissance (sol x climat) sur la physiologie et le développement des plantes, jusqu'à l'élaboration du rendement. Ils identifient ainsi (pour le soja), les zones potentielles de croissance. A travers leur diagnostic, ils identifient ainsi les potentialités mais aussi les vulnérabilités pour la culture, permettant de mettre en évidence les principaux défis pour sécuriser la production.

Nous pensons que cette étude est une base méthodologique solide que nous exploiterons et adapterons pour notre propre étude.

Document 14. Climate Change and Livestock Production: A Literature Review. (Chen et al. 2022)

La revue de la littérature de Chen et al. (2022) est une analyse de la littérature récente sur les effets directs et indirects du changement climatique sur les animaux d'élevage, la contribution de l'élevage à l'émission de GES et les méthodes d'adaptation possibles ainsi que des stratégies de mitigation. Nous exploiterons en particulier les références relatives aux effets directs sur les animaux en vue d'estimer l'amplitude des effets des projections climatiques wallonnes sur les performances (ingestion, production, reproduction) et la mortalité animale des bovins, des porcs et des volailles. Les méthodes d'adaptation et les stratégies de mitigation décrites pourront également servir l'élaboration des propositions lors de la présente expertise.

Document 15. Impact of climate change on animal health and welfare. (Lacetera, 2019)

L'article de Lacetera (2019) décrit les mécanismes physiologiques et immunitaires liant la prévalence de troubles de santé des animaux, l'augmentation de la mortalité en élevage et le stress thermique. Des effets directs et indirects sont décrits à l'instar de l'article de Chen et al. (2022).

Pour le chapitre agriculture, ce document nous permettra d'identifier des seuils critiques (en particulier en fonction du Temperature Humidity Index) pour l'augmentation de l'occurrence de ces troubles et des mortalités dans nos projections de vulnérabilité.

Document 16. Heat stress adaptations in pigs. (Mayorga et al., 2019)

L'article de Mayorga et al. (2019) est spécifique au secteur porcin qui présente par son caractère essentiellement indoor, des particularités par rapport à l'élevage bovin en matière d'effets et d'adaptation au stress thermique et au changement climatique. Cet article reprend dans sa bibliographie une série de références utiles pour la quantification des effets du stress thermique auquel seraient soumis les porcs à l'avenir (en termes de mortalité, conversion alimentaire, etc.) et analyse l'efficacité des méthodes d'adaptation disponibles pour les bâtiments d'élevage.

Critique

En conclusion, le diagnostic des vulnérabilités et les mesures d'adaptation spécifiques à la Wallonie, pour la thématique agriculture, sont cruciaux. La vulnérabilité agricole est dépendante de nombreuses variables qu'il n'est pas possible d'évaluer dans leur entièreté en raison d'un manque de données de base sur l'agriculture wallonne. Par conséquent, le travail durant cette étude se concentrera sur ces données de bases mais leur usage pour répondre aux différentes attentes formulées devra se faire en-dehors de l'étude. La liste détaillée des attentes pour l'étude et de comment nous pourrions y répondre ou non (ou partiellement) est fournie en Annexe 1.

1.3. Méthodologie d'analyse de vulnérabilité

Approche générale

La méthodologie d'analyse de la vulnérabilité se déclinera en 3 axes :

1. le calcul d'indices agro-météorologiques utiles à une diversité de parties prenantes dans le domaine des grandes cultures et de leur gestion ;
2. une modélisation de l'impact du changement climatique sur le potentiel de production des cultures et des prairies en Wallonie ;
3. le calcul d'indices de stress thermiques utiles pour les aspects liés à l'élevage.

Ces trois volets reposent sur l'actualisation des projections climatiques régionales qui seront réalisées dans le cadre du volet 2 de l'étude, au regard des derniers scénarios émis par le GIEC.

A. Axe 1 – Indices agro-climatiques

Une série d'indicateurs agro-climatiques, tels que ceux proposés par DRIAS en France (<https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/250>) ou encore tels que ceux publiés par Makinen et al. (2018) seront également dérivées des projections climatiques. Ils seront consacrés aux fourrages, à la gestion de l'élevage et aux grandes cultures. Ils sont décrits plus en détail dans la section ci-après.

B. Axe 2 – potentiel de production agricole

Une modélisation de l'impact du changement climatique sur le potentiel de production agricole sera réalisée en Wallonie pour les principales cultures des rotations wallonnes (i.a. froment d'hiver, pomme de terre, betterave, etc.) et la prairie, mais aussi pour des cultures potentiellement émergentes (soja, tournesol, etc.). Les outputs étudiés concerneront les aspects agronomiques (niveau de production, qualité, niveau de stress, etc.) et environnementaux (lessivages N, évolution de la matière organique, etc.). Pour ce faire, les modèles de développement des cultures (a priori, le modèle STICS développé par l'INRAe – Beaudoin et al., 2023) et de la prairie (a priori à partir d'un modèle de croissance des herbages MODVEGE adapté à la situation wallonne – Jouven et al., 2006 ; Kokah et al. 2023) seront déployés à l'échelle spatiale wallonne. Ils seront interfacés avec les bases de données (BDD) "sol" issus du projet <https://soilgrids.org> (maille 250 x 250m²) porté par l'ISRIC. Des algorithmes d'interfaçage de cette BDD seront développés pour adapter les données aux besoins en données d'entrée du modèle (nombre d'horizons, etc.). Des fonctions de pédotransfert seront déployées pour dériver les paramètres complémentaires nécessaires et absents initialement dans la BDD (teneur en aux à la capacité au champ ou au point de flétrissement, etc. – Szabo et al., 2021).

L'information climatique future, projetée selon les différents scénarios et spatialisée à l'échelle wallonne sera utilisée.

C. Axe 3 – Elevage et stress thermique

Sur la composante animale, ces mêmes projections climatiques spatialisées seront utilisées pour dériver des indices de stress thermique (ex. THI) permettant d'évaluer les périodes de l'année, la fréquence et l'intensité des épisodes critiques pour les animaux (bien-être animal) et de projeter des réductions de production et/ou des augmentations de mortalité attendues lors de ces épisodes de franchissement de ces seuils sur les différentes mailles (Thornton et al., 2021). Le travail ciblera les élevages bovins pour les herbivores (Morignat et al. 2015; Vitali et al. 2009, 2016; Maggiolino et al., 2020), et les élevages de monogastriques porcins (Wegner et al. 2014) et avicoles (Liu et al, 2020; Kim & Lee, 2023). Etant donné l'impact potentiel de la conception des bâtiments et des infrastructures d'élevage et des équipements dont ils disposent sur le stress thermique subi par les animaux, l'étude de l'impact sur les animaux des conditions environnementales en conditions standards d'élevage (conditions de mesures des indicateurs de stress thermique tels le THI) sera qualitative.

Indicateurs

Sur base du diagnostic de vulnérabilité mené sur les 3 volets évoqués ci-avant, les données seront synthétisées en indicateurs pertinents qui seront mis en représentation graphiques à l'échelle territoriale afin de diagnostiquer les zones à risques prioritaires.

A. Axe 1 – Indices agro-climatiques

Sur base des données météorologiques brutes, des indicateurs agro-climatiques seront calculés. Ceux-ci s'inspireront du DRIAS et seront complétés avec une partie des indicateurs proposés par Makinen et al. (2018). Ils renvoient aux calculs d'indices thermiques (sommes de températures sur différentes bases, nombre de jours échaudants, nombre de jours de gels, etc.), d'indice d'ensoleillement (radiation solaire cumulée, etc.), ou encore d'indices relatifs au bilan hydrique (somme de précipitation, déficit hydrique, nombre de jour de sécheresse, etc.) impactant le développement des cultures et de la prairie.

B. Axe 2 – potentiel de production agricole

Les données météorologiques, croisées avec les données pédologiques, seront utilisées pour alimenter **des modèles de culture et des modèles de développement des prairies**. Les sorties de ces modèles concernent des indicateurs de production, tant quantitatifs que qualitatifs (rendement, teneur azotée), mais aussi des indicateurs de stress perçus par les plantes en développement (intensité et longueur des stress hydriques ou thermiques, etc.). Des indicateurs relatifs aux risques associés à la gestion de l'azote pour les productions culturales seront aussi extraits des sorties du modèle : e.g. quantité d'azote laissée dans le sol au terme de la saison culturale. Sur les fourrages, des indicateurs spécifiques seront formulés : date de redémarrage de la pousse de l'herbe, date de fauche suggérée.

C. Axe 3 – Elevage et stress thermique

Sur la composante animale, l'indicateur THI (Shu et al., 2021) relatif au stress thermique perçu par les animaux, permettant d'évaluer les périodes de l'année, la fréquence et l'intensité des épisodes critiques pour le bien-être des animaux, sera calculé. Sur base de seuils de dépassement du THI identifiés dans la littérature, un indicateur relatif à la réduction du potentiel de production (Thornton et al., 2021) et/ou un indicateur relatif à l'augmentation de mortalité (Thornton et al., 2021) attendu lors de ces épisodes de franchissement de ces seuils seront également calculés.

Zones à risque et seuils d'alerte

Sur base de tous ces indicateurs, des **représentations graphiques spatiales explicites** des données seront réalisées à l'aide d'un outil GIS. Elles serviront par ailleurs à identifier les zones les plus vulnérables à l'échelle territoriale pour les différentes cultures étudiées, sous pratiques agricoles standards. Elles permettront éventuellement d'identifier des zones susceptibles de devenir propices à des cultures déjà cultivées ailleurs sur le territoire ou à accueillir de nouvelles cultures.

La question des systèmes d'alerte avec des seuils à partir desquels des actions de gestion doivent être entreprises n'est pas pertinente à l'échelle d'une approche régionale ni même communale tant la réponse est dépendante du contexte propre à chaque exploitation (qualité nominale du bâtiment au regard de son niveau d'isolation, activation de la ventilation/climatisation, etc.).

Sur la question du stress hydrique et de l'irrigation, nous estimons que les mesures d'adaptation et de mitigation proposées en réponse au diagnostic de vulnérabilité doivent nous amener à identifier les zones et les plantes qui permettront une culture pluviale.

Données

Ci-après, voici la liste des données requises pour cette fiche :

- **Données météorologiques** : Projection climatique actualisées provenant du volet 2 de l'étude.
- **Données pédologiques** : Nous travaillerons au départ de la base de données produite par ISRIC.
- **Données "cultures"** : Nous aurons besoin des données de la SAU wallonne. Nous aurons également besoin de connaître les itinéraires techniques standards pour les différentes cultures (en partenariat avec les centres pilotes). Nous pourrions avoir besoin d'avoir accès aux enquêtes agricoles annuelles (DAEA).
- **Données "animales"** : Nous aurons besoin des données du cheptel par commune. Nous pourrions avoir besoin d'avoir accès aux enquêtes agricoles annuelles (DAEA).

Des contacts seront pris avec les centres pilotes et la DAEA afin d'obtenir ces données.

- Pour les avis d'experts et utilisateurs, différents groupes de travail seront établis. Ceux-ci impliqueront d'autres partenaires internes du consortium, ainsi que : CRAw, UCLouvain, ULB, Centres pilotes grandes cultures et fourrages, AWé, Protect'eau et sa cellule d'appui scientifique Grenera, Natagriwal, Des structures gravitant de la profession agricole, telles que

Greenotec, Regenacterre, BRIOAA, les syndicats agricoles, etc., CWAD et ses organisations membres (ceintures alimentaires, WAGRALIM, SOCOPRO, etc.), Réseau TERRAé.

Liens thématiques

Eau (inondations/sécheresse) et Sols :

Nombreux liens déjà listés dans les chapitres 2 et 3. Nous calculerons des indices de sensibilité des cultures au stress hydrique et le risque d'anoxie des sols. Nous évaluerons le reliquat azoté au terme de la saison culturale (risque de contamination des nappes phréatiques).

Services écosystémiques

Nous évaluerons le service écosystémique d'approvisionnement en denrées agricoles.

Socio-économique

Nous calculerons les changements en rendements attendus sur les productions animales et végétales. Ceci pourra servir de base pour l'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'économie du secteur agricole.

1.4. Mesures d'adaptation

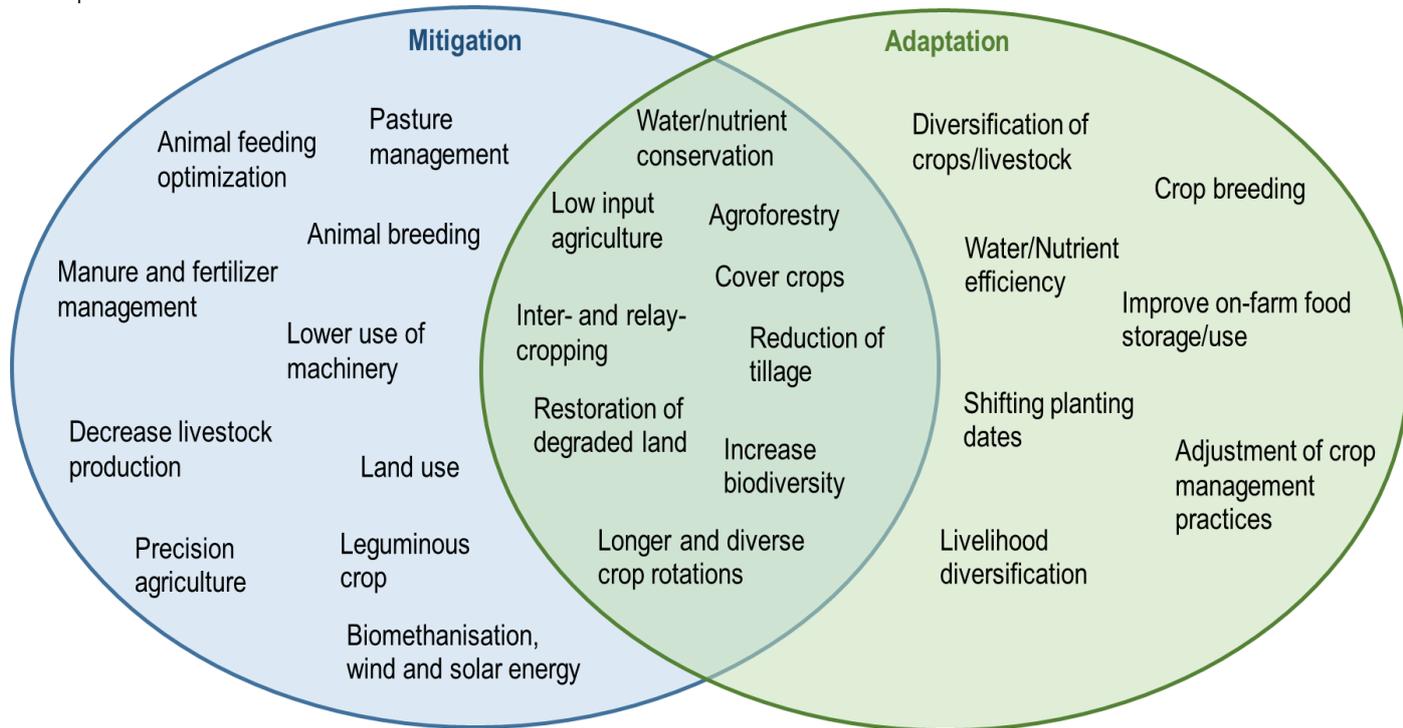
La liste des mesures d'adaptation possibles pour l'agriculture wallonne est assez longue. Le projet AgriADAPT (<https://awa.agriadapt.eu/fr/adaptations>) propose des fiches qui pourront être consultées dans la suite de l'étude. On peut lister par exemple, la **modification des dates de semis** et de la **variété de culture** semée, la **sélection végétale**, guidée par la modélisation sur le plus long terme, le choix de cultiver d'autres plantes mieux adaptées aux nouvelles conditions agro-climatiques (ex. soja ou tournesol déjà proposés plus haut) qui sera toutefois tributaire du développement des filières de valorisation sur notre territoire. Parmi les mesures, certaines permettent de réagir à court terme aux dangers immédiats posés par le changement climatique (ex. équipement de refroidissement des bâtiments d'élevage par ex.) sans apporter de solution à long terme, voire en renforçant le problème climatique par les émissions de GES induites par la consommation d'énergie directe et indirecte de ces solutions. D'autres, comme par ex. le recours à l'irrigation des grandes cultures, semblent même fort peu souhaitables a priori sur le long terme pour la Wallonie en raison des coûts élevés de déploiement des infrastructures ainsi que des risques que cela pose sur la ressource hydrique et les conflits d'usage qui en découleront.

Certaines mesures, comme **l'adaptation des pratiques de pâturage** peuvent être actionnées à court terme et sont des mesures sans regret car, dans l'exemple cité, elles permettent un gain dans la valorisation de l'herbe par les animaux même en l'absence de changement climatique.

Enfin, le **recourt à l'agroforesterie** ne peut s'envisager que sur le long terme, mais en tant que solution basée sur la nature, elle peut apporter, en plus d'une mitigation des risques d'érosion, des bénéfices de supports à la biodiversité et de piégeage de carbone dans les sols (et donc d'atténuation des changements climatiques), en particulier des cultures.

Ceci offre un premier aperçu des mesures, qui sera complété dans l'étude sur base des résultats du diagnostic. Les mesures seront déclinées selon les risques qu'elles adressent, le levier à activer et surtout quel niveau d'action (au niveau de l'agriculteur ou des pouvoirs publics par exemple).

A titre d'exemple non-exhaustif, voici une compilation personnelle des auteurs de mesures d'adaptation.



<https://www.icedd.be/>

Chapitre 5) Social

1.1. Introduction

La vulnérabilité, telle que définie dans le dernier rapport du GIEC, est définie comme « la propension ou la prédisposition à subir des effets néfastes et englobe divers concepts et éléments, notamment la **sensibilité** ou la susceptibilité aux dommages et le manque de **capacité à faire face et à s'adapter**. » (IPCC, 2022). La vulnérabilité est une composante du calcul du risque lié à un aléa climatique. Afin de calculer le risque associé à un aléa climatique, des informations concernant à la fois l'aléa, les populations exposées et la vulnérabilité de celles-ci sont nécessaires (Lamarque et al, 2022). La finalité de la thématique vulnérabilité sociale des populations face au changement climatique sera donc d'identifier les populations et groupes vulnérables d'un point de vue socio-économique, social et démographique. La vulnérabilité des populations est un aspect transversal et commun au calcul du risque de plusieurs thématiques abordées dans ce rapport. Lorsque pertinentes, les données et informations de vulnérabilité socio-économique et démographique rassemblées pourront donc être exploitées dans le calcul du risque des zones à risques et zones d'intervention prioritaires lié aux autres thématiques de ce projet. Les données de vulnérabilité pourront aussi être visualisées et explorées de façon indépendante dans la plateforme interactive qui sera développée. **Pour cela, un ou plusieurs indices de vulnérabilité sociale seront développés sur base des connaissances, outils et données existants.**

Dans un premier temps, ce chapitre présente les différents facteurs influençant la vulnérabilité des populations au changement climatique tels que décrits dans la littérature et les ressources existantes en Belgique et dans les pays voisins. Ensuite, la méthodologie qui sera utilisée afin d'estimer la vulnérabilité des populations dans ce projet sera décrite.

L'aspect social n'est donc pas une chaîne d'impact en soi, mais une composante de la vulnérabilité dans toutes les chaînes d'impacts impliquant la population humaine.

1.2. Etat des lieux

Synthèse

Bien que toute la société soit affectée par le changement climatique (Bacheley 2021), tous les individus et communautés ne sont pas affectés de la même manière (De Ridder et al 2020). Certains individus ou communautés sont plus vulnérables car ils sont plus sensibles ou moins bien préparés aux conséquences de ce changement. Ce différentiel de vulnérabilité est connu et est influencé par différents facteurs (Deguen et al 2023) dont l'aspect socio-économique est primordial (Viner et al 2020). La vulnérabilité est généralement scindée en deux composantes, la sensibilité et la capacité d'adaptation (IPCC 2022). Selon le GIEC, la **sensibilité** des populations se définit comme la prédisposition de celles-ci à être négativement affectées. La capacité d'adaptation des groupes humains se réfère à la capacité de ceux-ci à s'adapter aux dommages potentiels, à profiter des opportunités et à réagir aux conséquences (IPCC 2022). La capacité d'adaptation englobe aussi les ressources disponibles, ainsi que la capacité à accéder et à mobiliser ces ressources (Benitez et Reghezza 2018). D'autres auteurs mentionnent également l'influence de l'environnement sur la vulnérabilité à travers une **exposition accrue** aux aléas (De Ridder et al 2020, Kazmierczak 2015).

Afin de mieux appréhender les facteurs influençant la vulnérabilité des populations au changement climatique, des études d'origine belge, européenne ou mondiale ont été synthétisées. Les documents consultés sont soit des études synthétisant les connaissances sur la vulnérabilité sociale (De Ridder et al 2020, Van de Vel et al 2021, Vanderplanken et al 2019, Bacheley 2021, Breil et al 2018) soit des études appliquées incluant différentes variables dans le calcul d'indices de vulnérabilité (Hooyberghs 2018, Kazmierczak 2015, Krunoslav et al 2017), soit des outils abordant la vulnérabilité sociale (Broekx et al 2023, Beullens et al 2021, IMPACTtool, Klimaateffectatlas). La liste des documents consultés est

présentée dans le Tableau 1. Une synthèse des différents facteurs⁴ influençant la vulnérabilité des populations au changement climatique est présentée dans le Tableau 2.

Tableau 1. Etudes consultées afin d'établir la liste des facteurs de vulnérabilité.

Nom de l'étude	Aléa climatique	Région analysée	Référence
Evaluation of the socio-economic impact of climate change in Belgium Final report	Changement climatique	Belgique	1
Impact of climate change on the Healthcare system in Belgium	Changement climatique	Belgique	2
Kwetsbaarheidsanalyse in het kader van het Warmteplan Vlaanderen	Vague de chaleur	Flandre	3
Uitbreiding van het Klimaatportaal-Vlaanderen met klimaatadaptatietools	Changement climatique	Flandre	13
Software LATIS 4.0	Inondation	Flandre	10
IMPACTtool – Klimaatportaal Vlaanderen	Changement climatique	Flandre	11
Heat Plan Compilation Deliverable 2.1 SCORCH project	Vague de chaleur	Europe	4
Inégaux face à la chaleur	Vague de chaleur	France	5
Klimaateffectatlas	Changement climatique	Pays-Bas	12
Mapping flood disadvantage in Scotland 2015	Inondation	Ecosse	6
Analysis of social vulnerability to climate change in the Helsinki Metropolitan Area	Changement climatique	Helsinki, Finlande	7
Leaving No One Behind in Climate Resilience Policy in Europe	Changement climatique	Europe	8
Social Vulnerability assessment Tools for Climate Change and DRR Programming A Guide to Practitioners.	Changement climatique	Mondial	9

L'inventaire réalisé a permis d'identifier 48 facteurs influençant la vulnérabilité des populations. Les facteurs trouvés ont été regroupés en neuf catégories : démographie, santé, groupes-cibles, statut socio-économique, social, environnement, accessibilité des services de soin, inondation, et évacuation. Parmi ces catégories, certaines se rapportent plus à la **sensibilité accrue** des personnes et des communautés (démographie, santé et groupe-cibles), d'autres sont en lien avec la **capacité d'adaptation** et à faire face à un aléa (statut socio-économique, social).

Dans le Tableau 2, les références sont numérotées comme suit :

1. De Ridder, K. et al., 2020. Evaluation of the socio-economic impact of climate change in Belgium Final report. Study commissioned by the national climate commission.
2. Van de Vel, K. et al., 2021. Impact of climate change on the Healthcare system in Belgium. Study commissioned by the Federal Public Service health, Food chain safety and environment.
3. Hooyberghs, H., 2018. Kwetsbaarheidsanalyse in het kader van het Warmteplan Vlaanderen. Studie uitgevoerd in opdracht van 2018/UnitRMA/R.
4. Vanderplanken, K. et al., 2019. Heat Plan Compilation Deliverable 2.1 SCORCH project. Communication personnelle.
5. Bacheley, A., 2021. Entretien de Géraldine Molina « Inégaux face à la chaleur », Magazine Cartographique, Les autres possibles, n°32
6. Kazmierczak, A., 2015. Mapping flood disadvantage in Scotland 2015 Final report for the Scottish Government.

⁴ Il est à noter que les différentes études consultées ne présentent pas toutes le même niveau d'exhaustivité et de détail, ce qui a une influence sur les facteurs de vulnérabilité repris dans le Tableau 2.

7. Kazmierczak, A., 2015. Analysis of social vulnerability to climate change in the Helsinki Metropolitan Area. Study commissioned by HSY.
8. Breil, M. et al., 2018. Social vulnerability to climate change in European cities – state of play in policy and practice. European Topic Centre on Climate Change impacts, Vulnerability and Adaptation (ETC/CCA) Technical paper 2018/1.
9. Krunoslav, K. et al., 2017. Social Vulnerability assessment Tools for Climate Change and DRR Programming A Guide to Practitioners. United Nations Development Programme.
10. Beullens, J. et al., 2021. Ontwikkeling LATIS 4: Deelrapport 3c: Opmaak Baselayerpackage voor LATIS 4.0. Versie 1.0. WL Rapporten, 13_159_8. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
11. IMPACTtool – Klimaatportal Vlaanderen. <https://impacttool.toepassingen.vmm.vlaanderen.be/2>
12. Klimaateffectatlas. <https://www.klimaateffectatlas.nl/en/>
13. Broekx, S. et al., 2023. Uitbreiding van het Klimaatportaal-Vlaanderen let klimaatadaptatietools Methodologische beschrijving Studie uitgevoerd in opdracht van Vlaamse Milieumaatschappij.

Tableau 2. Facteurs de vulnérabilité sociale

Catégorie	Facteur	Références												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Démographie	Genre								x	x				
	Personnes âgées	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
	Enfants	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x
	Maladies préexistantes et chroniques	x	x		x	x	x		x	x				
Santé	Personnes hospitalisées		x		x	x	x		x	x				
	Femmes enceintes		x		x									
	Maladies mentales				x	x	x		x					
	Personnes à mobilité réduite		x		x	x	x		x	x				
	Toxicomanes				x									
	Besoin de médicaments		x		x		x		x					
Groupes-cibles	Hôpitaux			x			x			x		x		x
	Maisons de repos et de soins			x			x					x		x
	Milieux d'accueil de la petite enfance			x								x		x
	Ecoles maternelles et primaires			x								x		x
	Revenus	x		x	x	x	x	x	x	x				
Statut socio-économique	Personnes sans emploi	x		x			x	x		x				
	Incapacités de travail	x					x			x	x			
	Bénéficiaires de programmes sociaux	x								x	x			
	Niveau d'étude	x		x				x		x				
Social	Origine étrangère	x			x					x	x			
	Isolation sociale	x	x	x	x		x		x	x				
	Personnes SDF		x		x					x				
	Migrants		x		x				x					
	Touristes		x		x									
	Croissance/renouvellement important de la population	x					x			x				



	Pourcentage d'étudiants							x						
	Ménages avec des enfants scolarisés							x						
	Ménages d'une seule personne							x						
	Familles monoparentales	x								x	x			
	Pensionnés isolés	x	x					x	x					
	Locataires	x						x	x	x	x			
Environnement	Bâtiments en mauvais état	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
	Présence d'espaces verts et d'arbres	x	x	x		x	x	x					x	
	Urbanisation/ruralité	x			x	x	x				x			
	Régions polluées				x									
	Régions sujettes à la chaleur				x									
	Présence d'eau de surface								x					x
	Présence de surface imperméabilisée	x							x					
	Distance moyenne à l'hôpital le plus proche							x			x			
Accessibilité des services médicaux	Nombre d'hôpitaux par habitant										x			
	Nombre de personnel médical par habitant										x			
Inondation	Prise d'assurance							x						
	Criminalité							x	x	x				
Capacité de mobilité	Mode de déplacement					x	x	x			x			
	Ménages sans voiture personnelle	x						x	x					
	Taille des ménages	x							x					
	Logements surpeuplés	x							x					
	Accessibilité de la zone								x		x			

L'**âge** influence la **sensibilité** face aux effets du changement climatique. Les **enfants** ont une sensibilité accrue car leurs organes sont encore en croissance, leur capacité de thermorégulation n'est pas encore complètement développée et ils sont plus sensibles à la perte de fluide (Deguen et al 2023, Vanderplanken 2018). De plus, ils ont des comportements à risque qui augmentent les effets sanitaires des expositions (e.g. mise en bouche) (Deguen et al 2023). Les **personnes âgées** sont aussi plus sensibles aux vagues de chaleur car leur corps réagit moins vite à l'augmentation de température, elles sont moins conscientes de la soif et leurs glandes sudoripares sont moins productives (Vanderplanken 2018). En cas d'inondation, les personnes âgées, présentent un plus haut taux de mortalité dû à la noyade, l'hypothermie et les problèmes cardiaques (Karmierczak 2015). Les personnes âgées ont aussi une probabilité plus élevée de souffrir de maladies chroniques ou de démence, de consommer des médicaments, d'être socialement isolées ou de résider dans des centres de soin, ce qui augmente leur vulnérabilité (Vanderplanken 2018).

L'état de **santé** des personnes influence aussi leur **sensibilité** aux aléas climatiques. Cela concerne les personnes souffrant de maladies préexistantes et/ou chroniques diminuant leur résistance aux effets physiques du changement climatique, les personnes hospitalisées ou en situation de handicap qui dépendent d'autres personnes pour la mobilité et ont besoin de soins réguliers, les personnes qui prennent des médicaments, les femmes enceintes ainsi que les toxicomanes. Les personnes souffrant

de problèmes mentaux ou de démence peuvent avoir une perception altérée du danger et ne pas réagir de façon adéquate à celui-ci (Karmierczak 2015). Ces différents facteurs de vulnérabilité liés à l'état de santé sont présents dans les plans d'adaptation à la chaleur de 15 pays européens, synthétisés dans le projet SCORCH (Vanderplanken 2018).

La catégorie des **groupes cibles** reprend les établissements accueillants les publics vulnérables [9]. Cela comprend les écoles, les milieux d'accueil de la petite enfance, les hôpitaux et les maisons de repos et de soins. Ces établissements sont inclus dans l'analyse de vulnérabilité aux vagues de chaleur développée en Flandre (Hooyberghs 2018).

Les facteurs sociaux et socio-économiques influencent la capacité d'adaptation et à faire face à un aléa. La capacité d'adaptation peut être scindée en la capacité à se **préparer** aux changements, la capacité de **réponse** au moment de la crise et la capacité de **récupération** une fois la crise passée. Ces différentes composantes n'ont cependant pas la même importance en fonction de l'aléa considéré. La capacité de récupération est essentielle dans le cas des inondations qui, au contraire des vagues de chaleur, laissent des dommages à long terme sur les infrastructures et les logements (Karmierczak 2015).

En cas de crise, avoir un bon **réseau social** facilitant l'accès à l'information et à l'aide est déterminant. Ainsi, l'isolement social augmente la vulnérabilité. Les personnes vivant seules, surtout lorsqu'elles sont âgées, en mauvaise santé ou en situation de dépendance, sont plus vulnérables (De Ridder et al 2020). De même, les quartiers présentant une croissance rapide de population ou un renouvellement régulier des habitants, par exemple avec une proportion élevée de locataires ou d'étudiants, sont aussi plus vulnérables en raison d'un tissu social réduit et d'une moins bonne connaissance des conditions locales (Karmierczak 2015, Krunoslav et al 2017). Être locataire de son logement peut représenter un obstacle concernant la mise en adéquation de celui-ci par rapport à de potentielles inondations (Karmierczak 2015). La capacité de comprendre l'information et de réagir à celle-ci influence aussi la vulnérabilité sociale (Karmierczak 2015). Les personnes ayant une moins bonne maîtrise de la langue, telles que les personnes d'origine étrangère, les migrants ou les touristes ont un accès à l'information réduit, ce qui diminue leur capacité à se préparer et à réagir en cas de crise. Dans le cas des personnes SDF, leur vulnérabilité est multiple, elles ont de mauvaises conditions de vie et n'ont pas accès à l'information, aux infrastructures ou en encore aux soins de santé (Van de Vel et al 2021, Vanderplanken et al 2019).

Les différences **socio-économiques** sont complexes et induisent des différences de vulnérabilité au sein de la population. Le niveau socio-économique est lié à de multiples aspects de la vie quotidienne des personnes tels que le type et la qualité du logement, le type et le secteur d'activité professionnelle, le type de loisir, le mode de déplacement (Bacheley 2021). Les différences socio-économiques sont aussi liées à des inégalités de santé, notamment au travers de l'espérance de vie en bonne santé ou de la mortalité infantile (Sciensano 2022, Missinne et al 2019). Le revenu influence directement la capacité financière à préparer son logement aux vagues de chaleur ou à réparer des dégâts dus aux inondations. De plus, le niveau d'exposition aux aléas varie en fonction du lieu de résidence, qui est lui-même fonction du statut socio-économique (Deguen et al 2023). Des projections, réalisées au Royaume-Uni, estiment que le changement climatique augmenterait le coût de la vie. Les personnes en situation de défaveur socio-économique seraient alors plus affectées par ces potentielles augmentations (De Ridder et al 2020).

L'**environnement** dans lequel les populations évoluent influence leur vulnérabilité. En cas de fortes chaleurs, le bien-être des personnes dépend de l'accessibilité aux endroits plus frais. Toutes les études consultées mentionnent que la qualité du logement influence la vulnérabilité, tant au niveau de l'isolation thermique que de la ventilation. En cas d'inondations, la préparation du logement afin de le rendre plus résilient est essentielle. Les caractéristiques physiques des quartiers dans lesquels les

populations évoluent influencent les effets ressentis du changement climatique. Le degré d'urbanisation, et notamment la présence de surfaces imperméables, diminuent la capacité d'infiltration en cas de forte pluie et augmentent l'îlot de chaleur urbain⁵ (De Ridder et al 2020). En cas de vagues de chaleur, la présence de végétation ou d'étendue d'eau, i.e. la trame bleue et verte, fournit un effet rafraichissant. Cependant, De Ridder et al., 2020 montrent que les quartiers densément peuplés de la ville de Gand, avec peu de végétation, abritent une population défavorisée. L'étude remarque que les quartiers des villes où les aléas sont accrus sont aussi ceux où habitent des populations en défaveur socio-économique, qui sont plus vulnérables et moins à même de faire face aux effets du changement climatique. Ce constat est vrai pour d'autres villes belges et européennes (De Ridder et al 2020, Deguen et al 2023).

L'**accès aux services médicaux** influence aussi la vulnérabilité. Les personnes plus éloignées des services de soins sont plus vulnérables en cas d'urgence médicale liée ou survenant durant une crise climatique (Krunoslav et al 2017).

Parmi les facteurs de vulnérabilité identifiés, certains sont spécifiques à l'aléa d'**inondation**. La prise d'une assurance a un impact non négligeable sur la capacité de récupération après la catastrophe. Le taux de criminalité pourrait influencer la volonté des personnes à évacuer leur logement et abandonner leur possession sur place (Kazmierczak 2015).

La catégorie de facteurs relatifs à la **capacité de mobilité** concerne les différents aspects pouvant ralentir le processus d'évacuation en cas de crise. Le mode de déplacement, ainsi que l'accès à une voiture personnelle, influencent la vulnérabilité. Les personnes dont le mode de transport est incertain ou ayant uniquement accès à des transports en commun peu fréquents auront plus de difficulté à évacuer. Des ménages de grande taille, ainsi que des logements surpeuplés, compliquent le processus d'évacuation (Kazmierczak 2015). L'accessibilité de la zone pour l'évacuation mais aussi pour l'acheminement des secours influence aussi la vulnérabilité durant la crise (Krunoslav et al 2017).

Ainsi, il apparaît que la vulnérabilité sociale des populations ne relève pas uniquement de déterminants individuels ou de la privation matérielle mais englobe bien une gamme étendue de facteurs interagissant entre eux (De Ridder et al 2020, Kazmierczak 2015).

Données et ressources disponibles

Plusieurs ressources et données disponibles en lien avec les facteurs identifiés permettent d'approcher la vulnérabilité des populations face au changement climatique en Wallonie, en Belgique et à l'étranger.

Différents indicateurs socio-économiques existants ont été inventoriés dans le cadre du projet **SIGEnSa** (Habran et Remy 2018) afin d'identifier les populations en défaveur sociale en Wallonie :

- Revenu médian par secteur statistique
- Indicateur synthétique de pauvreté par secteur statistique
- Indicateur socio-économique de la politique des grandes villes par secteur statistique
- Indice de discrimination positive par secteur statistique, utilisé pour les écoles par la Fédération Wallonie-Bruxelles
- Indicateur synthétique d'accès aux droits fondamentaux (ISADF) par commune
- Pourcentage des bénéficiaires de l'intervention majorée (BIM) par commune ou quartier

Un indicateur synthétique de défaveur sociale (WDep) a également été créé à l'échelle de la commune (Habran et Genin 2021). Par ailleurs, le projet cartographie les populations en Wallonie (résidents et lieux accueillant des publics vulnérables - écoles, crèches, hôpitaux, maisons de repos et de soins -) au travers d'applications web permettant de visualiser et de dénombrer les populations ou établissements dans une zone d'intérêt.

⁵ Le phénomène d'îlot de chaleur urbain est décrit en détail dans le chapitre "Villes - Risques liés à l'exposition de la population à l'ICU".

Le projet “**Adapte ta commune**” présente les vulnérabilités du territoire wallon au changement climatique à travers 8 thématiques. Pour les thématiques inondation et chaleur, les personnes exposées au risque ont été comptabilisées, ainsi que les lieux accueillants les publics vulnérables.

Plusieurs variables liées à la vulnérabilité sociale (incapacité de travail, personnes bénéficiant d’un revenu de remplacement, prévalence de certaines maladies) sont également disponibles sur l’atlas de l’**agence intermutualiste (AIM)** de Belgique. Tandis qu’un indicateur synthétique lié à la qualité du logement « Housing deprivation Index » a été construit sur l’ensemble de la Belgique dans le cadre du projet **ELLIS**.

Critique

Bien que la plupart des ressources consultées abordent l’aléa posé par les vagues de chaleur, seuls quatre sources traitent explicitement l’aléa d’inondation. Afin de prendre en compte la spécificité liée à l’aléa d’inondation, une catégorie spécifique a été ajoutée dans le Tableau 2. Ainsi, malgré que certains facteurs ne soient cités que par un nombre restreint de ressources, ils ont une pertinence dans la planification par rapport aux inondations.

La vulnérabilité de l’environnement bâti (tel que la qualité des logements, la taille de ceux-ci, le nombre d’étage en cas d’inondation, la qualité du réseau routier et de l’infrastructure de transport en cas d’évacuation et pour acheminer les secours) ainsi que l’accessibilité physique du lieu influencent aussi la vulnérabilité des communautés en cas de crise (Krunoslav et al 2017). Bien qu’essentiels, ces points ne seront pas couverts dans ce chapitre sur la vulnérabilité des populations. Ils seront en partie abordés dans les chapitres “Vulnérabilité du logement vis-à-vis des vagues de chaleur” et “Vulnérabilité urbaine aux inondations”.

De plus, la résilience des communautés dépend aussi de la capacité de celles-ci à se mobiliser en cas de catastrophe. Ce “capital social” englobe le sens de communauté, l’attachement à un endroit, l’engagement citoyen et le soutien social perçu (Krunoslav et al 2017). Ces aspects étant difficilement mesurables, ils n’ont pas été repris dans le Tableau 2.

La vulnérabilité est fondamentalement dynamique et varie avec le temps et l’espace (Jurgilevich et al 2017). Cependant, dans tous les documents consultés, les données démographiques et socio-économiques utilisées sont statiques afin d’éviter de faire des projections incertaines quant à la démographie future (De Ridder et al 2020, Hooyberghs 2018).

1.3. **Méthodologie d’analyse de vulnérabilité**

Approche générale

L’approche méthodologique consistera à développer un ou plusieurs indices de vulnérabilité sociale spatialement explicites et qui pourront être visualisés dans la plateforme interactive qui sera développée. Selon le GIEC, un tel indice de vulnérabilité est obtenu en combinant, avec ou sans pondération, plusieurs facteurs représentant la vulnérabilité des populations (IPCC 2022). Pour cela, bien qu’il existe une large gamme de facteurs pouvant être exploités (Tableau 2), la méthode utilisée afin de calculer les indices de vulnérabilité reste similaire à travers les différentes études (Krunoslav et al 2017). L’approche méthodologique sera basée sur les méthodes proposées dans les études (Kazmierczak 2015, Hooyberghs 2018, VM 2018, Habran et al 2020) qui consistent à développer un indice composite sans pondération. L’analyse de vulnérabilité réalisée dans (Kazmierczak 2015) a développé plusieurs indices de vulnérabilité en fonction des aléas considérés, les vagues de chaleur et les inondations. De même, l’analyse des facteurs de vulnérabilité (Tableau 2) a montré que les facteurs considérés étaient différenciés en fonction de l’aléa, avec notamment des facteurs spécifiques pour l’aléa d’inondation. Dans ce projet, un ou plusieurs indices de vulnérabilité sociale des populations seront développés en fonction des données disponibles et des besoins identifiés dans les autres thématiques du projet. Ces indices de vulnérabilités pourront ensuite être utilisés dans le calcul des zones à risque et des zones d’intervention prioritaires liés aux autres thématiques, notamment dans les

sous-chapitres Villes « Vulnérabilité du logement vis-à-vis des vagues de chaleur », « Vulnérabilité urbaine aux inondations », « Risques liés à l'exposition de la population à l'ICU ».

Collecte des données disponibles

La première étape consistera à faire un inventaire complet des données disponibles à l'échelle de la Wallonie et qui correspondent aux facteurs de vulnérabilité recensés (Tableau 2). L'étude (De Ridder et al 2020) souligne qu'en Belgique, les données socio-économiques et démographiques sont souvent uniquement disponibles à l'échelle communale, ce qui ne permet pas de réaliser des analyses fines. La qualité de l'analyse ainsi que sa résolution spatiale dépendront des données obtenues. La priorité sera axée sur la collecte de données récentes à l'échelle du secteur statistique, ou plus fine lorsque disponible. Spécifiquement, la résolution spatiale des données de population conditionnera le succès de l'analyse.

Prétraitement des données

Les données collectées seront prétraitées afin de s'assurer de leur qualité et de leur homogénéité sur la Wallonie. Les données seront ensuite standardisées afin de permettre leur utilisation simultanée dans un indice de vulnérabilité composite (Hooyberghs 2018, Karmierczak 2015). Pour les données à caractère confidentiel, une attention particulière sera portée au traitement afin de respecter la vie privée en les agrégeant.

Calcul des indices de vulnérabilité des populations

Les différentes données standardisées ainsi obtenues seront combinées afin d'obtenir un ou plusieurs indices de vulnérabilité.

Indicateurs et zones à risque

Le ou les indices de vulnérabilité obtenus seront visualisables sur la plateforme de visualisation en ligne. Les données sources, en fonction de leur degré de confidentialité, pourraient aussi être visualisables, à l'image de ce qui est fait sur le Klimaateffectatlas des Pays-Bas. L'indice de vulnérabilité sera ensuite combiné avec les cartes d'aléas développés dans les autres thématiques afin de développer des cartes de risque intégrant la vulnérabilité des populations. Afin d'illustrer ce processus pour l'aléas d'inondation, la figure 1 montre pour la ville de Helsinki 1) la carte de l'indice de vulnérabilité sociale aux inondations et 2) la carte de risque d'inondation pour la population. Cette deuxième carte a été obtenue en combinant la première carte avec la carte d'aléas d'inondation (non présentée).

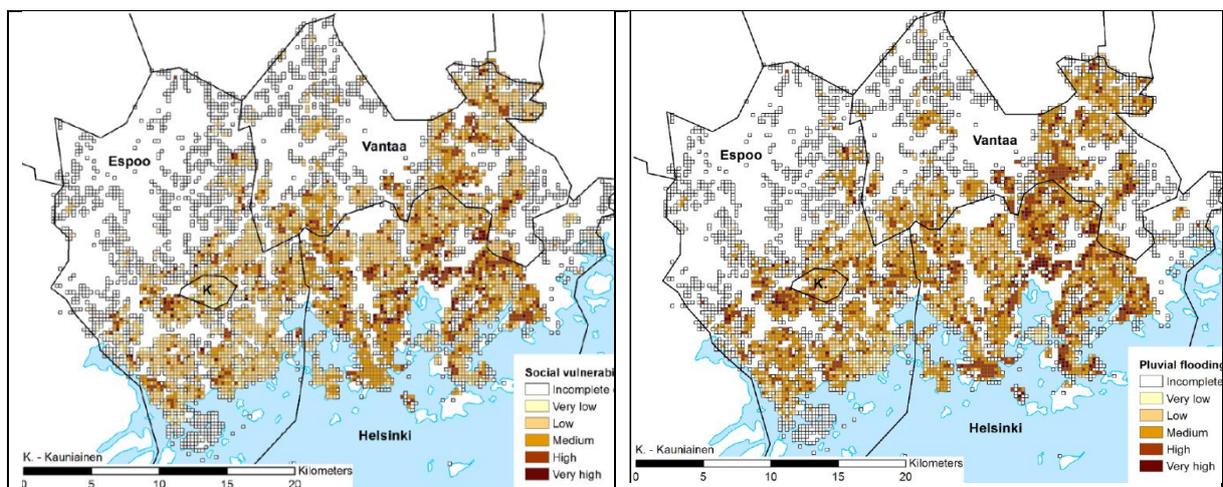


Figure 13. Ville de Helsinki (250 x 250 m). Gauche – Carte de vulnérabilité sociale des populations à l'aléa d'inondation. Droite – Carte de risque d'inondation. Source : (Karmierczak 2015)



L'approche prévue se concentrera sur l'aspect géographique de la vulnérabilité sociale et se basera sur des données actuelles. Les impacts inégalement répartis du changement climatique sur le budget des ménages ou les secteurs économiques et l'emploi ne seront pas abordés dans ce chapitre.

Données

La disponibilité des données, leur qualité ainsi que leur obtention dans un délai raisonnable seront des caractéristiques limitantes à la poursuite de cette analyse.

Les données exactes qui seront nécessaires pour développer un indice de vulnérabilité n'ont pas encore toutes été identifiées précisément et le seront durant la phase de collecte des données. Les fournisseurs potentiels de données préalablement identifiés sont StatBel, et notamment les recensements belges (Census), IWEPS, Registre national des personnes physiques du SPF intérieur, WalOnMap, Projet SIGEnSA (Habran et Remy 2018) et l'Atlas intermutualiste.

L'obtention des données de population récentes à échelle fine, i.e. par ha ou au point adresse, conditionnera la qualité des analyses et l'inclusion de certains facteurs de vulnérabilité dans les indices de vulnérabilités obtenus.

D'autres données, à notre connaissance, actuellement manquantes à l'échelle de la Wallonie, pourraient venir nourrir ce type d'analyse si elles étaient rendues disponibles à l'avenir. C'est notamment le cas de la carte de la distance aux îlots de fraîcheur du Klimaateffectatlas néerlandais, de la carte de la végétation arborée et non arborée obtenue lors du Plan canopée de la Ville de Liège (Beaumont et al 2022), ou encore de la disponibilité des données à 250 m pour la ville de Helsinki (Karmierczak 2015).

Liens thématiques

Des liens ont été identifiés avec les thématiques internes au projet suivantes :

- Villes :
 - o Vulnérabilité du logement vis-à-vis des vagues de chaleur,
 - o Vulnérabilité urbaine aux inondations,
 - o Risques liés à l'exposition de la population à l'ICU
- Santé
- Economique : impact du changement climatique sur les différents secteurs d'activité et l'emploi.

Des liens ont aussi été identifiés avec des projets existants, notamment le projet SIGEnSa (Habran et Remy 2018), Troisième Plan d'Action National Environnement-Santé (NEHAP3, 2023-2029, fiche 3) et le plan wallon environnement-santé et le projet ELLIS.

1.4. Mesures d'adaptation

Les mesures d'adaptation ciblant spécifiquement les populations vulnérables ne sont pas largement abordées dans la littérature consultée. Les informations trouvées mentionnent cependant les concepts de « résilience juste » (just resilience en anglais). La résilience juste ainsi que de « ne laisser personne de côté » (leaving no one behind) sont au centre des politiques européennes d'adaptation au changement climatique telles que le Green Deal européen et la stratégie d'adaptation de l'EU (Climate ADAPT). La juste résilience doit faire en sorte que les mesures d'adaptation mises en place ne créent ou n'augmentent pas la vulnérabilité au sein des groupes vulnérables. Ces groupes disposent en effet de moins de ressources afin de faire entendre leur voix dans le débat public. Il est cependant essentiel que leurs besoins soient entendus lors du choix des mesures d'adaptation au risque que ces mesures ne bénéficient qu'à des groupes plus avantagés socio économiquement. En particulier, lorsque les politiques d'adaptation ont comme conséquences de créer de nouveaux risques ou d'augmenter la vulnérabilité, on parle de « mal adaptation » (Breil et al 2021). Il apparaît donc nécessaire que dans tous



projet d'adaptation les besoins spécifiques des populations vulnérables soient entendus et pris en compte.

En ce qui concerne les plans d'urgence, les plans vagues de chaleur de 15 pays européens, dont la Belgique, ont été synthétisés dans le SCORCH project (Vanderplanken et al 2019). Le plan ozones et fortes chaleurs mentionne plusieurs mesures que la population peut adopter afin de se protéger lors des vagues de chaleur. En cas d'inondation, les citoyens enregistrés sur BE Alert reçoivent des informations concernant les risques et les comportements à adopter.

En France, une note concernant les pistes d'actions propose de modifier le fonctionnement des registres municipaux afin de rendre possible le signalement de personnes vulnérables à la municipalité (Santé Publique France – Canicule et Santé).

Chapitre 6) Economique

1.1. Introduction

Le changement climatique et les événements météorologiques extrêmes qui y sont associés pourraient sérieusement affecter l'économie wallonne. Deux types de risques directs sont identifiés : les **risques de transition** (principalement ceux liés à la conversion vers une production et des opérations à faibles émissions de gaz à effet de serre) et l'exposition aux **risques climatiques physiques** (De Ridder *et al.*, 2020) tels que la **hausse tendancielle des températures** et les **vagues de chaleur**, les catastrophes naturelles, comme les **inondations** et les **tempêtes**, et les épisodes de **sécheresse**. Le tissu économique présente également la particularité d'être vulnérable à une multitude de risques indirects pouvant causer des dommages à l'économie globale en plus du seul coût sectoriel (ETUC, 2020). Ces mécanismes peuvent être renforcés par différents facteurs de risque, en particulier la **localisation du tissu économique local**, que ce soient des industries, des PME qui constituent l'essentiel du paysage économique wallon ou du commerce de détail.

La figure suivante rassemble tous les éléments principaux dans le cadre du concept de chaînes d'impacts.

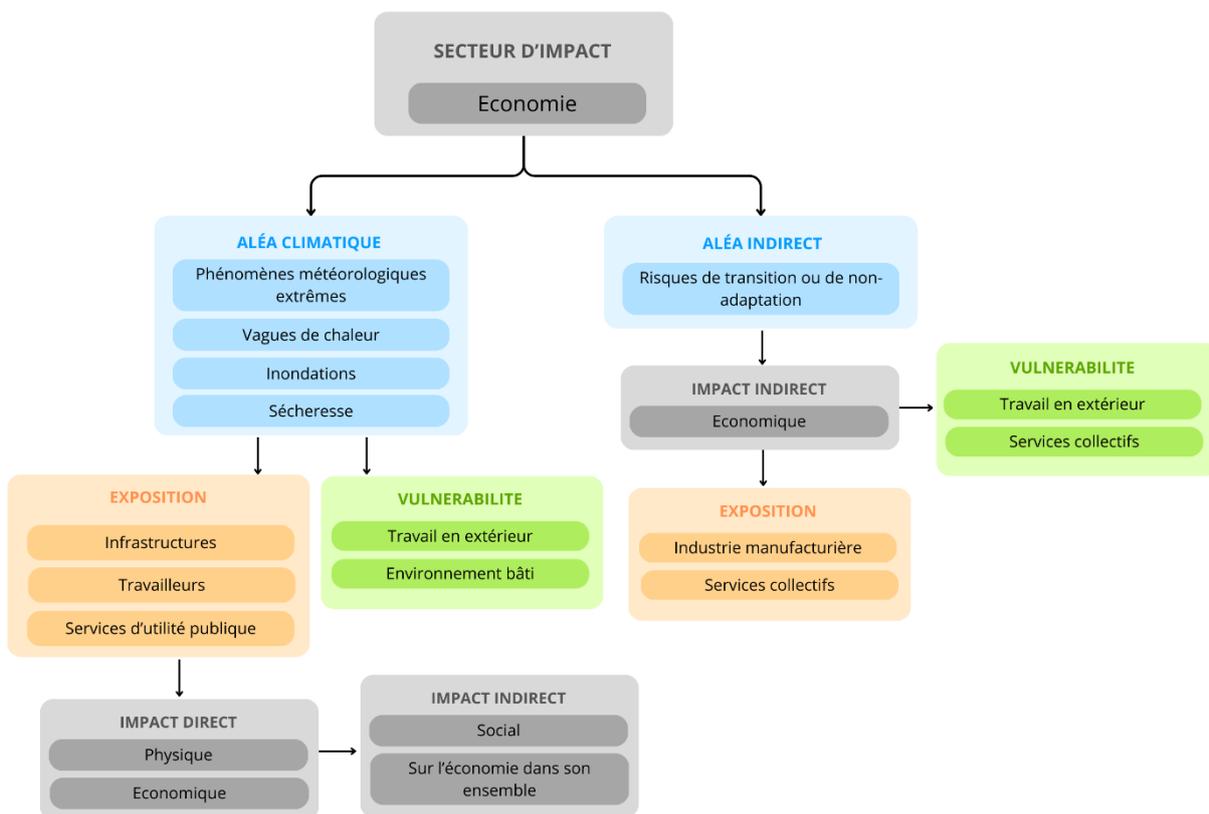


Figure 14 – chaînes d'impacts pour le chapitre 6 - Economique

1.2. Etat des lieux

Les « ressources existantes » en Wallonie listées dans l'annexe 4 du cahier des charges et relevant de la thématique économique sont limitées à l'IWEPS tandis que les « attentes spécifiques » sont l'impact sur l'emploi et l'impact sur les différents secteurs d'activité. La liste d'outils proposée ci-dessous découle d'une revue de la littérature. Les références retenues sont principalement des articles internationaux.

Référence	Sujet
(De Ridder et al., 2020)	Évaluation de l'impact socio-économique du CC en Belgique
(ETUC, 2020)	Adaptation au changement climatique et monde du travail en Europe
(ICEDD, 2014)	Évaluation des coûts de l'inaction face au changement climatique en Wallonie
(IPCC, 2014)	Impact, adaptation et vulnérabilité au CC : aspects mondiaux et sectoriels
(Banque de France, 2022)	Adaptation des économies au changement climatique en France
(CERDD, 2020)	Adaptation au changement climatique : les entreprises françaises en action
(Lauwaet et al., 2020)	Évaluer du confort thermique extérieur dans les agglomérations urbaines
(ADEME, 2020)	Diagnostic des impacts du changement climatique sur une entreprise
(EPE et ONERC, 2014)	Les entreprises française et l'adaptation au changement climatique

Synthèse

L'évaluation des coûts liés aux **risques de transition ou de non-adaptation** des entreprises aux conséquences du changement climatique est un problème délicat et difficile à mesurer précisément vu l'incertitude associée aux résultats (ICEDD, 2014). La Commission européenne a estimé en 2012 que les coûts de la non-adaptation au changement climatique pourraient varier entre 100 milliards d'euros par an en 2020 et 250 milliards d'euros par an en 2050 pour l'ensemble des pays de l'Union européenne (ETUC, 2020). L'industrie manufacturière et les services collectifs sont les secteurs qui pourraient perdre le plus d'emplois en Europe si aucune mesure d'adaptation n'est mise en œuvre (Triple E Consulting, 2014). Cette situation s'explique par les impacts négatifs du changement climatique sur la demande de certains secteurs, mais aussi par une perte de productivité plus importante par rapport aux autres secteurs (ETUC, 2020), ou encore une réduction des revenus due à la baisse des ventes suite à la modification des comportements de consommation (De Ridder et al., 2020).

En ce qui concerne les risques physiques, trois catégories de stress lié au changement climatique menacent majoritairement les entreprises wallonnes : les vagues de chaleur, les inondations, et la sécheresse.

La hausse tendancielle des températures et les vagues de chaleur, plus fréquentes, affectent l'offre de travail et la productivité (Banque de France, 2022). Les températures plus élevées annoncées en raison du changement climatique représentent un risque sérieux pour la santé et la sécurité des travailleurs. De nombreuses études ont montré que la productivité du travail commence à diminuer au-dessus d'un seuil de température d'environ 25 °C (Zivin et Neidell, 2014). De nombreux secteurs pourraient ainsi souffrir d'une perte de productivité (Lauwaet et al., 2020).

Le secteur secondaire (industrie, énergie, construction) représente 22 % de l'emploi régional (ONSS, 2020) (INASTI, 2020). La majorité des employés et indépendants du secteur de la construction travaillent à l'extérieur et peuvent souffrir de stress thermique, de la sécheresse, de vertiges ou même s'effondrer si leur température corporelle dépasse 39 °C. L'environnement bâti se heurte également à un souci croissant de surchauffe lorsqu'il est exposé à des températures en hausse et à une chaleur extrême ; un phénomène problématique pour le matériau de construction, mais surtout préjudiciable au confort et à la santé des travailleurs actifs à l'intérieur ou dans des environnements chauds. En pratique, les endroits les plus exposés par de tels dangers sont les serres, les boulangeries, les usines de fabrication, les entrepôts et les fonderies (ETUC, 2020).

Les catastrophes naturelles, comme les inondations et les tempêtes, sont quant à elles susceptibles d'affecter les entreprises à travers le facteur capital (Banque de France, 2022). Les inondations

constituent, après les tremblements de terre, l'un des types de catastrophes les plus coûteux, principalement lorsqu'elles se produisent dans des zones urbanisées (ETUC, 2020). C'est généralement le secteur industriel qui subit les dommages les plus importants. Pour la Wallonie, cela est important, étant donné la présence, toujours structurante, des industries métallurgiques dans le sud du Pays (De Ridder et al., 2020). Les entreprises touchées par des événements météorologiques extrêmes peuvent être obligées à arrêter définitivement ou temporairement leur production, à déménager ou à rénover leurs installations (ETUC, 2020). Les infrastructures, les bâtiments et les machines sont particulièrement vulnérables compte tenu de leur longue durée de vie et de leur coût initial élevé (De Ridder et al., 2020), mais également en raison de leur conception (faible résistance aux tempêtes) ou de leur emplacement en zone inondable ou sujet à des glissements de terrain (ETUC, 2020).

De nombreuses villes wallonnes ont été construites le long d'une rivière, et ces rivières réagiront aux fortes précipitations par des crues extrêmes, menaçant les vallées, où se sont installées historiquement les industries manufacturières. Ces situations peuvent avoir des conséquences dramatiques pour l'économie, car elles affectent notamment le tissu économique local, l'industrie, le commerce de détail et les PME (ETUC, 2020). Il est également à noter que la Wallonie abrite un certain nombre de grandes entreprises qui, par leur taille, leurs activités et les risques qui y sont liés, doivent faire l'objet d'une attention particulière. C'est notamment le cas des établissements relevant de la Directive européenne relative aux émissions industrielles (IED) tels que les industries d'activités énergétiques, de production et transformation de métaux, les industries minérales, chimiques, de gestion des déchets mais aussi les activités liées à l'élevage et au traitement des produits d'origine animale et végétale. C'est également le cas des établissements relevant de la directive Seveso, soumis à une réglementation stricte du fait des substances dangereuses présentes sur leurs sites (installations pétrochimiques, raffineries, explosifs, etc.). Une attention particulière sera nécessaire dans la suite de l'étude pour ces types d'entreprises (prise en considération de l'ensemble des parcelles cadastrales concernées et non uniquement l'emprise au sol du bâtiment).

Les épisodes de sécheresse, quant à eux, devraient affecter significativement les services d'utilité publique, tels que les fournisseurs d'énergie et d'eau ou les unités de gestion des déchets. L'approvisionnement en énergie pourrait être réduit ou connaître des risques de black-out suite au manque d'eau de refroidissement servant à la production d'électricité, contraignant les entreprises à adapter leur consommation d'énergie et/ou à augmenter leurs coûts. Les centrales nucléaires, par exemple, ont besoin de grandes quantités d'eau pour refroidir et leur refroidissement provoque une hausse de la température des rivières (ETUC, 2020). Or, la production électrique reste très largement dépendante de l'énergie nucléaire en Wallonie. Les centrales risquent donc d'exercer une pression supplémentaire sur les rivières dont les débits diminuent. Les entreprises mentionnent, pour leur part, les impacts suivants, par ordre d'importance : baisse des revenus due à une diminution de la production qui peut être liée à des difficultés de transport ou de chaîne d'approvisionnement; augmentation des coûts d'exploitation, par exemple, à la suite d'un approvisionnement en eau inadéquat ; et réduction des revenus due à la baisse des ventes (De Ridder et al., 2020).

Les sécheresses (étiage) peuvent également gravement perturber les services de navigation intérieure du secteur de la logistique en réduisant les niveaux d'eau au point de contraindre les navires à diminuer la charge transportée, ou au point de rendre la navigation impossible (ETUC, 2020). Dès lors, en cas de pénurie d'eau, on s'attend à ce que les ménages, l'industrie, les data centers, la distribution d'eau, le tourisme, les producteurs d'électricité, l'agriculture et la nature se livrent une concurrence féroce pour accéder à des ressources en eau devenues limitées. Surtout qu'il n'existe pas, à l'heure actuelle, de lignes directrices claires en cas de crise.

Le tissu économique présente également la particularité d'être vulnérable à une multitude de **risques indirects pouvant se répercuter au-delà d'un secteur**, et causer des dommages à l'économie globale en

plus du seul coût des dommages sectoriels (ETUC, 2020). En effet, la chaîne de valeur des entreprises peut concerner une multitude de secteurs, allant de l'agriculture au transport (routier, maritime, aérien), en passant par l'énergie, les infrastructures et l'eau, entre autres. Une grande partie de cette vulnérabilité découle également des impacts sectoriels en dehors de l'Europe, la chaîne de valeur d'une entreprise étant souvent mondialisée et donc très étendue (EEA, 2017).

L'emploi en Wallonie est dominé en termes de volume de main-d'œuvre par le secteur des services aux personnes ou non marchands qui représente 45 % de l'emploi régional et continue à croître légèrement. Les services marchands représentent 20 % de la main-d'œuvre et affichent la plus forte croissance. Les commerces et l'HoReCa qui représentent 12 % sont également en légère hausse (ONSS, 2020). Ces secteurs ne sont pas identifiés comme critique vis-à-vis des effets directs du changement climatique mais Triple E consulting (2014) a estimé que les pertes d'emplois les plus nombreuses en Europe devraient intervenir dans les services collectifs, le commerce de détail et les loisirs (environ 100 000 pertes d'emploi d'ici 2050), les services aux entreprises (informatique, services juridiques, gestion des installations, etc.) et les services publics (jusqu'à 90 000 emplois perdus pour les deux secteurs). La structure de l'emploi wallon pourrait donc être fortement impactée. En effet, les effets négatifs sur le secteur primaire (agriculture, sylviculture, pêche, activités minières) provoqueront des effets d'entraînement négatifs extrêmes sur ces secteurs en raison de liens intersectoriels en plus du seul coût des dommages sectoriels (ETUC, 2020). Les études qui ont pris en compte ces effets indirects semblent souvent se heurter à un doublement du coût initial des dommages lorsque leur effet sur l'ensemble de l'économie est pris en compte (De Ridder et al., 2020).

Critique

Même s'il n'existe encore que peu d'études et de recherches concernant les effets du changement climatique sur l'emploi et les secteurs secondaire et tertiaire dans l'Union européenne (ETUC, 2020), l'état des lieux met en évidence combien le changement climatique a d'ores et déjà des impacts importants et non linéaires sur certaines activités économiques (Banque de France, 2022).

En particulier, le secteur de l'industrie et des services a été largement sous-étudié, tandis que le secteur primaire a été bien étudié (IPCC, 2014). Il n'est donc pas prévu de faire une analyse du secteur primaire. Celui-ci est d'ailleurs couvert en partie par les thématiques forêt et agriculture de cette étude. Il ne sera également pas possible de réaliser une estimation des coûts de la non-adaptation aux effets du changement climatique en raison du manque d'informations fiables dans toute l'Europe (EEA, 2017), ni de traiter la question de l'impact indirect sur les chaînes de production et d'approvisionnement. L'impact sur le secteur bancaire et assuranciel ne sera pas non plus analysé.

1.3. Méthodologie d'analyse de vulnérabilité

Approche générale

L'impact du changement climatique sur l'emploi et les différents secteurs d'activités sera étudié au regard des trois stress climatiques identifiés dans l'état des lieux :

1. la hausse tendancielle des températures et les vagues de chaleur ;
2. les inondations ;
3. les épisodes de sécheresse.

Ces trois mécanismes peuvent être renforcés par différents facteurs de risque, en particulier la localisation du tissu économique local, des industries, des PME et du commerce de détail.

Zones à risque

Les indicateurs qui permettront de visualiser les vulnérabilités sont l'évolution du nombre d'emplois et d'entreprises (ONSS & INASTI), le chiffre d'affaires par secteur d'activité (Belfirst), la localisation des établissements inscrits à la Banque-Carrefour des Entreprises (BCE) ainsi que leur emprise au sol.

L'identification des zones à risques sur le territoire résulteront de l'analyse de la localisation des établissements inscrits à la BCE croisée avec les zones à risque proposées dans le cadre des thématiques îlots de chaleur urbain et inondations.

Données

Les données économiques devront être collectées à l'échelle de la Wallonie. Il est à noter que la problématique de l'accès aux données et leur fiabilité (Belfirst et BCE) peuvent limiter grandement les traitements réalisables.

Liens thématiques

L'aspect économique est transversal à toutes les autres thématiques. En particulier l'agriculture, les forêts, la santé et le tourisme mais aussi à celle des villes, des infrastructures et de l'énergie.

1.4. Mesures d'adaptation

Les mesures d'adaptation au changement climatique à l'échelle d'une entreprise peuvent être subdivisées en deux catégories : d'une part, les mesures **organisationnelles** via le renforcement des capacités d'adaptation, et d'autre part, les mesures **structurelles** via la mise en place d'investissements adaptés (EPE et ONERC, 2014).

Ces mesures permettent de préparer une entreprise à poursuivre la fourniture de ses produits et services, même en cas d'événements climatiques perturbateurs. La démarche d'adaptation se déroule en deux phases :

- 1) un diagnostic de la vulnérabilité climatique de l'entreprise, liée à la transition ainsi qu'au risque physique potentiels sur les actifs et la chaîne d'approvisionnement ;
- 2) une mise en œuvre de stratégies visant à renforcer la résilience et à assurer la continuité des activités (De Ridder et al., 2020).

À cet égard, ADEME (2020) a identifié un ensemble de méthodes et d'outils internationaux à disposition des entreprises pour les appuyer dans la réalisation de leur diagnostic, tels que l'outil « www.climability.eu » développé par la CCI d'Alsace qui permet de poser les bases d'un diagnostic et de prendre conscience des risques (CERDD, 2020) ou la norme ISO 14090 publiée en 2019 par l'organisme international de normalisation qui se concentrent sur la vulnérabilité, les impacts et l'évaluation des risques (ISO, 2018). Ces outils sont très intéressants pour structurer les démarches d'adaptation, depuis la phase de diagnostic jusqu'au suivi-évaluation, en passant par les processus décisionnels et le passage à l'action (CERDD, 2020). Rappelons également l'entrée en vigueur, en janvier 2023, de la directive européenne « Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) » relative à la publication d'informations en matière de durabilité par les entreprises qui devra être transposée avant juillet 2024 par les états. Elle s'inscrit dans la stratégie générale de l'Union européenne vers une transition durable (le « Green Deal ») à travers la mise en exergue de leur responsabilité environnementale. Mais elle pourrait également permettre d'identifier l'exposition aux risques climatiques.

L'adaptation a également des effets positifs sur l'économie et l'emploi. En effet, elle contribue à préserver les emplois en maintenant la viabilité et la résilience des entreprises. En outre, de nombreuses mesures d'adaptation nécessiteront des investissements substantiels qui, à leur tour, peuvent stimuler la demande de main-d'œuvre et encourager la demande de nouveaux types de biens et de



services¹⁰⁶ et ainsi créer de nouveaux débouchés commerciaux¹⁰⁶ ETUC, 2020HYPERLINK
"https://www.icedd.be/"ht

Chapitre 7) Villes

Ce chapitre est un peu particulier dans la mesure où il reprend de nombreux risques climatiques considérés dans les autres chapitres, mais dans le contexte spécifique des zones fortement urbanisées.

Les attentes formulées dans le domaine « villes » correspondaient à des approches méthodologiques d'analyse de risque diversifiées. Il est donc divisé en 6 sous-chapitres :

1. Arbres
2. Pollution de l'air
3. Îlots de chaleur urbains
4. Le logement urbain face aux vagues de chaleur
5. Le logement urbain face aux inondations
6. Incendies en milieu urbain

1.1. Arbres

1. Introduction

La végétalisation des espaces urbains, en particulier par des arbres, offre de nombreux services écosystémiques de régulation, d'approvisionnement et culturels (Aubry et al 2019, Pretzsch et al 2015, Ferrini et al 2020, Rötzer et al 2021). En particulier pour ce marché, nous mettons en évidence son rôle dans l'atténuation des îlots de chaleur urbains (ICU) (Gillner et al 2015), dans la séquestration du carbone (Nowak et al 2002), l'amélioration de la qualité de l'air (Nowak et al 2006), la régulation des eaux fluviales et l'atténuation des risques naturels (Aubry et al 2019, Dury et al 2023, Xiao et McPherson 2002). De plus, la végétation urbaine joue un rôle de soutien à la biodiversité en participant au réseau écologique et en servant de corridors de migration (Dury et al 2023). Dans le cadre du réchauffement climatique mondial, les zones urbanisées deviennent également les principaux corridors de migration pour de nombreuses espèces animales et végétales.

Cependant, la ville pose des défis particuliers pour les arbres : sols déstructurés et tassés, disponibilité réduite d'eau, faible humidité, chaleur plus intense, grande diversité d'habitats allant des parcs aux canyons urbains (Aubry et al 2019). Les évolutions climatiques prévues, couplées à l'effet des ICU, accentuent le stress sur les arbres. Dès lors, le choix des essences à planter en milieu urbain doit concilier les exigences bioclimatiques des essences, la configuration urbaine, les objectifs de service et les projections climatiques, afin de garantir la prospérité des arbres urbains et les services qu'ils peuvent rendre aux hommes et à la nature.

Afin de répondre à la question posée par le marché, ce rapport dresse un premier inventaire des ressources disponibles en Belgique et dans les pays proches au climat similaire au nôtre. Une proposition méthodologique est dérivée de l'analyse critique de cet inventaire.

Ce sous-chapitre est directement lié aux volets ICU (atténuation), nature et biodiversité, et services écosystémiques.

1. Etat des lieux

Synthèse

Un premier inventaire des ressources disponibles en Belgique et dans les pays proches met en évidence l'existence de nombreuses études menées sur le sujet. Le Tableau 1 recense ainsi 15 études récentes. Pour chacune, le Tableau met en évidence la portée géographique de l'étude (pays, région, focus urbain ou non), le nombre d'essences et les critères évalués par les auteurs. Cet état des lieux recense 5 études wallonnes, 2 flamandes, 2 bruxelloises, 2 françaises, 1 luxembourgeoise, 1 allemande, 1 néerlandaise et 1 britannique.

Les résultats présentés dans les études recensées ont été produits presque exclusivement sur base d'une revue de littérature, souvent avec consolidation d'experts, parfois avec retours d'expérience de terrain. L'analyse met aussi en évidence la liste variable d'espèces/variétés étudiées (de 8 à 282) et des critères évalués par chaque étude. En particulier, les critères bioclimatiques ne sont pas développés dans chaque inventaire. Seuls les fichiers écologiques des essences du SPW (SPW, 2023) et du Grand Duché du Luxembourg (Gouv. Grand Duché de Luxembourg, 2023) fournissent une information quantitative sur ces critères, là où les autres études s'appuient essentiellement sur des critères qualitatifs (e.g. peu-moyennement-très sensible, échelles numériques, description textuelle).

Certaines études présentent un inventaire d'arbres adaptés au changement climatique. Elles ne justifient toutefois pas les critères d'adaptabilité utilisés pour réaliser cette sélection. L'écartement de certaines espèces des inventaires n'est ainsi que rarement justifié. L'étude réalisée dans le cadre du projet CESAME est la plus détaillée sur cet aspect, écartant plus de 130 espèces sur 218 étudiées sur base de 6 critères d'exclusion : caractère invasif, sensibilité aux maladies/pathogènes, contexte pédoclimatique, fragilité climatique, balance non-favorable dans les services écosystémiques et faible intérêt pour les services en milieu urbain (Aubry et al 2019). Enfin, soulignons la publication du "Guide de l'arbre urbain" par la Ville de Liège en 2023 qui propose un guide de plantation, d'entretien et préservation des arbres en milieu urbain (Ville de Liège 2023b). L'annexe 1 de ce guide liste 195 essences recommandées classées en 3 catégories en vue d'une diversification du patrimoine arboré de la Ville de Liège.

Tableau 1 – Principales références étudiées.

Nom de l'étude	Pays, Région, Urbain/ Non-urbain	Nombre espèces/ variétés	Critères évalués par l'étude
Fichier écologique des essences Wallonie (SPW 2023)	BE-Wal, Non-urbain	49	Compatibilité bioclimatique (température moyenne, minimale et maximale, précipitations) Compatibilité altitudinale Changement climatique (Précipitation estivale/hivernale, canicule, sécheresse de l'air, gelées tardives, vents forts) Sol (contraintes édaphiques, compacité, niveau hydrique, enracinement) Atouts Limites Aire de distribution Contraintes physiques Ombrage Effets de microclimats topographiques Régénération Services écosystémiques (Biodiversité) Ravageurs et agents pathogènes
Plan Canopée, 2021 (Halford 2021)	BE-Wal, Liège, Urbain	207	Floraison Feuillage Ombrage Sol (nature, sec) Morphologie Services écosystémiques (air, biodiversité, fructification, mellifère)
Guide de l'arbre urbain (Ville de Liège 2023b)	BE-Wal, Liège, Urbain	195	Compatibilité climatique Sensibilité aux agents pathogènes Espèce invasive Diversification
Plan Canopée, (Dury et al 2023)	BE-Wal, Liège, Urbain	22	Services écosystémiques (eau, air, stockage C, biodiversité)
Bemelmans et al 2009	BE-WAL, Non-urbain	8	Sensibilités (Vague de chaleur, xéricité, chablis, maladies et parasites, milieux xériques, réverbération, ombrage) Lumière

Inverde, 2023	BE-FL, Urbain	230	Climat (Rusticité, vent, gelée tardive, lumière) Feuillage Sol (humidité, nature, acidité, compacité) Contraintes physiques Aire de distribution Fructification
Limburg, 2023	BE-FL, Limburg, Urbain	109	Morphologie Sol (nature, pavage) Ombrage Eau Climat (sécheresse, chaleur)
Adaptation du TDAG au territoire Belge. Bruxelles Environnement 2023 ⁶	BE-BXL, Urbain	A définir.	A définir.
Bruxelles Environnement, 2017	BE-BXL, Urbain	35	Morphologie Sol (nature) Floraison Biodiversité Aspects paysagers
Fichier écologique des essences Luxembourg, 2023	Lux, Non-urbain	53	Compatibilité bioclimatique (température moyenne, minimale et maximale, précipitations) Compatibilité altitudinale Changement climatique (Précipitation estivale/hivernale, canicule, sécheresse de l'air, gelées tardives, vents forts) Sol (contraintes édaphiques, compacité, niveau hydrique, enracinement) Atouts Limites Aire de distribution Contraintes physiques Ombrage Effets de microclimats topographiques Régénération Services écosystémiques (Biodiversité) Ravageurs et agents pathogènes
CESAME, (Aubry et al 2019)	France, Metz, Urbain	85	Floraison Feuillage Lumière Chaleur Continental Air sec Sol (pauvre, sec et compaction) Changement climatique Atouts Limites (rusticité, morphologie, résistance) Services écosystémiques (polluants gazeux, particules, biodiversité, climat local, paysage, adaptation) Risque allergique Contraintes physiques
Méthode VECUS, 2023	France, Seine-et-Marne, Urbain	131	Floraison Feuillage Climat (rusticité, chaleur, réverbération, ombrage) Lumière Morphologie Sol (acidité, compacité, niveau hydrique)
GALK, 2023	DE, Urbain	65	Morphologie Rusticité
Hiemstra, 2018	Pays-Bas, Urbain	120	Morphologie Rusticité Sécheresse Sel Précipitation Sol (Nature, Humidité, Sec, Compacité) Services écosystémiques (Biodiversité, Alimentation...)
TDAG, 2023	UK, Urbain	282	Morphologie Ombrage Sècheresse Eau Floraison Fructification Feuillage

Critique

L'analyse critique de ces références met en évidence le niveau variable d'espèces/variétés décrites, la description attributaire hétérogène et la prédominance de critères qualitatifs. Le travail de synthèse / recoupement d'informations entre inventaires sera donc complexe.

De plus, la mise en correspondance entre critères bioclimatiques qualitatifs, tels que présentés dans la plupart des études, et modélisations climatiques quantitatives prévues dans ce marché (indicateurs extraits des modélisations MAR) n'apparaît pas réaliste. L'adaptation des critères bioclimatiques selon les scénarios de réchauffement pourra être réalisée pour une liste restreinte d'espèces, telles que celles reprises dans les fichiers écologiques des essences du SPW et du Grand Duché du Luxembourg, et discutée pour une série d'autres espèces selon le niveau d'information à disposition. Nous attirons

⁶ Plusieurs actions sont en finalisation sur le territoire Bruxellois :

- Adaptation du guide anglais du TDAG sera publié en novembre en FR et NL ;
- Mise-à-jour du portail *renature*, en particulier concernant l'adaptation climatique des arbres fruitiers (projet ARBRES d'Innoviris) ;
- Une fiche dédiée aux arbres d'avenir reprendra aussi une liste d'une quarantaine d'espèces susceptibles de prospérer (d'origine d'Europe du Sud).

également l'attention sur le fait que les deux études quantitatives de fichiers écologiques des essences ne sont pas spécifiques aux milieux urbains et concentrent des essences productives forestières.

L'étude du problème inverse, à savoir l'identification des essences non-adaptées au changement climatique, n'est que partiellement abordée dans les références identifiées au tableau 1. Un retour d'expérience d'experts et d'acteurs gestionnaires des arbres en zone urbaine apparaît indispensable pour consolider un tel listing dans le cadre de ce marché.

Les études soulignent que l'adaptation des stratégies de gestion et de développement de la végétation arborée urbaine ne peut pas uniquement s'appuyer sur le choix d'espèces/variétés adaptées au changement climatique. La reprise et la survie des plantations vont fortement varier selon le contexte local (microclimat, nature du sol, environnement direct) et les caractéristiques/qualité de la plantation et de l'entretien sur le court-moyen-long terme (taille de la fosse, apports, organisation dans l'espace, contraintes et activités autour de la plantation, etc.). Il en sera de même pour les services écosystémiques rendus par les arbres, qui présentent une variabilité forte selon la densité, l'âge, l'état de santé, la répartition dans l'espace, les espèces et variétés en place (Aubry et al 2019, Dury et al 2023, Ville de Liège 2023b).

Outre la prise en compte des aspects bioclimatiques et de contexte local, plusieurs contraintes spécifiques propre au milieu urbain vont également orienter la prise de décision (Aubry et al 2019, Ville de Liège 2023b). Nous pouvons notamment citer les aspects de risque allergique, caractère invasif, branches cassantes, dépôt de miellat, fructification, système racinaire, etc.

Enfin, la stratégie recommandée univoquement dans la littérature est la diversification des espèces plantées. Il n'y aura donc jamais de recommandations vers une et une seule espèce pour un site de plantation particulier, i.e. il faudra toujours privilégier un éventail d'espèces adaptées à une situation donnée (Aubry et al 2019, Ville de Liège 2023b).

2. Méthodologie d'analyse de vulnérabilité

Approche générale

La revue de littérature nous enseigne que le choix des essences à planter en milieu urbain doit concilier les exigences bioclimatiques des essences, la configuration urbaine, les objectifs de service et les projections climatiques. Dans cette optique, notre proposition méthodologique est la suivante :

1. Identification des critères bioclimatiques et non-bioclimatiques à prendre en compte pour orienter le choix des essences à privilégier en milieu urbain ;
2. Identification des essences non compatibles avec les espaces urbains selon des critères non-climatiques tels que ceux utilisé par Aubry et al 2019 : caractère invasif, sensibilité aux maladies/pathogènes, balance non-favorable dans les services écosystémiques, etc. ;
3. Création d'un tableau synthétique recensant pour les essences non-écartées à l'étape 2 les indicateurs théoriques identifiés à l'étape 1, au départ des références listées au Tableau 1 ;
4. Etude de la compatibilité climatique des espèces avec les différents scénarios climatiques modélisés dans le volet 2 de l'étude. Cette étape précisera l'adaptabilité des espèces par l'ajout d'un ou plusieurs attributs au tableau synthétique et sera discutée dans le rapport descriptif joint au tableau.

Notre proposition méthodologique pourra profiter du processus de consultations d'experts externes prévu dans le marché sur 3 aspects :

- Définition des critères d'exclusion pour l'étape 1 ;
- Identification/consolidation des références pertinentes pour le contexte urbain wallon ;
- Co-construction de la liste des espèces non-adaptées au changement climatique (retour de terrain) ;
- Validation et appropriation de l'inventaire synthétique final.

Le présent volet ne débouchera pas sur un livrable cartographique. En effet, la stratégie recommandée univoquement dans la littérature est la diversification des espèces plantées de sorte qu'il n'y aura jamais de recommandations vers une et une seule espèce pour un site de plantation particulier. En outre le choix des sites de plantation doit être défini par les villes selon les objectifs poursuivis et les contraintes de site (présence d'impétrants par exemple). Des recommandations méthodologiques en vue d'identifier les sites prêts à planter seront toutefois formulées sur base des approches adoptées par Liège dans le cadre de son Plan Canopée (Ville de Liège 2023a) ou encore par le métropole de Lyon avec la production d'un calque de plantabilité (Métropole de Lyon 2022).

Les données seront présentées sous forme d'un tableau synthétique accompagné d'un rapport descriptif. Le tableau devrait permettre aux villes de choisir les essences à planter selon les exigences bioclimatiques des essences, les caractéristiques du site de plantation et les objectifs de service visés.

Données

Les données nécessaires sont :

- Résultats des projections climatiques du MAR sur les villes pour les différents scénarios climatiques ;
- Seuils de tolérance bioclimatiques des espèces ligneuses, par l'analyse des références listées au tableau 1 consolidée par le retour expert ;
- Critères non bioclimatiques permettant d'exclure certaines espèces des recommandations de plantation en milieu urbain, par l'analyse des références listées au tableau 1 consolidée par le retour expert.

Les experts visés pour cette thématique sont les gestionnaires des arbres et espaces verts en ville (région, villes et communes), chargés de projet résilience et végétalisation, experts universitaires, etc. Ce retour expert est envisagé par une approche d'enquête en ligne et d'entretiens.

Liens thématiques

Ce volet de l'étude est lié aux volets suivants :

- Services écosystémiques : pondération des services écosystémiques rendus entre espèces (lien entre les inventaires identifiés dans les deux volets) ;
- Nature & Biodiversité : **impact des scénarios de changements climatiques sur la distribution et la viabilité des différents types d'espèces** ;
- Forêts : mise en correspondance des analyses entre espèces forestières et urbaines ;
- Villes – Ilot de chaleur : pour la définition des zones à risques et l'ajustement des scénarios climatiques, pour orienter les stratégies d'atténuation de la chaleur en ville ;
- Santé : services écosystémiques rendus par la végétation.

3. Mesures d'adaptation

Comme développé dans le sous-chapitre des îlots de chaleur urbain, l'adaptation des villes requerra la création d'espace verts, et favorisera ainsi l'implantation de nombreux arbres. Ce besoin sous-tend la nécessité d'identifier précisément quels sont les espèces les plus adéquates. Dans ce cadre, la revue de la littérature et les retours d'expérience permettront de dresser une liste de mesures d'adaptation pertinentes. Parmi ces pistes, pourraient être exploré :

- Intégration au CoDT du besoin de renforcer l'implantation d'arbres ;
- Etablir un cadastre des arbres ;
- Adaptation des plans de plantation actuels et futurs vers des espèces plus résilientes ;

- Développement d'un outil de simulation permettant de simuler l'impact des arbres sur le microclimat urbain et leur fonctionnement (ex. outil LASER.T en France) ou d'un outil modélisant les services écosystémiques des arbres (ex. outil Sésame en France)
- Stratégie de conservation et/ou remplacement progressif de certains arbres en ville (gestion proactive du patrimoine arboré) ;
- Diversification des plantations, d'une manière globale et locale ;
- Monitoring des plantations, des maladies et pathogènes ;
- Contrôle des espèces invasives ;
- Amélioration de l'accès à l'eau des plantations (plantation comme zone tampon) ;
- Partage d'expérience entre acteurs.

1.2. Pollution de l'air

1. Introduction

En Europe, la qualité de l'air est une des préoccupations majeures des dernières décennies, à laquelle s'est ajoutée plus tard la lutte contre les changements climatiques. L'inventaire des différentes sources de pollution atmosphérique, leur surveillance et les mesures contraignantes prises par l'Union Européenne a permis de réduire fortement les émissions. Toutefois, des épisodes de fortes pollutions continuent à être enregistrés lors d'évènements météorologiques particuliers comme les inversions de température en hiver ou les vagues de chaleur en été, avec des effets directs sur la santé (maladies cardio-respiratoires) et sur les écosystèmes (réduction de la croissance). En 2019, 6500, 750 et 270 décès prématurés (non cumulables) étaient respectivement attribuables à l'exposition aux particules fines (PM_{2.5}), au dioxyde d'azote (NO₂) et à l'ozone (O₃) en Belgique (EEA, 2021).

Des températures élevées sont souvent accompagnées d'épisodes de hautes concentrations en ozone troposphérique. Il est le produit de réactions photochimiques complexes dans lesquelles interviennent des polluants précurseurs tels que les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV). Des conditions autres que des températures élevées doivent aussi être remplies pour observer ces pics d'ozone comme un rayonnement important (beaucoup d'UV, pas de nuages) ou un vent faible. Les concentrations en particules, quant à elles, dépendent de la fréquence et de l'intensité des précipitations mais aussi de l'épaisseur de la couche de mélange qui diminue avec la stabilité de l'atmosphère. Lorsque les conditions sont stables, le mélange vertical est limité. Les niveaux de pollution sont également influencés par la vitesse et la direction des vents dominants.

En 2021, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a mis à jour ses lignes directrices relatives à la qualité de l'air ambiant en abaissant les valeurs seuils des principaux polluants atmosphériques. En septembre dernier, le Parlement européen a approuvé la révision de la Directive sur la qualité de l'air ambiant. Si ce projet est adopté par le Conseil européen, les États membres devront respecter des valeurs limites qui s'alignent sur les recommandations OMS d'ici 2035. En 2021, un peu plus de 50 %, 30 % et 80 % de la population wallonne, dont la majorité de la population urbaine, a été exposée à des concentrations supérieures aux seuils recommandés par l'OMS pour respectivement le NO₂, les PM₁₀ et les PM_{2.5} (ISSeP, 2021).

Dans ce contexte, (ré)évaluer les impacts des changements climatiques (projetés pour le milieu et la fin du siècle) sur la pollution de l'air pour l'ensemble du territoire wallon et le respect des objectifs de qualité de l'air est essentiel.

2. Etat des lieux

Synthèse

À l'échelle de l'Europe, plusieurs études se sont concentrées sur l'effet du changement climatique sur l'O₃ de surface à l'aide de modèles régionaux de transport chimique (*e.g.*, Meleux *et al.*, 2007; Katragkou *et al.*, 2011; Juda-Rezler *et al.*, 2012; Langner *et al.*, 2012). En ne considérant que l'effet du climat (avec des émissions maintenues constantes), l'augmentation des températures et la diminution des précipitations estivales favorisent la formation de l'ozone et donc l'augmentation des concentrations de surface. Selon Orru *et al.* (2019) notamment, les concentrations d'ozone devraient à l'avenir, en raison du seul changement climatique, augmenter en Europe occidentale et méridionale (particulièrement les valeurs les plus extrêmes qui sont, en Europe, largement associées à l'augmentation des températures et des émissions COV (surtout l'isoprène) mais aussi à l'humidité du sol, qui régule les dépôts secs ; Andersson et Engardt, 2010) et diminuer en Europe du Nord. Les concentrations en O₃ devraient cependant être légèrement inférieures aux niveaux actuels si on tient compte d'une diminution des émissions de précurseurs. Hedegaard *et al.* (2013) montrent en effet que

ce sont les réductions d'émissions attendues qui déterminent les changements dans les concentrations en ozone et que ces réductions peuvent mener à une augmentation des concentrations au-dessus des régions les plus polluées comme le Benelux. En effet, les concentrations en O_3 ne diminuent pas systématiquement avec la réduction des émissions en NO_x . La courbe de concentrations en O_3 en fonction des émissions NO_x montre au contraire un maximum au-delà duquel la tendance s'inverse (Figure 1; ISSeP, 2012). En Belgique (et dans le Nord-Ouest de l'Europe), nous nous situons au-delà de ce maximum. En d'autres termes, les modèles prédisent dans un premier temps une augmentation des concentrations en ozone en cas de réduction des émissions en oxydes d'azote (à émission égale de COV). Les émissions devraient être fortement réduites avant d'être du « bon côté » de la courbe et voir les concentrations en ozone diminuer. Orru *et al.* (2019) insiste que, si la mortalité liée à l'ozone proche de la surface est censée diminuer à l'avenir (principalement en raison de la réduction des émissions de précurseurs), la réduction pourrait ne pas être aussi importante qu'elle pourrait l'être théoriquement en raison du changement climatique et d'une population croissante et vieillissante, et qu'il est donc essentiel de continuer à réduire les émissions de précurseurs de l'ozone.

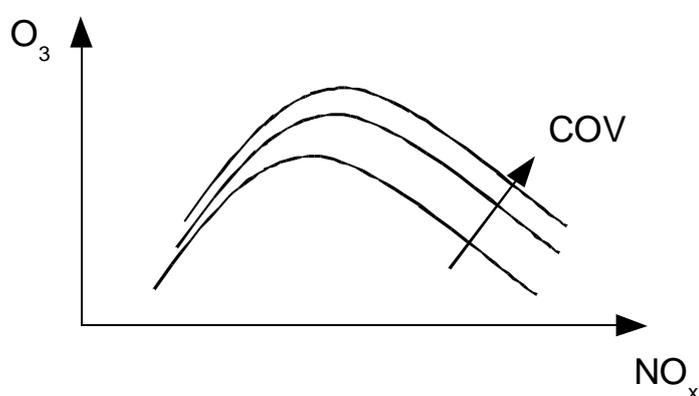


Figure 15 - Relation entre oxydes d'azote et ozone (ISSeP, 2012).

L'impact des changements climatiques sur la qualité de l'air en Belgique a pour la première fois été évalué à une haute résolution spatiale (3 km) dans le projet MACCBET (*Modelling Atmospheric Composition and Climate for the Belgian Territory*, van Lipzig *et al.*, 2017). Des projections à court terme (2026-2035) des concentrations en différents polluants atmosphériques (O_3 , NO_2 , PM_{10}) ont été réalisées avec le modèle de qualité de l'air AURORA et le modèle climatique régional COSMO-CLM forcé par les sorties du modèle global EC-Earth sous le scénario RCP4.5 utilisé dans le cinquième rapport du GIEC (2014). Sous le scénario RCP4.5, le modèle projetait une hausse significative des concentrations moyennes en O_3 (de surface) d'ici 2030 (jusqu'à +30 %), avec les augmentations les plus importantes à proximité des grands axes routiers et dans les centres-villes, en raison d'une destruction moins importante de l'ozone (principalement la nuit) à cause de la réduction des émissions de NO_x (Lauwaet *et al.*, 2014; Brouwers *et al.*, 2015). L'augmentation simulée était plus importante en hiver qu'en été. En effet, des émissions de NO_x plus faibles ralentissent également la formation d' O_3 pendant la journée, sous l'influence de la lumière du soleil, un processus qui, en Belgique, est principalement pertinent pendant les mois d'été. Le modèle projetait aussi une diminution de 25 % du nombre d'épisodes « pic d'ozone » pendant l'été avec le RCP4.5. Leurs résultats montraient aussi que le changement climatique seul (augmentation de la température et diminution des précipitations en été, avec cette fois des émissions anthropiques maintenues constantes) aurait un effet beaucoup plus faible sur les concentrations en O_3 en Belgique (jusqu'à +10 % d'ici 2030). Les simulations réalisées dans le projet MACCBET démontraient aussi qu'une très haute résolution horizontale (3 km) permet d'améliorer considérablement les corrélations spatiales et les concentrations maximales simulées par rapport à une simulation standard de 25 km. Concernant le NO_2 et les particules fines, le modèle projetait une diminution des concentrations. Pour la région parisienne, Markakis *et al.* (2014) simulent des baisses

importantes des concentrations en PM_{2.5} en hiver, dues principalement à la réduction significative des émissions de particules primaires. Les diminutions sont beaucoup plus importantes dans les villes que dans les zones rurales en raison de l'atténuation efficace des émissions dues au transport routier, ce qui gomme fortement le contraste entre la ville et les zones rurales en hiver.

Critique

Il ressort de notre synthèse que les projections réalisées sur la région wallonne méritent d'être actualisées et étendues jusqu'au milieu voire à la fin du siècle. Certaines composantes, comme les émissions liées aux incendies, l'érosion accrue ou encore le transport vers le bas de l'ozone stratosphérique (qui entraînerait probablement, à nos latitudes, une augmentation du niveau d'ozone à la surface) n'ont peut-être pas été prises en compte dans les études précédentes. Il sera intéressant, si pas de les inclure, d'examiner leur impact dans notre diagnostic. La revue de littérature démontre aussi l'importance de discuter l'incertitude associée aux scénarios climatiques et d'émissions. Une validation détaillée de la capacité des modèles à reproduire la fréquence et l'intensité des événements extrêmes actuels est également primordiale.

3. Méthodologie d'analyse de vulnérabilité

Approche générale Les projections de la qualité de l'air actuelle et future (jusqu'en 2050) pour la région wallonne en cours de réalisation avec le modèle de transport chimique CHIMERE (version 2020r3, Menut *et al.*, 2021) dans le cadre du projet Moerman ReCOVeR de l'ISSeP (Recherche sur les Composés Organiques Volatils émis par la Végétation dans l'air, 2020-2024) seront valorisées.

Similairement aux simulations non prévisionnelles réalisées pour la Belgique par la Cellule Interrégionale de l'Environnement (CELINE), des projections sur la Wallonie à haute résolution spatiale seront obtenues par un emboîtement de simulations (*nesting* en anglais) : une première simulation sur l'Europe à 0,5° (~ 50 km, domaine EMAP1), une deuxième simulation sur un domaine couvrant la Belgique, les Pays-Bas, le Luxembourg et une partie de la France à 0,1° (~ 10 km, domaine EMAP3) et, enfin, une simulation sur la Région wallonne à une résolution de 1 km. Les plus petits domaines de simulation sont forcés par les plus grands avec un domaine européen dont les conditions aux limites sont fournies par défaut dans CHIMERE.

La température et les autres variables météorologiques utilisées comme données d'entrée dans le modèle de dispersion de la pollution atmosphérique seront simulées avec le modèle atmosphérique régional MAR développé par le Laboratoire de Climatologie de l'Université de Liège (Wyard *et al.*, 2018) à une résolution de 7,5 km. Le MAR sera forcé à ses frontières par les sorties du modèle climatique global GCM MPI-ESM1-2-HR sous le scénario d'émissions SSP370, produites pour la dernière intercomparaison de modèles CMIP6 du rapport AR6 du GIEC (IPCC, 2021). Les sorties du MAR à 7,5 km mises à l'échelle alimenteront les simulations CHIMERE sur les domaines EMAP3 et EMAP5.

Les émissions anthropiques estimées dans le projet Interreg TransfAIR (<https://www.transfair-interreg.eu/>) pour les trois domaines précités seront utilisées pour la période actuelle. Pour le futur, le scénario global SSP370 ou un scénario local (si disponible) seront appliqués à la Wallonie. Les émissions biogéniques pour l'actuel et le futur seront simulées par le modèle d'émissions MEGAN qui est couplé au modèle CHIMERE (Bauwens *et al.*, 2018). La nouvelle carte d'occupation du sol de la Wallonie développée dans le cadre du projet WALOUS (WALLonie Occupation et Utilisation du Sol, Lennert *et al.*, 2019) sera utilisée ainsi que l'évolution de l'occupation du sol, simulée pour le projet ReCOVeR, selon trois scénarios (« business-as-usual », « stop au béton » et « centralités »).

Les résultats seront validés à l'aide des stations du réseau télémétrique de l'ISSeP et des autres régions belges (e.g., concentrations moyennes, cycle journalier et distribution spatiale).

Indicateurs et zones à risque

Les résultats seront présentés sous forme de cartes à l'échelle régionale. Ces cartes présenteront les projections des concentrations régionales actuelles, futures et les anomalies futur-présent, les indices BelAQI correspondants (rassemblant en un seul nombre représentatif les concentrations de plusieurs polluants de l'air ambiant et basé entièrement sur les effets santé) ainsi que la comparaison des concentrations simulées avec les valeurs limites européennes actuelles et les lignes directrices de l'OMS mises à jour pour identifier les zones à risque. La fraction de population exposée à un dépassement sera calculée pour l'ensemble des polluants étudiés.

Données

Les données nécessaires sont :

- des projections des conditions aux frontières du domaine européen ;
- des projections des émissions futures (AWAC) ;
- les projections climatiques du volet 2 de l'étude ;
- des données socio-économiques (densité de population en particulier) actuelles et projections futures pour estimer l'exposition de la population wallonne (IWEPS).

Liens thématiques

Ce volet de l'étude est lié aux volets suivants :

- Services écosystémiques : mise en parallèle des niveaux de pollution atmosphérique actuels et futurs avec l'évaluation de la capacité présente et future des écosystèmes à capturer les polluants atmosphériques (fixation des particules fines et adsorption des polluants gaz) ;
- Agriculture : impact des pratiques agricoles (épandage d'engrais ou de pesticides) sur la qualité de l'air et identification des zones sensibles ;
- Socio-économique : estimation de l'exposition et de la vulnérabilité de la population à la pollution atmosphérique ;
- Villes : qualité des airs ambiant (extérieur) et intérieur directement liés respectivement à l'identification des îlots de chaleur (pics d'ozone) et à la caractérisation du bâti (ventilation, isolation, ...) dans les villes où se concentrent une grande part de la population et des activités sources d'émissions polluantes ;
- Santé : évaluation des risques sanitaires liés à la pollution atmosphérique (toxicité des polluants, relation dose-réponse, ...) ;
- Énergie : impacts des politiques énergétiques sur la qualité de l'air (mobilité, isolation des bâtiments, ...) ;
- Patrimoine : détérioration du patrimoine causée par la pollution atmosphérique.

4. Mesures d'adaptation

Les véritables mesures efficaces pour améliorer la qualité de l'air et réduire les risques sur la santé sont de limiter l'utilisation des moteurs thermiques et favoriser fortement la mobilité active dans la zone la plus large possible. Cela nécessite de prendre des mesures en matière de mobilité notamment réduire l'impact du trafic automobile (instaurer des zones basses émissions, favoriser les transports en commun ou partagés, rendre les voitures électriques accessibles).

D'autres pistes pertinentes peuvent être avancées comme :

- Pérenniser le télétravail ;
- Rénover et isoler le bâti (bâtiments publics en priorité) ;
- Réduire la dissémination d'intrants chimiques (pesticides, herbicides et engrais) dans l'environnement ;

- Accélérer la transition énergétique.

1.3. Ilots de chaleur urbains

1. Introduction

Avec le changement climatique, les vagues de chaleur sont de plus en plus fréquentes, intenses, durables, précoces et même tardives en Belgique (Lamarque et al., 2022). Or, ces vagues de chaleurs sont généralement plus intenses en ville, car elles sont amplifiées par le phénomène d'**îlot de chaleur urbain** (ICU). En effet, les constructions urbaines stockent la chaleur le jour et la restituent la nuit, tandis que leur configuration empêche une bonne ventilation de la ville. La forte activité humaine génère aussi des flux de chaleur. La faible présence du végétal et de l'eau peine à rafraîchir l'air ambiant. En conséquence, la température est plus élevée en ville qu'à la campagne et particulièrement durant la nuit. L'ICU s'additionne au signal de réchauffement global (Gallardo et al., 2022), avec des impacts notamment sur le confort thermique et la santé des citoyens. Un excès de mortalité est observé dans les villes belges lors des vagues de chaleur particulièrement dans les groupes de population vulnérables tels que les personnes âgées, les jeunes enfants, les personnes souffrant de maladies chroniques ou d'affections préexistantes (De Ridder et al., 2020 ; Van De Vel et al., 2021 ; Demoury et al., 2022).

Ce sous-chapitre vise à étudier les **risques liés à l'exposition de la population aux ICU au travers d'une cartographie de l'aléa à l'échelle régionale**. Ces risques se décomposent en trois éléments :

1. Le **danger ou l'aléa** se définit par son intensité, son occurrence spatiale (où) et temporelle (quand), et sa durée. Rapporté aux ICU, la notion d'aléa correspond aux événements de forte chaleur ayant pour effet le réchauffement d'intensité variable de tissus urbains localisés (ADULME, 2022) ;
2. L'**exposition** de la population à l'aléa ;
3. La **vulnérabilité** de la population à l'aléa. Cette dernière est liée à sa **sensibilité** à la chaleur (qui dépend du sexe, de l'âge, de facteurs de co-morbidité) et à sa **capacité d'adaptation** et de gestion (qui dépend de facteurs socio-économiques, d'accessibilité aux îlots de fraîcheur, d'existence de plan de prévention).

Ce sous-chapitre complète les notes thématiques de (i) vulnérabilité de la population ; (ii) vulnérabilité du logement vis-à-vis des vagues de chaleur ; (iii) identification des espèces ligneuses adaptées et inadaptées au changement climatique dans les villes, et (iv) pollution de l'air ; qui sont traitées dans des rapports dédiés.

2. Etat des lieux

Synthèse

Notre état des lieux s'est concentré sur (i) **l'identification des données existantes en Wallonie**, et (ii) **les techniques et critères utilisés pour cartographier les ICU** dans les régions et les pays voisins. En effet, l'exposition et les facteurs de vulnérabilité socio-économique de la population font l'objet d'un volet spécifique dans ce cahier des charges. Le Tableau 3 synthétise les références qui ont été consultées.

A l'échelle de la **Wallonie**, les risques liés aux ICU sont de plus en plus étudiés. L'AWAC a produit des cartes de vulnérabilités aux ICU pour chaque commune de Wallonie (AWAC, 2017). A Namur, Liège et Charleroi, l'ICU a été modélisé à 100 m de résolution spatiale avec le modèle de climat urbain UrbClim (De Ridder et al., 2015a) via des études spécifiques sur le sujet (Smartpop, 2019 ; ICEDD & Ecores, 2020 ; Lauwaet et al., 2023 ; Ville de Liège, 2023). La température ressentie a été modélisée à Liège avec un modèle de WBGT (pour *Wet Bulb Globe Temperature*) (Lauwaet et al., 2020). Mons, Mouscron et Verviers ont lancé ou lanceront en 2023 des marchés pour étudier le phénomène d'ICU et son atténuation sur leur territoire via la plantation d'arbres. Des études réalisées au niveau belge renseignent des produits couvrant l'entièreté de la Wallonie (Brouwers et al., 2015 ; De Ridder et al., 2015b ; Wouters et al., 2017 ; De Ridder, et al., 2020 ; Van De Vel et al., 2021). Les simulations réalisées avec le modèle de climat régional COSMO CLM à 2,8 km de résolution montrent que le nombre de degré-

jour de vague de chaleur (HWDD pour *Heat Wave Degree Day*) est plus élevé dans les villes et que cette tendance se renforcera dans le futur peu importe le scénario (Wouters et al., 2017). L'agglomération liégeoise ressort particulièrement dans cette étude. Une analyse réalisée sur des températures de surface mesurées par le satellite MODIS (1 km de résolution) montre l'existence d'un ICU de surface au niveau de toutes les villes wallonnes de plus de 30 000 habitants (Brouwers et al., 2015).

Tableau 3. Synthèse des données utilisées en Belgique et à l'étranger pour évaluer les risques liés aux ICU.

Zone géographique	Indices utilisés pertinents	Méthodes	Horizons temporels, scénarios	Références
Namur	<u>Aléa</u> : intensité de l'ICU en été <u>Exposition</u> : territoire et population <u>Vulnérabilité</u> : Bâtiments résidentiels, lieux d'accueil de la petite enfance, établissements pour aînés et hôpitaux, situés dans des îlots à coefficient d'imperméabilisation > 0.6 mais hors zones tampons de 100 m autour des espaces verts	Simulation numérique (modèle de climat urbain UrbClim 100 m)	Présent	ICEDD & Ecores, 2020
Liège	<u>Aléa</u> : intensité de l'ICU en été, nombre de jour de vague de chaleur, nombre de nuit chaude, HWDD, WBGT <u>Exposition</u> : densité de population, densité de logement <u>Vulnérabilité</u> : densité des +65 ans	Simulation numérique (modèle de climat urbain UrbClim 100 m, WBGT 1 m)	1996-2015, 2026-2050 (RCP 8.5), 2081-2100 (RCP 8.5)	Smartpop.be, 2019 ; Ville de Liège, 2023
Wallonie	<u>Vulnérabilité</u> : Bâtiments résidentiels, lieux d'accueil de la petite enfance, établissements pour aînés et hôpitaux, situés dans des îlots à coefficient d'imperméabilisation > 0.6 mais hors zones tampons de 100 m autour des espaces verts	Croisement de données ancillaires	Présent (2015)	AwAC, 2017
Belgique entière	<u>Aléa</u> : HWDD, nombre de jour de vague de chaleur <u>Exposition</u> : HIP (hot island population index)	Simulation numérique (modèle climatique régional (COSMO-CLM 2,8 km ⁷), mesures satellitaires (MODIS))	1980-2014, 2000-2010, 2040-2074 (Low, medium, high), 2060-2070 (Low, medium, high)	Brouwers et al., 2015 ; De Ridder et al., 2015b ; Wouters et al., 2017 ; De Ridder, K. et al., 2020 ; Van De Vel et al., 2021
Bruxelles	<u>Aléa</u> : nombre jour de vague de chaleur, nombre de nuits chaudes, HWDD, WBGT <u>Vulnérabilité</u> : îlot de fraîcheur	Simulation numérique (modèle de climat urbain UrbClim 100 m, WBGT 1 m)	1987-2016	Lauwaet & De Ridder, 2018
Flandre	<u>Aléa</u> : WBGT, HWDD (seuil de 60 degrés-jours), nombre de jour de canicule. <u>Vulnérabilité</u> : institutions d'accueil de publics vulnérables, densité de	Simulation numérique (modèle de climat urbain UrbClim 100 m, WBGT 1 m)	2000-2019, 2030, 2050, 2100	Klimaat portal Vlaanderen – Impact tool ; Broeckx et al., 2023

⁷ Ce modèle est l'un des modèles utilisés dans Cordex.be

	personnes vulnérables (0-4 ans, +65 ans).			
Allemagne (diverses villes)	<u>Aléa</u> : intensité de l'ICU mesurée (8 villes), excès de température de l'air lors des nuits tropicales et des journées chaudes modélisées en fonction de type de morphologie urbaine, température perçue diurne et nocturne en fonction de type de morphologie urbaine	Mesures in-situ, simulation numérique type	Présent	DWD Wärmeinsel – Stadtklimastationen ; DWD INKAS tool
France (43 agglomérations)	<u>Aléa</u> : 3 classes soit en fonction des LCZs, soit sur base de l'intensité de l'ICU modélisée <u>Exposition</u> : population	Mesures in-situ, mesures satellitaires, méthodes statistiques, simulation numériques (Meso NH UHII, TEB)	Présent	Masson, 2019 ; Ademe, 2020a ; Gardes et al., 2020; ADULME, 2022
Luxembourg	<u>Aléa</u> : PET diurne (14h), température de l'air et écoulement d'air froid nocturne (4h)	Simulations numériques (modèle de climat urbain FITNAH-3D à 25 m)	Présent	GEO-NET & LIST, 2021
Pays-Bas	<u>Aléa</u> : PET, nombre de nuit tropicale, intensité réelle de l'ICU, HWDD. <u>Vulnérabilité</u> : Densité de personne isolée âgée de +75 ans, distance à pied par rapport aux îlots de fraîcheur.	Croisement de données ancillaires, méthodes statistiques	1981-2010, 2004-2013, 2050 (high)	Atlas natuurlijk kapitaal; Klimaat effect atlas; Remme et al., 2018 ; De Nijs et al., 2019 ; Rucabado Gordo & Keizer, 2021 ; Statistics Netherlands and WUR, 2022
Europe (entre 100 et 571 villes, dont Charleroi et Liège)	<u>Aléa</u> : Intensité moyenne de l'ICU <u>Vulnérabilité</u> : accessibilité à des infrastructures vertes à distance de marche	Simulations numériques (Modèle de climat urbain UrbClim 100, Modèles climatiques régionaux issus de EUROCORDERX)	2008-2017, 2020-2052 (RCP8.5)	Guerreiro et al., 2018 ; Maes et al., 2019 ; VITO, 2019 ; EEA, 2020 ; Lauwaet et al., 2023
Monde	Cartographie des LCZ	Méthodes statistiques	2018	Demuzere et al., 2022

L'analyse étendue aux autres régions de Belgique et aux pays voisins montre que Bruxelles, la Flandre, les Pays-Bas et le Luxembourg ont cartographié les ICU en chaque point de leur territoire. En Allemagne et en France, l'approche est différente en raison de leur territoire plus vaste et d'une urbanisation moins étendue : les ICU y sont traités par agglomération ou métropole.

A **Bruxelles**, et en **Flandre**, des indicateurs d'ICU ont été produits par simulation numérique avec les modèles UrbClim et de WGBT pour plusieurs horizons temporels, à des résolutions spatiales comprises entre 1 et 100 m obtenus (De Ridder et al., 2018 ; Broeckx et al., 2023). Notons que la commune de Bruxelles Ville a commandé une nouvelle étude sur le sujet en 2022.

Au **Luxembourg**, le modèle climatique urbain FITNAH-3D a permis de calculer la température de l'air et les écoulements d'air froid nocturnes, et la PET (pour *Physiological Equivalent Temperature*) en journée à 25 m de résolution spatiale sur l'ensemble du territoire luxembourgeois (GEO-NET & LIST, 2021).

Aux **Pays-Bas**, les ICU ont été cartographiés via des méthodes statistiques utilisant à des données météorologiques et climatiques (vent et température), de densité de population, de couverture du sol, et de sky view factor (Remme et al., 2018 ; De Nijs et al., 2019 ; Rucabado Gordo & Keizer, 2021 ; Statistics Netherlands and WUR, 2022).

En **France**, le projet MApUCE a cartographié l'ICU de 43 agglomérations via des simulations numériques et des méthodes statistiques (Masson, 2019 ; Gardes et al., 2020). Certaines métropoles ont commandé des études supplémentaires. Par exemple, Dijon a déployé un réseau de thermomètres et a découpé son territoire en local climate zones (LCZ) (Ademe, 2020a). Lille a eu recours à des photographies thermographiques aériennes et a utilisé l'approche par LCZ pour déterminer l'aléa d'ICU (ADULM, 2022).

En **Allemagne**, l'intensité de l'ICU est mesurée en temps réelle pour 8 villes grâce à des stations de mesures du Deutscher Wetterdienst (DWD). Des valeurs types de température de l'air et de température perçue ont été modélisées pour différentes classes de morphologie urbaine et sont accessibles via l'outil INKAS.

Une étude de l'Agence Européenne pour l'Environnement s'est penchée sur l'ICU de **100 villes européennes** (EEA, 2020). Le modèle UrbClim (VITO 2019, Lauwaet et al., 2023) et des modèles régionaux (Guerreiro et al., 2018) ont été utilisés pour produire des indicateurs d'ICU. Les villes de Liège et de Charleroi sont reprises dans ces travaux.

Enfin, Demuzere et al. (2022) ont généré les LCZ pour **le monde entier** à une résolution spatiale de 100 m.

Au niveau des **indicateurs d'ICU (aléa)**, l'intensité moyenne de l'ICU durant l'été, le nombre de jour de vague de chaleur, le HWDD, et le nombre de nuit chaude reviennent le plus souvent dans les études renseignées dans le Tableau 1. Les auteurs ont aussi recours à des indicateurs de température ressentie comme la WBGT et la PET pour mesurer le stress thermique auquel sont soumis les habitants. Au niveau de la **vulnérabilité**, l'accessibilité à pied ou la distance aux espaces verts, la densité de personnes sensibles, la localisation des institutions d'accueil des publics sensibles sont des facteurs récurrents.

Critique

Cette revue de littérature met en évidence l'absence d'une cartographie fine des ICU sur l'ensemble de la Wallonie et une certaine diversité dans les approches possibles pour remédier à ce manque de données.

Les **mesures météorologiques** permettent une observation en temps réelle des ICU. Cependant, ces mesures sont ponctuelles et requièrent le déploiement d'un vaste réseau de capteurs. L'utilisation de **données thermiques satellitaires ou aéroportées** a l'avantage de fournir des mesures de température de surface en chaque point d'un territoire. La disponibilité de ces données est toutefois tributaire de la nébulosité et les prétraitements à appliquer sont conséquents. En outre, ces données montrent les ICU de surface et leur corrélation avec la température de l'air et la température ressentie n'est pas si évidente.

En l'absence de mesures, des **simulations numériques** peuvent être utilisées pour reconstituer les ICU. D'une part, **les modèles de climat urbain** permettent de modéliser physiquement le climat des villes à une échelle très fine (entre 1 et 100 m). Nous noterons la prépondérance de l'utilisation du modèle

UrbClim dans les études belges et européennes. UrbClim permet de simuler le climat des villes sur de longues périodes (plusieurs dizaines d'années) et pour les scénarios et horizons temporels souhaités. Ce modèle n'est cependant pas libre d'accès (propriété du VITO). D'autre part, les sorties de **modèles régionaux** comme celles de COSMO CLM ou celles du MAR, qui seront réalisées dans le cadre de ce CSC, sont produites pour des mailles de plusieurs km, entre 2,8 et 7,5 km, de sorte que les villes, et de ce fait les ICU, y sont au mieux grossièrement représentés. Des **méthodes statistiques**, comme celles utilisées aux Pays-Bas, sont également utilisées pour estimer les ICU. Ces méthodes reposent sur des études de modélisation et des campagnes d'observations plus larges et permettent de s'affranchir des désavantages des simulations numériques : elles sont plus légères, plus faciles à mettre en place et libres d'accès.

En l'absence de mesures et de modélisations numériques ou statistiques fines, l'utilisation du **référentiel LCZ** permet une première approche qualitative des ICU. La méthode, largement utilisée en France, repose sur les travaux de Stewart et Oke (2012). Ces derniers différencient 17 zones climatiques locales au comportement climatique homogène sur base de leur propriété de surface, végétations, hauteur et espacement du bâti, artificialisation du sol. Certains types de LCZ sont ainsi associés à des ICU plus ou moins intenses.

Parmi toutes ces méthodes, celles qui apparaissent les plus pertinentes d'un point de vue des objectifs de la présente étude (cartographie continue des ICU) et faisables en Wallonie (étant donné l'accessibilité des modèles, la disponibilité des données et le budget) sont les **méthodes statistiques et l'approche par les LCZ**. De nouvelles modélisations avec UrbClim sortent ainsi du cadre de ce marché en raison de l'inaccessibilité du modèle et de leur coût. En outre, les 3 plus grandes villes wallonnes possèdent déjà des sorties d'UrbClim. A noter qu'une estimation de l'évolution future des ICU requerrait l'utilisation de **scénarios d'évolution de l'occupation et d'utilisation du sol (bâti)**.

Au niveau des **indicateurs d'ICU**, ils présentent tous des avantages et des inconvénients. Par exemple, l'utilisation du HWDD préconisée par De Ridder et al. (2015b) a l'avantage de prendre en compte la durée et l'intensité des vagues de chaleur mais n'est pas facile à comprendre pour le grand public, au contraire du nombre de jour de vague de chaleur. L'intensité de l'ICU quantifie l'excès de chaleur généré par les tissus urbains. La WBGT et la PET permettent d'estimer la température ressentie par la population et sont d'ailleurs répertoriées par l'OMS dans son guide pour l'élaboration d'un système d'alerte au cas de vague de chaleur (WMO, 2015). La première a l'avantage d'être utilisée dans la législation belge du travail et d'être la norme ISO pour le confort thermique (ISO 1989). On notera que la définition des vagues de chaleur, de nuit chaude, de jour de canicule, etc. varie d'un pays à l'autre. Les seuils au-delà desquels on parle de stress thermique sont aussi variables.

3. Méthodologie d'analyse de vulnérabilité

Approche générale

Etant donné qu'une thématique est spécifiquement dédiée à l'exposition et à la vulnérabilité de la population wallonne, la méthodologie proposée se concentre sur la production de **cartes d'aléa**. Les données d'ICU existant en Wallonie seront d'abord collectées : sorties d'UrbClim pour Liège, Charleroi et Namur, LCZ et les sorties de COSMO-CLM et de MAR, données météo. Une cartographie de l'aléa à une résolution spatiale minimale de 100 m sera réalisée sur l'ensemble de la région via 2 approches. Une première approche utilisera le référentiel LCZ. Les LCZ calculées par Demuzere et al. (2022) seront affinées grâce aux géodonnées wallonnes et la détermination des classes d'aléas sera réalisée en comparant les LCZ avec les sorties d'UrbClim aux endroits où elles sont disponibles. Les méthodes statistiques néerlandaises seront aussi implémentées pour tenter de quantifier l'intensité des ICU présents et futurs. Les sorties de COSMO CLM et de MAR (vent et température de l'air), la densité de

population, l'occupation du sol, le sky view factor constituent les principales données d'entrée de ces méthodes. Le sky view factor sera calculé grâce aux données lidar wallonnes.

Des **cartes de risques** liés à l'exposition de la population à l'aléa d'ICU pourront ensuite être calculées. Les cartes d'aléa seront croisées avec les données d'exposition et de vulnérabilité de la population qui seront produites par la thématique dédiée.

Zones à risque

Pour la réalisation de cartes d'aléa, les indicateurs (et leur définition), les seuils de stress thermique et de risques employés au niveau fédéral, en Flandres et à Bruxelles seront favorisés. Une attention particulière sera accordée à la cohérence (grille d'analyse, représentativité, format) des diverses données qui seront croisées. La cartographie des LCZ, les cartes d'aléa et les cartes de risques seront présentées sous forme de cartes à l'échelle régionale et une note technique accompagnera ces cartes pour faciliter leurs compréhensions et leurs précautions d'usage.

Besoins en données, informations et accès

Les données nécessaires sont :

- Données UrbClim de Liège (Plan Canopée), Namur (ICEDD), et de Charleroi (VITO ou EEA) ;
- Sorties des modèles régionaux MAR (Volet 2 de ce CSC) et COSMO-CLM (Cordex.be) ;
- LCZ (Demuzere et al., 2022) ;
- Données d'occupation du sol et d'utilisation du sol (Walous et Smartpop) ;
- Données topographique (LiDaR wallon) ;
- Données météo (IRM) ;
- Sky view factor (à calculer) ;
- Données d'exposition et de vulnérabilité (fournies par la thématique "Vulnérabilité des populations").

Liens thématiques et parties prenantes

Ce volet de l'étude est lié aux chapitres suivants :

- Social : vulnérabilité des populations face aux changements climatiques.
- Villes : vulnérabilité du logement vis-à-vis des vagues de chaleur ; espèces ligneuses adaptées ou inadaptées au changement climatiques dans les villes ; composante pollution air.
- Santé : morbidité liée à la chaleur ; sensibilité sur la population urbaine.
- Agriculture : stress thermique dans les élevages
- Energie : adaptation du bâti au réchauffement et à la climatisation en évitant de renforcer l'ICU.
- Services écosystémiques : impact du changement climatique sur les services écosystémiques ;
- Nature & Biodiversité : impact des scénarios de changements climatiques sur la distribution la viabilité et la capacité de migration des différents types d'espèces ;
- Aménagement du territoire : Impact de l'étalement urbain et artificialisation des sols sur aléa et exposition (inondations, ICU). Politique de Zéro Artificialisation Nette (ZAN). Politique foncière.

4. Mesures d'adaptation

Les mesures que nous investiguerons peuvent être classées selon 4 axes :

- **Etudier le phénomène d'îlot de chaleur**

Le rapport T0 (Lamarque et al., 2022) recommande de cartographier les risques dans les villes et les personnes vulnérables. La région pourrait pousser pour une étude de modélisation détaillée du phénomène d'ICU pour une série de grandes villes wallonnes, avec un accent sur la cartographie des risques et des personnes vulnérables.

- **Végétalisation des centres urbains**

Le projet H2020 RESIN a répertorié et évalué l'efficacité des mesures d'adaptation visant à améliorer le confort thermique en ville à l'extérieur (RESIN, 2018). La création de parcs et la plantation d'arbres contribuent le plus à l'amélioration du confort thermique en extérieur. L'intégration de ces enjeux, dont l'intégration des réseaux écologiques dans les centres urbains, au CoDT est certainement une voie à étudier.

- **Contraintes urbanistiques contre la surchauffe**

Ce même rapport RESIN vise aussi l'intérieur des bâtiments (RESIN, 2018) pour lequel le refroidissement des toitures, l'installation de dispositifs d'ombrage ou encore renforcer le bâti de couleur blanche seraient les plus efficaces pour réduire les températures dans les bâtiments. Des impositions dans les prescrits urbanistiques relèvent des compétences régionales.

- **Gestion des canicules**

Le renforcement de la gestion sanitaire des canicules est une priorité du rapport T0. Le déploiement à l'échelle de la Région d'un plan chaleur pour les bâtiments en zone à risque d'ICU et composant avec des personnes sensibles sera étudié. De même, la Wallonie pourrait profiter de son « Plan Wallon Forte Chaleur et Pic d'Ozone » pour activer les mesures préventives au niveau des bâtiments susmentionnés lorsque nécessaire voire imposer des mesures concrètes à prendre comme annuler ou postposer des manifestations de masse (sportives, culturelles ou autres) afin de limiter les effets néfastes de la forte chaleur. Finalement, la Région pourrait également prescrire de renforcer la présence de points d'eau potable sur l'espace public permettant aux citoyens de s'hydrater facilement en période de forte chaleur.

Enfin, le [Centre de Ressources pour l'Adaptation au changement climatique](#) renseigne plusieurs guides pratiques à destination des villes françaises que l'on pourrait transposer aux villes wallonnes : Solutions de rafraîchissement urbain (Ademe – Métropole de Lyon, 2017), Guide de recommandation pour lutter contre l'effet îlot de chaleur urbain à destination des collectivités territoriales (Ademe, 2012), Adaptation au changement climatique et projet urbain (Ademe, 2020b).

1.4. Logement et vagues de chaleur

1. Introduction

Le changement climatique induit des vagues de chaleur de plus en plus fréquentes en Belgique et en Wallonie (PwG, 2022). Ces vagues de chaleurs sont généralement plus intenses en ville, car elles sont amplifiées par le phénomène d'îlot de chaleur urbain qui fait l'objet du précédent sous-chapitre. Ce sous-chapitre-ci vise à compléter celui des îlots de chaleur urbain en proposant des mesures d'adaptation au niveau des bâtiments résidentiels. En Europe du Nord, le parc de logements est vulnérable aux vagues de chaleur, car les bâtiments résidentiels ont toujours été conçus pour assurer une protection contre le froid plutôt que le chaud (Taylor et al., 2023) et sont actuellement soumis à une réglementation plus limitée en termes de surchauffe et de confort d'été⁸. Or, des températures extrêmes et prolongées au sein des principaux espaces de vie et de nuit exposent les habitants à des risques importants en termes de santé et de mortalité.

Les références mobilisées étudient principalement des pays européens, avec un focus sur les pays qui étaient jusqu'à peu épargnés par les vagues de chaleur et cherchent à présent à s'en prémunir.

Référence	Couverture géographique	Sujet
(Amaripadath et al., 2023; Attia & Gobin, 2020)	Belgique	Surchauffe des bâtiments résidentiels en Belgique
(Dolques & Dépoues, 2022)	France	Adapter les bâtiments face aux vagues de chaleur
(Taylor et al., 2023)	Europe centrale et septentrionale	Surchauffe dans le secteur résidentiel
(Jenkins et al., 2014)	Royaume-Uni	Distribution spatiale du risque à Londres
(Sukanen et al., 2023)	Finlande	Adaptation passive et comportement individuel
(Buzási, 2022)	Hongrie	Facteurs de vulnérabilité aux vagues de chaleur
(Monge-Barrio & Sánchez-Ostiz Gutiérrez, 2018)	Espagne	Facteurs de risque dans et à proximité des logements
(Sharma et al., 2022)	Asie du Sud	Stratégies d'adaptation face aux vagues de chaleur

2. Etat des lieux

Synthèse

Le **changement climatique** provoque des vagues de chaleur dans des régions tempérées qui n'y sont pas habituées, et donc peu préparées (Sukanen et al., 2023). La littérature scientifique aborde les vagues de chaleur à deux échelles différentes : (i) celle de la ville avec des études en lien avec la température de surface extérieure et les îlots de chaleur urbains (cf. chapitre dédié à cette thématique) et (ii) celle du bâtiment avec des analyses en lien avec la température intérieure et le confort thermique résidentiel. Ces deux échelles sont étroitement liées, car la densité du milieu bâti et la présence de surfaces minéralisées peut participer à l'augmentation locale des températures (Jenkins et al., 2014). En particulier, les centres-villes se caractérisent par des températures nocturnes plus élevées que les zones

⁸ En Wallonie, seuls les bâtiments résidentiels neufs sont soumis à une réglementation (les rénovations et les démarches PEB simplifiées ne sont pas concernées). L'indicateur de surchauffe (S) devrait rester en dessous de 6500 Kh (Kelvin heure), seuil à partir duquel on observe une surchauffe du bâtiment. Il s'agit d'une recommandation sanctionnée d'une amende administrative plus faible que celles imposées dans le cas du non-respect du niveau d'isolation par exemple (0,85€ par écart de 1000 Kh supplémentaires du niveau S (surchauffe) vs. 60€ par écart de 1 W/K pour les valeurs U (isolation des éléments de construction) et 60€ par écart de 1m² pour le niveau K (niveau d'isolation global) (SPW, 2021). Aucune imposition en termes de protections solaires n'est actuellement prévue (Attia et al., 2023).

péri-urbaines et rurales, ce qui a un impact direct sur la qualité du sommeil et la santé des habitants (Taylor et al., 2023).

Le **risque de vagues de chaleur** à l'échelle urbaine induit un **risque de surchauffe** à l'échelle résidentielle. Le risque se décompose en trois éléments :

1. Le **danger** correspond à l'occurrence d'une canicule ou d'une vague de chaleur, dont les définitions varient mais font toujours référence au dépassement d'un seuil de température extérieure pendant une période de plusieurs jours (Sharma et al., 2022). Dans le cas du logement, la surchauffe survient à partir du moment où la température intérieure dépasse une certaine valeur pendant un temps défini (ex : maximum 150 heures/an au-delà de 27°C en Finlande ; maximum 5% de l'année au-delà de 25°C avec un écart de maximum 5°C entre les températures intérieures et extérieures à Bruxelles) (Taylor et al., 2023) ;
2. L'**exposition** aux vagues de chaleur est plus élevée en contexte urbain étant donné la densité de population et la création d'îlots de chaleur urbains. Tous les logements ne sont pas exposés de la même manière, leur localisation au sein de l'immeuble et par rapport aux îlots de chaleur ayant un impact important ;
3. La **vulnérabilité** du logement est directement liée à sa capacité à évacuer la chaleur excédentaire. Elle dépend aussi bien de ses caractéristiques physiques (ex : surface, niveau d'isolation, orientation) que du profil de ses habitants (ex : âge, isolement, état de santé, revenu). Le comportement des habitants est également un facteur limitant ou aggravant leur vulnérabilité (ex : habillement, hydratation, ventilation naturelle).

De manière générale, la littérature scientifique identifie de nombreux facteurs de risques s'appliquant (i) au bâtiment lui-même, (ii) à son environnement direct et (iii) à sa population.

Au niveau du **bâtiment**, les logements les plus vulnérables sont généralement les appartements situés au dernier étage d'un immeuble, directement sous le toit, ainsi que les logements avec de larges surfaces vitrées orientées plein Sud (Taylor et al., 2023). Le risque dépend également de la configuration interne du logement (ex : taille du logement, nombre de pièces, présence d'ouvertures sur des façades opposées, présence de protections solaires) car elle détermine la possibilité de se réfugier dans un espace frais (« Cool retreat ») et d'avoir recours à une ventilation naturelle (Monge-Barrio & Sánchez-Ostiz Gutiérrez, 2018).

Au niveau de l'**environnement direct** autour du bâtiment, le risque varie en fonction du nombre de ou de la distance à différents services urbains : espaces verts, végétation, pharmacies, hôpitaux, médecins généralistes, lieux de refuge et espaces frais mis à disposition du public, etc. (Buzási, 2022; Sukanen et al., 2023).

Au niveau de la **population**, les (jeunes) enfants, les personnes âgées, isolées et/ou avec des problèmes de santé sont systématiquement identifiés comme particulièrement vulnérables, car ils ont plus de difficultés à réguler leur température corporelle (Monge-Barrio & Sánchez-Ostiz Gutiérrez, 2018; Sukanen et al., 2023). Dans les pays du sud, la capacité d'adaptation des habitants est généralement meilleure pour les plus âgés d'entre eux, car ceux-ci ont toujours vécu sans système de climatisation et ont potentiellement développé des stratégies pour supporter les journées les plus chaudes (Monge-Barrio & Sánchez-Ostiz Gutiérrez, 2018). La vulnérabilité socio-économique des habitants est également épinglée, car seuls certains ménages ont les ressources budgétaires nécessaires pour adapter leur logement (Jenkins et al., 2014), qui est généralement moins bien conçu, plus petit et plus peuplé (Taylor et al., 2023). Sur cette base, le concept de précarité énergétique a été élargi pour englober non seulement les foyers qui ne sont pas en mesure de se chauffer durant l'hiver, mais aussi ceux qui ne parviennent pas à limiter la température intérieure de leur logement pendant l'été (Taylor et al., 2023).

Les populations les plus précarisées sont également celles qui ne peuvent pas partir en vacances et quitter les centres-villes aux périodes les plus chaudes de l'année (Dolques & Dépoues, 2022), ni prévoir des activités en famille dans des espaces frais ou climatisés (ex : cinéma, piscine).

En ce qui concerne les mesures d'adaptation des logements, la plupart des auteurs signalent qu'aucune intervention ne se suffit à elle-même et qu'une combinaison d'actions est nécessaire. Les trois cas suivants sont fréquemment mobilisés pour démontrer la complexité de l'adaptation du logement face aux vagues de chaleur :

- La **ventilation naturelle** est identifiée comme l'une des manières les plus efficaces de se prémunir d'une surchauffe, mais cette mesure est parfois difficile à appliquer dans les centres-villes en raison de problèmes de pollution, de nuisance sonore, de sécurité des habitants ou d'une température nocturne trop élevée (Monge-Barrio & Sánchez-Ostiz Gutiérrez, 2018). Elle peut même être impossible si le logement n'est pas traversant ou contre-productive si elle n'est pas opérée au bon moment par les occupants (lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure) ;
- La **climatisation** est un moyen efficace de limiter la surchauffe intérieure, mais qui présente de nombreux désavantages : coûts d'installation, de fonctionnement et de maintenance importants, consommation élevée et dépendance électrique, fonctionnement optimal pour des bâtiments déjà énergétiquement performants, rejet d'air chaud aggravant l'effet d'îlot de chaleur urbain (Dolques & Dépoues, 2022; Sukanen et al., 2023; Taylor et al., 2023). L'utilisation d'une climatisation doit toutefois rester possible lorsque les autres stratégies ne suffisent plus, en particulier pour les populations les plus vulnérables (Dolques & Dépoues, 2022).
- L'**isolation** des façades et en particulier du toit protège de la surchauffe en limitant la transmission de chaleur vers l'intérieur. Toutefois, dans les cas extrêmes, il existe un risque de retenir la chaleur à l'intérieur, en particulier pour des bâtiments (passifs) qui ont été conçus pour tirer profit des apports de chaleur internes et des gains solaires (Taylor et al., 2023). Globalement, l'absence de réglementation en lien avec la surchauffe tend à orienter la conception des bâtiments pour le confort d'hiver et à négliger le confort d'été. Or, l'isolation des bâtiments n'est pas suffisante pour assurer le confort des occupants pendant toute l'année et il est déjà prouvé que le respect strict des normes actuelle en termes de performance énergétique ne permet pas de faire face aux vagues de chaleur actuelles et futures (Amaripadath et al., 2023; Attia & Gobin, 2020). Aux Pays-Bas, les bâtiments construits selon les normes de 2012 subissent plus de surchauffe que ceux construits avant 1970 (Monge-Barrio & Sánchez-Ostiz Gutiérrez, 2018). Une isolation reste évidemment essentielle, mais doit être couplée à d'autres mesures telles que l'ajout de protections solaires par exemple.
- La mise en place de dispositifs de **protections solaires** (volets, louveres, ...). Idéalement ces dispositifs doivent être placés à l'extérieur du bâtiment, de manière à éviter l'incidence de la radiation solaire dans le bâtiment. Ils peuvent être opérés de manière automatique ou manuelle, avec des avantages et des inconvénients dans les deux cas. Dans le cas d'une opération automatique, le système est généralement couplé avec une régulation thermique centralisée. Des protections solaires peuvent être déployées sur les bâtiments neufs comme les bâtiments existants.

Critique

Dans la littérature, la vulnérabilité du logement vis-à-vis des vagues de chaleur est principalement étudiée à travers des modélisations de la performance énergétique des bâtiments. Ces analyses sont généralement réalisées au cas par cas ou proposent des comparaisons de plusieurs configurations afin de choisir les mesures d'adaptation les plus efficaces dans différents contextes. Dans le cadre de ce projet, il n'est ni possible ni pertinent de descendre à l'échelle de chaque bâtiment, mais il reste important de tenir compte de leur vulnérabilité à l'échelle urbaine. Parmi tous les facteurs identifiés

dans la littérature, il nous faudra donc sélectionner ceux pour lesquels des données sont disponibles et utiles pour notre étude. Nous ne réaliserons pas d'analyses statistiques pour sélectionner les critères et construire un modèle prédictif, mais nous baserons sur les conclusions déjà avancées dans la littérature.

3. Méthodologie d'analyse de vulnérabilité

Approche générale

Les variables qui ont une influence sur la vulnérabilité des logements et de leurs habitants face aux vagues de chaleur sont très variées et leur distribution spatiale peut donc révéler des différences importantes entre différents quartiers d'une ville (Buzási, 2022). L'approche développée ici vise donc à croiser plusieurs variables dont l'impact a déjà été démontré dans la littérature afin d'identifier le nombre de bâtiments en situation critique, c'est-à-dire particulièrement vulnérables vis-à-vis des vagues de chaleurs.

Les facteurs considérés seront probablement (en fonction de la disponibilité des données) :

- L'âge des habitants afin d'identifier les publics les plus sensibles à la chaleur (enfants et seniors) ;
- Le profil socio-économique de manière à faire une hypothèse quant à la présence d'un équipement de conditionnement d'air et à la capacité budgétaire à adapter le logement ;
- La structure des ménages (et la taille des logements) afin de repérer les petits ménages isolés ;
- L'âge des bâtiments afin de déterminer le niveau d'isolation thermique⁹ ;
- La distance aux espaces verts accessibles¹⁰ et aux éventuels refuges communaux ;
- La distance aux établissements de soin.

Comme suggéré dans la littérature, les facteurs de vulnérabilité étudiés reprennent donc à la fois des caractéristiques du bâtiment, de sa population ou de son environnement direct.

Zones à risque

Les zones à risque résulteront du croisement des facteurs de risque présentés auparavant. Des zones d'intervention prioritaires seront ensuite identifiées en superposant ces zones à risque avec celles proposées dans le cadre de la thématique des îlots de chaleur urbain.

Données

L'identification des zones où les logements sont en situation critique vis-à-vis des vagues de chaleur dépendra notamment de la cartographie des îlots de chaleur urbain préalablement construite dans le chapitre dédié. Les autres données (cadastrales, socio-économiques, etc.) devront être collectées à l'échelle de la Wallonie.

Liens thématiques et parties prenantes

Cette thématique est en lien direct avec celle des îlots de chaleur urbain, mais également avec celles de la santé et des aspects socio-économiques. Des parallèles pourront également être réalisés avec la thématique des inondations qui touche également plus fortement les ménages les plus vulnérables.

⁹ Une absence ou un manque d'isolation peut déjà provoquer un risque de surchauffe « chronique » en temps normal, sans prise en compte du changement climatique (Taylor et al., 2023). Les logements mal isolés sont donc particulièrement vulnérables.

¹⁰ Le chapitre en lien avec les îlots de chaleur urbain traitera plutôt de la manière dont les espaces verts en ville limitent la température et offrent de l'ombrage. Ce chapitre s'intéressera plutôt à la possibilité des habitants de se réfugier dans des espaces frais si l'habitabilité de leur logement est menacée.

4. Mesures d'adaptation

La végétalisation du centre-ville participe à créer un micro-climat qui permet de rafraîchir localement les espaces urbains, mais ne suffit pas et doit s'accompagner d'autres mesures à l'échelle du bâtiment et du comportement de ses occupants (Taylor et al., 2023). Le recours systématique à la climatisation est une mesure d'adaptation qui s'impose peu à peu en Europe, au risque de mettre en péril la logique d'atténuation en augmentant les consommations électriques et le risque de « surchauffe urbaine » (Dolques & Dépoues, 2022). En Europe, la réglementation PEB encourage donc l'usage de solutions passives plutôt qu'actives (Taylor et al., 2023).

Les mesures proposées doivent concerner prioritairement le bâti existant, et donc la rénovation du parc de logement, pour éviter l'installation massive d'équipements de conditionnement d'air. Un renforcement des normes actuelles, en tenant compte des projections futures en termes de température plutôt qu'un aléa historique, est également essentiel pour intégrer le changement climatique (Dolques & Dépoues, 2022). En effet, les logements ne sont actuellement soumis à aucune réglementation en regard de la surchauffe et l'isolation ne suffira plus compte tenu de l'évolution climatique. Citons pour exemple des mesures telles que la végétalisation de toiture et de façade, la protection des vitrages si ceux-ci sont importants et fort exposés, le bâti de couleur blanche... Une priorisation des mesures peut également être envisagée selon que le bâtiment soit considérée dans une zone à risque d'îlot de chaleur ou comme plus à risque de surchauffe.

Les mesures d'adaptation proposées pourront s'inspirer des techniques déployées dans des climats plus chauds et porter notamment sur les protections solaires et les zones de refuges (intérieures et extérieures) (Sharma et al., 2022). Ces mesures appliquées au bâtiment doivent absolument s'accompagner de recommandations à destination du grand public, car le comportement des occupants est déterminant en termes de gestion de crise et d'efficacité des systèmes mis en place (ex : manipulation des protections solaires mobiles, horaire de la ventilation naturelle) (Sukanen et al., 2023). En Europe, de nombreux outils sont déjà disponibles à cet égard (par exemple, le plan wallon forte chaleur ou encore des guides techniques de l'ADEME en France), mais se concentrent plutôt sur l'hydratation, l'habillement, les sorties, etc. plutôt que sur l'opération du bâtiment.

1.5. Logement et inondations

1. Introduction

La vulnérabilité des villes aux inondations est particulièrement critique car les politiques de gestion du risque se sont jusqu'à présent focalisées sur des mesures de résistance plutôt que d'adaptation. Les inondations de 2021 en Wallonie ont démontré la vulnérabilité importante des fonds de vallée où se concentrent l'urbanisation et la population, dans les zones les plus à risque de nos territoires. L'adaptation des bâtiments existants est essentielle compte tenu de la mise à jour récente des débits caractéristiques, réalisée dans le cadre de modélisations hydrauliques suite aux événements de juillet 2021, qui annonce un élargissement des zones d'aléa dans tous les fonds de vallée. L'analyse de la vulnérabilité aux inondations doit donc tenir compte de l'évolution du risque sous l'effet du changement climatique, mais aussi des profils socio-économiques des habitants qui y sont exposés.

2. Etat des lieux

Synthèse

En Wallonie, le **risque d'inondation** peut provenir de deux phénomènes majeurs différents : (1) le débordement du cours d'eau qui quitte son lit pour s'écouler dans la vallée ou (2) le ruissellement des eaux de pluie qui peuvent provoquer des inondations à d'autres endroits du bassin versant. Une inondation peut également être le résultat d'une remontée de nappe, du refoulement des égouts ou de phénomènes karstiques par exemple, mais ces cas ne sont en général pas directement liés au **changement climatique**. Le risque d'inondation par débordement/ruissellement est par contre influencé par l'évolution du climat. Les analyses menées dans le cadre du Schéma Vesdre ont démontré que, d'une part, des précipitations similaires à celles de juillet 2021 pourraient se reproduire à deux ou trois reprises d'ici 2050 et, d'autre part, que les débits observés pendant les inondations de juillet 2021 s'intègrent dans la série statistique historique (avec un temps de retour estimé à environ 300-400 ans). Il s'agit donc d'un événement exceptionnel en termes de débit, mais qui doit être intégré pour recalculer les futures cartes de l'aléa d'inondations.

De manière générale, le risque d'inondation se décompose en trois éléments :

1. Le **danger** d'inondation correspond à l'aléa et donc à la probabilité d'observer des inondations par ruissellement ou par débordement suite à des précipitations ;
2. L'**exposition** aux inondations correspond à la présence de bâtiments, d'infrastructures et de personnes au sein des zones soumises à un risque d'inondation. En Province de Liège, les populations les plus exposées appartiennent aux classes socio-économiques les plus précarisées, avec une exposition maximale pour les habitants des classes moyennes (Poussard et al., 2021). En outre, la vallée de la Vesdre se caractérise par des constructions historiquement très proches du cours d'eau et donc extrêmement exposées (Schelings et al., 2023) ;
3. La **vulnérabilité** aux inondations renvoie aussi bien aux caractéristiques des bâtiments (ex : absence d'étage pour les logements, type de fonctions plus sensibles aux inondations, localisation des services de secours) et de leurs abords (ex : terrain en pente, chemin d'évacuation), que de celles des habitants (ex : précarité, isolement, manque de mémoire et de culture du risque).

Suite aux inondations de juillet 2021, le Service Public de Wallonie (SPW) a commandité une série d'études qui sont aujourd'hui pour la plupart terminées. Celles-ci sont synthétisées dans le tableau ci-dessous et contiennent de nombreuses informations (diagnostic, analyses spatiales, propositions d'aménagement, mesures d'adaptation, etc.) quant à la vulnérabilité des villes et des logements face aux inondations. Plusieurs travaux de fin d'études (TFE) ont également été réalisés au sujet de la vulnérabilité aux inondations et font appel à des articles scientifiques internationaux. La vulnérabilité

aux inondations était déjà un sujet d'étude et de recherche au SPW et à l'Université de Liège avant les événements de 2021 et certaines références sont antérieures à ces événements.

Références	Description
(Barcellona Corte et al., 2022; Teller et al., 2023)	Le Schéma stratégique du bassin versant de la Vesdre vise la production d'une vision territoriale multidisciplinaire et partagée afin d'orienter la reconstruction résiliente et cohérente du bassin versant de la Vesdre, selon des principes d'adaptation climatique et de solidarité territoriale, à l'horizon 2050. Cette étude globale concerne les 25 communes du bassin versant de la Vesdre, correspondant à des territoires à la fois de plateaux et de fonds de vallées, des espaces naturels et des espaces urbanisés (703 km ²).
(SPW, 2022b)	Les Programmes de Développement Durable de Quartiers (PDDQ) se sont focalisés sur l'aménagement de quartiers localisés dans des communes particulièrement impactées par les inondations : Chaudfontaine, Liège, Limbourg, Pepinster, Theux, Trooz et Verviers, Esneux et Rochefort. Ces études plus spécifiques proposent des pistes de reconstruction pour les zones les plus sinistrées en fond de vallée. Les PDDQ s'inscrivaient donc dans une temporalité plus courte, en réponse à la nécessité urgente d'intervenir localement.
(Circulaire sur la constructibilité en zone inondable, 2021; SPW, 2022a, 2023b, 2023a)	Deux Référentiels concernent (i) les constructions et les aménagements en zone inondable (2022) et (ii) la gestion durable des eaux de pluie (2023). Ces référentiels peuvent être mobilisés dès à présent et s'appliquent à l'échelle du projet de construction ou de rénovation. Ces guides illustrés visent à compléter la Circulaire ministérielle du 23 décembre 2021 relative à la constructibilité en zone inondable. Ils s'adressent aux professionnels de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire (administrations communales et régionales, auteurs de projets, promoteurs...), en particulier en lien avec les demandes de permis et les remises d'avis. A noter que, depuis 2014, la Wallonie propose un Guide de bonnes pratiques relatif à la réduction de la vulnérabilité des constructions existantes (mis à jour en 2023).
((Pas encore disponible))	L' Étude hydraulique et hydrologique (convention MODREC) a démarré en mai 2022 et prendra fin en début d'année 2024. Cette étude complète a débuté par une « étude courte » (MODREC Phase 1) visant à fournir rapidement des données utiles dans le cadre du Schéma Vesdre, à savoir une modélisation statique de l'ensemble du linéaire de la Vesdre et d'une partie de la Hoëgne. Ces résultats intermédiaires ont permis de définir des « classes d'exposition aux inondations » sur base de la hauteur d'eau et de la période de retour, actualisées sur base des nouveaux débits recalculés par le Groupe de Travail Inondations (GTI) suite aux événements de juillet 2021. Cette première phase est complétée d'une modélisation hydrologique dynamique intégrant notamment les effets de stockage des zones d'expansion de crue localisées en amont et le long des cours d'eau. L'étude complète concerne l'ensemble du bassin versant de la Vesdre, y compris ses affluents secondaires.
TFE (Poussard, 2019)	Inondations et inégalités environnementales
TFE (Noulin, 2021)	How to adapt and design houses to flood risks? Case studies from UK and Belgium

En Europe, de nombreux guides pratiques fournissent des recommandations aux propriétaires de logements vulnérables aux inondations et des mesures d'adaptation à l'échelle de territoires plus vastes (villes, régions, bassins versants). Des exemples ont déjà été analysés dans le cadre de la rédaction des référentiels wallons.

Critique

La plupart des références listées ici se concentrent sur la Province de Liège et le bassin versant de la Vesdre. Le travail devra être étendu à l'ensemble de la Wallonie, sans refaire les analyses qui ont déjà été réalisées, mais en reprenant les méthodes développées pour un territoire plus large et en y attribuant et les recommandations avancées par ailleurs.

3. Méthodologie d'analyse de vulnérabilité

Approche générale

L'état des lieux révèle l'abondance de littératures scientifique et grise sur le sujet de la vulnérabilité des milieux urbains et des bâtiments résidentiels aux inondations. L'état des lieux nous permet également de capitaliser sur deux méthodes existantes pour définir les zones à risque.

La première méthode que nous appliquerons est entièrement documentée dans un article de journal publié en 2021 (Poussard et al., 2021). En résumé, la méthodologie proposée consiste à croiser deux cartographies :

- Une **carte du risque d'inondation**, qui est basée sur une modélisation hydraulique et identifie trois niveaux de risque - faible (niveau 1), moyen (niveau 2) ou élevé (niveau 3) - en fonction de la fréquence des inondations, de la profondeur d'eau et de la vitesse d'écoulement ;
- Une **carte de l'indice de disparité socio-économique** à l'échelle des secteurs statistiques, qui propose cinq classes de population en fonction du statut socio-économique (calculé sur base de l'origine et de la nationalité, du niveau de revenu imposable, du taux de chômage et d'activité, et de la part des ménages bénéficiant d'un revenu de sécurité sociale). La classe 1 correspond aux populations les plus démunies, la classe 5 aux populations les plus aisées.

Ces cartes sont ensuite comparées avec les **données cadastrales** afin d'analyser l'exposition au risque à l'échelle des bâtiments (en considérant que les habitants des bâtiments d'une zone statistiques partagent un même indice de disparité, les données à l'échelle individuelle n'étant pas disponibles).

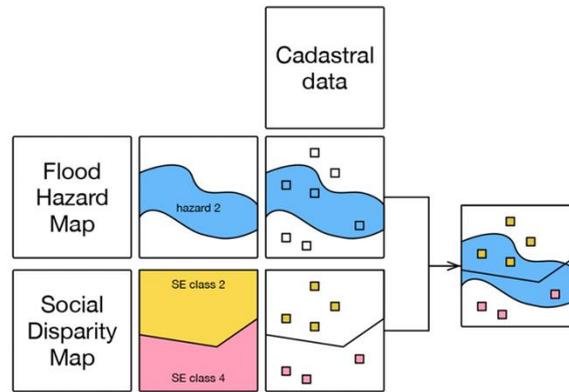


FIGURE 3 | Combination of flood hazard and socio-economic data at the building level through the use of cadastral data. Squares represent building footprints. Cadastral data provides information about the number of housings per building. The combination of the data sets results in a database of housings with a given index of social disparity (ISD) class and a given hazard level covering the entire territory. This is used for estimating the number of households exposed to a certain level of hazard along the different socio-economic levels.

Cette méthode permet de définir des zones prioritaires en termes de vulnérabilité des habitants, dont le logement se situe en zone à risque et dont la situation socio-économique peut limiter la capacité d'adaptation. En ce qui concerne la vallée de la Vesdre, il sera possible de considérer les cartes officielles de l'aléa d'inondations (2021), mais aussi les cartes des classes d'exposition au risque d'inondation proposée dans le cadre du Schéma Vesdre (2023), dont les emprises sont plus larges que les zones d'aléa actuelles.

Par ailleurs, le statut de propriété des habitants (propriétaires ou locataires) est également un facteur qui pourrait être pris en compte pour déterminer si des mesures d'adaptation peuvent être réalisées (Djanaraliev, 2022). A cet égard, une recherche flamande propose la mise en place d'un audit des bâtiments résidentiels en termes d'adaptation aux inondations, pour réaliser une évaluation à la manière d'un audit énergétique (Davids, 2021). Une démarche est actuellement en cours pour mettre en place une formation similaire en Wallonie.

La seconde méthode consiste également à croiser plusieurs informations afin de construire trois cartes successives :

- Une carte de la vulnérabilité en cinq niveaux - 1 étant le plus faible, 5 le plus élevé - défini sur base de « récepteurs de vulnérabilités » qui intègrent des fonctions (du sol, des bâtiments, des réseaux) et des zones de risque environnemental (sites Seveso, établissements IED, ...) ;
- Une carte du niveau d'acceptabilité pour des mailles de 20 m, qui est construite sur base d'un croisement entre la carte de vulnérabilité et les hauteurs d'eau et périodes de retour issues de la modélisation hydraulique. Ce niveau d'acceptabilité varie entre -2 (risque inacceptable) et +2 (risque acceptable). Par exemple, il apparaît plus acceptable d'inonder un espace vert qu'un bâtiment résidentiel ;
- Une carte des 56 périmètres d'attention prioritaires situés le long de la Vesdre et de la Hoëgne, tracés manuellement sur base de la carte précédente et classés selon 5 catégories (quantiles). Les périmètres sont hiérarchisés selon leur score global (plus le score est élevé, moins l'inondation de la zone est acceptable et plus une intervention est nécessaire).

Cette seconde méthode permet notamment de tenir compte de l'usage des bâtiments et pourrait également intégrer les questions liées aux infrastructures et aux services d'urgence, qui sont parfois mal localisés vis-à-vis du risque. Elle exige néanmoins de disposer d'une donnée d'entrée assez précise, à

savoir les hauteurs d'eau pour quatre récurrences (25, 50, 100 et 1000 ans), donnée qui n'est pas encore disponible sur tout le territoire wallon.

Zones à risque

La première méthode décrite ci-dessus permettra de fournir une cartographie des zones à risque pour la Wallonie.

Données

L'application de la seconde méthode est conditionnée par la mise à disposition d'une modélisation hydraulique, car elle nécessite de disposer des hauteurs d'eau précises (pas uniquement la distinction de trois niveaux tels que proposés dans la carte du risque d'inondation). Cette méthode a déjà été mise en place pour le bassin versant de la Vesdre sur base de l'étude MODREC et pourrait être déployée à l'échelle wallonne si les données de modélisation sont fournies.

Liens thématiques

Des liens avec la thématique sociale seront à réaliser, de même qu'avec celles de l'eau et des infrastructures.

4. Mesures d'adaptation

Si des concomitances peuvent apparaître avec la thématique eau, les mesures proposées ici se concentreront principalement au niveau des bâtiments résidentiels (sur base des référentiels) dont la vulnérabilité sera étudiée vis-à-vis des profils socio-économiques et de l'exposition au risque (cartes d'aléa et du risque d'inondation et cartographie des classes d'exposition aux inondations lorsqu'elle est disponible). Ces mesures pourront traiter de :

- Normes urbanistiques pour la résilience du bâti aux inondations ;
- Sensibilisation aux types d'habitations qui n'imperméabilisent pas le sol ;
- Identification et accompagnement des bâtiments à risque d'inondations et sensibles, dans l'élaboration de plans d'urgence spécifiques hôpitaux/crèches/homes/écoles ;

1.6. Incendies

1. Introduction

Les feux de forêts sont de plus en plus fréquents sous l'effet des périodes de sécheresse et des canicules (PwG, 2022). L'urbanisation tend à augmenter les risques d'incendies urbains et de feux de forêt ainsi que la vulnérabilité des populations. D'une part, les villes s'étendent sur des territoires autrefois réservés à l'agriculture, réduisant les espaces tampons entre les forêts et les zones urbanisées et densifiant les zones à risque à proximité des forêts. D'autre part, les trames bâtie et forestière s'entremêlent progressivement, créant un contact direct entre la source d'allumage (les bâtiments) et le combustible (les forêts). Si les zones bâties sont souvent à l'origine du départ de feu, elles permettent néanmoins de limiter leur propagation à d'autres zones. Le changement climatique, et en particulier l'augmentation des températures, tend à augmenter le risque d'incendie en asséchant les sols et la végétation, mais va surtout modifier la structure de la végétation, amplifiant ou atténuant leur sensibilité aux incendies.

Le cahier des charges ne reprenait pas d'attente pour la thématique des feux de forêts. La liste d'outils proposée découle d'une brève revue de la littérature. Les références employées sont principalement des articles scientifiques internationaux, au-delà de la Belgique (et des pays nord-européens) où la recherche reste limitée sur ce sujet.

Référence	Couverture géographique	Sujet
(Depicker et al., 2020)	Belgique	Risque d'incendie en Belgique
(Knorr et al., 2016)	Global	Dynamiques démographiques et climatiques
(Maille & Espinasse, 2006)	Méditerranée	Dynamiques d'urbanisation et de couverture du sol
(Modugno et al., 2016)	Europe	Cartographie des interfaces WUI
(Price & Bradstock, 2014)	Australie	Urbanisation comme facteur de risque et de protection
(Wu & Ren, 2009)	Chine	Localisation et temps de réponse des services de secours
(Yao et al., 2022)	Californie, USA	Vulnérabilité du réseau électrique

2. Etat des lieux

Synthèse

Le **changement climatique** a un impact direct sur la vulnérabilité des territoires aux feux de forêts et aux incendies urbains, mais cette thématique est encore peu explorée dans la littérature. D'une part, le réchauffement climatique induit des vagues de chaleur et des périodes de sécheresse qui sont susceptibles d'amplifier la taille et l'intensité des feux de forêts dans le futur (Depicker et al., 2020). D'autre part, l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère a pour effet de modifier la croissance de la végétation et la structure des écosystèmes, ce qui influence l'inflammabilité des forêts et peut redistribuer spatialement le risque d'incendie (Knorr et al., 2016). En Europe, les feux de forêts touchent actuellement principalement les régions méditerranéennes (Modugno et al., 2016), mais pourraient s'étendre à l'avenir aux régions tempérées comme la Belgique ou l'Allemagne (Depicker et al., 2020). Le manque d'historique en Belgique limite également la culture du risque d'incendie.

Le **risque d'incendie** correspond à la probabilité d'allumage d'un feu de forêt et découle de trois éléments (Depicker et al., 2020; Knorr et al., 2016; Price & Bradstock, 2014) :

1. le **danger d'incendie**, qui dépend principalement de la présence d'une source de feu et d'un combustible (ex : une forêt, une haie). L'origine de l'incendie est généralement humaine (ex : une cigarette, un feu de camp), plus rarement technique (ex : un court-circuit, vétusté d'une installation électrique), et exceptionnellement naturelle (ex : foudre). Les caractéristiques de la végétation (ex : taux d'humidité, hauteur) ont également un impact sur le départ de feu ;
2. l'**exposition à l'incendie**, qui varie en fonction de la propagation du feu vers des éléments vulnérables. La propagation dépend notamment des conditions climatiques (ex : temps chaud et sec, vent) et des configurations spatiales (ex : urbanisation dispersée, présence d'une pente, d'un chemin coupe-feu) ;
3. la **vulnérabilité à l'incendie**, qui correspond à la prédisposition des biens et des personnes à être affectés par l'incendie. Outre les potentielles pertes humaines, les éléments touchés par l'incendie se caractérisent souvent par une perte de valeur, qu'elle soit socio-économique (ex : dégâts aux bâtiments résidentiels, interruption d'une activité commerciale) ou environnementale (ex : dommages dans une réserve naturelle, dégradation de la biodiversité).

En général, le risque est donc plus important dans les zones où se rencontrent un danger et un objet qui y est exposé et potentiellement vulnérable. Dans le cas des feux de forêts et des incendies urbains, il est intéressant de noter que les bâtiments peuvent à la fois être (1) la source du danger en provoquant un départ de feu, (2) des objets exposés en fonction de la propagation du feu et de la configuration spatiale, et (3) des objets vulnérables puisqu'ils abritent des activités humaines (Maille & Espinasse, 2006).

Par conséquent, le risque d'incendie et les dégâts associés sont plus importants à l'**interface entre les zones bâties et les zones naturelles** (Maille & Espinasse, 2006). L'« interface urbain-sauvage » (Wildland-Urban Interface, WUI) est défini et cartographié de multiples manières dans la littérature et les documents légaux internationaux, chaque proposition s'adaptant au contexte local auquel elle s'applique. En général, les interfaces WUI correspondent à « *des paysages où l'utilisation anthropogénique et urbaine des sols et la masse de combustible forestier entrent en contact* » (Modugno et al., 2016). Cet interface est particulièrement vulnérable, car l'incendie peut s'y propager facilement et menacer directement la population, des habitations, des espaces protégés, etc. (Price & Bradstock, 2014). En Europe, la cartographie de ces espaces repose sur l'intersection entre (i) les espaces urbanisés, autour desquelles est appliqué un tampon compris entre 50 et 200 mètres, et (ii) les espaces forestiers, élargis d'un tampon compris entre 100 et 400 mètres (Modugno et al., 2016).

A l'échelle mondiale, l'emprise spatiale de l'interface WUI, et le **risque d'incendie urbain** associé, ne cesse d'augmenter compte tenu des dynamiques d'urbanisation et d'étalement urbain (Wu & Ren, 2009). En Belgique, l'interface WUI représente déjà une large proportion du territoire (11%) par rapport à d'autres pays européens (par exemple, 4% en France) (Modugno et al., 2016). La probabilité d'occurrence d'un feu dans cet interface WUI est importante, car elle se caractérise par une urbanisation relativement dispersée (Maille & Espinasse, 2006), cas typique en Wallonie. Si la Belgique a jusqu'à présent été relativement épargnée par les « grands » feux de forêt (Depicker et al., 2020), aussi bien en termes de nombre de feux que de surfaces brûlées (Modugno et al., 2016), ceux-ci pourraient être particulièrement dévastateurs à l'avenir. Il existe un réel risque d'incendie urbain, qui n'est plus cantonné aux espaces naturels, en particulier aux forêts, mais s'étend aux zones urbaines et périurbaines. Il est donc essentiel d'étudier les relations entre l'urbanisation et les risques d'incendie (Price & Bradstock, 2014).

A cet égard, Price et Bradstock identifient l'**urbanisation** comme une « *arme à double tranchant, car elle augmente la probabilité d'inflammation, mais protège également les zones contre la propagation du feu* » (2014). De manière générale, l'urbanisation induit un plus grand nombre de départs de feux, mais permet aussi de limiter leur propagation (Price & Bradstock, 2014). En effet, l'artificialisation des sols et

la fragmentation du paysage tend à modifier le type et la présence de végétation, et donc à limiter la quantité de combustible (Knorr et al., 2016). En Belgique, la forte densité de population associée à l'urbanisation a également pour effet que les incendies sont rapidement détectés par les habitants et signalés aux services de secours (Depicker et al., 2020). La localisation et le temps de réponse des services de secours, qui dépend également de l'organisation du territoire et de son réseau routier, sont également des éléments essentiels à intégrer (Wu & Ren, 2009). Par contre, la périurbanisation généralisée rend le territoire particulièrement vulnérable aux incendies, car la source et le combustible sont systématiquement proches l'un de l'autre (Depicker et al., 2020). Les incendies d'origine électriques sont également une cause majeure de grands incendies en Californie et découlent de la nécessité de déployer des lignes électriques à travers des zones arborées (Yao et al., 2022).

La couverture et l'utilisation du sol a également un impact sur le risque d'incendie. En Europe méditerranéenne, les activités d'agriculture et d'élevage ont fortement diminué pour laisser place à des occupations industrielles et touristiques (Maille & Espinasse, 2006). De nombreux terrains agricoles ont été abandonnés et sont peu à peu envahis de broussailles et d'arbustes davantage inflammables, voire investis par des bâtiments qui deviennent des sources d'incendie potentielles à proximité de la végétation native (Modugno et al., 2016). Historiquement, ces zones agricoles jouaient le rôle de barrière entre les zones urbanisées et les forêts naturelles (Maille & Espinasse, 2006), mais ce périmètre de protection ne cesse de diminuer à mesure que les villes et les forêts s'étendent, voire se rejoignent (Modugno et al., 2016). En Flandres, les landes sont également très vulnérables lorsqu'elles servent de sites d'entraînement militaires (Depicker et al., 2020). Les Fagnes et les Ardennes sont également des zones à risque compte tenu de l'omniprésence de résineux, y compris en remplacement des zones humides et tourbeuses naturelles, et des activités touristiques.

Critique

L'état des lieux met en évidence le manque de connaissances en lien avec les incendies urbains, en particulier en Europe où les publications à ce sujet sont rares et concernent principalement les pays de la Méditerranée (France, Espagne, Italie). Les références mobilisées sont donc également issues d'autres régions du monde où le risque de feu de forêt est mieux connu et/ou plus étudié (Californie, Australie, Chine).

3. Méthodologie d'analyse de vulnérabilité

Approche générale

Les risques d'incendie seront étudiés en regard d'un double mécanisme :

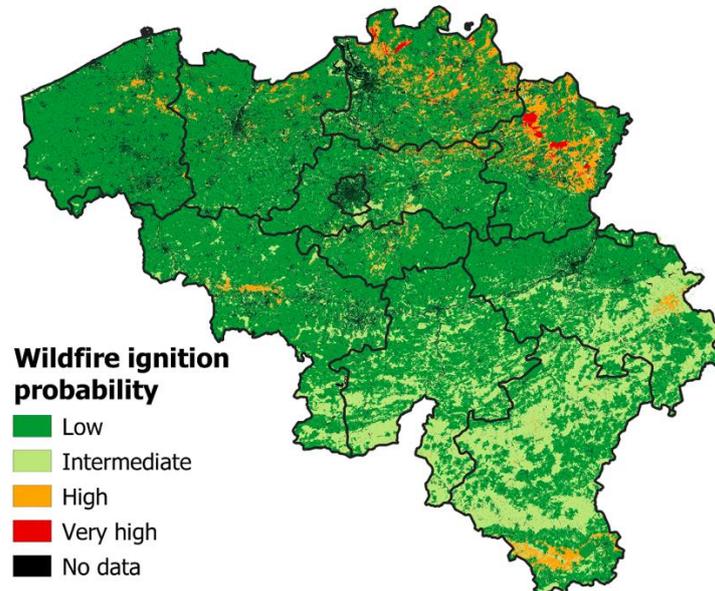
1. **De la ville vers la nature** : le milieu bâti est vu comme un déclencheur d'incendies qui pourraient s'étendre vers le milieu naturel avec des risques importants en termes de services écosystémiques (sources potentielles : vétusté du réseau électrique, activités humaines responsables de 95% des incendies) ;
2. **De la nature vers la ville** : la présence d'activités humaines dans la nature (en particulier le tourisme) peut déclencher l'incendie au cœur même de l'espace naturel et les continuités de la trame verte peuvent devenir des vecteurs qui ramènent l'incendie vers les zones urbanisées (et donc vers la population).

Ces deux mécanismes peuvent être renforcés par différents facteurs de risque, en particulier la dispersion du tissu urbain wallon ainsi que l'absence de culture du risque d'incendie en Wallonie, et s'enclenchent généralement au niveau de l'interface entre les milieux bâti et naturel (WUI).

De manière générale, il y a peu d'information sur cette thématique, mais Depicker et al. font le point sur la situation en Belgique (recensement des incendies et carte du risque) (2020).

Zones à risque

Les zones à risque concernent aussi bien la ville que la forêt qui sont toutes deux vulnérables aux incendies. La carte de la probabilité d'inflammation, directement liée au risque d'incendie, proposée par des chercheurs belges permet déjà d'identifier les zones les plus à risque en Wallonie sur base des incendies historiques, de la couverture, de la nature et de l'utilisation du sol (Depicker et al., 2020).



Cette cartographie nous servira de base pour proposer les mesures d'adaptation. Des zooms sur les zones les plus à risque pourraient être construits afin d'y délimiter les interfaces WUI sur base d'un indicateur de distance entre les zones urbanisées et les zones naturelles. Aucun seuil de densité de population ne sera proposé, étant donné que le risque découle davantage d'une imbrication entre une zone peuplée et une zone non peuplée, mais qu'un petit groupement d'habitations en cœur de forêt peut parfois faire plus de dégât qu'une ville protégée par une zone tampon.

Notons par ailleurs que la carte ci-dessus pourrait, dans le cadre d'une étude subséquente, être revue en fonction des changements d'usage et de couverture du sol potentiellement observés à l'avenir, notamment les modifications projetées en termes de végétation sous l'effet du changement climatique. Il s'agirait par ailleurs d'intégrer la vulnérabilité des espaces verts dans cette analyse, en tenant compte par exemple de leur statut de protection.

Données

La thématique des feux de forêt et incendies urbains peut être étudiée à la fois en termes descriptifs et prospectifs. Dans le cadre de cette étude, nous nous limiterons à décrire la vulnérabilité actuelle, mais d'autres études devront probablement compléter ce travail avec des données en lien avec les dynamiques futures en termes d'urbanisation, de services écosystémiques et de démographie.

Liens thématiques et parties prenantes

Cette thématique est directement liée à celle des forêts, mais aussi le tourisme, les infrastructures et services d'urgence et la thématique transversale de l'aménagement du territoire (dynamique d'urbanisation). Un lien existe également avec le développement d'une nouvelle culture du risque intégrant des risques encore peu observés en Wallonie mais amenés à s'intensifier à l'avenir, tels que les grands incendies.

Les parties prenantes à contacter seront en priorité les chercheurs belges ayant déjà étudié la thématique à l'échelle de la Belgique, mais aussi les services de secours (pompiers).

L'impact des incendies sur l'activité touristique devrait également être intégrée dans cette approche, au vu de l'importance du tourisme nature dans l'offre de la Wallonie.

4. Mesures d'adaptation

Les mesures d'adaptation dans le cadre des risques d'incendies urbains devraient principalement s'intéresser au milieu bâti et ses habitants. Ces mesures peuvent passer par des recommandations d'occupation des sols au sein des interfaces WUI (ex : distance et type de végétation aux abords d'une maison située en pleine forêt ; création de bande coupe-feu dans les coulées vertes urbaines), mais aussi par la sensibilisation des habitants et des touristes pour limiter les départs de feu, ou encore par des stratégies à l'échelle du territoire wallon (ex : localisation des tours de guet et des casernes). Pour pallier ce risque, un système de surveillance et de prévision serait également judicieux afin de cartographier de manière instantanée les incendies de feux de forêt.

Chapitre 8) Infrastructures

1.1. Introduction

L'évolution du climat engendre un changement du régime hydrologique et une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes (pluies intenses, inondations, sécheresses, canicules, orages, vents violents). Par ailleurs, les phénomènes karstiques et de retrait-gonflement des argiles constituent un risque supplémentaire étant donné l'instabilité de terrain qu'ils engendrent, renforcés par l'imperméabilisation et l'artificialisation du territoire (ECORES-TEC, 2011).

Les répercussions du changement climatique sur les infrastructures bâties par la société humaine pourront être multiples car celles-ci y sont souvent peu adaptées. Elles subiront alors des dégradations à plusieurs niveaux :

- Sur les **infrastructures elles-mêmes** : dégradations subies des infrastructures (endommagement, déformation ou destruction structurelle) nécessitant des réparations voire la reconstruction complète. Ces dommages engendreront des coûts importants pour la collectivité (Etat fédéral, Régions, Communes) si ce sont les infrastructures publiques qui sont touchées, pour les citoyens et les entreprises si ce sont les infrastructures privées qui sont touchées et pour les organismes d'assurances. Les besoins en ressources humaines et budgétaires pour l'inspection des infrastructures pendant et après les phénomènes climatiques seront également en hausse.
- Sur **l'environnement** de ces infrastructures¹¹ : mouvements du sol, glissements de terrain, inondations...

Ces dégradations entraîneront des perturbations voire des arrêts (temporaire ou définitif) de la fonctionnalité des infrastructures. Par exemple, les infrastructures de transport touchées impacteront les chaînes d'approvisionnement des entreprises, la mobilité des personnes et augmenteront les coûts de transport. Tout cela mettra en danger la population et plus particulièrement encore les personnes vulnérables (inondations, accidents) et pourra perturber l'accès des services de secours et/ou l'évacuation des personnes en danger. *In fine*, il en résultera potentiellement une réorganisation de la société et de l'économie (ex. modification des destinations touristiques)¹², ce qui modifiera l'usage fait de cette infrastructure. Toutefois, certaines conséquences pourraient s'avérer positives (ex. allongement de la durée de vie d'infrastructures grâce à une diminution du nombre de jours de gel)¹³.

Le présent état des lieux analyse **les infrastructures de réseaux de transport** (rail, les routes, les voies navigables), **les infrastructures de gestion de l'eau** (captage, transport, distribution, égouttage), les **infrastructures aéroportuaires**, les **TIC**, les **systèmes de gestion des déchets** et les **entreprises SEVESO**. Les infrastructures bâties sont traitées dans les sous-chapitres logements de la thématique « Ville » et dans la thématique économique. Les infrastructures liées à l'énergie sont traitées dans la thématique « Energie ».

¹¹ Cerema, <https://www.cerema.fr/fr/actualites/evaluer-impact-du-changement-climatique-infrastructures>

¹² Climat.be, <https://climat.be/changements-climatiques/consequences/transport>

¹³ *Ibidem*

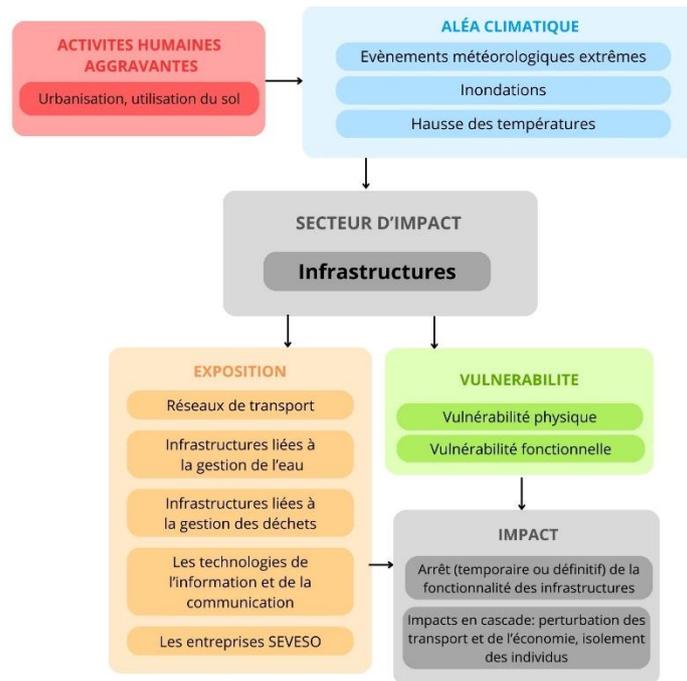


Figure 16 – Chaines d'impacts du chapitre 8 - Infrastructures

1.2. Etat des lieux

Synthèse

Définition du périmètre

Le terme d'infrastructure peut être compris de manière large et inclure de nombreuses choses. La Commission européenne (2021, p.8) définit ainsi **les infrastructures comme notre environnement bâti** et décline même les différents types d'infrastructures que ce concept englobe. Dans le cadre de ce chapitre, nous nous concentrerons sur les **infrastructures de réseaux**, à savoir les réseaux de transport (y compris les voies hydrauliques), les technologies de l'information et de la communication et les infrastructures hydrauliques (fourniture et traitement des eaux). Nous n'incluons pas les infrastructures énergétiques qui seront prises en compte dans le chapitre « Energie ». En outre, nous évaluerons les **systèmes** (infrastructures de gestion des déchets) et les **installations SEVESO** qui se trouvent dans des zones à risques liées au changement climatique. En conséquence, cela exclut les bâtiments résidentiels - traités dans le chapitre « Villes » - et industriels (sauf SEVESO).

La littérature emploie fréquemment les termes d'infrastructures **grises, vertes** ou **bleues**. Les premières correspondent aux ouvrages techniques d'origine humaine souvent construits en béton alors que les deux suivantes sont des systèmes naturels ou aménagés pour favoriser ces derniers. Les infrastructures vertes sont définies comme un « réseau constitué de zones naturelles, semi-naturelles et d'espaces verts qui offre de nombreux services écosystémiques, fondement du bien-être humain et de la qualité de vie » (Agence européenne pour l'environnement, 2015). Pour le Conseil Canadien des Ministres de l'environnement (2021), le terme « infrastructure bleue » est utilisé principalement pour désigner la conservation et la gestion des écosystèmes d'eau douce et côtiers marins. Si les mesures d'adaptation pourront être basées sur des infrastructures vertes et bleues, l'analyse de risques se concentrera uniquement sur les infrastructures « grises », d'origine humaine.

Identification des risques et méthodes d'analyse des risques

Si les types d'infrastructures sont nombreux, les risques auxquels ils peuvent être soumis sont également multiples. Il y aura donc lieu d'établir clairement quels sont les aléas les plus pertinents pour le territoire de la Wallonie et comment ils impactent les différents types d'infrastructures. Bien que variable selon le type d'infrastructures, la littérature sur le sujet est assez abondante, notamment car le concept d'*asset management* est une considération stratégique importante dans le chef des entreprises et autres propriétaires d'infrastructures de grande ampleur.

- Infrastructures de réseaux
 - *Infrastructures de transport*

L'analyse des risques pour les infrastructures de transport peut se comprendre à deux niveaux : au niveau des risques physiques, considérés comme l'exposition des infrastructures, et des risques fonctionnels, considérés comme la sensibilité aux fonctions critiques du transport (services de secours, pompiers, police, évacuations de personnes, accessibilité du transport...) (Colin, Palhol, & Leuxe, 2016).

Le **transport ferroviaire** peut être largement impacté tant par la diversité des aléas (températures élevées/basses, fortes précipitations, vents forts, feux...) que par leurs conséquences (augmentation de la dilatation ou de la déformation des rails des voies ferrées, surchauffe des équipements, dommages aux infrastructures en raison des inondations, glissements de terrain, chutes d'arbres...) provoquant des interruptions ou coupures de la circulation ainsi que des dommages matériels économiquement conséquents (Dépoues, Vanderlinden, & Venturini, 2019) (Quinn, et al., 2017). Quinn et al. (2017) définisse en outre un processus pour développer une stratégie d'adaptation pour le rail. Ce processus comprend notamment (i) l'examen des vulnérabilités potentiels pour les impacts identifiés comme prioritaires, (ii) l'identification et la quantification des pertes socio-économiques et environnementales consécutives à la défaillance du rail, tant pour l'organisation que pour l'extérieur, et (iv) l'évaluation du risque selon un *scoring* de l'intensité et de la fréquence des impacts.

Le **transport routier** est sujet aux mêmes types d'aléas dont dérivent des impacts et risques qui lui sont propres. Par exemple, les revêtements routiers de surface sont particulièrement affectés par de hautes températures alors que des inondations augmenteront le besoin d'entretien et d'investissement dans le drainage et la protection des routes¹⁴. Rychen P. (2013) identifie par aléa les impacts pour les infrastructures mêmes mais aussi pour le trafic et les usagers. Par aléa, Souza de Abreu et al (2022) synthétisent, sur base d'une méta-analyse de la littérature, les impacts, les méthodes d'identification de l'exposition et vulnérabilités (analyses SIG, drones, modélisations 3D...) mais également des mesures d'adaptations pour les infrastructures routières. Gonzva et al (2020) développe une approche de modélisation de la vulnérabilité et de la résilience fonctionnelle d'une infrastructure routière, à l'aide du calcul de deux indicateurs de vulnérabilité physique et d'un indicateur de résilience. La vulnérabilité physique est établie sur base (i) d'un indicateur d'exposition estimé par cartographie et par élèvement par rapport au terrain) et (ii) d'un indicateur de vulnérabilité tenant compte de la densité de population, du nombre d'établissements recevant du public, de bâtiments d'activité économique et d'infrastructures critiques que cette infrastructure dessert ou encore du trafic moyen. Enfin, l'indicateur de résilience évalue quantitativement la capacité de gestion d'un opérateur en cas de crise.

Le transport par **voies navigables** est impacté par (i) la hausse des températures et des sécheresses favorisant l'évaporation de l'eau et abaissant les niveaux d'eau – aussi significativement impactés par la diminution des débits - et (ii) par les inondations, responsables de décharges importantes dans les canaux et cours d'eau causant potentiellement des dommages aux infrastructures d'une part, et rendant la navigation interdite partir d'un certain débit de crue. La qualité et la disponibilité de la navigation est alors mauvaise voire impossible, ce qui peut se traduire par des coûts plus importants et une moindre fiabilité (Hendrickx & Breemersch, 2012). Au-travers du projet ECCONET, Hendrickx & Breemersch (2012) croisent l'application de modèles climatiques, hydrologique et transport-économique pour estimer l'impact économique du changement climatique sur les voies navigables, pour le Rhin et le Danube. Les conclusions pour ces fleuves semblent indiquer que leur importance dans le transport ne devrait pas être impactée significativement à moyen et long terme (Federal Ministry of Transport and Infrastructure, 2015). Il faut noter que l'étude « besoins d'adaptation des voies hydrauliques au changement climatique, aspect étiage » pilotée par la Direction de la Gestion hydrologique (SPWMI) , sera disponible fin 2024 / mi-2025 et n'a donc pas encore pu être analysée. Cette étude fournira des indicateurs d'évolution simulée de la navigabilité des voies hydrauliques en période d'étiage sur base des scénarios climatiques issus du projet Cordex.be.

En termes d'infrastructures, le **transport aérien** est essentiellement concerné au-travers des aéroports. Les aléas pouvant impacter les infrastructures aéroportuaires sont connus et documentés, comme en attestent les travaux de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) (2019). Cette dernière identifie 9 aléas (ex. augmentation du niveau de la mer, changements de températures moyens et extrêmes, tempêtes, hausse des précipitations) et liste les impacts associés pour chaque aléa. L'évaluation des risques fait partie intégrante des recommandations prodiguées par ces organisations chapeau tant au niveau international (Organisation de l'Aviation Civile Internationale, 2019), européen (Burbidge, 2016) ou national (French Civil Aviation Authority, 2016). L'évaluation aux risques préconisée se fait toujours au-travers d'une matrice croisant la sévérité et la probabilité d'occurrence de l'aléa, sur base de projections et scénarios climatiques, pour identifier les risques potentiels et les priorités d'actions. Colin et al (2016) précise que l'échelle des paramètres sévérité et probabilité doit être définie entre parties prenantes de l'étude. Par ailleurs, Colin et al (2016) recommande également de tenir compte des dégradations fonctionnelles que les événements climatiques peuvent engendrer, en termes

¹⁴ Climat.be, <https://climat.be/changements-climatiques/consequences/transport>

de connectivité, qualité du service de transport, temps d'accès... particulièrement pour les zones et sites critiques (pompiers, hôpitaux, police...). Aucune étude belge ou wallonne n'est connue à ce stade de la recherche. Néanmoins, les prescrits des organisations tels que l'OACI s'appliquent de manière uniforme aux aéroports mondiaux.

- *Technologies de l'information et de la communication (TIC)*

La littérature commence à s'intéresser à l'impact du changement climatique sur les TIC. Shabajee et al (2014) identifie les infrastructures des TIC comme les infrastructures liées aux *hardware*, à savoir les réseaux internet et de téléphonie mobile (ex. câbles, routeurs), les serveurs (emails, internet) ou encore notamment les bâtiments (ex. *data centers*). Les risques physiques se matérialisent différemment selon qu'il s'agisse d'infrastructures en sous-sol ou en surface (Adams, Steeves, Ashe, Firth, & Rabb, 2014) (Horrocks, et al., 2010). Selon Fu et al (2016) les infrastructures britanniques sont actuellement résilientes aux impacts climatiques, notamment étant donné le taux rapide de remplacement des équipements, bien qu'elles restent vulnérables aux futurs impacts climatiques, évalués de manière qualitative par aléa. Par ailleurs, la même étude fait le lien avec la dépendance des autres secteurs aux TIC, rendant des défaillances multisectorielles en cascade crédibles. Horrocks et al (2010) propose deux études de cas établissant le lien (i) entre inondations et infrastructures TIC et (ii) entre température, humidité et *data centers*. Le premier cas calcule un indice d'intensité des jours de pluie (>10mm) pour évaluer la probabilité de pluies plus intenses et plus fréquentes, impliquant *de facto* de plus grands risques d'inondation. Le deuxième cas s'intéresse à la hausse du nombre de jours dépassant le seuil maximal opératoire pour les *data centers* de 26,7°C, au-delà desquels ils cessent d'opérer. CALLENDAR (2022) perfectionne ce type de méthode en recourant à la théorie des valeurs extrêmes. Les besoins en refroidissement sont alors plus importants car ils reposent généralement sur l'air extérieur. Inversement, ils regardent également à l'évolution du nombre de jours où il sera nécessaire de déshumidifier l'air pour que les *data centers* fonctionnent correctement (entre 40 et 55% d'humidité). En Belgique, le modèle Alaro calcule l'humidité relative de l'air toutes les 6 heures¹⁵.

- *Infrastructures hydrauliques*

L'eau peut être regardée du point de vue de la ressource en elle-même et des infrastructures hydrauliques qui la collecte et la traite soit pour la potabiliser soit pour l'assainir après utilisation. Nous ne nous intéresserons ici qu'aux infrastructures, la ressource eau étant traitée en elle-même dans la thématique du même nom.

L'Association française des professionnels de l'eau et des déchets (ASTEE, 2019) identifie que les **fortes pluies** plus nombreuses et plus intenses mettront sous pression les réseaux de collecte des eaux usées et des eaux pluviales étant donné l'accroissement des volumes d'eau. D'une part, ces réseaux risquent d'arriver plus fréquemment à saturation et d'autre part, de « déverser plus fréquemment des effluents bruts au milieu naturel ou déborder en milieu urbain ». De même, en cas **d'inondation**, des eaux parasites polluées (ex. pollution urbaine, microbiologique, agricole) pourraient infiltrer les réseaux, perturbant ainsi le fonctionnement des stations d'épuration. L'ASTEE indique également que sous l'effet des températures en hausse, les micro-organismes des eaux usées et des stations d'épuration vont proliférer, requérant potentiellement des changements opérationnels, plutôt qu'au niveau des infrastructures.

Les **températures et les sécheresses** fragiliseront les infrastructures de potabilisation d'eau (Programme Solidarité-Eau, 2016)¹⁶. En effet, pour les pays du sud, trois risques émanent de ces conditions : surutilisation des équipements pour répondre à des demandes importantes, dégradation des pompes suite à du pompage à sec et fissuration du béton en cas de vague de chaleur (Programme Solidarité-

¹⁵ <https://www.meteo.be/fr/meteo/previsions/modele-alaro/humidite-relative>

¹⁶ https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ps_eau_services_d_eau_et_d_assainissement_face_au_changement_climatique_2016_07.pdf

Eau, 2016). Nous n'avons pas identifié de source l'indiquant pour la Wallonie, ce qui n'empêche pas d'y être vigilant.

➤ Systèmes (de gestion de déchets)

L'Association française des professionnels de l'eau et des déchets identifie deux phénomènes climatiques majeurs entraînant des aléas pour la **gestion des déchets** (Association française des professionnels de l'eau et des déchets (ASTEE), 2019). D'une part, les **inondations** causées par la hausse des précipitations et tempêtes peuvent causer (i) des risques sanitaires (prolifération de rongeurs, de bactéries, d'émissions gazeuses liées aux dégradations biologiques) étant donné le stockage temporaire de déchets post-catastrophe¹⁷, (ii) des risques accrus de pollutions atmosphériques suite aux perturbations de fonctionnement des incinérateurs et (iii) des relâchements de contaminants dans les nappes phréatiques¹⁸. D'autre part, la **hausse moyenne des températures** (accompagnée potentiellement de sécheresses), risque d'engendrer (i) un besoin plus important de collecte des déchets organiques pour éviter le développement massif de bactéries potentiellement pathogènes et (ii) de plus nombreux départs de feu dans les installations (i.e. les déchets combustibles dans les décharges peuvent prendre feu en cas de chaleur extrême). Par ailleurs, les sécheresses provoquent un assèchement des sols pouvant générer un « retrait/gonflement des argiles dont les conséquences seront potentiellement critiques pour la stabilité des ouvrages, maisons et immeubles » (Association française des professionnels de l'eau et des déchets (ASTEE), 2019) et donc également pour les installations de gestion de déchets.

De son côté, l'étude d'AEA (2012) identifie les inondations comme l'aléa étant la cause d'une majorité d'impact (3 des 7 impacts identifiés) pour les infrastructures britanniques. Cette même étude a analysé les vulnérabilités du système en croisant la localisation des infrastructures actuelles avec des cartes (i) de projections de l'évolution des températures et des précipitations et (ii) d'aléas d'inondation.

➤ Sites SEVESO

Les **Sites SEVESO** sont à risque dès lors qu'ils sont présents dans une zone d'aléa. La Wallonie cartographie la localisation de ces sites via son géoportail¹⁹. La France calcule le nombre de sites à risque d'aléa par submersion marine²⁰. Si ce n'est pas pertinent pour la Wallonie, les inondations par ruissellement ou débordement de cours le sont d'autant plus que de nombreux sites se trouvent dans le sillon Sambre et Meuse, sujet à inondations. Par ailleurs, l'étude CALLENDAR (2022) et son outil (<https://foret.climint.com/>) répertorient et cartographient les sites SEVESO français à risque d'aléa de feux de forêt. Cet outil repose notamment sur l'Indice Forêt Météo²¹ (IFM) et établit le risque futur de feu de forêt pour un endroit précis du territoire français sur base de projections de scénarios d'émissions de GES jusqu'à 2100. A notre connaissance, il n'existe pas d'équivalent en Wallonie mais l'outil *EFFIS Wildfire Risk Viewer* de Copernicus²² permet de visualiser le risque de feu de forêt au niveau de la région wallonne bien qu'en principe l'augmentation du nombre de jours avec feux de forêt devrait rester modéré en Belgique (JRC Science for Policy Report, 2020, p. 44). Cet outil cartographie, avec une

¹⁷ A ce sujet, on peut rappeler que la bretelle d'autoroute A601 a servi de zone de dépôt provisoire des déchets liés aux inondations de juillet 2021. (<https://www.rtf.be/article/dechets-engendres-par-les-inondations-saturation-des-recyparc-dintradet-et-du-depot-temporaire-de-la601-10810029>).

¹⁸ <https://www.climateguide.fi/articles/waste-management-adaptation/>

¹⁹

<https://geoportail.wallonie.be/walonmap#BBOX=16259.641585860372,438032.3539456956,7679.581102297641,197072.89704384655#SHARE=43B1C5AD2C826D05E053DOAFA49DE0A8>

²⁰ <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/biodiversite/les-milieux-littoraux-et-marins-ressources/article/enjeux-industriels-etablissements-seveso-en-zones-de-submersion-marine-et-dans>

²¹ <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/meteo-france-en-appui-a-la-lutte-contre-les-feux-de-forets>

²² <https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/fire.risk.viewer/>

résolution de 12,5km, la probabilité de feux de forêt mais également la vulnérabilité des populations, écologique et économique.

Outils existants repris dans le cahier des charges

Les études, portails et sites cités dans le CSC tant en Wallonie et Belgique qu'en Flandre, France, Hollande, Allemagne ont été consultés ainsi que d'autres plateformes ([GISER](#), [hydrométrie en Wallonie](#), [inondations en Wallonie](#)) et outils wallons (Walonmap, PASH et PICC). Les documents cités dans la bibliographie ont été également consultés.

Spécifiquement, le portail flamand KLIMMATPORTAL et sa méthodologie sous-jacente n'abordent pas la thématique des infrastructures de transports, car ils ne traitent « que » celle des infrastructures bâties (au sens des bâtiments résidentiels et professionnels). Ils proposent néanmoins une série de mesures d'adaptation liées à la gestion des eaux de pluie et permet de simuler l'efficacité des mesures pour des projets spécifiques (outil PLANTOOL). La stratégie flamande formule des objectifs stratégiques visant à réduire l'imperméabilisation dans les zones bâties et à augmenter les volumes de rétention d'eau pour les immeubles bâtis.

La Stratégie française sur l'énergie et le climat et plus particulièrement son étude d'adaptation des réseaux aux changements climatiques (2022) précise qualitativement les aléas par type d'infrastructure (transport, TIC et réseaux de transport électrique) mais ne propose aucune méthode d'évaluation quantitative des risques. En revanche, elle identifie quelques mesures d'adaptation et insiste particulièrement sur les effets en cascades liés à l'interdépendance (physiques, géographiques, cybernétiques et logiques) des réseaux. Effectivement, un gestionnaire d'infrastructures ayant scrupuleusement adapté ses infrastructures au climat futur restera vulnérable si les réseaux dont il dépend n'ont pas adopté une stratégie d'adaptation suffisante pour ce qui les concerne.

Critique

Les infrastructures potentiellement concernées par ce volet sont très nombreuses. La revue de littérature a démontré que :

- Il existe de nombreuses études identifiant les interrelations entre changements climatiques et aléas climatiques ;
- Il y a un consensus général au sein des organisations chapeautant les secteurs des infrastructures concernées pour recommander la réalisation d'études d'analyse des risques en vue d'évaluer leur degré de résilience ;
- Néanmoins, il y a très peu d'évaluations quantitatives et cartographiques des risques appliqués aux infrastructures spécifiques ;
- Aucune étude identifiée n'a fait l'examen de zones à risques pour des populations vulnérables.

Les aléas les plus systématiquement pris en compte sont l'évolution des précipitations et les inondations d'une part, et l'évolution des températures et sécheresses d'autre part. Pour ces aléas, ainsi que pour les risques découlant des feux de forêts, il existe des méthodes d'analyse des risques potentiellement exploitables pour cette étude. En revanche, les tempêtes et le retrait/gonflement des argiles ne font l'objet d'aucune modélisation quantitative bien que ces aléas soient identifiés dans la littérature.

Enfin, on peut noter que la littérature aborde particulièrement les systèmes d'information des risques (en lien avec la surveillance et les alertes météo) afin de détecter les dangers. Les indicateurs cités sont le plus souvent des indicateurs de mesures des impacts constatés lorsque les événements extrêmes sont passés mais pas de mesure des vulnérabilités potentielles.

1.3. Méthodologie d'analyse de vulnérabilité

Approche générale

La littérature étudiée propose assez peu de méthodologies éprouvées pour analyser la vulnérabilité des infrastructures, et certainement pas spécifiquement pour chaque type d'infrastructures. Il est donc nécessaire de prioriser les infrastructures pour lesquelles l'analyse des vulnérabilités est possible. Dès lors, nous proposons de suivre les prescrits de la Commission Européenne (2021) pour tenir compte des enjeux climatiques dans les projets d'infrastructure en matière d'adaptation selon un processus en deux phases :

Tout d'abord, réaliser un **examen des risques**. Cela consistera en la :

- Définition du périmètre : validation de la liste des infrastructures suggérées pour l'analyse : transport dont l'aérien, TIC, collecte et potabilisation d'eau, les systèmes de gestion des déchets et les sites SEVESO ;
- Identification des risques prioritaires : par type d'infrastructure retenu, identifier qualitativement les risques prioritaires liés au changement climatique et pertinents pour la Wallonie. Cette étape pourra être sujette à **validation par un panel d'experts** adéquats selon les infrastructures étudiées ;

Ensuite, pour les risques prioritaires, conduire une **analyse détaillée** via une **analyse de vulnérabilité** par type d'infrastructure et par aléa climatique. Dans ce chapitre, nous proposons de le faire pour trois aléas climatiques :

- Inondations : il s'agira de croiser des cartes d'aléas d'inondation (par débordement des cours d'eau et par ruissellement) disponibles au niveau wallon avec la géolocalisation des infrastructures. Les vulnérabilités seront représentées pour les infrastructures dans la limite de l'accessibilité aux données des gestionnaires.
- Hausse des températures : à l'instar de ce qu'il se fait en Flandre ([Klimaatportaal](#)) et en France ([DRIAS](#)), nous proposons de localiser les zones du territoire wallon les plus exposées à une évolution du nombre annuel de journées chaudes. Si la température communément arrêtée est de 25°C pour définir une journée chaude, un autre seuil pourra être fixé sur base d'un optimum de fonctionnement de l'infrastructure en question (26,7°C pour les *data centers*) ou à dire d'experts.
- Feux de forêts : les cartes d'aléas du *EFFIS Wildfire Risk Viewer* seront croisées avec la géolocalisation des infrastructures retenues. Cet exercice sera possible dans la limite des données disponibles auprès des gestionnaires des infrastructures. La carte de vulnérabilité des population du *EFFIS Wildfire Risk Viewer* pourra être employée bien que la résolution ne permette pas une analyse fine.

Dans le cas de la gestion des eaux de pluie, nous ne traiterons pas du dimensionnement des infrastructures actuelles de collecte (cfr. Annexe 1). Cependant, un croisement des cartographies entre taux d'imperméabilisation des sols wallons (étude ULB - IGEAT - ANAGÉO, 2015), les zones inondables, et le PASH sera réalisé pour déterminer les zones à risques.

Enfin, nous suggérons également de documenter **l'interdépendances des infrastructures de réseaux** afin de comprendre le degré de dépendance d'un réseau à l'autre et d'identifier les risques de défaillances en cascade.

Indicateurs et Zones à risque

En termes d'**indicateurs**, nous pourrions calculer :

1. un indicateur de la **longueur** des tronçons des infrastructures de transport impactés par les aléas d'inondation et de feu de forêt ;

2. un indicateur du **nombre** d'ouvrages d'art, de *data centers* et de sites de gestion des déchets et SEVESO en aléa d'inondation et soumis au plus grand nombre de journées chaudes ($\geq 25^{\circ}\text{C}$).

Des **cartes** croisant les aléas et la localisation des infrastructures pour identifier les zones à risque seront créées.

Données

Les données nécessaires sont :

1. Données de géolocalisation des infrastructures retenues ;
2. Cartes d'aléas d'inondation ;
3. Taux d'imperméabilisation des sols wallons basé sur l'étude ULB - IGEAT - ANAGÉO, 2015. « Cartographie des surfaces imperméables en Wallonie (CASIM) ». Rapport final. Étude réalisée pour le compte du SPW - DGO3 - DRCE
4. Bases de Données sur les caractéristiques physiques des réseaux de transport (SPWMI, SNCB) (ex : BDOA du SPWMI)
5. Etat d'avancement et partage des résultats de l'étude du SPWMI (Adaptation des VH)

Liens thématiques et parties prenantes

La thématique Infrastructures est liée à :

- La thématique **Eau** car elle fournira la source des données pour le croisement des cartographies en matière de risque d'inondation et d'évaluation de la vulnérabilité ;
- La thématique **Villes-Logements et inondations** car non seulement les méthodologies de croisement des cartographies seront similaires pour identifier les zones à risque (l'une visant le bâti, l'autre les infrastructures) mais également parce que la gestion des eaux de pluie et le risque d'inondation des bâtiments sont liés ;
- La thématique **économique** car l'impact sur les différents secteurs d'activités y est étudié, or une perturbation, voire un arrêt complet de la fonctionnalité des infrastructures (telles que routes, voies ferrées, voies fluviales) auront un impact fort important sur le secteur du transport des biens et des personnes, et la mobilité en général ;
- La thématique **Energie** en lien avec les dommages en cascades qui peuvent être engendrés par des dommages aux réseaux électriques et aux réseaux TIC sur les réseaux de transport (mis en lumière dans la stratégie française) et le risque de rupture de l'approvisionnement en électricité (plus de traction ferroviaire par exemple) ;
- La thématique **Aménagement du territoire** car les réponses à donner aux risques auxquelles les infrastructures sont soumises passeront par une réflexion de fond sur l'organisation spatiale et fonctionnelle du territoire de la Wallonie.

Des liens peuvent également être faits avec l'étude en cours du SPWMI (l'étude « *Evaluation des besoins d'adaptation des voies hydrauliques au changement climatique afin de garantir la disponibilité de la ressource en eau en période d'étiage* ») ayant débuté en octobre 2022 (sous de la direction de la gestion hydrologique – SPWMI Philippe Dierickx). Cette étude vise à déterminer les besoins d'adaptation des voies hydrauliques wallonnes au changement climatique et à proposer des pistes étayées de mesures pour garantir la disponibilité de la ressource en eau, plus spécifiquement pendant les périodes d'étiage :

- d'établir un bilan des ressources et des besoins actuels et futurs en eau (navigation, eau potable, besoins industriels)
- de quantifier l'impact à moyen (2050) et long terme (2100) du changement climatique sur toutes les voies hydrauliques et les grands barrages associés ;
- de proposer un plan d'adaptation qui permette au SPWMI d'assurer à long terme ses missions (navigation, eau potable, énergie hydroélectrique, eau industrielle, voire agricole, et respect des débits écologiques).

Dans le cas où des résultats partiels en cours d'étude peuvent être transmis, nous en réaliserons une relecture critique pour ce qui est directement liés à notre propre étude (adaptation de l'infrastructure de navigation).

1.4. Mesures d'adaptation

Une '*climate resilient infrastructure*' est une infrastructure capable de maintenir les services qu'elle rend en cas de crise (OECD, 2018). Les mesures d'adaptation doivent donc pouvoir permettre d'atteindre cet objectif. Ces mesures peuvent être à la fois techniques (*design* des installations) ou managériales (pilotage des installations, création de centres d'alerte, systèmes de surveillance et de suivi...).

Pour ce chapitre, les mesures d'adaptation seront proposées à deux niveaux. De **manière générale**, il faut développer en Wallonie une culture des risques (risques liés aux inondations, aux coulées de boue, aux vents violents) auprès de la population et des autorités communales (et provinciales ?). Ensuite, des recommandations spécifiques seront faites **par type d'infrastructures et/ou d'aléas climatiques**.

Ci-dessous, nous listons une série de pistes d'actions tous azimuts ayant été identifiées dans la littérature, en complément des recommandations des rapports TO (Plateforme wallonne pour le GIEC, 2022) et ECORES-TEC (2011) :

- Faire évoluer les normes et référentiels techniques sur base des projections climatiques régionalisées à moyen et long termes (Ministère de la transition écologique, 2022) ;
- Développer une stratégie de gestion du trafic (avec une attention particulière sur les voies routières pour l'accessibilité des services de secours) en cas de perturbation ou d'interruption dues à un aléa climatique. Pour cela, réaliser l'analyse de la criticité fonctionnelle du réseau étudié (Cerema, 2019) (Jelenius, Petersen, & Mattson, 2006).
- Etablir des systèmes de secours pour alimenter les équipements électromécaniques ;
- Etablir des systèmes constructifs mieux adaptés aux aléas (matériaux plus résistants à la chaleur, perméabilité...) ;
- Créer des enceintes de dialogue entre réseaux (entre les infrastructures de transport et avec les infrastructures énergie et TIC), y compris le partage des informations et coordination des actions ;
- Réaliser des plans et mesures de gestion des urgences, exercices de gestion de crise ;
- Réduire le tirant d'eau et bateaux de plus petits gabarits pour le transport fluvial (à noter : on réduit le tirant d'eau de manière temporaire quand on manque vraiment d'eau. Pour favoriser le développement du transport fluvial, et participer ainsi à l'atténuation, on va au contraire vers des classes de navigation plus élevées et l'acceptation de gabarits de bateaux plus gros. ;
- Utiliser des chaussées froides (elles ont une température de surface plus basse et constituent une solution importante pour atténuer les effets du flux de chaleur sensible)
- Végétaliser les abords d'autoroutes pour libérer de la vapeur d'eau et faire abaisser les températures (Souza de Abreu, Souza Santos, & Monteiro, 2022) ;
- Pour les TIC : enterrer les réseaux, installer des parafoudres sur les équipements, utiliser des matériaux résistants aux fortes températures, prévoir des délestages entre réseaux fixes, mobiles et satellitaires, prévoir des systèmes de secours pour assurer l'alimentation électrique en cas de crises ...
- Pour la gestion des eaux de pluie : augmenter le taux d'infiltration de l'eau de pluie dans les zones vulnérables et augmenter les ouvrages de rétention de l'eau de pluie en : désimperméabilisant des surfaces existantes (type trottoirs, parkings) en installant des zones naturelles d'infiltration, des zones d'infiltration le long des routes, en restaurant des cours d'eau (remise à ciel ouvert des cours d'eau canalisés), en construisant des déversoirs supplémentaires dans les zones non aménagées, en construisant des zones tampon pour l'eau de pluie dans les zones bâties, des zones de stockage en sous-sol (bassins tampons...)

Dans la mesure du possible, les pistes d'actions seront décrites et déclinées sous le prisme de 4 dimensions :

- Eléments du risque auquel on est amené à faire face (fréquence ou intensité de l'aléa, l'exposition des personnes/infrastructures, la sensibilité de celles-ci) ;
- Leviers d'action (régulateur, soutien technique/financier, sensibilisation, plaidoyer/lobbying) ;
- Niveau d'action (régional, citoyen, pouvoir public local, supra-communal, provincial fédéral...)
- Compétences (aménagement du territoire, énergie...).

<https://www.icedd.be/>

1.1. Introduction

Dans le contexte actuel de changements et d'urgence climatiques, ce rapport se penche sur l'adaptation aux changements climatiques en Wallonie, avec un focus particulier sur la santé humaine. Nous entamons notre analyse en évaluant les actions et les outils déjà déployés au niveau des initiatives régionales et internationales, afin de déterminer la voie à suivre pour accroître la résilience de notre région face à ces défis cruciaux.

Les changements climatiques attendus génèrent divers risques et impacts significatifs sur la santé, dont une augmentation de la morbidité liée à la chaleur, particulièrement chez les populations vulnérables, et une prolifération des maladies à transmission vectorielle comme celles propagées par les tiques et les moustiques. Les variations de température et les phénomènes météorologiques extrêmes, outre les morts accidentelles ou post-traumatiques, favorisent également les maladies d'origine hydrique et alimentaire, tout en intensifiant les problèmes liés aux allergènes et affectant la santé mentale.

Le rapport « T0 » réalisé par la plateforme Wallonne pour le GIEC (PwG, 2022) indique clairement que ces changements induiront des risques et des impacts significatifs sur la santé humaine. En premier lieu, l'augmentation des températures, en particulier les fortes chaleurs estivales, constitue la principale menace, engendrant des problèmes tels que l'épuisement, les coups de chaleur, les maladies rénales et respiratoires. Ces effets seront d'autant plus sévères pour les personnes âgées, les individus atteints de maladies chroniques, les populations défavorisées sur le plan socio-économique ou encore les résidents urbains exposés aux îlots de chaleur. De plus, les maladies à transmission vectorielle, notamment celles propagées par les tiques (comme la maladie de Lyme et l'encéphalite à tiques) ainsi que celles transmises par les moustiques, sont favorisées par les conditions climatiques changeantes. Les épisodes de fortes pluies, de sécheresses et de températures élevées augmentent également les risques de maladies d'origine hydrique et alimentaire, causées par la prolifération de bactéries et de virus, entraînant des troubles gastro-intestinaux, neuraux et dermiques (PwG, 2022).

En outre, les températures plus élevées et les concentrations élevées de CO₂ et de NO₂ ont des répercussions sur la distribution saisonnière, l'allergénicité et la répartition géographique des espèces allergisantes et des aéroallergènes, avec l'émergence de nouvelles plantes allergisantes comme l'ambroisie. Le changement climatique affecte également la santé mentale, engendrant des problèmes tels que l'anxiété et les risques de suicide, à la fois directement et indirectement à travers ses effets physiques. De plus, le personnel de santé est davantage soumis à une surcharge de travail, ce qui rend difficile la gestion des besoins de soins supplémentaires résultant de vagues de chaleur plus longues et plus intenses. Les systèmes de santé, déjà sous pression en raison de la pénurie de personnel et du sous-financement, font face à des défis financiers accrus lorsqu'ils doivent gérer des taux élevés de mortalité et de morbidité dans la population. Des mesures d'adaptation, telles que l'investissement dans les systèmes de santé, la sensibilisation, la surveillance et la gestion des crises, l'implémentation de technologies pour atténuer la chaleur, et la coordination intersectorielle (santé, urbanisme, environnement, éducation...) sont essentielles pour mitiger ces impacts et protéger la population. L'accent est également mis sur la nécessité d'améliorer la gestion des données et la communication, et de développer des stratégies à long terme pour une adaptation efficace aux changements climatiques dans le secteur de la santé.

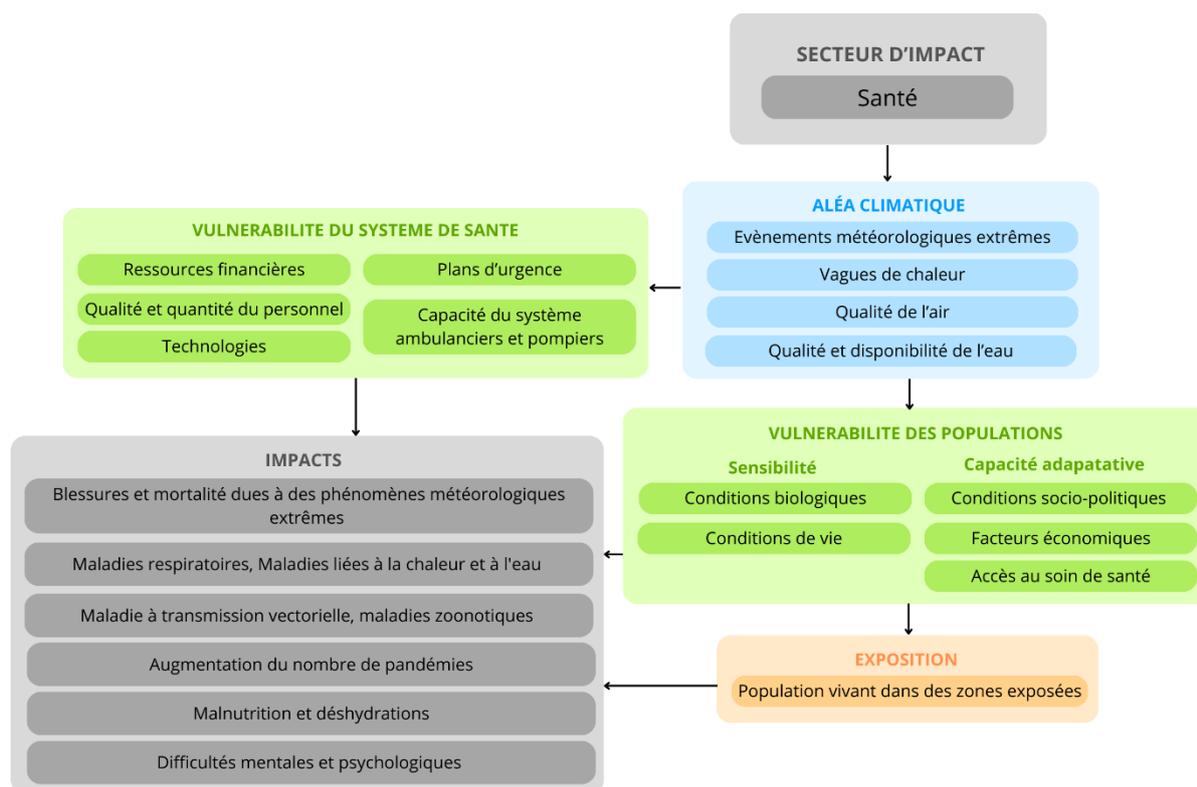


Figure 17 – chaînes d'impact du chapitre 9 - Santé

1.2. Etat des lieux

Synthèse

La principale attente spécifique est d'établir une analyse rétrospective des données sanitaires pour fournir des informations sur la charge de morbidité liée aux différents impacts des changements climatiques. Déterminer les groupes vulnérables de la population nécessite des méthodes d'analyses et l'accès à différentes données comme la sensibilité sur l'âge, la localisation de la population et son degré d'urbanité, le statut économique... Nombre de ces données sont donc communes aux autres thématiques abordées. Le tableau ci-dessous reprend les sources bibliographiques consultées les plus pertinentes pour cette première étape.

Tableau 1 : Analyse thématique des principales sources consultées

Références	Pays / région	Thématiques	Aspects
Agence InterMutualiste, 2023	Belgique	<ul style="list-style-type: none"> - Indicateurs sur des caractéristiques sociodémographiques et consommation de soins de santé, données pseudonymisées au niveau de la personne - Indicateurs calculés au niveau des quartiers et des secteurs statistiques - Indicateurs disponibles par hôpital dans certains cas - Accès pour les institutions autorisées 	- Statistiques de santé
AVIQ, 2023a (SURVMI)	Wallonie	<ul style="list-style-type: none"> - Surveillance de l'évolution des maladies, tendances spatio-temporelles - Contextes sociodémographiques affectés et facteurs de risque. - Déclaration obligatoire des maladies infectieuses en Wallonie, liste des maladies en rapport avec le changement climatique 	<ul style="list-style-type: none"> - Statistiques de santé - Vecteurs de maladies tropicales

AVIQ, 2023b	Wallonie	<ul style="list-style-type: none"> - Veille politique, fourniture d'avis - Equipe pluridisciplinaire - Identification des enjeux à long terme et propositions d'adaptation 	<ul style="list-style-type: none"> - Politique de santé à long terme - Prospective
Barcellona-Corte et al., 2022	Wallonie	<ul style="list-style-type: none"> - Identification des enjeux médico-sociaux - Dissémination des plantes invasives - Pollution des sols 	<ul style="list-style-type: none"> - Santé mentale - Crues
Climate fit-city, 2023	Europe	<ul style="list-style-type: none"> - Lien entre la chaleur urbaine et la santé publique en Europe - Sensibilisation à l'importance de l'impact de l'environnement urbain sur la santé depuis les années 80 (îlots de chaleur, effets délétères sur la santé, surtout chez les citoyens vulnérables) - Modèle UrbClim pour aider les villes à atténuer les impacts de la chaleur urbaine. 	<ul style="list-style-type: none"> - Chaleur Urbaine / UHI
Congrès Résilience, 2021	Wallonie	<ul style="list-style-type: none"> - Surmortalité liée aux vagues de chaleur - Augmentation des coûts d'hospitalisation liés aux vagues de chaleur - Part des décès dus à des facteurs de stress environnementaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Vagues de chaleur - Artificialisation des terres - Pollution de l'air
Demoury et al., 2022	Belgique	<ul style="list-style-type: none"> - Relations entre la température et la mortalité non linéaire, avec analyses spécifiques aux différentes agglomérations - Effets de la température sur la mortalité examinés pour diverses périodes de latence - Températures minimales de mortalité / Impact de la chaleur et du froid - Associations entre la température et la mortalité cardiovasculaire et respiratoire 	<ul style="list-style-type: none"> - Vagues de chaleurs - Populations vulnérables - Méthodologie
Environnement Risques et Santé, 2023	France	<ul style="list-style-type: none"> - Documentation des inégalités sociales et environnementales de santé - Problématique des inégalités - Mécanismes - Définition des populations les plus vulnérables - Implications en santé publique 	<ul style="list-style-type: none"> - Risques environnementaux - Vagues de chaleurs - Qualité de l'air
EURMOMO, 2023	Europe	<ul style="list-style-type: none"> - Système de surveillance européen de la mortalité en santé publique en temps réel - Analyse Rétrospective des Données de Mortalité - Données de Z-score par pays 	<ul style="list-style-type: none"> - Modèle de surveillance - Techniques Épidémiologiques et Statistiques
GeDiDot, 2020	Belgique / France	<ul style="list-style-type: none"> - Documente la situation socio-sanitaire et les inégalités sociales de santé du territoire franco-belge étudié (Région wallonne, Région Hauts-de-France et Départements des Ardennes et de la Marne - Démographie / Déterminants socio-économiques / Offre de soins et de services / Etat de santé/ Comportement de santé / Consommation de soins / Environnement et santé - Zonage : Commune (Belgique) / EPCI ²³(France); Arrondissement; Province (Belgique) / Département (France); Région; Pays. 	<ul style="list-style-type: none"> - Statistiques de santé
IWEPS, 2023	Wallonie	<ul style="list-style-type: none"> - Taux de mortalité standardisé sur l'âge - Nombre d'années de vie perdues standardisé - Nombre d'années de vie perdues à 70 ans/100.000 hab - Nombre d'habitants par médecin généraliste équivalent temps-plein 	<ul style="list-style-type: none"> - Statistiques de santé

²³ Établissement Public de Coopération Intercommunale

		<ul style="list-style-type: none"> - Part des médecins généralistes de plus de 55 ans - Lits MR/MRS²⁴ 	
Kennisportaal Klimaatadaptatie, 2023	Pays-Bas	<ul style="list-style-type: none"> - Portail de la connaissance sur l'adaptation climatique - Atlas des impacts, boîte à outils pour l'adaptation - Tendances climatiques, impacts climatiques et conséquences pour les secteurs dont la santé 	<ul style="list-style-type: none"> - Vagues de chaleurs - Sécheresses / Inondations - Elévation du niveau de la mer
KLiVO, 2023	Allemagne	<ul style="list-style-type: none"> - Données et des informations sur le changement climatique - Services pour une adaptation ciblée, outils web et cartographiques - Plans d'action contre la chaleur dans les municipalités - Topic « Soigner face au changement climatique » 	<ul style="list-style-type: none"> - Chaleur Urbaine / UHI - Inondations, étiages - Vagues de chaleur, sécheresse - Fortes pluies, tempêtes - Elévation du niveau de la mer - Espèces animales et végétales
L'Agence de Santé Publique de Barcelone (ASPB)	Espagne	<ul style="list-style-type: none"> - Explore les liens entre divers indicateurs climatiques, la chaleur et la mortalité via le modèle UrbClim - Mise en évidence du risque notable pour la santé humaine dû à la chaleur extrême et aux vagues de chaleur entre 1992 et 2015 - Liens avec facteurs d'inégalité, tels que l'âge, le sexe et le statut socio-économique - Plateforme d'exploration 	<ul style="list-style-type: none"> - Chaleur Urbaine / UHI
London Health Service	Royaume-Unis	<ul style="list-style-type: none"> - Modèle UrbClim pour générer des données climatiques locales de très haute résolution et couplage avec données sur la mortalité - Identifier les populations à risque lors de conditions de chaleur extrême / Augmentation de la température de 1°C entraîne une augmentation de la probabilité de décès 	<ul style="list-style-type: none"> - Chaleur Urbaine / UHI
Ministère de la transition écologique, 2023	France	<ul style="list-style-type: none"> - Jeux de données et scénarios climatiques récents (GIEC) - Pas de données spécifique dans le domaine de la santé - Analyse des extrêmes climatiques depuis 2013 - Planification, éducation et sensibilisation 	<ul style="list-style-type: none"> - Vagues de chaleurs - Maladies Vectorielles
Santé Publique France, 2023a	France	<ul style="list-style-type: none"> - Impact de la chaleur sur la mortalité en France métropolitaine (2014-2022) - Dispositif d'alerte et de surveillance - Actions individuelles et collectives de protection - Stratégie d'atténuation et d'adaptation 	<ul style="list-style-type: none"> - Vague de chaleur
Santé Publique France, 2023b	France	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode de quantification de la mortalité attribuable à la chaleur - Résultats de la mortalité attribuable à la chaleur (2014-2022). - Répartition de l'impact sur la mortalité - Nécessité de réponses spécifiques pendant les canicules 	<ul style="list-style-type: none"> - Vague de chaleur
Sciensano, 2023 (Be-MOMO project)	Belgique	<ul style="list-style-type: none"> - Modèle de surveillance de la mortalité toutes causes en Belgique - Détection rapide et quantification de mortalités inhabituelles pouvant résulter d'épidémies ou de conditions environnementales extrêmes liées au changement climatique - Mise à jour hebdomadaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Modèle de surveillance - Vagues de chaleurs - Qualité de l'air

²⁴ Maisons de Repos / Maisons de Repos & de Soins

SPF, 2023 (NEHAP)	Belgique	<ul style="list-style-type: none"> - National Environment-Health Action Plan, V3, 2023-2029 - 4 fiches en lien avec la résilience et lutte contre le changement climatique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Politique de santé - Facteurs environnementaux modifiables
Vlaanderen, 2023	Flandre	<ul style="list-style-type: none"> - Synthèses et conséquences possibles en Flandre (Outil Impact) - Planificateur communal (Outil Plan) - Calculateur d'un score d'adaptation et estimation des coûts (Outil Project) - Catalogue Opendata/SIG (pas de données de santé spécifiques) / Cartes WBGT 	<ul style="list-style-type: none"> - Vagues de chaleurs - Sécheresses / Inondations - Hivers plus humides - élévation du niveau de la mer

Critique

Nous sommes confrontés à deux défis principaux. Le premier défi est l'accès aux données. Pour mener à bien cette analyse, il sera nécessaire de disposer des données remontant à plusieurs années afin de pouvoir effectuer une analyse rétrospective solide. Les données doivent également être suffisamment détaillées pour nous permettre de déceler un lien de causalité avec les effets du changement climatique mais également de mettre en lumière de manière précise les groupes de population vulnérables, que ce soit basé sur l'âge, le niveau socio-économique ou encore la géographie - avec des distinctions telles que ville/campagne ou encore la proximité à des espaces verts ou des étendues d'eau. Enfin, il est également nécessaire de vérifier l'accessibilité des données, soit à cause de coûts éventuels ou de restrictions liées à la protection de la vie privée si des données pseudonymisées ne sont pas disponibles. Dans la plupart des références et portails consultés, nous avons accès d'une part à un grand nombre des données climatiques, environnementales, démographiques et socio-économiques et à des données de santé à différents niveaux d'agrégation d'autre part. Peu de références proposent des liens ou d'associations entre ces deux types de données, sauf au travers de méthodes difficiles à mettre en place dans notre étude (Demoury *et al.*, 2022) ou sur base de modèle de type Urbclim (De Ridder, 2015). Le second défi concerne les méthodes d'analyses. Beaucoup de méthodes d'analyse seront transversales à d'autres sujets, notamment en ce qui concernera la définition des groupes vulnérables en fonction de critères comme l'âge, le lieu de vie ou le statut socio-économique. Cependant, le besoin d'apporter des informations concernant la charge de morbidité nécessitera des analyses fondées sur la mortalité/morbidité ou le Z-score²⁵. Par ailleurs, la détermination de la charge de morbidité est plus complexe car elle vise à quantifier l'impact global d'une maladie sur une population en termes de morbidité et de mortalité, à l'aide d'indices tels que l'Année de Vie Ajustée sur l'Incapacité (DALY), un aspect qui ne sera pas exploré dans cette étude.

1.3. Méthodologie d'analyse de vulnérabilité

Approche générale

L'approche méthodologique proposée se base sur 4 étapes.

A. Analyse des Risques Climatiques et de Santé

Sur base de l'analyse contextuelle, une liste spécifique de maladies, affections et de risques en lien direct avec le changement climatique, comme les maladies cardiovasculaires et respiratoires liées à la chaleur (Demoury *et al.*, 2022) ou maladies transmises par les vecteurs, sera proposée en lien avec une analyse rétrospective des événements climatiques survenus au cours des dernières années (principalement vagues de chaleurs et crues), en fonction de la disponibilité historique des données. L'objectif est de pouvoir construire des relations entre des effets observables du changement climatique et différentes données de santé en fonctions des groupes vulnérables (voir par exemple les rapports de surveillance de la mortalité toutes causes confondues en Belgique proposés par Sciensano (2023) ou les relations

²⁵ Un Z-score, également appelé score standardisé, est une mesure statistique qui décrit la position d'une valeur observée par rapport à la moyenne d'un ensemble de données. Le Z-score donne une idée de la position relative d'une valeur par rapport à l'ensemble des données, exprimée en nombre d'écarts-types par rapport à la moyenne

entre la température et la mortalité avec des analyses spécifiques aux différentes agglomérations proposées par Demoury *et al.* (2022).

B. Identification des Populations Vulnérables

Les données relatives aux populations vulnérables (personnes âgées, les malades, les enfants et les populations migrantes et marginalisées) seront proposées par le groupe de travail relatif aux populations vulnérables (voir « Vulnérabilité socio-économique des populations »). Si nécessaire, des compléments ou informations spécifiques pourront être obtenues au niveau de différentes bases de données (EASAC, 2019/ IWEPS, 2023 / ICEDD, 2017 / WalOnMap, 2023 / Agence InterMutualiste, 2023 / AVIQ, 2023a / AVIQ, 2023b). Ces données seront déjà intégrées à un Système d'Information Géographique afin de prendre en compte la dimension géographique et environnementale des données en y associant des données d'utilisation et d'occupation du sol (WAL_UTS et WAL_OCS) ou encore la localisation de sites plus vulnérables (Habran *et al.*, 2020).

C. Évaluation des Capacités d'Adaptation

Il s'agira d'analyser les ressources disponibles et les capacités existantes pour les groupes vulnérables afin de faire face aux risques identifiés. L'objectif est d'essayer de proposer des prédicteurs régionaux interdépendants géographiques (localisation), démographiques (classes d'âges, espérance de vie, indice de vieillissement) ou sociaux (éducation, revenu relatif) pouvant expliquer l'hétérogénéité de la charge de la morbidité imputable aux changements climatiques (Lloyd *et al.*, 2023) et, dans la mesure du possible, en déduire des informations sur les stratégies d'adaptation.

D. Cartographie des Zones à Risque

L'utilisation d'un Système d'Information Géographique permettra de visualiser et analyser spatialement les risques et les vulnérabilités.

Indicateurs et zones à risque

Les principaux indicateurs sont les taux de morbidité/mortalité la prévalence de maladies vectorielles en relation avec les indicateurs santé et socio-économiques déjà évoqué au chapitre 5 . La définition des seuils se base sur une analyse des données passées et des prédictions futures. La cartographie des zones à risque sera le fruit d'une analyse multidimensionnelle croisant les indicateurs et seuils précédemment définis avec la localisation des populations vulnérables aux différents aléas sanitaires.

Données

L'identification des populations vulnérables en situation critique vis-à-vis des différents effets du changement climatique dépendra premièrement d'une cartographie préalable des classes de populations définies sur base de différents critères d'âges, de situation socio-économique ou de leur environnement géographique (Habran, 2020). Ensuite, bien que plusieurs fournisseurs et données ont été identifiés (StatBel, Atlas intermutualiste, Siensano, IWEPS..) les données exactes qui seront nécessaires pour développer les indices n'ont pas encore toutes été identifiées précisément et le seront durant la phase de collecte des données. De ce fait, la qualité du résultat final dépendra principalement du niveau de détails des données et indicateurs de santé collectés à l'échelle de la Wallonie, et permettant de mettre en évidence un lien de causalité avec les effets du changement climatique.

Liens thématiques

Cette thématique est en lien direct avec celle des aspects sociaux, des différentes thématiques villes, et plus spécifiquement celles des îlots de chaleur urbains, des inondations / sécheresses. Des parallèles pourront également être réalisés avec les thématiques relatives à l'environnement-santé, la nature et les services écosystémiques.

1.4. Mesures d'adaptation

Diverses pistes d'adaptation peuvent être explorées selon que l'on regarde (i) à la sensibilité au risque pour la santé ou (ii) à la capacité adaptative à celui-ci :

Sensibilité

De manière générale, les mesures visant à améliorer la qualité de l'air, à végétaliser les centres urbains et le bâti, à créer des espaces verts vont par ricochet contribuer à améliorer la santé publique et lutter contre les inondations. En termes de mesures "sans regrets" (sans conséquences néfastes) ou basées sur la nature pour réduire la sensibilité et l'exposition des populations vulnérables, on peut lister :

- La conception d'espaces urbains qui favorisent la marche et le vélo afin de réduire la pollution atmosphérique liée à l'utilisation de moteurs thermiques et d'améliorer la santé publique ;
- L'amélioration de la conception des bâtiments en incluant par exemple des toits verts et des murs végétalisés qui réduisent l'effet des îlots de chaleur urbains et améliorent la qualité de l'air ;
- La restauration et la protection des espaces verts et des zones humides pour fournir des espaces de loisirs, améliorer la biodiversité, et agir comme des tampons naturels contre les inondations. En ce compris notamment, le recours à des espèces d'arbres hypoallergéniques ;
La mise en place de corridors verts afin de connecter différents espaces verts et favoriser le déplacement des espèces tout en offrant des espaces récréatifs et apaisants pour les citoyens.

Capacités adaptatives

L'adaptation peut également s'opérer au niveau des systèmes de surveillance (et d'alerte) épidémiologique aux maladies spécifiques liées aux changements climatiques et des vecteurs, notamment pendant les vagues de chaleur ou autres événements climatiques extrêmes. La mise en place de plans et programmes de sensibilisation du public aux risques liés à la santé et au climat, et le développement de partenariats avec les acteurs locaux pour mieux comprendre et répondre aux besoins des communautés vulnérables peuvent s'avérer également très utiles.

1.1. Introduction

Comme le rappelle la Commission Européenne (2013), « l'augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes ou l'évolution des températures de l'eau et de l'air ont des effets sur le transport, la distribution, la production et la demande d'énergie », et plus particulièrement sur le secteur électrique. Au niveau wallon, ce sont principalement les variations des précipitations et inondations, les tempêtes et les variations de températures de l'air et de l'eau qui affecteront les systèmes énergétiques dans leur ensemble (OCDE, 2018).

La Commission Européenne (2013) définit également les « infrastructures » comme des actifs physiques associés à divers secteurs d'activités (transport, eau, communications...). L'essentiel de ces infrastructures est traité dans la thématique du même nom. Le volet « Energie » s'intéresse néanmoins aux infrastructures liées aux systèmes énergétique tant au niveau du transport et de la distribution de l'énergie que de sa production.

Les réseaux de transport et de distribution seront impactés tant par des phénomènes météorologiques extrêmes (ex. tempêtes, inondations) que par un changement des modèles de demande saisonnière et régionale d'énergie (ex. réduction des besoins chauffage en hiver dans les pays d'Europe du Nord). De même, la croissance attendue des volumes d'électricité produits par des sources renouvelables engendrera des ajustements pour garantir l'équilibre du réseau électrique. L'efficacité de la production électrique (ex. diminution de la disponibilité en eau de refroidissement pour les unités de production thermique et nucléaire) se trouvera également diminuée des suites du changement climatique (Commission Européenne, 2013).

Conformément aux prescrits du cahier des charges, nous analyserons l'impact du changement climatique sur la sécurité d'approvisionnement à court terme et à long terme pour le système électrique et les réseaux de gaz naturel. Nous tiendrons également compte des contradictions et synergies entre adaptation et atténuation (cfr. 1.3) mais ne formulerons pas de recommandations concrètes pour l'adaptation du bâti au réchauffement et à la climatisation car ce point est traité dans le chapitre « Villes – ICU » de cette étude.

1.2. Etat des lieux

Synthèse

Le système énergétique wallon en 2050

La lutte contre les changements climatiques est à l'origine de profonds changements dans la production et la consommation énergétique mondiale. Pour évaluer les vulnérabilités du système énergétique, il est donc nécessaire de s'interroger sur son fonctionnement à terme.

En Wallonie, le PACE 2030 fixe l'objectif d'une consommation finale d'énergie issue à 28-29% de sources renouvelables d'ici 2030 et à 100% d'ici 2050 (Gouvernement Wallon, 2023). Cette évolution impactera l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement du système énergétique, à savoir de la production à la consommation en passant par le transport et la distribution.

La transition du recours à des sources fossiles vers des sources renouvelables symbolise le transfert d'une dépendance géopolitique à une dépendance climatique. En effet, la production d'énergie renouvelable intermittente (principalement éolien et photovoltaïque) est dépendante de facteurs météorologiques dont l'absence est préjudiciable. Le phénomène de *Dunkelflaute* – période prolongée combinant absence d'ensoleillement et de vent pouvant avoir lieu principalement durant les mois d'hiver en Europe – nécessite de réfléchir à la sécurité d'approvisionnement. Cela pourrait passer par

le maintien d'unités de production d'énergie d'appoint dont la source n'est pas nécessairement renouvelable (ex. nucléaire, gaz naturel).

Il est clair que la production électrique future sera moins dépendante des cycles vapeur à l'avenir. Il sera donc nécessaire de regarder les vulnérabilités du système énergétique au changement climatique en fonction des changements possibles du parc de production. Les scénarios posés devront considérer le mix énergétique futur (ex. 100% de sources renouvelables, 100% de sources décarbonées ou mix de sources décarbonées²⁶ et fossiles) d'une part et l'horizon temporel (2030 – 2050) d'autre part.

Les impacts du changement climatique sur le système énergétique wallon en 2050

Comme évoqué en introduction, les vulnérabilités du futur système énergétique wallon seront décryptées sur toute la chaîne d'approvisionnement, décomposée en deux pans : (i) la production et la demande et (ii) le transport et la distribution.

Production et demande d'énergie

➤ *Hausse des températures*

La température ambiante se réchauffe, impactant à la fois l'air mais aussi l'eau des fleuves et rivières. En Europe, on observe déjà une baisse du nombre de degrés-jour de chauffage et une augmentation du nombre de degrés-jour de climatisation (Agence européenne pour l'environnement, 2019), influençant les besoins énergétiques totaux saisonniers et régionaux - la Wallonie n'ayant pas les mêmes besoins que le nord de l'Europe ou du pourtour méditerranéen en hiver comme en été.

Outre les besoins globaux, le changement climatique impactera également le pic de demande, et particulièrement de refroidissement, essentiellement couvert par l'électricité (ECORES-TEC, 2011) (Agence européenne pour l'environnement, 2019) (OCDE, 2018). Cela pourrait mettre en péril la stabilité du réseau électrique en cas de vague de chaleur combinée à une capacité limitée de refroidissement des centrales électriques thermiques due à des eaux fluviales plus chaudes.

Par ailleurs, les sécheresses peuvent causer l'arrêt partiel ou complet de centrales hydroélectriques comme cela s'est produit en 2018²⁷, bien que cela s'applique principalement aux installations situées au fil de l'eau et non pas aux unités de pompage turbinage qui fonctionnent en circuit fermé comme la centrale de Coe. Le risque de perte de production (GWh/an) hydroélectrique est compris entre 10 et 50% en Belgique (et par extension en Wallonie) mais il faut rappeler que celle-ci ne représente qu'une fraction très limitée de la production électrique wallonne (Joint Research Centre, 2023). En effet la production hydroélectrique wallonne est de l'ordre de 300 GWh/an pour une production électrique annuelle supérieur à 25.000 GWh/an. De même, la production nucléaire et les productions électriques des centrales TGV en Wallonie pourraient être affectées par des températures fluviales trop élevées ou par des limitations du débit des principaux cours d'eau wallons (cf. ci-dessous). Enfin, l'efficacité des panneaux photovoltaïques est également susceptible d'être affectée négativement lorsqu'il fait trop chaud (OCDE, 2018).

➤ *Disponibilité de l'eau*

Les unités thermiques de production d'énergie dépendent de l'eau des rivières et des fleuves. Elles sont susceptibles d'être à la fois impactées par (i) un manque de disponibilité en eau en vue de leur refroidissement (ECORES-TEC, 2011) voire aussi (ii) par l'impossibilité de se décharger des eaux utilisées car celles-ci sont trop chaudes pour être rejetées dans le milieu. Le cas échéant, cela risque de mener à des interruptions partielles ou totales des unités de production. La canicule et sécheresse de 2003 a entraîné une perte de 5% du taux d'utilisation des centrales thermoélectriques en Europe (van Vliet,

²⁶ Nous comprenons le nucléaire comme une source d'énergie décarbonée mais pas renouvelable.

²⁷ <https://www.rtf.be/article/secheresse-les-centrales-hydroelectriques-wallonnes-mises-a-l-arret-10056502>

Sheffield, Wiberg, & Wood, 2016), mais ces pertes de capacité pourraient atteindre jusqu'à 15% (Agence européenne pour l'environnement, 2019).

Il est à noter également que les technologies de capture et de stockage du carbone affectent négativement l'efficacité centrales thermoélectriques et accroissent leurs besoins en eau de refroidissement. Il y a donc un risque d'incohérence entre mesures d'atténuation et d'adaptation dont l'impact potentiel doit pouvoir être compris en vue de proposer une méthodologie de synergie entre les deux comme demandé par le CSC (Plateforme wallonne pour le GIEC, 2022).

Les changements de régimes de précipitations pourraient mener à un potentiel croissant pour la production hydroélectrique en hiver mais décroissant en été sous l'effet de stress hydriques causés par des sécheresses (VITO, ECORES, & KENTER, 2020). A ce sujet, Luminus estime que d'ici la fin du siècle, le productible hydroélectrique de leurs installations wallonnes baissera de 17%. Celle-ci est néanmoins marginale par rapport à la production totale wallonne comme précisé ci-dessus. A l'inverse, les épisodes de sécheresses peuvent favoriser l'évaporation de l'eau, rendant plus sensible l'emploi de station de stockage par pompage turbinage.

➤ *Phénomènes météorologiques extrêmes*

Les tempêtes de grêle peuvent endommager fortement les panneaux photovoltaïques, responsables de production électrique (Agence européenne pour l'environnement, 2019).

➤ *Potentiel énergétique*

L'Agence européenne pour l'environnement (2019) souligne que les effets du changement climatique ne devraient pas avoir d'influence sur le déploiement de l'éolien et des panneaux photovoltaïques. En effet, les projections réalisées ne montrent que des variations marginales du potentiel énergétique de ces deux sources à l'avenir.

Transport, transformation et distribution d'énergie

➤ *Hausse des températures*

En cas de fortes chaleurs, des pertes d'efficacité des réseaux peuvent se présenter (OCDE, 2018) (VITO, ECORES, & KENTER, 2020). Celles-ci peuvent osciller de l'ordre de 0,5 à 1,5% par degré (Agence européenne pour l'environnement, 2019).

➤ *Phénomènes météorologiques extrêmes*

Le changement climatique renforcera également la fréquence et l'intensité d'événement météorologiques extrêmes comme les inondations, les tempêtes, les vagues de chaleur, les sécheresses et les feux de forêts. Autant d'événements dont les impacts peuvent être désastreux sur le système énergétique, et particulièrement ses infrastructures.

L'augmentation des épisodes de précipitations intenses engendrera des crues et donc davantage **d'inondations** dont les dégâts aux infrastructures électriques (ex. transformateurs électriques) (Agence européenne pour l'environnement, 2019) et même aux barrages (Institut de la francophonie pour le développement durable, 2021) pourraient être potentiellement importants. Par interdépendance, les dégâts subis par d'autres types d'infrastructures comme les ouvrages d'art (ex. ponts) pourraient également endommager les réseaux énergétiques à l'instar de conduites de gaz arrachées lors des inondations de juillet 2021²⁸. Le géoportail WalOnMap met à disposition des cartes d'aléas d'inondation par débordement de rivières et de ruissellement. Au-delà du croisement de la géolocalisation des infrastructures énergétiques avec les cartes d'aléas d'inondation, il est possible d'estimer la population

²⁸ <https://www.rtb.be/article/a-chenee-la-vesdre-vidoe-pour-reparer-une-grosse-conduite-de-gaz-arrachee-lors-des-inondations-10903575>

et des *hot spots* sensibles à l'aléa à l'instar des travaux de Hu et al (2016) pour les infrastructures chinoises.

Les lignes électriques sont particulièrement sensibles aux **tempêtes** (vent, neige, glace) et peuvent être impactés directement ou indirectement (ex. chute de végétation) (Agence européenne pour l'environnement, 2019). A nouveau, les dégâts engendrés peuvent être significativement coûteux mais peuvent aussi créer des *black-out* partiels ou complets (OCDE, 2018).

Les installations électriques sont également sensibles aux **vagues de chaleur**, pouvant provoquer des surchauffes, d'autant plus probables lors de pic de demande de climatisation. Une surchauffe de transformateurs électriques par exemple résulterait en des coupures de courant. La même approche que celle proposée pour les inondations est possible pour estimer la population et les *hot spots* à risque d'aléa de sécheresse (Hu, Hall, Shi, & Lim, 2016). Lorsque des **sécheresses** prennent place en parallèle, les infrastructures énergétiques de transport sont d'autant plus à risque de **feux de forêt** car (i) elles peuvent directement être impactées par les feux et (ii) elles peuvent être la raison du départ de ces mêmes feux de forêt (Agence européenne pour l'environnement, 2019). Même les fumées des feux de forêt peuvent perturber le transport d'électricité²⁹. Bien que le risque de feux de forêt soit considéré comme modéré à terme pour la Wallonie (Joint Research Centre, 2020), la criticité des infrastructures concernées mérite que la question soit étudiée particulièrement pour les provinces de Liège, de Luxembourg ainsi qu'une partie de la province de Namur où le réseau à haute tension (380 et 220 kV) traverse d'importants massifs forestiers. A ce titre, mentionnons les outils [français](#), hollandais [Klimaat-effectatlas](#) et européen ([EFFIS Wildfire Risk Viewer](#) de Copernicus) pouvant servir d'inspiration pour calculer le risque de feux de forêt en Wallonie. Ce dernier cartographie, avec une résolution de 12,5km, la probabilité de feux de forêt mais également la vulnérabilité des populations, écologique et économique. Une étude américaine identifie les communautés qui sont à risque d'être coupées du réseau électrique car elles résident dans une zone à forte probabilité de feux de forêt (Jones, Bresloff, & Darbali-Zamora, 2023) tandis qu'une étude californienne a également pu identifier géographiquement qu'il existe des disparités sociales entre régions face au risque de feux de forêt (Andersen & Sugg, 2019).

Evidemment, la combinaison des aléas climatiques mais également l'interdépendance entre les infrastructures (ICT, transport...) peut aggraver les conditions potentielles sur le système énergétique. Concernant l'interdépendance des infrastructures, les défaillances en cascade constituent un risque important qu'il est essentiel de pouvoir comprendre pour réaliser l'ampleur des enjeux liés aux infrastructures (France Stratégie, 2022).

De son côté, l'Agence européenne pour l'environnement (2019) retient que pour l'Europe centrale occidentale - dont la Wallonie fait partie - les risques climatiques sont essentiellement (i) liés tempêtes pour les infrastructures de production, (ii) liés tempêtes et aux inondations pour les infrastructures de transport et de distribution et (iii) liés inondations pour les infrastructures de transformation.

Etudes et outils	Couverture géographique	Aléa climatique
Agence européenne pour l'environnement (2019)	Europe	Changement climatique
OCDE (2018)	Europe	Changement climatique
Commission européenne (2015)	Europe	Changement climatique
Commission européenne (2013)	Europe	Changement climatique
VITO, ECORES, & KENTER (2020)	Belgique	Changement climatique
ECORES-TEC (2011)	Belgique	Changement climatique
Gouvernement Wallon (2023)	Wallonie	Changement climatique

²⁹ <https://www.ledevoir.com/environnement/793458/feux-de-foret-hydro-quebec-sous-tension>

Plateforme wallonne pour le GIEC (2022)	Wallonie	Changement climatique
Institut de la francophonie pour le développement durable (2021)	Afrique	Changement climatique
van Vliet, Sheffield, Wiberg, & Wood (2016)	Monde	Sécheresse
Mikellidou et al. (2017)	Monde	Changement climatique
Klimaateffectatlas	Pays-Bas	Changement climatique (feux de forêts)
Hu et al. (2016)	Chine	Inondation et sécheresse
Callendar (2022)	France	Feux de forêt
EFFIS Wildfire Risk Viewer	Europe	Feux de forêt
Jones & al. (2023)	Etats-Unis	Feux de forêt
Andersen & Sugg (2019)	Californie	Feux de forêt

Critique

La littérature aborde habituellement la vulnérabilité du système énergétique de manière qualitative, et plus particulièrement au niveau des infrastructures énergétiques. A l’instar de littérature identifiée pour le volet « Infrastructures », celle-ci se concentre essentiellement sur une identification des impacts du changement climatique. A l’exception d’évaluations économiques, les analyses quantitatives et spatiales des risques sont assez peu nombreuses.

De manière générale, il est préconisé de comprendre le système énergétique de manière transversale et de le décomposer selon les étapes de la chaîne d’approvisionnement de l’énergie. Les effets du changement climatique varient en effet selon que l’on traite de la production et la demande d’une part, et du transport, transformation et distribution d’autre part. Néanmoins, il est plus aisé d’évaluer quantitativement et spatialement les vulnérabilités sur cette dernière partie de la chaîne d’approvisionnement.

Pour la Wallonie, il apparaît que les aléas climatiques les plus probables et impactant actuellement sont les inondations et les tempêtes. Si les aléas d’inondation sont assez bien modélisés, la modélisation de tempêtes est un exercice complexe pour lequel il n’existe pas de projections fiables à long terme. Par ailleurs, si le risque de feu de forêt est moins présent actuellement, il n’est pas impensable d’imaginer qu’il prenne plus d’ampleur à l’avenir. Il apparaît donc pertinent de s’y attarder. Nous avons d’ailleurs pu recenser des travaux visant à établir l’impact sur les populations de la vulnérabilité du réseau électrique suite à des sécheresses ainsi que des feux de forêt, et dont la transposition à la Wallonie pourrait s’avérer pertinente. La modélisation des températures futures et donc des sécheresse est un exercice source de grandes incertitudes, et dont l’impact serait plus difficile à évaluer car il porte particulièrement sur la production et la demande en énergie pour lesquelles des estimations ont déjà été retrouvées dans la littérature. En revanche, l’analyse spatiale de la vulnérabilité des infrastructures énergétiques face au risque de feux de forêts, et par extension des populations potentiellement impactées, peut être réalisée grâce à aux méthodes retrouvées dans la littérature à disposition.

Enfin, il convient de noter que la littérature met également en avant l’accroissement des risques lorsque des aléas se combinent ou que des interrelations profondes existent avec d’autres secteurs. C’est d’autant plus vrai que la majorité des secteurs d’activités et systèmes d’urgence reposent d’une manière ou d’une autre sur l’énergie délivrée par le système énergétique. Les défaillances en cascade sont donc extrêmement probables dès lors que le système énergétique est interrompu, ne serait-ce que partiellement.

1.3. Méthodologie d’analyse de vulnérabilité

Approche générale

L’objectif de cette étape est d’évaluer la vulnérabilité du système énergétique wallon, au travers d’indicateurs spatialement explicites et visualisables sur la future plateforme. A l’instar du constat tiré

de l'analyse de la littérature, l'exercice n'est pas nécessairement évident car la vulnérabilité d'un système énergétique est fortement tributaire des caractéristiques techniques de ce système, qui ne sont pas nécessairement traduisibles visuellement. C'est pourquoi l'exercice se limite à localiser les infrastructures en zone d'aléa et, lorsque c'est possible, à estimer les populations potentiellement affectées.

Nous proposons une approche en 3 étapes :

1. **Définir le périmètre d'étude** pour, au-travers d'une consultation d'experts, lister et documenter les éléments suivants :
 - a. **Système énergétique** : nous nous concentrerons sur les composantes de la chaîne d'approvisionnement les mieux documentés dans la littérature qui sont (i) la production et la demande d'énergie et (ii) le transport, la transformation et la distribution d'énergie. L'exercice portera sur les infrastructures du système énergétique ;
 - b. **Parc de production électrique à l'horizon 2030 et 2050** : nous constituerons deux scénarios du parc sur base des scénarios WEM et WAM du PNEC et du PACE. L'étude ne le proposera pas, mais il pourrait être intéressant d'étudier un scénario alternatif où la production électrique thermique serait dominante, de manière à mettre en perspective les différences en termes de problèmes d'adaptation découlant d'une dépendance géopolitique et non climatique ;
2. **Identifier les risques prioritaires liés aux CC** : nous nous alignerons sur la littérature et surtout les risques principaux identifiés par l'AEE, pour les deux scénarios définis précédemment. Les aléas d'inondations seront exploités alors qu'une approche similaire sera proposée pour les feux de forêt ;
3. **Analyser les vulnérabilités pour les risques majeurs** : la méthodologie générale pour chaque risque évalué consistera en (i) l'identification et la collecte des données disponibles en Wallonie, (ii) le prétraitement des données, (iii) le calcul des indicateurs et (iv) la visualisation des résultats. Par risque, cela implique de :
 - a. **Inondations** : croiser des cartes d'aléas d'inondation (par débordement des cours d'eau et par ruissellement) disponibles au niveau wallon avec la géolocalisation des infrastructures. Nous chercherons également à estimer les populations affectées par une éventuelle défaillance des infrastructures en zone d'aléa. Cela pourrait se faire soit en reconstituant le nombre de compteurs (citoyens, entreprises, bâtiments publics) reliés à des postes de transformation électrique ou des points de distribution de gaz naturel soit en se basant sur la méthodologie proposée par Hu et al. (2016). Cet exercice sera possible dans la limite des données disponibles auprès des GRT (ELIA et FLUXYS) et des GRD (ORES et RESA principalement) d'électricité et de gaz naturel.
 - b. **Feux de forêts** : les cartes d'aléas du *EFFIS Wildfire Risk Viewer* seront croisées avec la géolocalisation des infrastructures énergétiques. Similairement aux inondations, les populations à risque pourraient être identifiées si nous sommes en mesure de relier des populations à certaines infrastructures spécifiques (ex. transformateurs électriques). Cet exercice sera possible dans la limite des données disponibles auprès des GRT et des GRD d'électricité et de gaz naturel. A défaut, la carte de vulnérabilité des populations du *EFFIS Wildfire Risk Viewer* sera employée bien que sa résolution ne permette pas une analyse fine.

Enfin, nous suggérons également de documenter **l'interdépendances des infrastructures électriques et de gaz naturel avec d'autres infrastructures** afin de comprendre le degré de dépendance d'un réseau à l'autre et d'identifier les risques de défaillances en cascade.

Indicateurs et Zones à risques

En termes **d'indicateurs**, nous pourrions calculer :

- un indicateur de la **longueur** des lignes électriques et conduites de gaz impactées par les aléas d'inondation et de feu de forêt. Les estimations tiendront compte, dans la mesure du possible, de la granularité (haute, basse, moyenne tension/pression) du système énergétique (électricité et gaz naturel) ;
- Un indicateur de la **part de la population, des ménages, des entreprises, des bâtiments publics à risque de coupure (partielle ou complète) du réseau électrique et de gaz naturel** à cause des aléas d'inondation/feux de forêt sera calculé dans la limite des données disponibles auprès des GRT et GRD.

Des **cartes** croisant les aléas et la localisation des infrastructures électrique et de gaz naturel avec les aléas d'inondation et feu de forêt seront créées.

Données

Nous nous baserons sur les cartes d'aléas disponibles sur WalOnMap en ce qui concerne les inondations (par débordement et ruissellement). Pour les feux de forêts, nous exploiterons les données publiquement disponibles grâce au *EFFIS Wildfire Risk Viewer*.

La difficulté principale réside dans l'existence et l'accès de données conciliant ménages, entreprises et bâtiments publics à certaines infrastructures clés du systèmes énergétiques (ex. transformateurs, lignes/conduites haute/moyenne tension/pression...). Ces données seront directement à collecter auprès des GRT et GRD. Pour autant qu'elles existent de manière exploitable, ils pourraient invoquer des raisons RGPD (ou de confidentialité commerciale) pour ne pas les transmettre.

Liens thématiques

La thématique « Energie » est liée à :

- La thématique **Eau** car elle fournira la source des données pour le croisement des cartographies en matière de risque d'inondation et d'évaluation de la vulnérabilité. Si possible d'en obtenir des données pertinentes, cette thématique pourrait également être liée aux questions de sécheresses et de refroidissements des centrales nucléaires ou du rendement des centrales hydroélectriques ;
- La thématique **Infrastructure** en lien avec les dommages en cascades qui peuvent être engendrés par des dommages aux réseaux électriques et de gaz naturel, engendrant *de facto* un risque de rupture de l'approvisionnement en électricité de gaz naturel, et donc d'interruption de services (TIC, transport...) ;
- La thématique **socio-économique** car l'impact sur les différents secteurs d'activités y est étudié, or une perturbation, voire un arrêt complet de la fonctionnalité des infrastructures énergétiques auront un impact fort important sur divers secteurs (ICT, transport...) ;
- La thématique **Aménagement du territoire** car les réponses à donner aux risques auxquelles les infrastructures sont soumises passeront par une réflexion de fond sur l'organisation spatiale et fonctionnelle du territoire de la Wallonie.

1.4. Mesures d'adaptation

Une '*climate resilient infrastructure*' est une infrastructure capable de maintenir les services qu'elle rend en cas de crise (OECD, 2018). Les mesures d'adaptation doivent donc pouvoir permettre d'atteindre cet objectif. La littérature est assez bien fournie en termes de mesures d'adaptation pour les infrastructures énergétiques. Celles-ci peuvent être de deux types : elles peuvent être à la fois techniques (*design* des installations) ou managériales (pilotage des installations, création de centres d'alerte, systèmes de surveillance et de suivi...). Les mesures développées ici ne tiendront pas compte de l'adaptation du bâti au réchauffement et à la climatisation pour éviter de renforcer l'ICU car ce point est adressé dans le volet « Villes - ICU ».

Citons quelques mesures à titre d'exemples :

- Enfouissement des lignes électriques aériennes ;
- Modification des critères de conceptions des lignes électriques et conduites de gaz naturel ;
- Surélévation des infrastructures (p.ex. postes de transformation électrique) pour éviter les dégâts liés aux inondations ;
- Mise en place de systèmes coupant automatiquement le courant d'une ligne électrique lorsqu'elle est arrachée suite à des dégâts importants liés à des phénomènes météorologiques extrêmes ;

Lors de l'identification et la formulation de mesures d'adaptation, nous procéderons également à une analyse croisée qualitative des mesures d'atténuation spécifiques à l'énergie du PACE 2030. L'objectif est de s'assurer que les mesures d'adaptation ne rentrent pas en contradiction avec les mesures d'atténuation voire que l'on puisse dégager des synergies avec ces dernières.

<https://www.icedd.be/>

1.1. Introduction

Selon l'OMT (Organisation Mondiale du Tourisme), le tourisme est « un phénomène social, culturel et économique qui suppose des mouvements de personnes vers des pays ou des lieux situés en dehors de leur environnement habituel intervenant pour des motifs personnels ou pour affaires et motifs professionnels. Ces personnes sont appelées visiteurs et peuvent être des touristes ou des excursionnistes; des résidents ou des non-résidents ». Le tourisme englobe un grand nombre d'activités différentes, dont certaines impliquent des dépenses touristiques. Ces activités concernent des secteurs essentiellement touristiques (agences de voyages, tour-opérateurs, hébergements, attractions culturelles, naturelles ou récréatives...) et d'autres pour lesquels les touristes ou excursionnistes représentent une certaine partie de la clientèle (transports, HORECA, commerces, services à la personne etc.).

Le tourisme représente une des principales activités économiques au niveau mondial. Selon l'OMT (2023), en 2022, le secteur contribuait ainsi à hauteur de 7,6% du PIB mondial pour des recettes estimées à 1072 milliards de dollars. L'OMT indique également que la croissance se poursuivra en 2023 qui devrait voir les arrivées internationales quasi retrouver leur niveau d'avant la pandémie. Au niveau de la Wallonie, le tourisme a une importance relative moindre que d'autres régions du monde avec 7 milliards d'euros et une contribution à la valeur ajoutée brute de 3,6%. Le secteur représenterait aussi près de 60.000 emplois ETP (OTW, 2023).

Bien évidemment, avec un tel niveau d'activité, le tourisme est l'un des vecteurs principaux du réchauffement climatique. Une étude publiée dans la revue scientifique *Nature Climate Change* (Lentzen et al., 2018) indique ainsi que le tourisme serait responsable de 8 % des émissions de gaz à effet de serre dans le monde. Mais les changements climatiques ont, eux-mêmes, un impact sur l'évolution des flux et des activités touristiques. Ces deux dimensions (l'impact du tourisme sur les changements climatiques et l'impact des changements climatiques sur le tourisme) sont déjà extrêmement bien documentées dans la littérature depuis le début des années 2000, qu'elle soit scientifique, « grise » ou médiatique. Récemment, Scott et Gössling (2022) ont conduit une analyse bibliométrique de 1290 articles liés à 35 ans de recherche sur le changement climatique et le tourisme. Les auteurs concluent que malgré cette profusion d'études, les travaux n'ont pas réussi à préparer le secteur à la transition vers une économie décarbonée et à la disruption climatique qui transformera le tourisme au cours des prochaines décennies.

Même s'il est impossible d'être exhaustifs dans notre benchmarking scientifique, on peut épinglez des études qui ont été menées au niveau de certains pays ou certaines régions en particulier. Citons ainsi l'Europe (Amelung et Moreno, 2012), l'Afrique (Dube et al., 2023), la Méditerranée (Perry, 2000 ; Braki et Anagnostopoulou, 2019), l'Espagne (Hein et al., 2009), l'Allemagne, le Royaume-Uni et l'Irlande (Hamilton et Tol, 2007), les Iles Canaries (Carrillo et al., 2022), les régions montagneuses d'Amérique du Nord (Scott, 2003), l'Australie (Amelung et Nicholls, 2014), les régions côtières (Arabadzhyan et al., 2021), les îles (Uyarra et al., 2005) ou encore les parcs nationaux (Liu, 2016 ; Dube et Nhamo, 2020). Des études ont aussi été réalisées sur les impacts des changements climatiques sur certaines activités touristiques telles que le ski (Steiger et al., 2020).

Au niveau Wallon, en dehors de l'étude de la PwG (Plateforme wallonne pour le GIEC) et de l'AWAC sur l'adaptation aux changements climatiques en Wallonie, c'est l'étude de la CPDT (Conférence Permanente du Développement Territorial) sur l'impact des modifications climatiques à 30 ans sur le tourisme en Wallonie (2014) qui, même si elle commence à dater, reste la plus complète à ce jour. Cette étude, d'une durée de trois ans, portait sur les liens entre les changements climatiques à 30 ans et le tourisme en Wallonie. Son objectif était de mettre en évidence l'impact des changements climatiques et des mesures d'atténuation de ces changements tant sur les flux touristiques vers la Wallonie que sur les flux au sein du territoire wallon. Ses principaux résultats sont intégrés dans l'état des lieux ci-dessous.

1.2. Etat des lieux

D'après notre revue de la littérature, les changements climatiques sont susceptibles d'avoir des impacts multiples sur le tourisme, que ce soit en Wallonie ou dans d'autres régions du monde. Globalement, il apparaît toutefois que la Wallonie serait moins affectée et pourrait même, dans une certaine mesure, tirer son épingle du jeu dans ce contexte de disruption climatique.

Les principales forces susceptibles d'affecter le tourisme en Wallonie sont l'augmentation de la température moyenne et l'augmentation des épisodes extrêmes (vagues de chaleur, sécheresses et épisodes de précipitations intenses). De manière indirecte, les changements climatiques provoquent des effets sur la biodiversité terrestre et sur le patrimoine culturel qui sont aussi susceptibles de concerner le tourisme wallon. Les changements vont s'exprimer tant du niveau de la demande que de l'offre touristique.

1.1. Changements au niveau de la demande touristique

1.1.1. Flux touristiques

- **Une modification spatiale des flux l'été**: les changements climatiques devraient provoquer une redistribution des atouts et contraintes climatiques des différentes régions du monde. La conclusion principale des différentes études traitant de ce sujet est que les flux de touristes devraient opérer un **glissement vers le Nord**. Les destinations actuellement relativement peu prisées d'Europe du Nord pourraient voir leur attractivité augmenter, le sud de l'Europe devenant moins attractif, car moins confortable pour les touristes. Ainsi en 2023, cela a déjà été le cas en France avec une augmentation significative des réservations en Bretagne, la Manche et le Pas-de-Calais et une diminution dans le sud. La Belgique et la Wallonie pourraient donc voir leur niveau global d'attractivité augmenter. La perte d'attractivité de destinations devenues trop « chaudes » pourrait amener à une réduction du tourisme international en faveur d'un tourisme plus interne/domestique.
- **Un attrait plus important pour le tourisme domestique l'été** : la hausse des températures ainsi que la baisse des précipitations en été en Belgique pourraient amener les touristes belges, qui, à l'heure actuelle, voyagent en grand majorité (plus de 80%) à l'étranger, à préférer un tourisme domestique au tourisme international. Par ailleurs, les touristes belges devraient être de plus en plus nombreux à vouloir limiter leur empreinte écologique pendant les vacances et donc préférer des vacances en Belgique/Wallonie plutôt qu'à l'étranger.
- **Un raccourcissement des distances** : la croissance des prix de l'énergie et l'intégration du coût des externalités négatives (pollution) dans les normes comptables auront un impact sur l'évolution à la hausse du prix des tickets d'avion, ce qui devrait globalement conduire à un raccourcissement des distances, renforçant de ce fait le tourisme de proximité (domestique et pays limitrophes).
- **Une modification temporelle des flux sur l'année** : Parallèlement au glissement vers le Nord des flux touristiques, on devrait assister à un plus grand étalement des flux touristiques sur l'année. Ainsi, le potentiel touristique de l'été devrait diminuer tandis que celui des **intersaisons** devrait croître significativement. Le printemps et l'automne devenir plus favorables au tourisme car offrant plus de fraîcheur.

1.1.2. Comportement des touristes

- L'instabilité du climat, l'incertitude de la météo et le risque d'évènements extrêmes (vagues de chaleur/canicules, précipitations intenses) devraient impacter le comportement des touristes qui sont en général averses au risque. Outre, les choix en termes de destinations et de périodes de voyage décrits ci-dessus, les touristes devraient **adapter leurs activités** en conséquence. Citons ainsi par ex. :
 - Possible réduction de l'attrait des sites et infrastructures les plus exposés aux évènements climatiques extrêmes.

- Possible attrait plus important pour les points de fraîcheur que constituent les sous-bois, les rivières ou les grottes.
- Possible attrait plus important pour les zones de baignades qui, par ailleurs, devraient être aussi plus vulnérables, du moins en ce qui concerne les rivières (cf. ci-dessus).
- Possible attrait plus important pour les infrastructures climatisées et/ou à l'abri de la pluie.
- Possible attrait plus important pour des activités à horaires décalés (tôt le matin ou en soirée, comme dans les pays du sud de l'Europe où certains commerces et attractions sont fermés pdt les heures chaudes mais ouvrent plus tard le soir).
- L'aversion aux risques (climatique mais aussi sanitaire, géopolitique etc.) devrait aussi amplifier le phénomène des réservations « **last minute** », **qui s'est déjà accru suite à la crise de la Covid-19.**
- Enfin, de manière indirecte, le réchauffement climatique favorisera le développement d'espèces invasives (par exemple les moustiques Tigre, les tiques ou les punaises de lit par exemple) qui sont source d'**inconfort** pour les touristes.

1.2. Changements au niveau de l'offre touristique

1.2.1. Changements structurels dans l'écosystème touristique

- Le réchauffement climatique rend plus rares les **chutes de neige** en Belgique provoquant en conséquence une baisse d'opérationnalité et d'attrait de l'activité touristique d'hiver liée à la neige (dans les Fagnes ou les Ardennes par exemple) et par ailleurs des situations de sur-fréquentation lorsqu'elle arrive soudainement.
- **L'augmentation de la température (de l'air et de l'eau)** devrait permettre d'allonger la saison touristique des activités nautiques.
- Les changements climatiques impactent les **écosystèmes terrestres** (forêts, espaces naturels, réserves naturelles, etc.), **aquatiques** (mers, océans, rivières, lacs, etc.) et **aériens** (vents, niveaux d'ozone, dômes de chaleur, etc.). Ces changements représentent des menaces pour l'offre touristique en Wallonie et plus particulièrement :
 - Menace pour le tourisme nature/éco-tourisme : certains espaces naturels visités pour leur spécificité (tourbières, pelouses calcaires, etc.) pourraient être affectés par un changement/disparition de la biodiversité et de leur écosystème. La perturbation de la faune et de la flore installées et le stress hydrique sur la santé des peuplements, notamment forestiers, impliqueraient des coupes à blanc qui diminuent l'attractivité des paysages. Les feux de forêt, les risques d'incendies et des épidémies animales telles que la peste porcine, la grippe aviaire, les chenilles urticantes, ... (causées indirectement en partie par les changements climatiques) pourraient conduire à fermer des forêts et/ou des espaces naturels.
 - Menace pour le tourisme nautique: ainsi, la baisse du niveau des eaux en deçà des minimums pourrait perturber ou empêcher la navigation de plaisance, surtout en ce qui concerne les plans d'eaux (estran boueux à franchir pour aller se baigner ou embarquer) et les ouvrages de franchissement (priorité donnée à la navigation marchande). Certaines activités nautiques pourraient aussi être interdites suite à des problèmes liés à la qualité des eaux de baignade (eaux polluées par l'eutrophisation et la limitation des processus naturels d'épuration, prolifération de bactéries entraînant des problèmes sanitaires, etc.)
- Les changements climatiques peuvent provoquer des **manques d'eau douce** conduisant à des restrictions pouvant menacer le remplissage des piscines et l'arrosage des espaces verts. Plus globalement, il faut s'attendre à une tension accrue entre demande et disponibilité d'eau douce, surtout dans un contexte où un touriste consomme beaucoup plus d'eau (ratio allant jusque 1 à 10 !) qu'un habitant local.
- Les changements climatiques peuvent menacer les cultures et par conséquent la **gastronomie locale** mais aussi **impacter les paysages** par le remplacement des prairies existantes par des cultures intensives devenues possibles.

- Les **mesures pour réduire les émissions de gaz à effet de serre** dans tous les secteurs auront un impact à la fois sur les prix, les équipements et les fournitures des sites/événements touristiques et les comportements des consommateurs.

1.2.2. Perturbations de l'offre touristique

- Les incendies, les orages/tempêtes et les inondations (surtout les inondations en Wallonie) peuvent entraîner l'endommagement, voire la destruction de certaines **infrastructures et sites touristiques**. **Il est donc nécessaire** d'anticiper ces risques et d'équiper les infrastructures en fonction de différents scénarios météorologiques, ce qui bien évidemment, aura un impact sur les coûts d'investissement mais aussi d'exploitation.
 - Réduction de l'attrait de certains sites et événements (spectacles, festivals, foires, marchés etc.) touristiques à court et moyen terme.
 - Menace de l'opérabilité de certains sites et événements touristiques, d'autant qu'ils sont situés dans des zones d'aléa climatique (près de cours d'eau ou dans des forêts par ex.).
 - Menace de la viabilité de certains sites et événements touristiques en raison des coûts important d'investissement pour prévenir les risques climatiques et/ou reconstruction.
 - Augmentation des risques de rapatriement, délogement ou d'annulation des séjours touristiques.
- Les **assurances** seront probablement de moins en moins enclines à couvrir les conséquences des changements climatiques (hausse des prix, exclusions d'évènements, etc.)
- Les changements climatiques peuvent entraîner l'endommagement, voire la destruction du **patrimoine culturel et historique**.
 - Les sites historiques ont souvent été érigés en fonction du climat original et ne sont pas toujours adaptés aux changements climatiques.
 - Augmentation de la complexité de conservation.
 - Menace de l'opérabilité des sites touristiques.
 - Réduction de l'attrait des sites touristiques à court et moyen terme.
 - Menace de la viabilité des sites touristiques en raison des coûts important de conservation.

1.3. Méthodologie d'analyse de vulnérabilité

Nous proposons une double lecture pour le développement de cette analyse ; d'une part, une lecture géographique par commune, province, et par Maison du tourisme (MT sensées constituer des zones plus homogènes au niveau de l'éco-système touristique) et d'autre part, une lecture économique, par activités/produits touristiques. Concernant ces derniers, on peut lire sur le site d'accueil de la RW que « La Région dispose, il est vrai, de pas mal d'atouts : des forêts préservées, des vallées authentiques, un patrimoine architectural remarquable, une gastronomie et des produits de bouche de grande qualité sans oublier un goût prononcé pour le folklore et la fête ». Il serait dès lors utile d'analyser notamment la vulnérabilité de cinq éléments (produits) clés de l'offre touristique wallonne.

1.3. Analyse de vulnérabilité par commune, MT et province

Il s'agirait ici de superposer les cartes d'aléa climatiques proposés par les experts wallons du GIEC aux cartes des scores ou taux de touristicité des différentes communes, MT et province proposés par l'IWEPS (<https://www.iweps.be/indicateur-statistique/score-de-touristicite-des-communes-wallonnes>). Nous pourrions ainsi mieux **visualiser les zones à risque** qui concernent l'offre et la demande touristique.

1.4. Analyse de vulnérabilité par produit touristique

L'idée est ici de lister les produits, attractions et événements touristiques phares de la RW et d'analyser en quelle mesure ils sont susceptibles d'être affectés par les risques liés aux changements climatiques repris ci-dessus (au niveau de la demande et de l'offre touristique). Nous nous référons à des **jugements d'expert** pour procéder à une telle analyse.

PRODUITS/ACTIVITES
Forêts
Vallées (y compris Kayak)
Patrimoine architectural
Gastronomie
Folklore
Attractions phares
Événements phares

1.5. Analyse de vulnérabilité du patrimoine

Il s'agira ici de superposer les cartes d'aléa climatiques proposés par les experts wallons du GIEC aux cartes localisant les différents biens classés en Région wallonne. Selon la RW, « le classement constitue une mesure de protection légale d'un bien immobilier dont la valeur patrimoniale supérieure est ainsi reconnue et dont la conservation est jugée d'intérêt régional. Cette exigence de conservation inclut l'entretien du bien et, si nécessaire, sa restauration au moyen de procédés et techniques spécifiques déterminés en fonction de ses qualités propres. Le classement porte uniquement sur des biens immobiliers qui présentent un intérêt architectural, historique, archéologique, scientifique, artistique, social, technique, mémoriel, esthétique, urbanistique ou paysager, dont le degré supérieur est analysé sur base des critères d'authenticité, d'intégrité, de représentativité typologique ou de rareté. Une distinction est apportée au niveau du classement en fonction de la nature du bien concerné : on le classera comme monument, site, ensemble architectural ou site archéologique (CoPat - art.3, 7°) » (<https://geoportail.wallonie.be/catalogue/01491630-78ce-49f3-b479-4b30dabc4c69.html>).

Nous pourrions ainsi mieux **visualiser les zones à risque** qui concernent le patrimoine classé en Wallonie.

2. Mesures d'adaptation

Il est évidemment prématuré de lister les mesures d'adaptation qui devront être prises suite à l'analyse de vulnérabilité décrite ci-dessus. Dans tous les cas, nous proposons, d'une part, d'analyser et de présenter les mesures d'adaptation au niveau des quatre types d'acteurs suivants (Njoroge, 2015):

- Les entreprises et organisations touristiques
- Les touristes-consommateurs
- Les destinations
- Les pouvoirs publics

D'autre part, il s'agira de préciser la nature des adaptations requises. On peut ainsi distinguer :

- Les innovations technologiques
- Les changements de comportement
- La suppression ou relocalisation d'activités ou de zones touristiques
- La réduction voire la fermeture au tourisme

Nous proposerons ensuite de croiser ces deux dimensions dans un tableau à double entrée permettant d'émettre nos recommandations en termes d'adaptation. Celui pourrait ainsi résulter dans une conclusion telle que « Les innovations technologiques peuvent aider à reconstituer des sites naturels ou culturels devenus difficilement accessibles ou menacés de détérioration. Des plages peuvent être reconstruites

artificiellement le long de nos cours d'eau ; les stations de ski peuvent se tourner vers les canons à neiges ou les infrastructures d'intérieur. Toutefois, ces options peuvent avoir des effets néfastes : utilisation de combustibles fossiles, coût, etc. En outre, les touristes n'aiment pas les infrastructures artificielles ».



PARTIE C : Glossaire



Bassin versant : Un bassin versant est un territoire géographique correspondant à l'ensemble de la surface recevant les eaux qui circulent vers une même masse d'eau. Des lignes de partages des eaux délimitent les différents bassins versants. En Wallonie, quatre bassins versants (la Meuse, l'Escaut, le Rhin et la Seine) sont subdivisés en quinze sous-bassins versants.

Capacité d'adaptation : La capacité d'adaptation se réfère aux ressources et caractéristiques qui aident les groupes humains à s'adapter à des dangers et à en diminuer les impacts potentiels. La capacité est scindée en la capacité de se préparer aux dangers potentiels, en la capacité de réponse au moment de la crise et la capacité de récupération une fois la crise passée.

Charge de la maladie : Il s'agit d'un concept utilisé pour quantifier l'impact global d'une maladie en termes de morbidité et de mortalité sur une population. Une des mesures couramment utilisées pour estimer cette charge est l'Année de Vie Ajustée sur l'Incapacité (DALY, pour "Disability-Adjusted Life Year" en anglais). Le DALY est une mesure qui combine à la fois les années de vie perdues à cause d'une mortalité prématurée et les années de vie vécues avec une incapacité. En somme, il donne une vue d'ensemble des années de "bonne santé" perdues. Il est calculé par la somme du YLL (Years of Life Lost = Années de vie perdues en raison d'une mortalité prématurée) et du YLD (Years Lived with Disability = Années vécues avec une incapacité, égales au produit du nombre de cas d'une maladie par la durée de cette maladie et par un facteur de pondération qui reflète la gravité de la maladie)

Confort d'été : « Capacité d'un bâtiment à maintenir une température intérieure maximale agréable l'été » (Dolques & Dépoues, 2022).

Courbes IDF : Les courbes Intensité-Durée-Fréquence représentent l'évolution de l'intensité des pluies en fonction de leur durée et de leur fréquence exprimée en période de retour. Ces courbes sont réalisées par l'IRM en se basant sur les données historiques des précipitations.

Débit d'étiage : Le débit d'étiage est le débit minimal d'un cours d'eau calculé sur un pas de temps donné, à la période où le niveau d'un cours d'eau a atteint son point le plus bas.

Dettes d'invasion : risque d'établissement future et de l'augmentation du phénomène des invasions

Données limnimétriques : Les données limnimétriques sont les mesures de la hauteur d'un cours d'eau au cours du temps. En Wallonie, plus de 180 stations de mesures limnimétriques enregistrent la hauteur des cours d'eau toutes les 2 à 10 minutes.

Erosion aratoire : Détachement et déplacement de particules du sol sous l'effet de certaines pratiques agricoles comme le travail du sol

Erosion de récolte : Détachement et déplacement de particules du sol sous l'effet de la récolte des cultures de racines et de tubercules

Erosion hydrique : L'érosion hydrique est provoquée par les fortes précipitations et le ruissellement de l'eau sur les sols, en particulier sur les sols agricoles, qui vont déplacer des particules de sols et engendrer des pertes de sol.

Espèces Exotiques Envahissantes (EEE) : espèces végétales ou animales qui ont été introduites par l'homme en dehors de leur aire d'origine et qui constituent une menace pour la biodiversité et les services fournis par les écosystèmes (production végétale, épuration de l'eau, pollinisation, etc.). Elles peuvent aussi causer d'importantes nuisances socio-économiques (biodiversite.wallonie.be)



Infrastructure verte (IV) : réseau constitué de zones naturelles, semi-naturelles et d'autres éléments environnementaux faisant l'objet d'une planification stratégique, conçu et géré aux fins de la production d'une large gamme de services écosystémiques. Il intègre les espaces verts (ou aquatiques) et d'autres éléments physiques des zones terrestres et marines » (Commission européenne, 2013).

Jardin de pluie : Zone combinant différents dispositifs de ralentissement, de stockage, d'infiltration et d'évaporation des eaux tout en proposant des services de paysage, de loisirs et même de refuge pour la biodiversité.

Mesures agro-environnementales et climatiques (MAEC) : Mesures volontaires pour répondre voire anticiper les conséquences de certains phénomènes climatiques extrêmes ou contrecarrer leur amplitude

Modèle de distribution des espèces (SDM) : modèle qui décrit ou prévoit la probabilité de la présence ou de l'absence d'une espèce à travers les paramètres environnementaux dans une zone géographique spécifiée (P.B. PEARMAN et al., 2008).

Mortalité vs Morbidité : La mortalité se réfère au nombre de décès dans une population donnée, tandis que la morbidité désigne la fréquence et la prévalence des maladies ou des problèmes de santé au sein de cette population, qu'ils entraînent ou non la mort

Nature-Based Solutions (NBS) : solutions inspirées et soutenues par la nature, qui sont rentables, offrent simultanément des avantages environnementaux, sociaux et économiques, et contribuent à renforcer la résilience. De telles solutions introduisent davantage de biodiversité et de processus et éléments naturels dans les villes, les paysages et les espaces marins, grâce à des interventions adaptées localement, efficaces en termes de ressources et systémiques (Commission Européenne).

Noue : La noue est une dépression peu profonde et large qui favorise le stockage des eaux pluviales et leur infiltration dans les sols.

PASH : Plan d'assainissement par sous bassin hydrographique

PEB : Performance énergétique des bâtiments.

PICC : Projet informatique de cartographie continue : référence cartographique numérique en 3 dimensions de l'ensemble de la Wallonie.

Réseau écologique (RE) : ensemble des habitats susceptibles de fournir un milieu de vie temporaire ou permanent aux espèces végétales et animales, dans le respect de leurs exigences vitales, et permettant d'assurer leur survie à long terme (biodiversite.wallonie.be).

Réserve en eau utile (REU) : La réserve en eau utile du sol est la quantité maximale d'eau que le sol peut retenir et restituer à la plante.

Sécheresse édaphique : La sécheresse édaphique ou agricole correspond à un manque d'eau disponible dans les sols qui impacte la production végétale.

Sécheresse hydrologique : La sécheresse hydrologique correspond à une diminution du débit des cours d'eau et un niveau bas des nappes d'eau souterraines sur une période prolongée.



Sécheresse météorologique : La sécheresse météorologique correspond à une longue période sans précipitations.

Sensibilité : la sensibilité des populations se définit comme la prédisposition de celles-ci à être négativement affectée.

Services écosystémiques (SES) : biens et les services réalisés par la biodiversité, les processus écologiques, les écosystèmes et le support de l'activité humaine pour améliorer le bien-être de l'humanité (biodiversite.wallonie.be).

Végétations Naturelles Potentielles (VNP) : végétation qu'on supposerait (sur des bases scientifiques, généralement phytosociologiques) présente dans un milieu naturel, s'il n'avait pas subi d'influence anthropique significative.

Vulnérabilité : La vulnérabilité se définit comme la propension ou la prédisposition d'un système à être négativement affecté.

Wildland-Urban Interface (WUI) : Interface entre les zones « sauvages » (naturelles) et les zones urbaines.



PARTIE D : Bibliographie



AgriAdapt (s.d.). <https://awa.agriadapt.eu/fr/>

Adams, P., Steeves, J., Ashe, B., Firth, J., & Rabb, B. (2014). Climate Risks Study for Telecommunications and Data Center Services. Riverside Technology, inc.

Ademe & Métropole de Lyon (2017). Solutions de rafraîchissement urbain. https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/sites/cracc/files/fichiers/2018/11/406_Solutions%20de%20Rafra%C3%AEchissement%20Urbain%20Journ%C3%A9e%20technique.pdf (accès le 06/10/2023)

Ademe (2012). Guide de recommandation pour lutter contre l'effet îlot de chaleur urbain à destination des collectivités territoriales). https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/sites/cracc/files/fichiers/2018/11/401_Guide%20de%20recommandation%20pour%20lutter%20contre%20l%E2%80%99effet%20%C3%AElot%20de%20chaleur%20urbain%20%C3%A0%20destination%20des%20collectivit%C3%A9s%20territoriales.pdf (accès le 06/10/2023)

ADEME. (2020). Diagnostic des impacts du changement climatique sur une entreprise.

Ademe (2020a). Climatologie urbaine, enseignement du programme MUSTARDijon. <https://bibliothèque.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/204-climatologie-urbaine-enseignements-du-programme-mustardijon.html> (accès le 26/10/2023)

Ademe (2020 b). Adaptation au changement climatique et projet urbain. 144 p. <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/agir/espace-documentaire/adaptation-au-changement-climatique-et-projet-urbain> (accès le 06/10/2023)

ADULM (2022). Atlas des îlots de chaleur de la métropole lilloise. 32 p. https://www.adu-lille-metropole.org/wp-content/uploads/2022/11/Atlas-des-ICU_ADULM.pdf (accès le 26/10/2023)

AEA. (2012). Increasing the climate resilience of waste infrastructure.

Agence européenne pour l'environnement. (2015). Infrastructure verte: mieux vivre grâce à des solutions fondées sur la nature. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/fr/articles/infrastructure-verte-mieux-vivre-grace>

Agence européenne pour l'environnement . (2019). Adaptation challenges and opportunities for the European energy system - Building a climate-resilient low-carbon energy system.

Amaripadath, D., Joshi, M. Y., Hamdy, M., Petersen, S., Stone, Jr., B., & Attia, S. (2023). Thermal resilience in a renovated nearly zero-energy dwelling during intense heat waves. *Journal of Building Performance Simulation*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/19401493.2023.2253460>

Amelung, B., & Moreno, A. (2012). Costing the impact of climate change on tourism in Europe: results of the PESETA project. *Climatic Change*, 112, 83-100.

Amelung, B., Nicholls, S., & Viner, D. (2007). Implications of global climate change for tourism flows and seasonality. *Journal of Travel research*, 45(3), 285-296.

AMICE, Adaptation of the MEUSE to the Impacts of Climate Evolution. (s. d.). <http://www.amice-project.eu/fr/>

Ancion, P.-Y., Reyskens, R., 2020. Projet de cartographie des zones soumises à l'aléa d'inondation.

- Andersen, L., & Sugg, M. (2019). Geographic multi-criteria evaluation and validation: A case study of wildfire vulnerability in Western North Carolina, USA following the 2016 wildfires. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- Andersson, C., & Engardt, M. (2010). European ozone in a future climate: Importance of changes in dry deposition and isoprene emissions. *Journal of Geophysical Research*, 115(D2), D02303–n/a. <https://doi.org/10.1029/2008JD011690>
- Arabadzhyan, A., Figini, P., García, C., González, M. M., Lam-González, Y. E., & León, C. J. (2021). Climate change, coastal tourism, and impact chains—a literature review. *Current Issues in Tourism*, 24(16), 2233-2268.
- Association française des professionnels de l'eau et des déchets (ASTEE). (2019). Eaux, déchets et changements climatiques - Comment les services publics des déchets et de l'eau peuvent-ils atténuer leurs émissions de gaz à effet de serre et s'adapter au changement climatique ?
- Atlas de l'agence intermutualiste de Belgique. <https://atlas.aim-ima.be/base-de-donnees/?rw=1&lang=fr> Consulté le 10/10/2023.
- Atlas natuurlijk kapitaal. <https://www.atlasnatuurlijkkapitaal.nl/en/node/1761> (accès le 06/10/2023)
- Attia, S., & Gobin, C. (2020). Climate Change Effects on Belgian Households : A Case Study of a Nearly Zero Energy Building. *Energies*, 13(20), 5357. <https://doi.org/10.3390/en13205357>
- Attia, S., Benzidane, C., Rahif, R., Amaripadath, D., Hamdy, M., Holzer, P., Koch, A., Maas, A., Moosberger, S., Petersen, S., Mavrogianni, A., Maria Hidalgo-Betanzos, J., Almeida, M., Akander, J., Khosravi Bakhtiari, H., Kinnane, O., Kosonen, R., & Carlucci, S. (2023). Overheating calculation methods, criteria, and indicators in European regulation for residential buildings. *Energy and Buildings*, 292, 113170. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113170>
- Aubry, N., Babin, J., Douay-Bertrand, C., Dufournet, M., Pailloux, N. & Suaire, R. (2019).
- AVIQ, 2023a. SURVMI:Cellule de surveillance des maladies infectieuses : <https://www.aviq.be/fr/prevention-maladies/maladies-infectieuses/la-surveillance-des-maladies-infectieuses>
- AVIQ, 2023b. Conseil de stratégie et de prospective (<https://www.aviq.be/fr/organes-de-gestion/conseil-de-strategie-et-de-prospective>)
- AWAC (2017). Cartographie du projet 'ADAPTE TA COMMUNE'. <https://event.icedd.be/AWAC/cartes.html> (accès le 06/10/2023)
- Ayphassorho, H., Bertrand, N., Mitteault, F., Pujos, C., Rollin, D., & Sallenave, M. (2020). Changement climatique, eau, agriculture. Quelles trajectoires d'ici 2050. rapport CGEDD, (012819-01). <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/122908>
- Bacheley, A., 2021. Entretien de Géraldine Molina « Inégaux face à la chaleur », Magazine Cartographique, Les autres possibles, n°32 : 47°2 le matin. <https://hal.science/hal-03327923/>
- Banque de France. (2022). Adaptation des économies au changement climatique.
- Barcellona Corte, M., Bianchet, B., Privot, J., Schelings, C., & Teller, J. (2022). Schéma stratégique multidisciplinaire du bassin versant de la Vesdre. Diagnostic approfondi et multithématique. Contributions de la TEAM Vesdre – ULiège. ULiège. <https://hdl.handle.net/2268/296474>

- Barwise, Y., & Kumar, P. (2020). Designing vegetation barriers for urban air pollution
- Bauwens, M., Stavrakou, T., Müller, J.-F., Van Schaeybroeck, B., De Cruz, L., De Troch, R., Giot, O., Hamdi, R., Termonia, P., Laffineur, Q., Amelynck, C., Schoon, N., Heinesch, B., Holst, T., Arneth, A., Ceulemans, R., Sanchez-Lorenzo, A., & Guenther, A. (2018). Recent past (1979-2014) and future (2070-2099) isoprene fluxes over Europe simulated with the MEGAN-MOHYCAN model. *Biogeosciences*, 15, 3673–3690, <https://doi.org/10.5194/bg-15-3673-2018>
- Beaudoin N., Lecharpentier P., Ripoche-Wachter D., Strullu L., Mary B., Léonard J., Launay M., Justes E. (Eds), 2023.
- Beaumont, B., Loozen, Y., Castin, T., Radoux, J., Wyard, C., Lauwaet, D., Lefebvre, F., Halford, T., Haid., M., Defourny, P., Hallot, E. (2022). Green infrastructure planning through eo and gis analysis: the canopy plan of Liège, Belgium, to mitigate its urban heat island. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-4–2022, 243–250. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-4-2022-243-2022>
- Belias, D., Rossidis, I., & Valeri, M. (2022). Tourism in crisis: The impact of climate change on the tourism industry. *Tourism Risk: Crisis and Recovery Management*, 163-179.
- Bemelmans, D., Carnol, M., Claessens, H., De Cannière, C., François, L., Gerard, E., J-C. Grégoire, Benitez, F. et Reghezza, M., 2018. Les capacités à faire face ou comment repenser la résilience des individus », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.19116>
- Beullens, J. et al., 2021. Ontwikkeling LATIS 4: Deelrapport 3c: Opmaak Baselayerpackage voor LATIS 4.0. Versie 1.0. WL Rapporten, 13_159_8. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. <https://publicaties.vlaanderen.be/view-file/46604> Consulté le 10/10/2023.
- Bielders, C., Degré, A., Demarcin, P., de Walque, B., Dewez, A., Pineux, N., Staquet, J.-B., Swerts, G., 2016. GISER - Rapport: Connaissance et gestion du risque de ruissellement et d'érosion 24–60.
- Biernaux M. (2011). Agriculture – Fiche thématique. ECORES, ULB, TEC. 41p.
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J.E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., Ballabio, C., 2020. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 117, 21994–22001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>
- Bourdouxhe, Axel, Lionel Wibail, Hugues Claessens, et Marc Dufrêne. « Modeling potential natural vegetation: A new light on an old concept to guide nature conservation in fragmented and degraded landscapes ». *Ecological Modelling* 481 (juillet 2023). <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110382>.
- Braki, E., & Anagnostopoulou, C. (2019, May). The impacts of climate change on tourism in the mediterranean region. In XXXIIème Colloque International de l'AIC–Climatic Change, Variability and Climatic Risks (Vol. 29, pp. 537-542).
- Breil, M. et al., 2018. Social vulnerability to climate change in European cities – state of play in policy and practice. European Topic Centre on Climate Change impacts, Vulnerability and Adaptation (ETC/CCA) Technical paper 2018/1. https://doi.org/10.25424/CMCC/SOCVUL_EUROPCITIES
- Breil, M. et al., 2021. Leaving No One Behind in Climate Resilience Policy in Europe. European Topic Centre on Climate Change Impacts, Vulnerability and Adaptation (ETC/CCA) Technical paper 2021/2.



DOI:10.25424/cmcc/justtrans_europe. <https://www.preventionweb.net/publication/leaving-no-one-behind-climate-resilience-policy-and-practice-europe> Consulté le 10/10/2023.

Breuer, L., Eckhardt, K., & Frede, H. G. (2003). Plant parameter values for models in temperate

Broeckx, S., Lefebvre, F., Lauwaet, D., Beckx, C., Verachtert, E., Wolfs, V., Schoeters, K., Cauwenberg, P., Hilgersom, K., Gabriëls, K., Vaes, G., Lemeire, E., Raman, M. (2023). Uitbreiding van het Klimaatportaal-Vlaanderen met klimaatadaptatietools Methodologische beschrijving. VITO.

https://www.vmm.be/publicaties/rapport_klimaatadaptatietools_methodologisch_tw.pdf (accès le 06/10/2023)

Brouwers J., Peeters B., Van Steertegem M., van Lipzig N., Wouters H., Beullens J., Demuzere M., Willems P., De Ridder K., Maiheu B., De Troch R., Termonia P., Vansteenkiste Th., Craninx M., Maetens W., Defloor W., Cauwenberghs K. (2015) MIRA Climate Report 2015, about observed and future climate changes in Flanders and Belgium. Flanders Environment Agency in collaboration with KU Leuven, VITO and RMI. Aalst, Belgium, 147 pages.

Brouyère, S., 2023. Projet MARWAL (Managed Aquifer Recharge for the aquifers of WALLonia).

Bruxelles Environnement, 2017. Espèces végétales indigènes et conseillées.

Bruxelles Environnement, 2023. Transposition du TDAG en Belgique. A paraître.

Bubeck P., Dillenardt L., Alfieri L. et al. (2019). Global warming to increase flood risk on European railways », *Climatic Change*. 155. avril, p. 19-36.

Burbidge, R. (2016). Adapting European airports to a changing climate. *Transportation Research Procedia*, 14 – 23.

Buzási, A. (2022). Comparative assessment of heatwave vulnerability factors for the districts of Budapest, Hungary. *Urban Climate*, 42, 101127. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101127>

Californie du Sud. (2023). Wildfire mitigation plan fact sheet 2023-2025.

CALLENDAR. (2022). Feux de Forêt. Effets du changement climatique sur l'exposition des installations Seveso. Retrieved 09 18, 2023, from <http://callendar.climint.com/wp-content/uploads/2022/07/Callendar-Risque-incendie-pour-les-sites-Seveso-en-France.pdf>

CALLENDAR. (2022). Introduction à la théorie des valeurs extrêmes : calcul d'une canicule centennale avec Python. Retrieved from Medium: <https://callendar.medium.com/introduction-%C3%A0-la-th%C3%A9orie-des-valeurs-extr%C3%AAmes-calcul-dune-canicule-centennale-avec-python-31088e162c30>

CANARI, Climate ANalysis for Agricultural Recommendations and Impacts (s.d.). <https://canari-agri.fr/>

Cantreul, V., Pineux, N., Swerts, G., Biolders, C., Degré, A., 2019. Performance of the LandSoil expert-based model to map erosion and sedimentation: application to a cultivated catchment in central Belgium. *Earth Surf. Process. Landforms* 45, 1376–1391. <https://doi.org/10.1002/esp.4808>

Carrillo, J., González, A., Pérez, J. C., Expósito, F. J., & Díaz, J. P. (2022). Projected impacts of climate change on tourism in the Canary Islands. *Regional Environmental Change*, 22(2), 61.

Cellule GISER, 2015. Bonnes pratiques pour la gestion du risque de ruissellement en zone rurale. Conv. pour la Gest. intégrée Sol Eros. Ruissellement.



Centre Régional de Crise, 2023 : <https://www.wallonie.be/fr/acteurs-et-institutions/wallonie/spw-secretariat-general/direction-centre-regional-de-crise>

Centre Technique Horticole de Gembloux. (2011). Plantes d'intérêt apicole.

CERDD. (2020). Adaptation au changement climatique : les entreprises en action.

CEREMA, 2020 : La Boussole de la Résilience. <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/boussole-resilience>

Cerema. (2019). Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat.

Cheng, M., McCarl, B. and Fei, C., 2022. Climate change and livestock production: a literature review. *Atmosphere*, 13(1), p.140.

Circulaire ministérielle 23/12/21 relative à la constructibilité en zone inondable

Circulaire sur la constructibilité en zone inondable, (2021).

Climate ADAPT. Just Resilience. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/eu-adaptation-policy/key-eu-actions/just-resilience> Consulté le 10/10/2023.

Climate fit-city, 2023. PUCS project, H2020 Research and Innovation Programme under Grant Agreement No. 73004, <https://climate-fit.city>.

Colin, M., Palhol, F., & Leuxe, A. (2016). Adaptation of transport infrastructures and networks to climate change. *Transportation Research Procedia*.

Commission Européenne. (2013). Commission staff working document - Adapting infrastructure to climate change .

Commission européenne. (2015). Framework strategy for a resilient energy union with a forward-looking climate change policy.

Commission européenne. (2021). Orientations techniques pour la prise en compte des enjeux climatiques dans les projets d'infrastructures pour la période 2021-2027.

Communication de la Commission Européenne. (2021). Bâtir une Europe résiliente – la nouvelle stratégie de l'Union européenne pour l'adaptation au changement climatique.

Congrès résilience, 2021. Développement durable en Wallonie, Service public de Wallonie (<https://developpementdurable.wallonie.be/resilience/congres-resilience>).

CPDT (2014). Note de recherche : Tourisme et changement climatique. Etude réalisée par la Conférence Permanente du Développement Territorial (CPDT) à la demande du Commissariat général au tourisme (CGT).

CPDT (2022). Recherche R4 : Tourisme et territoire ; gérer le passé et préparer l'avenir.

Davids, P. (2021). Rethinking Floodlabel : A Situational Approach to Homeowner Involvement in Flood Risk Management. Ghent University.

De Nijs, T., Bosch, P., Brand, E., Heusinkveld, B., Van Der Hoeven, F., Jacobs, C., Klok, L., Kluck, J., Koekoek, A., Koopmans, S., Van Nieuwaal, K., Ronda, R., & Steeneveld, G. (2019). Ontwikkeling Standaard Stresstest Hitte. Technical Report, RIVM, Bilthoven, <https://doi.org/10.21945/RIVM-2019-0008>

De Ridder, K., Lauwaet, D., & Maiheu, B. (2015a). UrbClim – A fast urban boundary layer climate model, *Urban Climate*, 12, 21-48. doi.org/10.1016/j.uclim.2015.01.001

De Ridder, K., B. Maiheu, H. Wouters, N. van Lipzig, 2015b. Indicateurs van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen. Studie uitgevoerd in opdracht van MIRA, Milieurapport Vlaanderen, MIRA/2015/05, 147 pp. Available at <http://www.milieurapport.be/>.

De Ridder, K., Couderé, K., Depoorter, M., Liekens, I., Pourria, X., Steinmets, D., Vanuytrecht, E., Verhaegen, K., Wouters, H. (2020). Evaluation of the socio-economic impact of climate change in Belgium. Study commissioned by the national climate commission (2020/RMA/R/2271).

Degré, A., Sohier, C., 2020. EPICgrid Agro-Hydrological Model in Wallonia The way to quantify non-point source agricultural pollution.

Degré, A., Sohier, C., 2021. Modélisation prospective des impacts des pratiques agricoles sur la qualité du cycle de l'eau en Wallonie « Programme de recherche AQUAMOD ».

Deguen, S. et al., 2023. SYNTHÈSE : Inégalités sociales et environnementales de santé, deux dimensions étroitement liées : quelle implication en santé publique ?, *Environnement Risques & Santé*. https://www.yearbook-ers.jle.com/e-docs/synthese_inegalites_sociales_et_environnementales_de_sante_deux_dimensions_etroitement_liees_quelle_implication_en_sante_publique__332399/yb_synthese.phtml Consulté le 10/10/2023.

Deliège, J., Everbecq, E., Magermans, P., Grard, A., Bourouag, T., Blockx, C., 2009. PEGASE A Software Dedicated to Surface Water Quality Assessment and to European Database Reporting. *Eur. Conf. Czech Pres. Counc. EU Towar. Environ. Oppor. Oppor. SEIS SISE Integr. Environ. Knowl. Eur.* 24–31.

Deliège, J., Grard, A., Everbecq, E., 2011. PEGASE, A model dedicated to Surface Water Quality Assessment that helps stakeholders implementing the WFD.

Demoury, C., Aerts, R., Vandeninden, B., Van Schaeybroeck, B., & De Clercq, E. M. (2022). Impact of Short-Term Exposure to Extreme Temperatures on Mortality: A Multi-City Study in Belgium. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), 3763. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph19073763>

Demuzere, M., Kittner, J., Martilli, A., Mills, G., Moede, C., Stewart, I. D., van Vliet, J., & Bechtel, B. (2022). A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science. *Earth System Science Data*, 14(8), 3835–3873. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3835-2022>

Depicker, A., De Baets, B., & Baetens, J. M. (2020). Wildfire ignition probability in Belgium. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 363-376. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-363-2020>

Dépoues, V., Vanderlinden, J.-P., & Venturini, T. (2019). Entre dire et faire : discours scientifique sur le changement. VertigO.

Directorate-General for Environment (2023) Guidelines on Biodiversity-Friendly Afforestation, Reforestation and Tree Planting - Commission Staff Working Document. Brussels

Djanaraliev, L. (2022). La vulnérabilité résidentielle face au risque d'inondation : Comment les habitants adaptent-ils leur logement en phase de crise ? [TFE]. ULiège.

Dolques, G., & Dépoues, V. (2022). Les bâtiments face aux nouvelles vagues de chaleur : Investir aujourd'hui pour limiter la facture demain (p. 20).



- Donovan et al. (2005). Development and application of an urban tree air quality score for
- Dube, K., Nhamo, G., Kilungu, H., Hambira, W. L., El-Masry, E. A., Chikodzi, D., ... & Molua, E. L. (2023). Tourism and climate change in Africa: informing sector responses. *Journal of Sustainable Tourism*, 1-21.
- Dury, M., Hozay, F. & Lenartz, F. (2023). Rapport de réalisation de la tâche 2.6: Etude scientifique
- DWD INKAS tool - Informationsportal Klimaanpassung in Städten.
https://www.dwd.de/EN/ourservices/inkas/inkasstart_en.html (accès le 26/10/2023).
- DWD Wärmeinsel – Stadtklimastationen.
https://www.dwd.de/EN/ourservices/urban_heatisland/urbanheatisland_en.html (accès le 26/10/2023).
- EASAC, 2019. The imperative of climate action to protect human health in Europe, EASAC policy report 38.
- EBBEN Pépinières (2020). TreeEBB. Consulté sur <https://www.ebben.nl/fr/treeebb/>
- EC (2023). Regional impact of climate change on European tourism demand. Technical report by the Joint Research Centre (JRC), the European Commission’s science and knowledge service
- ECORES-TEC. (2011). L’adaptation au changement climatique.
- EEA (2020). Urban adaptation in Europe: how cities and towns respond to climate change. EEA Report No 12/2020, doi:10.2800/324620
- EEA (2021). <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021/table-4/#table-3-premature-deaths-attributable-to-pm2-5-no2-and-o3-exposu>
- EEA. (2017). Climate change, impacts and vulnerability in Europe.
- ELLIS project, 2021. Towards the development of the Belgian Index of Multiple Deprivation. <https://www.brain-ellis.be/blog/10-towards-the-development-of-a-belgian-index-of-multiple-deprivation> Consulté le 10/10/2023.
- Environnement Risques et Santé, 2023. Inégalités sociales et environnementales de santé, deux dimensions étroitement liées : quelle implication en santé publique ? Synthèse 29/06/2023 (https://www.yearbook-ers.jle.com/e-docs/synthese_inegalites_sociales_et_environnementales_de_sante_deux_dimensions_etroitement_liees_quelle_implication_en_sante_publique__332399/yb_synthese.phtml?utm_source=brev&utm_campaign=2023-07-yearbook-ERS)
- EPE et ONERC. (2014). Les entreprises et l'adaptation au changement climatique.
- ETUC. (2020). Adaptation au changement climatique et monde du travail.
- Etude MODREC, dont la phase 1 vise la modélisation du bassin de la Vesdre et d’une partie de la Hoëgne, (hauteur d’eau et période de retour pour définir des classes d’exposition aux inondations) – rapport attendu en décembre 2023.
- EUROMOMO, 2023. European mortality monitoring activity, Statens Serum Institut (<https://www.euromomo.eu/>)



European Environment Agency (2019). "Urban adaptation in Europe: How cities and towns respond to climate change". EEA Report No 5/2019.

Evaluation des besoins d'adaptation des voies hydrauliques au changement climatique afin de garantir la disponibilité de la ressource en eau en période d'étiage. Cahier des charges du SPWMI, n° MI-08.12.03-20-1132 (étude en cours SPWMI)

Federal Ministry of Transport and Infrastructure. (2015). KLIWAS - Impacts of Climate Change on Waterways and Navigation in Germany. Retrieved 08 02, 2023, from https://www.kliwas.de/KLIWAS/EN/Service/Downloads/publications/concluding_report.pdf?__blob=publicationFile

Ferrini, F., Fini, A., Mori, J., & Gori, A. (2020). Role of Vegetation as a Mitigating Factor in the France stratégie. (2022). Note d'analyse : « Risques climatiques, réseaux et interdépendance : le temps d'agir ».

French Civil Aviation Authority. (2016). Airport Vulnerability to Climate Change.

Fronzek et al., A daily time-step observed and scenario climate dataset on a European grid for crop modelling applications (version 3). <https://doi.org/10.4228/zalf.vjcp-vep3>.

Gallardo, L., Hamdi, R., Islam, A. K. M. S., Klaus, I., Klimont, Z., Krishnaswamy, J., Pinto, I., Otto, F., Raghavan, K., Revi, A., Sörensson, A. A., & Szopa, S. (2022). What the latest physical science of climate change means for cities and urban areas. Indian Institute for Human Settlements. <https://doi.org/10.24943/SUPSV108.2022>

GALK, 2023. GALK-Straßenbaumliste Abfrage vom 13.09.2023 Arbeitskreis Stadtbäume.

Gardes, T., Schoetter, R., Hidalgo, J., Long, N., Marquès, E., & Masson, V. (2020). Statistical prediction of the nocturnal urban heat island intensity based on urban morphology and geographical factors - An investigation based on numerical model results for a large ensemble of French cities. Science of The Total Environment, 737, 139253. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139253>

GeDiDoT, 2020. Indicateurs socio-sanitaires de la population frontalière franco-belge. Projet Interreg France-Wallonie-Flandre (<https://infocentre-sante.eu/indicateurs>)

GEO-NET & LIST (2021). Klimaökologische Situation in Luxemburg: Modellbasierte regionale Klimaanalyse. Etude réalisée pour le compte de l'Administration de l'environnement. <https://data.public.lu/fr/datasets/climate-and-energy-the-climate-ecology-situation-in-luxembourg/> (accès le 26/10/2023).

Geoportail de la Wallonie WalOnMap. <https://geoportail.wallonie.be/home.html> Consulté le 10/10/2023.

Gereffi et Fernandez-Stark. (2016).

Gillner, S., Vogt, J., Tharana, A., Dettmann, S. & Roloff, A. (2015). Role of street trees in mitigating

GIZ, 2017 : Vulnerability Source Notebook

Gobin A., 2010. Modelling climate impacts on crop yields in Belgium. Climate Research 44(1):55. DOI:

Gouv. Grand Duché de Luxembourg (2023). Fichier écologique des essences.



- Gouvernement Wallon. (2023). Plan Air Climat Energie 2030 de la Wallonie. Récupéré sur <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/pace-2030-adopte-gw-21-mars-2023.pdf?ID=73812>
- Grandry, M., 2018. Hydrotrend I : Analyse des débits maximums extrêmes et observation d'une tendance éventuelle à un retour plus fréquent de certains "hauts" débits.
- Grandry, M., 2020. HydroTrend II : Analyse de l'évolution de la fréquence et de l'amplitude des débits de crue en Région Wallonne.
- Grandry, M., Degré, A., 2021. Bacterieau II : Discrimination des flux bactériens en amont de 6 zones de baignade.
- Guerreiro, S. B., et al., 2018, 'Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities', *Environmental Research Letters* 13(3), p. 034009 (DOI: 10.1088/1748-9326/aaaad3).
- Habran S. & Genin M. (2021). Mapping socio-economic factors for environmental health studies in Wallonia: Transposition of the French Deprivation Index. ISEE. Hybrid conference, New-York, USA.
- Habran S. & Remy S. (2018). Rapport final n°2018-00932 : Développement et mise en place d'un système d'information géographique en environnement – santé (SIGEnSa). AS D31-3800.
- Habran, S. et al., 2020. Identification des points noirs environnementaux à l'aide d'un outil web cartographique. *Environnement, Risques & Santé*; 19(8): 257-261.
<https://doi.org/10.1684/ers.2020.1458>
- Halford, T. (2021). Essences conseillées pour la Ville de Liège. Plan Canopée.
- Hamilton, J. M., & Tol, R. S. (2004). The impact of climate change on tourism and recreation.
- Hamilton, J. M., & Tol, R. S. (2007). The impact of climate change on tourism in Germany, the UK and Ireland: a simulation study. *Regional Environmental Change*, 7, 161-172.
- Hedegaard, G. B., Christensen, J. H., & Brandt, J. (2013). The relative importance of impacts from climate change vs. emissions change on air pollution levels in the 21st century. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(7), 3569–3585. <https://doi.org/10.5194/acp-13-3569-2013>
- Hein, L., Metzger, M. J., & Moreno, A. (2009). Potential impacts of climate change on tourism; a case study for Spain. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(2), 170-178.
- Hendrickx, C., & Breemers, T. (2012). The effect of climate change on inland waterway transport. *Procedia Social and Behavioral Sciences*. Retrieved from <https://pdf.sciencedirectassets.com/277811/1-s2.0-S1877042812X00193/1-s2.0-S1877042812029011/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEFUaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIFCgFj4iUUyD6hLfgfQUnBoND2NOR1xXJ2sZTCsg5AiEAqZQ%2F76bUhoODhZ2TJ5D6ITTC2%2FW3Z4Oj%2FkwjtU>
- Hewitt and Street (1992). OVOC data. Consulté sur <http://www.es.lanccs.ac.uk/cnhgroup/iso->
- Hiemstra, J. A. (2018). Groen in de stad: soortentabel. Wageningen University &
- Hooyberghs, H., 2018. Kwetsbaarheidsanalyse in het kader van het Warmteplan Vlaanderen. Studie uitgevoerd in opdracht van 2018/UnitRMA/R. Communication personnelle
- Horrocks, L., Beckford, J., Hodgson, N., Downing, C., Davey, R., & O'Sullivan, A. (2010). Adapting the ICT Sector to the Impacts of Climate Change.



Hu, X., Hall, J. W., Shi, P., & Lim, W. H. (2016). The spatial exposure of the Chinese infrastructure system to flooding and drought hazards. *Nat Hazards*, pp. 1083–1118.

IBGE. (2009). Etude de l'adaptation des essences aux stations forestières de la forêt de soignes

ICEDD - Adapte ta commune. <https://portail-awac-frontend.vercel.app/> Consulté le 10/10/2023.

ICEDD. (2014). L'identification et l'évaluation des coûts de l'inaction face au changement climatique en Wallonie.

ICEDD & Ecores (2020), Plan d'action sur l'adaptabilité du territoire communal de la ville aux changements climatiques : Phase 1 – Vulnérabilités.

IMPACTtool – Klimaatportal Vlanderen. <https://impacttool.toepassingen.vmm.vlaanderen.be/2>
Consulté le 10/10/2023.

INASTI. (2020). Évolution des indépendants à titre principal INASTI.

Institut de la francophonie pour le développement durable. (2021). Vulnérabilité climatique du système électrique et de l'hydroélectricité : évaluer les risques pour mieux planifier. Récupéré sur <https://formation.ifdd.francophonie.org/vulnerabilite-climatique-du-systeme-electrique-et-de-lhydroelectricite-evaluer-les-risques-pour-mieux-planifier/>

Inverde, 2023. Bomen Wijzer. <https://bomenwijzer.be/>

IPBES (2019) Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. In: Brondizio ES, Settele J, Díaz S, Ngo HT (Eds), IPBES Secretariat, Bonn, Germany, 1148.

IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)].

IPCC, 2018: Résumé à l'intention des décideurs. dans: Réchauffement planétaire de 1,5°C

IPCC, 2022 : Sixth Assessment Report: the technical report or the chapter one of the full report

IPCC, 2022: Annex II: Glossary [Möller, V., R. van Diemen, J.B.R. Matthews, C. Méndez, S. Semenov, J.S. Fuglestedt, A. Reisinger (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2897–2930, doi:10.1017/9781009325844.029.

IPCC. (2014). *Climate Change : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects.*

IRENA. (2021). Bracing for climate impact: renewables as a climate change adaptation strategy.

ISO. (2018). ISO and climate change.

ISSeP et AWAC (2012). « Réseaux de surveillance de la Qualité de l'Air - Rapport 2012 »



ISSeP et AWAC (2021). « Réseaux de surveillance de la Qualité de l'Air - Rapport 2021 »

IWEPS, 2023. Walstat : Le portail d'informations statistiques locales sur la Wallonie.

https://walstat.iweps.be/walstat-catalogue.php?theme_id=5

IWEPS. <https://www.iweps.be/> Consulté le 10/10/2023

Jelenius, E., Petersen, T., & Mattson, L.-G. (2006). Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 537-560.

Jenkins, K., Hall, J., Glenis, V., Kilsby, C., McCarthy, M., Goodess, C., Smith, D., Malleson, N., & Birkin, M. (2014). Probabilistic spatial risk assessment of heat impacts and adaptations for London. *Climatic Change*, 124(1-2), 105-117. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1105-4>

Joint Research Centre. (2020). Climate change impacts and adaptation in Europe. Récupéré sur <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c707e646-99b7-11ea-aac4-01aa75ed71a1/language-en>

Joint Research Centre. (2023). European drought risk atlas. 43-44.

Jones, C., Bresloff, C., & Darbali-Zamora, R. (2023). Electric grid vulnerability analysis to identify communities prone to wildfire. *IEEE Access*, 35630 - 35638.

Jouven M., Carrère P., Baumont, R. (2006) Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description. *Grass Forage Sci.* 61, 112–124.

JPI Cultural Heritage

Juda-Rezler, K., Reizer, M., Huszar, P., Krüger, B. C., Zanis, P., Syrakov, D., Katragkou, E., Trapp, W., Melas, D., Chervenkov, H., Tegoulas, I., & Halenka, T. (2012). Modelling the effects of climate change on air quality over Central and Eastern Europe: concept, evaluation and projections. *Climate Research*, 53(3), 179–203. <https://doi.org/10.3354/cr01072>

Jurgilevich, A. et al., 2017. A systematic review of dynamics in climate risk and vulnerability assessments, *Environ. Res. Lett.*, 12, 013002, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5508>, 2017.

Katragkou, E., Zanis, P., Kioutsoukis, I., Tegoulas, I., Melas, D., Krüger, B. C., & Coppola, E. (2011). Future climate change impacts on summer surface ozone from regional climate-air quality simulations over Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D22). <https://doi.org/10.1029/2011JD015899>

Kazmierczak, A., 2015. Analysis of social vulnerability to climate change in the Helsinki Metropolitan Area. Study commissioned by HSY. https://www.hsy.fi/globalassets/ilmanlaatu-ja-ilmasto/tiedostot/social-vulnerability-to-climate-change-helsinki-metropolitan-area_2016.pdf Consulté le 10/10/2023.

Kazmierczak, A., 2015. Mapping flood disadvantage in Scotland 2015 Final report for the Scottish Government. <https://www.gov.scot/publications/mapping-flood-disadvantage-scotland-2015-main-report/> Consulté le 10/10/2023.

Kim, D.H. and Lee, K.W., 2023. An update on heat stress in laying hens. *World's Poultry Science Journal*, pp.1-24.

Klimaat effect atlas. <https://www.klimaateffectatlas.nl/en/> (accès le 06/10/2023)



Klimaat portal Vlanderen – Impact tool. <https://klimaat.vmm.be/tools/impact/impact-hitte> (accès le 06/10/2023)

KLiVO, 2023. Klimawandel und Gesundheit (APUG), Bundesregierung, Deutschland. <https://www.klivoportal.de>

Knorr, W., Arneth, A., & Jiang, L. (2016). Demographic controls of future global fire risk. *Nature Climate Change*, 6(8), 781-785. <https://doi.org/10.1038/nclimate2999>

Kokah, E. U., Knoden, D., Dumont, B., & Bindelle, J. (2023). Modeling the biomass production of grasslands of Wallonia according to their functional type. Paper presented at International Grassland Congress, Covington, United States.

Krunoslav, K. et al., 2017. Social Vulnerability assessment Tools for Climate Change and DRR Programming A Guide to Practitioners. United Nations Development Programme. https://www.adaptation-undp.org/sites/default/files/resources/social_vulnerability05102017_0.pdf Consulté le 10/10/2023

L. Maebe, H. Claessens, and M. Dufrêne. "The critical role of abiotic factors and human activities in the supply of ecosystem services in the ES matrix." *One Ecosystem*, 4 (03 June 2019). doi:10.3897/oneeco.4.e34769

Lacetera, N., 2019. Impact of climate change on animal health and welfare. *Animal Frontiers*, 9(1), pp.26-31.

Lamarque P., Tondeur A., Marbaix P., Gaino B., van Ypersele J.P. (2022). L'adaptation aux changements climatiques en Wallonie : synthèse et points d'attention pour l'actualisation des connaissances. Plateforme wallonne pour le GIEC. https://plateforme-wallonne-giec.be/assets/documents/Adaptation/PwG-SyntheseAdaptation_2022_complet_rev1.pdf

Langner, J., Engardt, M., & Andersson, C. (2012). European summer surface ozone 1990–2100. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(21), 10097–10105. <https://doi.org/10.5194/acp-12-10097-2012>

Lauwaet, D., & De Ridder, K. (2018). Cartographie des îlots de fraîcheur dans la région de Bruxelles-Capitale. Etude commandée par IBGE-BIM (2017/RMA/1710382). https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/Cartografie_Koelte_Eilanden_BHG (accès le 20/09/2023).

Lauwaet, D., Berckmans, J., Hooyberghs, H., Wouters, H., Driesen, G., Lefebvre, F., & De Ridder, K. (2023). High Resolution Modelling of the Urban Heat Island of 100 European Cities. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4406167> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4406167>

Lauwaet, D., Maiheu, B., De Ridder, K., Boëne, W., Hooyberghs, H., Demuzere, M., & Verdonck, M.-L. (2020). A New Method to Assess Fine-Scale Outdoor Thermal Comfort for Urban Agglomerations. *Climate*, 8, 6. doi.org/10.3390/cli8010006

Lauwaet, D., Viaene, P., Brisson, E., van Lipzig, N. P. ., van Noije, T., Strunk, A., Van Looy, S., Veldeman, N., Blyth, L., De Ridder, K., & Janssen, S. (2014). The effect of climate change and emission scenarios on ozone concentrations over Belgium: a high-resolution model study for policy support. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(12), 5893–5904. <https://doi.org/10.5194/acp-14-5893-2014>



- Lennert, M., Grippa, T., Radoux, J., Bassine, C., Beaumont, B., Defourny, P., & Wolff, E. (2019). CREATING WALLONIA'S NEW VERY HIGH RESOLUTION LAND COVER MAPS: COMBINING GRASS GIS OBIA AND OTB PIXEL-BASED RESULTS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.*, XLII-4/W14, 151–157. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W14-151-2019>
- Limburg (2023). *Klimaatbomen in Limburg*. <https://www.klimaatbomeninlimburg.be/>
- Liu, L., Ren, M., Ren, K., Jin, Y. and Yan, M., 2020. Heat stress impacts on broiler performance: a systematic review and meta-analysis. *Poultry Science*, 99(11), pp.6205-6211.
- Liu, T. M. (2016). The influence of climate change on tourism demand in Taiwan national parks. *Tourism Management Perspectives*, 20, 269-275.
- Lloyd SJ, Quijal-Zamorano M, Achebak H, Hajat S, Muttarak R, Striessnig E, Ballester J. The Direct and Indirect Influences of Interrelated Regional-Level Sociodemographic Factors on Heat-Attributable Mortality in Europe: Insights for Adaptation Strategies. *Environ Health Perspect*. 2023 Aug;131(8):87013. doi: 10.1289/EHP11766. Epub 2023 Aug 22. PMID: 37606292; PMCID: PMC10443201.
- M. Dufrêne and M. Pairon. "Réseau écologique: vers une fonctionnalité au service de l'opérationnel." Paper presented at Colloque CPDT : de l'observation à l'action territoriale, Mons, Belgium, 2019.
- Maes, E., Génereux, C., de Thysebaert, D., Ritondo, R., Claisse, F., 2020. Cahier de prospective de l'IWEPS n°4 : Risque de raréfaction des ressources en eau sous l'effet des changements climatiques : quelques enjeux prospectifs.
- Maes, J., et al., 2019, Enhancing resilience of urban ecosystems through green infrastructure (EnRoute): final report, Joint Research Centre, European Commission (<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/enhancing-resilience-urban-ecosystems-through-green-infrastructure-enroute>) accessed 13 August 2020.
- Maggiolino, A., Dahl, G.E., Bartolomeo, N., Bernabucci, U., Vitali, A., Serio, G., Cassandro, M., Centoducati, G., Santus, E. and De Palo, P., 2020. Estimation of maximum thermo-hygrometric index thresholds affecting milk production in Italian Brown Swiss cattle. *Journal of Dairy Science*, 103(9), pp.8541-8553.
- Maille, E., & Espinasse, B. (2006). Decision Support for Forest Fire Risk Evaluation : Dynamic Modelling and Spatio-Temporal Integration. 2006 First International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area, 40-45. <https://doi.org/10.1109/ISEIMA.2006.345039>
- Mailliet, L., & Bourgerie, C. (1993). *L'arboriculture urbaine*.
- Makinen et al., 2018. Sensitivity of European wheat to extreme weather. *Field crops research*, 222, 209-217.
- Markakis, K., Valari, M., Colette, A., Sanchez, O., Perrussel, O., Honore, C., Vautard, R., Klimont, Z., & Rao, S. (2014). Air quality in the mid-21st century for the city of Paris under two climate scenarios; from the regional to local scale. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(14), 7323–7340. <https://doi.org/10.5194/acp-14-7323-2014>
- Marsh, & Mc Lennan. (2020). Global risks for infrastructure. Retrieved 08 01, 2023, from <https://www.marshmclennan.com/content/dam/mmc->



web/insights/publications/2020/august/Global-Risks-for-Infrastructure-The-Climate-Challenge-Final.pdf

Masson (2019). Projet MaPUCE : Rapport final. http://www.umr-cnrm.fr/ville.climat/IMG/pdf/rapport_scientifique_mapuce_v1.2.pdf (accès le 27/10/2023)

Mayorga, E.J., Renaudeau, D., Ramirez, B.C., Ross, J.W. and Baumgard, L.H., 2019. Heat stress adaptations in pigs. *Animal Frontiers*, 9(1), pp.54-61.

Meleux, F., Solmon, F., & Giorgi, F. (2007). Increase in summer European ozone amounts due to climate change. *Atmospheric Environment*, 41(35), 7577–7587. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.05.048>

Menut, L., Bessagnet, B., Briant, R., Cholakian, A., Couvidat, F., Mailler, S., Pennel, R., Siour, G., Tuccella, P., Turquety, S., & Valari, M. (2021). The CHIMERE v2020r1 online chemistry-transport model. *Geoscientific Model Development*, 14(11), 6781–6811. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6781-2021>

Methode VECUS (2023). <https://www.arbrecaue77.fr/content/1-pyrus-salicifolia-pendula?s=>

Métropole de Lyon (2022). Kit de découverte du calque de plantabilité. Consulté sur <https://erasme.notion.site/Kit-de-d-couverte-du-calque-de-plantabilit-4a4ce2b615874903afe204ddbd5b94cd> (accès le 24/01/2024)

Ministère de l'Environnement, du climat et du développement durable. (2018). Stratégie et plan d'action pour l'adaptation aux effets du changement climatique au Luxembourg 2018-2023.

Ministère de la transition écologique, 2023. DRIAS Les futurs du climat, Projections climatiques pour l'adaptation de nos sociétés, France. <https://www.drias-climat.fr/>

Ministère de la transition écologique. (2022). Stratégie française sur l'énergie et le climat : Evaluation à mi-parcours du 2ème plan national d'adaptation au changement climatique (2018-2021).

Missinne, S., Avalosse, H., Luyten, S. (2019). Tous égaux face à la santé à Bruxelles ? Données récentes et cartographie sur les inégalités sociales de santé. Observatoire de la Santé et du Social de Bruxelles-Capitale, Commission communautaire commune, Bruxelles, Belgique.

Modugno, S., Balzter, H., Cole, B., & Borrelli, P. (2016). Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland–Urban Interface areas in Europe. *Journal of Environmental Management*, 172, 112-126. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.013>

Monge-Barrio, A., & Sánchez-Ostiz Gutiérrez, A. (2018). Facing Heatwaves and Warming Conditions in the Mediterranean Region. In A. Monge-Barrio & A. Sánchez-Ostiz Gutiérrez, *Passive Energy Strategies for Mediterranean Residential Buildings* (p. 167-204). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69883-0_7

Morignat, E., Gay, E., Vinard, J.L., Calavas, D. and Henaux, V., 2015. Quantifying the influence of ambient temperature on dairy and beef cattle mortality in France from a time-series analysis. *Environmental research*, 140, pp.524-534.

Njoroge, J. M. (2015). Climate change and tourism adaptation: Literature review. *Tourism and hospitality management*, 21(1), 95-108.



- Noulin, J. (2021). How to adapt and design houses to flood risks ? Case studies from UK and Belgium [TFE]. ULiège.
- Nowak, D. J. (1996). Estimating leaf area and leaf biomass of open-grown deciduous urban
- Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA.
- Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs
- OECD. (2018). Climate resilient infrastructure - OECD environment policy paper n° 14. Consulté le 08 01, 2023, sur <https://www.oecd.org/environment/cc/policy-perspectives-climate-resilient-infrastructure.pdf>
- ONSS. (2020). Évolution des postes de travail ONSS en Belgique.
- Organisation de l'Aviation Civile Internationale. (2019). Climate Resilient Airports.
- Orru, H., Åström, C., Andersson, C., Tamm, T., Ebi, K. L., & Forsberg, B. (2019). Ozone and heat-related mortality in Europe in 2050 significantly affected by changes in climate, population and greenhouse gas emission. *Environmental Research Letters*, 14(7), 74013–. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1cd9>
- O'Sullivan, O. S., Holt, A. R., Warren, P. H., & Evans, K. L. (2017). Optimising UK urban road verge
- Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (2007). Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007. Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment.
- Panagos, P., Ballabio, C., Poesen, J., Lugato, E., Scarpa, S., Montanarella, L., Borrelli, P., 2020. A soil erosion indicator for supporting agricultural, environmental and climate policies in the European union. *Remote Sens.* 12. <https://doi.org/10.3390/RS12091365>
- Panagos, P., Borrelli, P., Matthews, F., Liakos, L., Bezak, N., Diodato, N., Ballabio, C., 2022. Global rainfall erosivity projections for 2050 and 2070. *J. Hydrol.* 610, 127865. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127865>
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., Alewell, C., 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environ. Sci. Policy* 54, 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
- Pang, S. F., McKercher, B., & Prideaux, B. (2013). Climate change and tourism: An overview. *Asia Pacific Journal of Tourism Research*, 18(1-2), 4-20.
- Paquette, A. & Messier, C. (2016). Liste des espèces retrouvées en milieu urbain au Québec et
- Perry, A. (2000). Impacts of climate change on tourism in the Mediterranean: adaptive responses. Available at SSRN 235082.
- PGRI Les Plans de gestion des Risques d'Inondation pour la Wallonie (2022-2027) - Directive Inondation 2ème cycle
- Piet Termonia, Bert Van Schaeuybroeck, Lesley De Cruz, Rozemien De Troch, Steven Caluwaerts, Olivier Giot, Rafiq Hamdi, Stéphane Vannitsem, François Duchêne, Patrick Willems, Hossein Tabari, Els Van Uytven, Parisa Hosseinzadehtalaei, Nicole Van Lipzig, Hendrik Wouters, Sam Vanden Broucke, Jean-Pascal van Ypersele, Philippe Marbaix, Cecille Villanueva-Birriel, Xavier Fettweis, Coraline Wyard, Chloé



Scholzen, Sébastien Doutreloup, Koen De Ridder, Anne Gobin, Dirk Lauwaet, Trissevgeni Stavrou, Maite Bauwens, Jean-François Müller, Patrick Luyten, Stéphanie Ponsar, Dries Van den Eynde, Eric Pottiaux, 2018. The CORDEX.be initiative as a foundation for climate services in Belgium, *Climate Services*, volume 11, pp 49-61. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2018.05.001>.

Pineux, N., 2018. Redistribution du sol au sein d'un bassin versant agricole : méthode de mesure novatrices et essai de modélisation. *Uliege - Gembloux Agro-Bio Tech*.

Pineux, N., Lisein, J., Swerts, G., Bielders, C.L., Lejeune, P., Colinet, G., Degré, A., 2017. Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion in an agricultural watershed? *Geomorphology* 280, 122–136. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.003>

Popescu, I., Brouyère, S., Dassargues, A., 2019. The APSÛ method for process-based groundwater vulnerability assessment.

Poussard, C., Dewals, B., Archambeau, P., & Teller, J. (2021). Environmental Inequalities in Flood Exposure : A Matter of Scale. *Frontiers in Water*, 3, 633046. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.633046>

Pretzsch, H., Biber, P., Uhl, E., Dahlhausen, J., Rötzer, T., Caldentey, J., Koike, T., van Con, T.,

Price, O., & Bradstock, R. (2014). Countervailing effects of urbanization and vegetation extent on fire frequency on the Wildland Urban Interface : Disentangling fuel and ignition effects. *Landscape and Urban Planning*, 130, 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.06.013>

Programme Solidarité-Eau. (2016). Services d'eau et d'assainissement face au changement climatique.

Project Heracles "Climate Change Impacts on Cultural Heritage"

Quinn, A., Jack, A., Hodgkinson, S., Ferranti, E., Beckford, J., & Dora, J. (2017). Rail Adapt. Adapting the railway for the future. Retrieved 08 02, 2023, from https://uic.org/IMG/pdf/railadapt_final_report.pdf

Redlich, Sarah, Jie Zhang, Caryl Benjamin, Maninder Singh Dhillon, Jana Englmeier, Jörg Ewald, Ute Fricke, et al. « Disentangling Effects of Climate and Land Use on Biodiversity and Ecosystem Services— A Multi-Scale Experimental Design ». *Methods in Ecology and Evolution* 13, n° 2 (2022): 514-27. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13759>.

Référentiels construction et aménagements en zone inondable

Référentiels Gestion durable des eaux pluviales

Regmi, M., & Hanaoka, S. (2011). A survey on impacts of climate change on road transport infrastructure and adaptation strategies in Asia. *Environmental Economics and Policy Studies*. doi:10.1007/s10018-010-0002-y

Remme, R., De Nijs, T., & Paulin, M. (2018). Natural Capital Model: Technical documentation of the quantification, mapping and monetary valuation of urban ecosystem services. Technical Report, RIVM, Bilthoven, doi: 10.21945/RIVM-2017-0040

Réseau Action Climat - France (2014) - Adaptation de l'agriculture aux changements climatiques Recueil d'expériences territoriales. Montreuil : RAC-F, 2014 - 58 p.

RESIN (2018). Adaptation Options Library. <https://resin-cities.eu/resources/library/> (accès le 06/10/2023)



- Rosselló-Nadal, J. (2014). How to evaluate the effects of climate change on tourism. *Tourism Management*, 42, 334-340.
- Rötzer, T., Moser-Reischl, A., Rahman, M.A., Grote, R., Pauleit, S. & Pretzsch, H. (2021). Modelling Rucabado Gordo, A., & Keizer, R. (2021). Afstand tot koelte : Technische documentatie. Technical Report, CAS & TAUW, <https://drive.google.com/file/d/1msnBzHbxn305VKQtKtite6GXHTk6FKR9/view>
- Santé Publique France, 2023 a. Fortes chaleurs et canicule : un impact sur la mortalité important nécessitant le renforcement de la prévention et de l'adaptation au changement climatique. Communiqué de Presse - 23 juin 2023 (<https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2023/fortes-chaleurs-et-canicule-un-impact-sur-la-mortalite-important-necessitant-le-renforcement-de-la-prevention-et-de-l-adaptation-au-changement-cl>)
- Santé Publique France, 2023 b. Estimation de la fraction de la mortalité attribuable à l'exposition de la population générale à la chaleur en France métropolitaine. Application à la période de surveillance estivale (1er juin -15 septembre) 2014-2022. Synthèse 30 juin 2023 (<https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/climat/fortes-chaleurs-canicule/documents/rapport-synthese/estimation-de-la-fraction-de-la-mortalite-attribuable-a-l-exposition-de-la-population-generale-a-la-chaleur-en-france-metropolitaine.-application-a>)
- Santé Publique France. Canicule et santé : comment les communes agissent-t-elles pour mieux protéger la population ? <https://www.santepubliquefrance.fr/les-actualites/2022/canicule-et-sante-comment-les-communes-agissent-t-elles-pour-mieux-protger-la-population> Consulté le 10/10/2023.
- Schelings, C., Barcelloni Corte, M., Privot, J., Bianchet, B., Joshi, M. Y., & Teller, J. (2023). Vulnérabilité et chemin de dépendance : Quelle est notre marge d'adaptation au changement climatique ? Rencontres Internationales d'Urbanisme, Lausanne.
- Scherrer, Daniel, Manuel Esperon-Rodriguez, Linda J. Beaumont, Víctor L. Barradas, et Antoine Guisan. « National Assessments of Species Vulnerability to Climate Change Strongly Depend on Selected Data Sources ». *Diversity and Distributions* 27, n° 8 (2021): 1367-82. <https://doi.org/10.1111/ddi.13275>.
- Sciensano, 2023. Belgian Mortality Monitoring, BE-MOMO project <https://epistat.sciensano.be/momo/>
- Sciensano, 2022. Inégalités de Santé : Inégalités en espérance de vie et qualité de vie, Health Status Report. Bruxelles, Belgique, <https://www.belgiqueenbonnesante.be/fr/etat-de-sante/inegalites-de-sante/inegalites-en-esperance-de-vie-et-qualite-de-vie>
- Scott, D., & Gössling, S. (2022). A review of research into tourism and climate change-Launching the annals of tourism research curated collection on tourism and climate change. *Annals of Tourism Research*, 95, 103409.
- Scott, D., Amelung, B., Becken, S., Ceron, J. P., Dubois, G., Gössling, S., ... & Simpson, M. (2008). Climate change and tourism: Responding to global challenges. World Tourism Organization, Madrid, 230, 1-38.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2009). Connecting Biodiversity and Climate Change Mitigation and Adaptation: Report on the Second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change. Montreal, Technical Series No. 41, 126 p.



Service public de Wallonie (2021). Plans de Gestion des Risques d'Inondation 2022-2027. .
https://inondations.wallonie.be/files/documents_a_telecharger/DI/PGRI%202/pgri20222027rwadapte012023.

Service public fédéral Intérieur. <https://www.ibz.rrn.fgov.be/fr/registre-national/faq/quest-ce-que-le-registre-national-des-personnes-physiques/> Consulté le 10/10/2023.

Sharma, A., Andhikaputra, G., & Wang, Y.-C. (2022). Heatwaves in South Asia : Characterization, Consequences on Human Health, and Adaptation Strategies. *Atmosphere*, 13(5), 734.
<https://doi.org/10.3390/atmos13050734>

Shu, H., Wang, W., Guo, L. and Bindelle, J., 2021. Recent advances on early detection of heat strain in dairy cows using animal-based indicators: A review. *Animals*, 11(4), p.980.

Siddiqui, S., & Imran, M. (2019). Impact of climate change on tourism. *Environmental Impacts of Tourism in Developing Nations*, 68-83.

Smartpop.be (2019). SmartPop - Spatially plan the population growth in Wallonia, and in particular in Liège, for shaping future. <http://smartpop.be/> (accès le 06/10/2023)

Solier, C., & Degré, A. (2021). Modélisation prospective des impacts des pratiques agricoles sur la qualité du cycle de l'eau en Wallonie «Programme de recherche AQUAMOD».

Souza de Abreu, V., Souza Santos, A., & Monteiro, T. (2022). Climate change impacts on the road transport infrastructure: a systematic review on adaptatio measures. *Sustainability*. Retrieved 08 02, 2023, from <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8864>

SPF, 2023. Plan d'Action National Environnement-Santé 2023-2029 (NEHAP3) - Service Publique Fédéral Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement.
<https://www.environnement-sante.be/fr>

SPW - DGO3 - DEMNA - DEE, 2017. Rapport sur l'état de l'environnement Wallon en 2017 (REEW 2017). Jambes, Belgique.

SPW (2023). Fichier écologique des essences. <https://www.fichierecologique.be/#/>

SPW, 2020. Notice Méthodologique D'Élaboration Des Cartographies Des Zones Soumises À L'Aléa D'Inondation Et Des Risques De Dommages Dus Aux Inondations.

SPW. (2021). Le Guide PEB - Règlementation à partir du 1er janvier 2021.
<https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/guide-peb-2021-2023.pdf?ID=63062>

SPW. (2022a). Référentiel Constructions et aménagements en zone inondable.

SPW. (2022b). Programmes de développement durable de quartiers.
https://lampspw.wallonie.be/dgo4/site_amenagement/index.php/site/inondations/programmes-de-developpement-durable-de-quartiers

SPW. (2023a). Inondations : Réduire la vulnérabilité des constructions existantes.

SPW. (2023b). Référentiel Gestion durable des eaux pluviales.

StatBel. <https://statbel.fgov.be/fr> Consulté le 10/10/2025



- Statistics Netherlands and WUR (2022), Natural Capital Accounting in the Netherlands –Technical report. Statistics Netherlands (CBS) and Wageningen University and Research (WUR). [https://www.cbs.nl/-/media/natuurlijk-kapitaal/nca-nl-technical-report-2022-\(32\).pdf](https://www.cbs.nl/-/media/natuurlijk-kapitaal/nca-nl-technical-report-2022-(32).pdf)
- Steiger, R., Posch, E., Tappeiner, G., & Walde, J. (2020). The impact of climate change on demand of ski tourism-a simulation study based on stated preferences. *Ecological Economics*, 170, 106589.
- Stewart, I.D., & Oke, T.R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull Am Meteorol Soc.* 93(12), 1879-1900. <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- STICS soil crop model - Conceptual Framework, Equations and Uses. 516p. Editions Quae.
- STRATEGIE.GOUV.FR Webconférence. (2022). Les infrastructures face aux risques climatiques.
- Sukanen, H., Taylor, J., Castaño-Rosa, R., Pelsmakers, S., Lehtinen, T., & Kaasalainen, T. (2023). Passive mitigation of overheating in Finnish apartments under current and future climates. *Indoor and Built Environment*, 32(7), 1372-1392. <https://doi.org/10.1177/1420326X231160977>
- Szabo B., Weynants M., Weber T., 2021. Updated European hydraulic pedotransfer functions with communicated uncertainties in the predicted variables (euptfv2). *Geosci. Model Dev.*, 14, 151–175, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-151-2021>, 2021.
- Taylor, J., McLeod, R., Petrou, G., Hopfe, C., Mavrogianni, A., Castaño-Rosa, R., Pelsmakers, S., & Lomas, K. (2023). Ten questions concerning residential overheating in Central and Northern Europe. *Building and Environment*, 234, 110154. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110154>
- TDAG, 2023. Tree species selection for green infrastructure – A guide for specifiers.
- Teller, J., Vigano, P., & Schelings, C. (2023). Schéma stratégique multidisciplinaire du bassin versant de la Vesdre. ULiège. <https://hdl.handle.net/2268/302764>
- Termonia, P., et al. (2018). The CORDEX. be initiative as a foundation for climate services in Belgium. *Climate Services*, 11, 49-61. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2018.05.001>
- Thornton, P., Nelson, G., Mayberry, D. and Herrero, M., 2021. Increases in extreme heat stress in domesticated livestock species during the twenty-first century. *Global Change Biology*, 27(22), pp.5762-5772.
- Triple E Consulting. (2014). Assessing the Implications of Climate Change Adaptation on Employment in the EU.
- UNEP, 2020 : United Nations Environment Programme (2020). Emissions Gap Report 2020. Nairobi. <https://www.unep.org/fr/emissions-gap-report-2020>
- UNEP/UNESCO (2016). World Heritage and Tourism in a Changing Climate.
- Urban Heritage Climate Observatory de l'Unesco
- Uyarra, M. C., Cote, I. M., Gill, J. A., Tinch, R. R., Viner, D., & Watkinson, A. R. (2005). Island-specific preferences of tourists for environmental features: implications of climate change for tourism-dependent states. *Environmental conservation*, 32(1), 11-19.
- Van de Vel, K., Vandengerghe, D., Bruffaets, N., De Clercq, E., De Ridder, K., Devleeschauwer, B., Koppen, G., Vanuytrecht, E., Willen, P. (2021). Impact of climate change on the healthcare system in



Belgium. Study commissioned by the federal public service health, food chain safety and environment (2021/HEALTH/R/2565).

VAN DEN BERK Pépinières (2015). Van Den Berk et les arbres.

van Lipzig, N., Saeed, S., Demuzere, M., Wouters, H., De Ridder, K., Lauwaet, D., van Ypersele de Strihou, J.-P., Marbaix, P., van Weverberg, K., Villanueva-Birriel, C., Delobbe, L., & Lukach, M. (2017). Modelling atmospheric composition and climate for the Belgian territory (MACCBET). Final Report. Brussels: Belgian Science Policy 2017 – 88 p. (Research Programme Science for a Sustainable Development)

van Vliet, M., Sheffield, J., Wiberg, D., & Wood, E. (2016). Impacts of recent drought and warm years on water resources and electricity supply worldwide.

Vanderplanken, K. et al., 2019. Heat Plan Compilation Deliverable 2.1 SCORCH project. Communication personnelle.

Ville de Liège (2023a). Plan Canopée. <https://canopee.liege.be/> (accès le 06/10/2023)

Ville de Liège (2023b). Guide l'arbre urbain. Consulté sur <https://canopee.liege.be/conseils/guide-de-larbre-urbain> (accès le 24/01/2024)

Viner, D. et al., 2020. Understanding the dynamic nature of risk in climate change assessments—A new starting point for discussion, *Atmospheric Science Letters*, 21, e958, <https://doi.org/10.1002/asl.958>.

Vitali, A., Segnalini, M., Bertocchi, L., Bernabucci, U., Nardone, A. and Lacetera, N., 2009. Seasonal pattern of mortality and relationships between mortality and temperature-humidity index in dairy cows. *Journal of dairy science*, 92(8), pp.3781-3790.

VITO (2019). UrbClim extra documentation, Copernicus Climate Change Service (C3S), Mol, Belgium.

Vlaamse Milieumaatschappij (2018), De Voorlopige OverstromingsRisicoBeoordeling in Vlaanderen. https://sgbp.integraalwaterbeleid.be/beheerplan/achtergronddocumenten/ad_vorb.pdf Consulté le 10/10/2023.

Vlaanderen, 2023. Klimaatportaal, Je kompas naar een klimaatbestendig Vlaanderen, <https://klimaat.vmm.be/>

Wallonie environnement SPW, ., UCLouvain, ., Uliège Gembloux Agro-Bio Tech, ., SHER, ., 2023. Approche de calcul du risque d'érosion hydrique.

WalOnMap, 2023. Géoportail de la Wallonie: Le site de l'information géographique wallonne, Service Public de Wallonie (<https://geoportail.wallonie.be>)

Watkiss P., Troeltzsch J. et McGlade K., Policy brief by the COACCH project. (2018). The Economic Cost of Climate Change in Europe: Synthesis Report on State of Knowledge and Key Research Gaps.

Wegner, K., Lambertz, C., Daş, G., Reiner, G. and Gauly, M., 2014. Climatic effects on sow fertility and piglet survival under influence of a moderate climate. *Animal*, 8(9), pp.1526-1533.

Wiedinmyer (2009). BVOC database. Consulté sur <http://bai.acom.ucar.edu/Data/BVOC/>



Wouters, H., De Ridder, K., Poelmans, L., Willems, P., Brouwers, J., Hosseinzadehtalaei, P, Tabari, H., Vanden Broucke, S., van Lipzig, N. P. M., Demuzere, M. (2017), Heat stress increase under climate change twice as large in cities as in rural areas: A study for a densely populated midlatitude maritime region, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 8997–9007, doi:10.1002/2017GL074889.

Wu, L., & Ren, A. (2009). Research on Urban Fire Risk Comprehensive Evaluation and Its Applications in China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 15(4), 778-788.
<https://doi.org/10.1080/10807030903051226>

Wyard, C., Doutreloup, S., Belleflamme, A., Wild, M., & Fettweis, X. (2018). Global Radiative Flux and Cloudiness Variability for the Period 1959–2010 in Belgium: A Comparison between Reanalyses and the Regional Climate Model MAR. *Atmosphere. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 9(7): 262.
<https://doi.org/10.3390/atmos9070262>

Xiao, Q., & McPherson, Eg. (2002). Rainfall interception by Santa Monica’s municipal urban

Yang, J., Chang, Y., & Yan, P. (2015). Ranking the suitability of common urban tree species for

Yao, M., Bharadwaj, M., Zhang, Z., Jin, B., & Callaway, D. S. (2022). Predicting electricity infrastructure induced wildfire risk in California. *Environmental Research Letters*, 17(9), 094035.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac8d18>

Zhao et al., 2022. Priority for climate adaptation measures in European crop production systems. *European Journal of Agronomy*, 138 : 126516

Zivin et Neidell. (2014). Temperature and the allocation of time : implication for climate change.



Annexes

Annexe 1 : domaines et attentes du cahier des charges

Annexe 1 : domaines et attentes du cahier des charges

1.1. Services écosystémiques

Attentes	Prise en compte
Evaluation des impacts des changements climatiques au regard de l'évolution de la capacité des écosystèmes à fournir des services écosystémiques (d'approvisionnement, de régulation, de support et socioculturels pour chacun des secteurs)	Oui, dans le chapitre 1
Analyse prospective des modifications des modes de gestion dans le cadre des changements climatiques et proposition de scénarios d'évolution des modes de gestion (et de l'occupation et de l'utilisation du sol)	En partie, dans le chapitre 1. Il n'est pas envisagé de construire l'analyse de vulnérabilité sur base de plusieurs scénarios de modes de gestion. Par contre la modification des modes de gestion sera considérée dans le volet 4 de propositions de mesures d'adaptation. Un scénario d'évolution de l'occupation du sol sera proposé et utilisé dans l'analyse de vulnérabilité des services écosystémiques. L'utilisation du sol est plus difficile à projeter et n'apporte généralement pas d'information supplémentaire que l'occupation du sol pour la fourniture des services écosystémiques. Elle ne sera donc pas étudiée.
Evaluation de la capacité des écosystèmes à fournir des services écosystémiques en fonction des changements attendus d'utilisation et d'occupation du sol dans les scénarios prospectifs suite aux changements climatiques	En partie, dans le chapitre 1. Voir ci-dessus.

1.2. Eau (inondations/sécheresses)

Attentes	Prise en compte
Courbes IDF de précipitations pour le futur	Oui. Dans le cadre du volet 2 – projections climatiques
Traduction des évolutions de précipitations en termes de variation de débit et hauteurs d'eau des cours d'eau	Partiellement, dans le chapitre 2. Pour le présent projet nous pourrions fournir les données de projections climatiques mises à jour à l'équipe du SPW qui gère le modèle EPICGrid (Catherine Sohier) afin qu'il puisse l'exploiter. Une modélisation hydrologique et hydraulique sur l'ensemble du territoire serait nécessaire pour développer ce point. Il est strictement impossible dans le cadre du présent projet de développer une telle modélisation. Toutefois différents outils existent et fonctionnent en Wallonie. En terme de modélisation hydrologique (transformation des précipitations en débit, des modèles de différent type existent, depuis la modélisation conceptuelle (ex : Wolf Hydro, modèle pluie débit à calibrer sur série observée, purement empirique) jusqu'à la modélisation physiquement basée (ex : EPICgrid pour un pas de temps journalier et une échelle spatiale de 1km ² ou MikeSHE, pour un pas de temps plus fin (dépendant des données d'entrée), et une résolution spatiale de quelques mètres à dizaines de mètres, selon l'objet de l'exercice). En termes de modélisation hydraulique, l'ensemble de modèles WOLF permet, sous réserve de la disponibilité de données topographiques adéquates, de représenter les hauteurs d'eau). Les modèles MikeSHE et Wolf hydraulic ont ainsi été utilisés dans le cadre du projet MODREC Vesdre (modélisation de la reconstruction de la vesdre). Outre ces modèles, différents autres outils, tels que HEC HMS, HEC RAS peuvent remplir des fonctions similaires et sont régulièrement mobilisés par des gestionnaires de cours d'eau ou des bureaux d'étude.
Traduction des évolutions de précipitations en termes de variations de débit de	Partiellement, dans le chapitre 2.



pointe sur les axes de ruissellement	<p>Pour le présent projet nous pourrons fournir les données de projections climatiques mises à jour et une méthodologie d'intégration des paramètres pertinents dans la réalisation de la prochaine carte des aléas d'inondation par ruissellement.</p> <p>La cartographie actuelle des aléas d'inondation par ruissellement prend en compte les coefficients de montana locaux (issus des IDF) pour estimer un débit de pointe à l'entrée dans le réseau hydrographique, qui est ensuite spatialisé par une règle de trois sur l'ensemble du bassin versant au prorata de la surface contributive. La prochaine carte devrait suivre la même méthodologie. Toutefois, celle-ci ne prévoit pas le calcul des hauteurs d'eau ou des emprises de ruissellement le long des axes. Un enjeu majeur est également l'incertitude induite dans cette carte par les interférences avec les infrastructures, routes, fossés, etc... ainsi que les reprises de ruissellement par le réseau d'égouttage dont la cartographie est incomplète. Par ailleurs, la fréquence des débits de crue en Wallonie est instationnaire et évolue de manière différente selon les bassins versant (Cf projets Hydrotrend I et II). Les débits des périodes de retour considérées doivent être revus, comme cela a été fait dans l'analyse du bassin versant de la Vesdre. De plus, la carte d'aléa d'inondation devrait intégrer le changement d'occupation des sols ainsi que les réseaux d'égouttage, bassins d'orage et autres aménagements. L'imperméabilisation des sols devrait également être prise en compte pour les inondations par ruissellement.</p>
Evolution de la recharge des nappes d'eau souterraine	<p>Partiellement, dans le chapitre 2.</p> <p>La recharge des nappes d'eau souterraine est évaluée par le modèle EPICGrid qui est géré par le SPW. Nous pourrons fournir les données de projections climatiques à jour pour que l'équipe actualise l'analyse. Un enjeu majeur de l'évolution de ce modèle sera toutefois la prise en compte de l'évolution de l'occupation des sols d'une part et l'intégration de nouveaux itinéraires techniques agricoles plus résilients au contexte climatique futur.</p>
Analyse des variations de débits des cours d'eau liées aux changements climatiques et de leurs incidences sur les concentrations en polluants rejetés dans les masses d'eau, leur qualité biologique, l'augmentation de la température des eaux de surface, la qualité des eaux de baignade (cyanobactéries), etc.	<p>Partiellement, dans le chapitre 2.</p> <p>Différents outils existent pour répondre partiellement à cette question : à l'échelle régionale, le modèle EPICgrid (géré au sein du SPW) peut quantifier les apports agricoles diffus vers les masses d'eau de surface et les masses d'eau souterraines. La quantification des apports industriels et urbains est à développer. Une analyse des connaissances actuelles sur ce point pourra être réalisée. Plus localement des études spécifiques sur des sites de baignades ont été réalisées (projet Bacterieau I et II) afin d'identifier les origines des contaminations et de tester quelles stratégies permettraient de les limiter. De tels outils pourraient être mobilisés pour estimer les impacts d'un changement de régime hydrologique mais le détail nécessaire pour réaliser de telles modélisations avec un niveau décent de validité empêche d'imaginer une généralisation dans le cadre du présent projet.</p>
Analyse des modifications de la répartition des précipitations annuelles sur les techniques culturales et leurs effets sur la dispersion de l'azote vers les masses d'eau	<p>Partiellement, dans le chapitre 2.</p> <p>A nouveau ici des outils existent, qu'il s'agisse de modélisation centrée sur la plante (STICS) ou centrée sur le sol (HYDRUS), il est possible de modéliser le bilan hydrologique et de nutriments issus de différentes techniques agricoles pour estimer l'effet des changements climatiques et de changements de pratiques agronomiques sur la pression diffuse en polluants issue des terres agricoles. Il est possible de proposer des modélisations exemplatives inféodées à quelques contextes biophysiques types afin de quantifier la sensibilité des systèmes. Il n'est par contre pas possible de cartographier finement cet aspect sur l'ensemble du territoire wallon.</p>
Analyse des modifications climatiques sur la dispersion des pesticides	<p>Partiellement, dans le chapitre 2.</p> <p>Le projet AQUAMOD a permis de modéliser l'impact du changement climatique sur la qualité des eaux de surface et souterraines en fonction du contexte pédologique, géologique, topographique et climatique. Cette analyse sera renouvelée sur base des projections climatiques et de scénarios d'évolution de l'agriculture par l'équipe SPW en charge du modèle EPICGrid (aux limitations près du modèle mentionnées supra). Une collaboration serait également nécessaire avec l'équipe SPW en charge du modèle Pégase afin de lier les deux modèles pour estimer l'évolution des flux d'eau et des charges en polluants des eaux de surface.</p>

1.3. Sol, indépendamment de l'usage du sol

Attentes

Prise en compte



<p>Aspects sécheresse : quels sont les sols les plus vulnérables sur base notamment de leur potentiel de rétention en eau (seuils critiques), et les pratiques de gestion permettant de réduire cette vulnérabilité (tout usage confondu : naturel, agricole, résidentiel, récréatif, commercial, industriel)</p>	<p>Partiellement, dans le chapitre 3.</p> <p>Une méthodologie de cartographie de la diversité des potentiels d'infiltration et de rétention en eau des sols grâce à la carte numérique des sols pour les bassins versants de Wallonie sera proposée comme réalisée pour le bassin versant de la Vesdre. Toutefois, les fonctions de pédotransfert utilisées mériteraient d'être confrontées à des mesures locales. Une réflexion sur la standardisation des mesures d'infiltration en Wallonie ainsi que leur collecte dans l'objectif de créer une base de données spatiale enrichie serait nécessaire.</p> <p>Une méthodologie de cartographie de la réserve utile sera proposée.</p>
<p>Aspects inondations : analyse de l'impact du taux d'artificialisation/imperméabilisation des sols sur les inondations/ruissellement.</p>	<p>Partiellement, dans le chapitre 3.</p> <p>Une méthodologie pour intégrer l'imperméabilisation des sols dans l'hydrologie des bassins versants (données de bâti de l'Uliège, données cadastrales comme pour le bassin versant de la Vesdre) sera proposée.</p> <p>Les données de l'évaluation de l'imperméabilisation des sols grâce aux images satellites réalisées par l'Agence Européenne pour l'environnement seront croisées avec les cartes d'aléa d'inondation pour définir les zones vulnérables</p>

1.4. Agriculture

Attentes	Prise en compte
<p>Traduction de l'évolution des événements climatiques sur l'état du sol (fertilité, érosion, ...), les cultures (plante), l'élevage, etc...</p>	<p>Voir ci-dessous puisque l'évolution climatique fera partie intégrante de l'analyse de vulnérabilité.</p>
<p>Vulnérabilité du territoire agricole : sols et topographie (érosion, coulées boueuses et perte en sol, ...) / culture / élevage / exploitations agricoles (aspects économiques)</p>	<p>Partiellement, dans le chapitre 3 (sols) et 4.</p> <p>Pour les sols, comme dans la thématique eau, des données et méthodes seront fournies à l'équipe du SPW en charge du modèle EPICGrid.</p> <p>Pour l'agriculture le travail se concentrera sur les aspects liés à la production végétale et l'élevage, leur évolution future et leur stabilité face au changement climatique. Bien que nous produirons des données quantitatives de potentiel de rendements attendus sur les principales cultures (froment, maïs, betterave, prairies, etc.) et les performances et/ou mortalités des principales espèces domestiques (bovins, porcins et volailles) suivant les scénarii climatiques et les régions agricoles, ils ne seront pas traduits directement en chiffre économiques; Les aspects économiques seront en effet abordés dans le chapitre 6 (économique) selon une approche standardisée pour les différents secteurs de l'économie wallonne.</p>
<p>Aspects sécheresse et inondation : comment s'adapter (quelles cultures, quelles pratiques, besoin en eau des cultures et de l'élevage, ...) et impacts économiques sur les exploitations agricoles</p>	<p>Partiellement, dans le chapitre 4.</p> <p>Nous nous focaliserons sur les questions de pratiques culturales et d'élevage, car les données de vulnérabilité de bases manquent cruellement à ce niveau.</p> <p>Nous ne quantifierons pas leurs conséquences en termes de rendements ou en termes économiques, car les données et ressources pour ce type de modélisation ne sont pas disponibles. De plus, et en particulier pour les mesures transformationnelles, ces mesures s'envisagent à des horizons temporels généralement long (changement dans la longueur et la diversité des rotations agricoles, modification des stocks de carbone des sols, etc.) rendant leurs quantifications incertaines;</p>
<p>Impact sur le degré d'autonomie alimentaire de la Wallonie ?</p>	<p>Non.</p> <p>Il ne sera pas possible d'évaluer le degré d'autonomie alimentaire de la Wallonie. Vouloir répondre à ces questions requiert des hypothèses bien trop fortes (quel régime</p>



	<p>alimentaire pour le belge moyen, quelle volonté des pouvoirs publics quant à l’exportation/la souveraineté, quel scénario de transition agroécologique porté par les pouvoirs publics et/ou la société, etc.). La seule initiative de chiffrage de l’autonomie alimentaire en Wallonie à ce jour est portée par des bénévoles et non validée par le SPW. Des réflexions sont en cours au sein du SPW pour de tels indicateurs, qui pourront alors s’appuyer sur les données de rendement que nous aurons fourni.</p> <p>L’étude fournira toutefois des informations sur les rendements attendus qui pourront être intégrée dans des études concernant la résilience alimentaire. Des contacts seront donc établis avec l’étude relative au baromètre de l’alimentation durable en cours par le SPW DD.</p>
Quel territoire agricole wallon en 20XX (lien avec aspect spatial développé (liens avec le volet 3)	<p>Non.</p> <p>Une étude prospective du territoire agricole wallon à un horizon futur, ainsi que les interactions avec les régions agricoles voisines n’est pas possible en raison du manque de données, mais aussi car cela relève de l’organisation des filières agricoles et de l’aménagement du territoire ; qui dépassent le champ du diagnostic de vulnérabilité agricole sensu stricto. Toutefois, un lien avec l’étude des stratégies alimentaires de différents pays européen réalisée sous le chef du SPW DDD sera établi ;</p>
Quelles interactions avec les régions agricoles voisines ?	<p>Non.</p> <p>Voir ci-dessus.</p>
Identifier les adaptations incrémentielles, systémiques et transformationnelles en matière d’agronomie (cultures, pratiques, aménagements nécessaires dont l’irrigation...), d’organisation des filières et des marchés, de politique agricole publique (PAC, encadrement agricole), et d’interactions avec les autres politiques publiques de gestion du territoire (environnement, aménagement du territoire, équipement, gestion des risques naturels)	<p>Partiellement, dans le volet 4 – mesures.</p> <p>Voir autres commentaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pistes d’adaptation oui, mais impacts non quantifiables - focus sur les données de bases agriculture/élevage - Pas de quantification économique si ce n’est au chapitre 6 mais selon une approche standardisée pour tous les secteurs;
Intégrer les interactions possibles avec les secteurs de l’Eau, de la santé et de la Biodiversité et les ZAR identifiées dans ces secteurs. Faire le lien avec les stratégies d’aménagement territorial	<p>Oui.</p> <p>Les interactions entre les différents secteur de l’étude est un objectif pour tous les chapitres.</p>
Identifier des axes d’adaptation prioritaires dans le cadre de la PAC et d’une transition agricole juste, de qualité et de proximité	<p>Partiellement, dans le cadre du volet 4 - mesures.</p> <p>La PAC est très transversale et donne surtout un cadre règlementaires pour les pratiques agricoles standards. Les MAECs sont plutôt des réponses à apporter suite au diagnostic de vulnérabilité, qu’elles soient obligatoires ou compensées par des politiques incitatrices. Par conséquent, on ne proposera pas des pistes de réforme de la PAC mais plutôt une analyse de la compatibilité des mesures proposées dans le cadre de cette étude avec la PAC actuelle, qui donneront des pistes de réflexion pour les futures réformes.</p> <p>Nous ne travaillerons pas non plus sur la transition agricole juste de qualité et de proximité. Ces enjeux, bien que pertinents dépassent le cadre d’un diagnostic de vulnérabilité agricole et font notamment l’objet d’analyses et d’actions plus holistiques dans la cadre du référentiel “Manger Demain” et de l’action Food Wallonia;</p>
Identifier des synergies possibles avec les autres politiques publiques ayant trait au territoire (environnement,	<p>Non.</p> <p>Ce point n’est pas spécifiquement abordé dans la thématique agriculture. Les liens de vulnérabilité entre</p>



aménagement du territoire, équipement, gestion des risques naturels)	chacune des thématiques sont toutefois explorés et devraient suffire à assurer que des synergies sont bien prises en compte.
Identifier les adaptations incrémentielles, systémiques et transformationnelles (source Inrae) en matière de pratiques agricoles et de productions	Partiellement, dans le volet 4 – mesures. Sur base du diagnostic évoqué ci-avant, nous identifierons des adaptations des pratiques agricoles et d'élevage, en commentant qualitativement leur potentiel (notamment sur base des travaux de l'INRAE), sans toutefois quantifier les conséquences précises au niveau wallon de leur mise en œuvre (cf. ci-avant) ;
Analyser l'impact des modifications de la répartition des précipitations annuelles sur les techniques culturales en vue notamment de limiter le lessivage des nitrates (périodes d'interdiction d'épandage, dates et durées d'implantation des CIPAN) ou d'autres intrants ou phytosanitaires utilisés en agriculture	Partiellement, dans le chapitre 3 (sols) et 4. Dans le chapitre 4 nous étudierons l'impact des modifications de la répartition des précipitations annuelles sur les productions agricoles, en termes de stress par déficit d'eau et par excès d'eau. A ce titre, nous pourrions potentiellement étudier le risque de lessivage des nitrates en saison culturale, à travers les reliquats azotés laissés post-récolte. Parallèlement aux simulations des effets du changement climatique, nous serons en mesure de dériver des indicateurs agro-climatiques qui seront utiles à cette thématique (ainsi qu'à une série d'autres thématiques). Ceux-ci pourront être mis à disposition des structures publiques d'encadrement du milieu agricole (CRAw, Centres pilotes, Protect'eau, Grenera, Fourrages-Mieux, etc.) afin que celles-ci puissent adapter leurs recommandations quant aux adaptations des pratiques culturales (périodes d'interdiction d'épandage, dates et durées d'implantation des CIPAN) en vue de limiter les nuisances environnementales (lessivage des nitrates et autres intrants). Ceci sera toutefois plus l'objet du chapitre 3 (eau), où Les données seront fournies à l'équipe travaillant sur EPICgrid afin de réaliser des modélisations des flux d'eau, de sédiments et des pollutions (nitrate, phosphore et pesticides) des eaux en fonction de différents scénarios climatiques et de pratiques agricoles comme les successions culturales, les dates d'épandage, les types de fertilisation, ... En matière de techniques culturales, en lien avec le fonctionnement hydrodynamique des sols, la dispersion de l'azote et des pesticides, nous pourrions produire un ensemble de modélisations 1D illustrant la sensibilité à la gestion des sols à court et long terme de différents indicateurs (sécheresse édaphique, transferts vers les eaux de surface et souterraines). Ces modélisations seront complétées par une synthèse contradictoire de la littérature discutée sur base des contextes biophysiques de la Wallonie.

1.5. Nature et biodiversité

Attentes	Prise en compte
Créer une typologie d'un échantillon d'un minimum de X espèces et de X habitats protégées sur base de leurs préférences climatiques et de leurs exigences écologiques	Oui, dans le chapitre 1.
Modéliser l'impact des scénarios de changements climatiques sur la distribution et la viabilité des différents types d'espèces et d'habitats protégées ainsi que sur les éléments du réseau écologique (haies p. ex.) et les espèces exotiques envahissantes en Wallonie	Partiellement, dans le chapitre 1. L'impact sur la distribution et la viabilité des différentes espèces et habitats sera modélisé et il en découlera une information générale d'impact sur le réseau écologique, mais il ne sera pas possible de visualiser l'impact sur des



	<p>éléments spécifiques de ce réseau écologique comme des haies.</p> <p>Une modélisation des espèces exotiques envahissantes futures ne sera pas possible, mais une synthèse des modélisations européennes existantes à ce sujet sera faite et commentée au regard de l'implication pour la Wallonie.</p>
<p>Evaluer la capacité de migration des espèces face au changement climatique et la pertinence de programmes de migration assistée destinés à faciliter leur acclimatation dans de nouvelles régions</p>	<p>Partiellement, dans le cadre du volet 4.</p> <p>La capacité de migration de chaque espèce face aux changements climatiques ne pourra pas être modélisée. Par contre la question de la migration assistée comme mesure d'adaptation pourra être considérée dans la phase d'élaboration des mesures (volet 4).</p>
<p>Proposition de mesures de gestion et de restauration des écosystèmes destinées à renforcer leur résilience</p>	<p>Partiellement, dans le cadre du volet 4.</p> <p>Des mesures génériques de gestion/restauration actuelles pourront être discutées au regard des changements climatiques et zones à risque identifiées. Toutefois l'étude ne pourra pas produire des plans de gestion pour chaque zone de biodiversité de Wallonie.</p>
<p>Révision des priorités de conservation de la biodiversité en Wallonie dans le cadre de différents scénarios climatiques/pour différents niveaux de réchauffement et tenant compte des services écosystémiques rendus</p>	<p>Partiellement, dans le cadre du volet 4.</p> <p>Des principes génériques à prendre en compte dans la révision de la stratégie biodiversité pourront être formulés.</p>
<p>Etude du cadre légal et de l'intégration des recommandations dans les autres politiques et législations sectorielles.</p>	<p>Partiellement, dans le cadre du volet 4.</p>

1.6. Forêts

Attentes	Prise en compte
<p>Proposer une méthodologie de monitoring des actions prises afin de suivre l'évolution et valider leurs efficacités</p>	<p>Oui, dans le chapitre 1.</p>

1.7. Socio-économique

Attentes	Prise en compte
<p>Identifier et prise en considération du degré de vulnérabilité des populations face aux changements climatiques.</p>	<p>Oui, dans le chapitre 5.</p>
<p>La capacité de réponses aux aléas et aux crises des différents segments de population.</p>	<p>Voir ci-dessus. La capacité de réponse d'une population aux aléas et aux crises fait partie intégrante de la notion de « vulnérabilité » mentionnée au point ci-dessus.</p>
<p>Impact du changement climatique sur les différents secteurs d'activité</p>	<p>Partiellement, dans le chapitre 6.</p> <p>Pour les secteurs de l'industrie et des services (sauf bancaire et assurantiels) face aux risques de vagues de chaleur, sécheresses et inondations.</p>
<p>Impact du changement climatique sur l'emploi</p>	<p>Partiellement, dans le chapitre 6.</p> <p>Voir ci-dessus.</p>

1.8. Villes

Attentes	Prise en compte
<p>Identification des espèces ligneuses à privilégier pour les plantations dans les milieux urbanisés dans le cadre des</p>	<p>Oui, dans le chapitre 7.</p>



différents scénarios climatiques/pour différents niveaux de réchauffement. En complément identifier les espèces qui ne seraient pas en mesure de s'adapter dans le contexte du dérèglement climatique.	
L'effet de l'îlot de chaleur, gérer la fraîcheur/l'eau en ville.	Oui, dans le chapitre 7.
La composante pollution de l'air (et combinaison avec l'effet d'îlot de chaleur	Oui, dans le chapitre 7.
Vulnérabilité du logement vis-à-vis des vagues de chaleur (logement résidentiel, résidences pour personnes âgées, ...). Ventilation, accès extérieur, ...	Oui, dans le chapitre 7. Attente ajoutée par l'équipe de projet.
Vulnérabilité urbaine aux inondations, en ce y compris les infrastructures critiques (pompiers, hopitaux, mobilité). Mesures en matière de GDEP (voir référentiel en cours de finalisation).	Oui, dans le chapitre 7. Attente ajoutée par l'équipe de projet.
Vulnérabilité du milieu bâti face aux risques d'incendie (feux de forêts)	Oui, dans le chapitre 7. Attente ajoutée par l'équipe de projet.

1.9. Infrastructures

Attentes	Prise en compte
Déterminer les zones de vulnérabilité des infrastructures en lien avec les risques d'inondation liés au ruissellement et débordement de cours d'eau	Partiellement, dans le chapitre 8. Voir périmètre pour la définition des infrastructures qui seront prises en compte.
Recommandations en matière de norme pour le dimensionnement des ouvrages de collecte, temporisation, de conduite et de rétention des eaux de pluie dans une optique sécheresse et inondations	Non. Dans le cas de la gestion des eaux de pluie, étant donné que le réseau de collecte des eaux pluviales est majoritairement confondu avec le réseau de collecte des eaux usées, il est matériellement impossible dans cette étude (budgétairement et temporellement) de vérifier le dimensionnement des infrastructures actuelles de collecte dépendant des organismes d'assainissement agréés (égouts), du SPWMI (eaux pluviales) et de la SPGE (collecteurs) pour identifier les zones critiques (sous-dimensionnement des infrastructures entraînant des inondations par mise en charge). Les données de recensement n'existant pas, l'évaluation de la capacité actuelle de rétention d'eau par les toits verts, les citernes individuelles, et par les bassins tampons ne pourra pas non plus être estimée. Par ailleurs le SPW MI a indiqué une étude en cours de plus grande ampleur qui se concentre sur la gestion des infrastructures d'eau en période de sécheresse et une feuille de route pour étudier les questions de gestion d'eaux de pluies intenses.

1.10. Santé

Attentes	Prise en compte
Etablir une analyse rétrospective des données sanitaires pour fournir des informations sur la charge de morbidité liée à la chaleur, les allergies, les tiques, les inondations etc. Effectuer des analyses de sensibilité sur l'âge, les sous-groupes vulnérables, la population urbaine, le statut économique etc. pour déterminer les groupes vulnérables de la population	Partiellement, dans le chapitre 9. En fonction des données qui s'avèreront disponibles.



Carte de canaux de communication par type de risques (qui communique quoi à qui selon quel risque), en collaboration avec Centre Régional de Crise	Non. Cette attente ne fait pas partie de l'analyse de vulnérabilité, mais de manière transversale pour chaque chapitre et quand c'est pertinent nous indiquons si des seuils d'alertes peuvent être envisagés.
--	---

1.11. Santé environnementale

Attentes	Prise en compte
Déterminer des critères d'avertissement et d'alerte à partir de systèmes de surveillance de l'environnement, de la santé (et d'autres comme le social ?) selon le type de risque, pour réaliser des plans de gestion de crise climatique	Partiellement. Cette thématique ne sera pas abordée de manière spécifique, mais chaque chapitre au moment d'identifier ses indicateurs de zone à risque, évaluera la pertinence qu'un seuil sur cet indicateur soit utilisé comme critère d'alerte.

1.12. Energie

Attentes	Prise en compte
Analyser l'impact du changement climatique sur la sécurité d'approvisionnement que ce soit en termes de productions ou de transport/distribution de l'électricité et de gaz et analyser le lien entre la gestion à court terme de l'impact du changement climatique sur le système énergétique existant mais aussi à long terme, sur le système énergétique post-transition, en particulier en ce qui concerne la sécurité d'approvisionnement (cf.* supra)	Oui, dans le chapitre 10.
Proposer une méthodologie pour mettre en place des synergies entre adaptation et atténuation	Oui, dans le cadre du volet 4 – mesures d'adaptation
Proposer des recommandations concrètes pour l'adaptation du bâti au réchauffement et à la climatisation en évitant de renforcer l'îlot de chaleur urbain	Oui, dans le chapitre 7 Villes – logement face aux ICU.

1.13. Tourisme

Attentes	Prise en compte
<p>Evaluer les effets négatifs et positifs sur l'activité du secteur du tourisme wallon en général et plus spécifiquement les points suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - les épisodes de sécheresse sur les activités touristiques liées aux cours d'eau (kayak, activités nautiques sur les plans d'eau)? - les épisodes d'inondations sur les campings et endroits de camps souvent implantés en bord de cours d'eau et sur l'activité touristique en général. Par exemple les parcours de balades balisées qui deviennent inaccessibles et doivent être réalisés. - la modification de la faune (perte de biodiversité) et de la flore (dégradations des forêts, disparitions de tourbières-landes...) sur l'attractivité touristique du territoire wallon. De nombreux touristes se rendent en Wallonie pour profiter de ses espaces naturels. Si ceux-ci se modifient substantiellement, cela pourrait entraîner une perte d'attractivité. 	<p>Partiellement, dans les chapitres 11 et 1.</p> <p>Les impacts des inondations sur les lieux de camp pourront être évalués si des données sur ces lieux de camps existent.</p> <p>L'impact de la modification de la faune et la flore sera étudié au travers du chapitre 1, via la perte potentielle des services écosystémiques culturels.</p>



- une augmentation du nombre de jours d'ensoleillement sur l'activité du secteur du tourisme wallon.

1.14. Patrimoine

Attentes	Prise en compte
Définir les risques concrets de pertes irrémédiables et de dégâts au Patrimoine immobilier. Proposer des méthodes de monitoring afin de suivre l'évolution de la situation. Développer des scénarii de mesures possibles afin de limiter les risques pour le Patrimoine en envisageant le Patrimoine comme faisant partie de la solution de par sa nature et sa conception	Oui, dans le chapitre 11.



Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable asbl

Boulevard Frère Orban 4
B-5000 NAMUR
00 32 81 25 04 80
www.icedd.be
icedd@icedd.be

N° registre de commerce : sans objet
N° TVA : BE0407.573.214
Représenté par : Gauthier Keutgen, Secrétaire Général
N° de compte bancaire : BE59 5230 4208 3426 / BIC TRIOBEBB