

Projet de Fin d'Études (PFE) 2022-2023

Les territoires européens face au changement climatique :

L'utilisation de Solutions Fondées sur la Nature pour répondre aux défis environnementaux



una.city



una.city

GRANDJEAN Charlotte
MENDES Félix

Sous la direction de
ROTGE Vincent

Les territoires européens face au changement climatique :

L'utilisation de Solutions Fondées sur la Nature pour répondre aux défis environnementaux

**Directeur de recherche :
ROTGE Vincent**

**Auteurs :
GRANDJEAN Charlotte
MENDES Félix**

2022-2023

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

Les auteurs de cette recherche ont signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons tout d'abord remercier M. Vincent ROTGE, encadrant de ce Projet de Fin d'Etudes, pour la supervision de ce travail depuis son commencement, ainsi que pour toute son aide et ses conseils apportés tout au long de sa réalisation.

Nous remercions également M. Karl M. WANTZEN, deuxième membre du jury d'évaluation de ce travail, pour sa disponibilité et les éléments de connaissance fournis lors de la formation.

Nous remercions enfin Mme Mathilde GRALEPOIS, encadrante de l'ensemble des Projets de Fin d'Etudes du Département « Aménagement et Environnement » de Polytech Tours, ainsi que M. Denis MARTOUZET, enseignant chargé de la ligne directrice initiale des projets, pour leurs précieux conseils lors des premières phases de ce travail.

SOMMAIRE

Table des Figures	2
Glossaire	3
Introduction	4
1. La contribution des SfN urbaines dans l'atténuation du changement climatique	5
1.1 Le rôle des villes dans le changement climatique	5
1.2 Les SfN urbaines	5
1.2.1 Les forêts urbaines	5
1.2.2 La restauration des rivières et cours d'eau	5
1.2.3 Les toits et façades végétalisés	5
1.2.4 Les espaces verts	6
1.2.5 Les trames vertes	6
1.2.6 Les bassins de rétention biologiques	6
1.3 Les SfN : des puits de carbone au sein des milieux urbains	7
1.3.1 La photosynthèse : le moteur de la séquestration du carbone par les végétaux	7
1.3.2 Les variations de l'activité photosynthétique	7
1.4 Des émissions de GES évitées grâce aux SfN	9
1.4.1 L'isolation thermique du bâti par les SfN	9
1.4.2 Une ville plus fraîche grâce aux SfN	10
1.4.2 Les modes de déplacement doux favorisés par les SfN	10
1.4.3 Les émissions de GES évitées dans le secteur de l'industrie	11
1.5 La séquestration du carbone varie selon le type de SfN	11
2. La séquestration du carbone par les Solutions fondées sur la Nature en milieu urbain, l'étude de la ville de Barcelone	11
2.1 Barcelone, une ville au cœur des enjeux climatiques	12
2.2 Le contexte géographique et urbain	12
2.3 Les sources d'émission de GES de Barcelone	14
2.4.1 L'inclusion de la population	15
2.4.2 Une ville qui mise sur les arbres	15
3. Les limites des SfN en ville pour atténuer le changement climatique	17
3.1 Le milieu urbain offre des conditions climatiques et géomorphologiques peu propices à la séquestration du carbone par la végétation urbaine	17
3.2 La végétation urbaine : un rôle limité dans la séquestration du carbone	18
4. L'atténuation du changement climatique par les SfN en dehors des villes	20
4.1 L'importance des sols dans la séquestration des GES	20
4.2 L'impact des villes sur l'occupation des sols	21
4.3 La séquestration des gaz à effet de serre par les zones humides	22
4.3.1 L'importance des zones humides dans la séquestration des GES (CO ₂ et CH ₄)	22
4.3.2 La restauration d'écosystèmes péri-urbains pour améliorer la séquestration du carbone : l'exemple de la revitalisation et renaturation de la zone humide d'Elster-Luppe	22
4.3.3 La séquestration du méthane : l'exemple de la restauration des tourbières du Jura	24

5. Les SfN urbaines : greenwashing ou réel impact sur l'environnement ?	25
5.1 Des politiques de réduction des émissions de GES	25
5.2 Des politiques d'atténuation du changement climatique : l'exemple de Barcelone	26
5.3 Les co-bénéfices associés aux SfN en milieu urbain	26
5.3.1 La restauration de la biodiversité	27
5.3.2 La réduction de l'effet îlot de chaleur urbain	27
5.3.3 L'amélioration de la qualité de l'air	27
5.3.4 La réduction du risque inondation	27
5.3.5 L'amélioration de la qualité de vie en ville et de la santé	28
5.3.6 Le développement de l'économie locale	28
1. Le moteur de sable et l'adaptation	30
1.1. Généralités	30
1.2. Les objectifs	31
1.3. La politique néerlandaise	32
1.4. Les premières tendances	33
2. Le moteur de sable pour la protection côtière	33
2.1. Les attentes	33
2.2. Les développements réels	34
2.3. L'évolution des stocks de sable	36
2.4. L'impact à long terme	37
3. Le moteur de sable pour la nature	38
3.1. Les attentes	38
3.2. Les développements réels	39
4. Le moteur de sable pour les loisirs	41
4.1. Les attentes	41
4.2. Les développements réels	41
5. La gestion du moteur de sable	42
5.1. Dépôts et projections de sable	42
5.2. Brouillard salin	43
5.3. Changements dans la végétation et les oiseaux	43
5.4. Mouillage dû à une élévation du niveau des eaux souterraines	44
6. Le moteur de sable : connaissance et innovation	45
6.1. Application des connaissances	45
6.2. Innovation à l'international	45
7. Analyse bilan	46
Conclusion	48
Bibliographie	49

Table des Figures

- Figure 1** : Le projet BiodiverCity à Malmö, Suède (malmo.se.)
- Figure 2** : Le parc Belvoir à Zurich, Suisse (Zuerich.com.)
- Figure 3** : Un bassin de rétention à Hanovre, Allemagne (northernarchitecture.us)
- Figure 4** : Equation bilan de la photosynthèse (Roger Prat, François Moreau.)
- Figure 5** : L'influence de la lumière sur la photosynthèse (Roger Prat, François Moreau.)
- Figure 6** : Îlot de chaleur en soirée (entre 21h et 22h) mesuré à Toulouse en août 2021 (CNRM; Toulouse)
- Figure 7** : Contribution relative des SfN dans différents domaines urbains pour le stockage du carbone (Cohen-Shacham et al., 2016 - Naturvation (2019a).)
- Figure 8** : Localisation de la ville de Barcelone (Google Earth.)
- Figure 9** : Occupation des sols de la ville de Barcelone (Baro et al., 2015.)
- Figure 10** : Sources d'émissions de CO₂e par secteurs de la ville de Barcelone en 2017 (Agence de l'énergie de Barcelone.)
- Figure 11** : Le jardin vertical de Tarradellas (urbangardensweb.com) - Trame verte au cœur de Barcelone (Naturvation)
- Figure 12** : Principaux corridors verts reliant les quatre espaces naturels majeurs (Barcelona green infrastructure and biodiversity plan 2020)
- Figure 13** : Comparaison des conditions environnementales des milieux naturels et urbains (Master Plan for Barcelona's Trees 2017-2037)
- Figure 14** : Résultats de la quantification des indicateurs de l'offre et de la demande de séquestration du CO₂ pour les cinq villes étudiées (Baro et al., 2015)
- Figure 15** : La revitalisation et renaturalisation de la zone humide d'Elster-Luppe (Lebendige Luppe)
- Figure 16** : La Neutralisation de drains - Tourbière du Forbonnet (Programme Life Jura)
- Figure 17** : Les émissions de GES dans l'UE par secteur en 2019 (Agence européenne pour l'environnement)
- Figure 18** : Exemple de solution associant des SfN et des infrastructures grises (World Bank, 2021).
- Figure 19** : Les co-bénéfices associés aux SfN. (World Bank, 2021)
- Figure 20** : Localisation du "Sand Motor" à La Haye, aux Pays-Bas (Deltares)
- Figure 21** : Le "Sand Motor" (Deltares)
- Figure 22** : Les différentes parties du Sand Motor après réalisation (Deltares)
- Figure 23** : Développement du moteur de sable entre 2011 et 2021 (Deltares)
- Figure 24** : Photos aériennes en 2011 (gauche) et 2015 (droite) (Deltares)
- Figure 25** : La flèche de sable ("Sand spit") (Deltares)
- Figure 26** : Canal reliant la mer à la lagune (Deltares)
- Figure 27** : Évolution des volumes de sable lors des 4 premières années (Deltares)
- Figure 28** : Différences d'altitude entre 2011 et 2015 (Deltares)
- Figure 29** : Un espace attrayant pour de nombreuses espèces (Deltares)
- Figure 30** : Des coquillages retrouvés aux abords du lagon (Deltares)
- Figure 31** : De nombreuses espèces d'oiseaux sont présentes (Deltares)
- Figure 32** : Une végétation clairsemée typique des plages (Deltares)
- Figure 33** : Une zone dynamique pour des activités de loisirs (Deltares)
- Figure 34** : Le Sand Motor offre de nouvelles possibilités d'activités (Deltares)
- Figure 35** : Des espèces rares se trouvent sur le Sand Motor (Deltares)
- Figure 36** : Services écosystémiques du Moteur de sable

Glossaire

AEE : Agence Européenne pour l'Environnement

CH₄ : méthane

CO₂ : dioxyde de carbone

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

N₂O : protoxyde d'azote

SfN : Solution fondée sur la Nature

UICN : Union internationale pour la conservation de la nature

Introduction

Ce PFE traite de la question des “**Solutions fondées sur la Nature**” (SfN), ou “Nature-based Solutions” (NbS) en anglais, en tant que réponse aux problématiques de **réduction/séquestration des émissions de gaz à effet de serre** et d'**adaptation des villes aux risques climatiques**. Notre sujet se concentrera sur l'exemple de projets de développement de SfN dans certaines villes européennes en approfondissant les conditions de mise en place des SfN par rapport à leur contexte géographique.

Le changement climatique (CC) est à l'origine de nombreux bouleversements météorologiques, dont la fréquence est en constante augmentation à cause des multiples sources de pollution. Il est caractérisé par le **risque climatique**, défini comme « un danger éventuel plus ou moins prévisible, lié au changement climatique. Le risque est la confrontation d'un aléa (phénomène naturel dangereux) et d'un enjeu (humain, économique, environnemental) » (UVED). La lutte contre le changement climatique nécessite donc de réduire rapidement nos émissions de gaz à effet de serre (GES), c'est-à-dire de mettre en place des mesures d'atténuation, mais également d'instaurer, dès à présent, des mesures d'adaptation afin de se préparer aux conséquences de ce changement climatique (Comité français de l'UICN, 2016). L'**atténuation** du changement climatique signifie « une diminution du degré de réchauffement. Celle-ci passe par la réduction des émissions de gaz à effet de serre qui en sont la cause » (Ademe PTC, n.d.). L'**adaptation** consiste à « prendre des mesures pour que les sociétés humaines soient moins vulnérables au changement climatique » (Adaptation Au Changement Climatique, n.d.).

La réduction des émissions de GES et l'adaptation des villes au CC peut se faire en s'appuyant sur la nature. Il s'agit alors de « Solutions fondées sur la Nature ». D'après l'UICN, les Solutions fondées sur la Nature sont « des actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés, pour relever directement les enjeux de société de manière efficace et adaptative tout en assurant le bien-être humain et des avantages pour la biodiversité » (Comité français de l'UICN, 2016). Les SfN reproduisent le fonctionnement des écosystèmes naturels. Or, s'ils sont en bonne santé, les écosystèmes régulent naturellement le climat, absorbent et stockent une grande partie des émissions de CO₂ produites par les activités humaines et atténuent les effets du changement climatique (Comité français de l'UICN, 2016). A titre d'exemple, les écosystèmes terrestres stockent presque trois fois plus de carbone que n'en contient l'atmosphère (Comité français de l'UICN, 2016). Lorsque des phénomènes météorologiques deviennent de plus en plus importants à cause du changement climatique, comme les inondations, il devient alors nécessaire de mettre au point des solutions afin de s'adapter, car leur atténuation en tant que telle n'est pas possible. Des solutions fondées sur la Nature peuvent alors être envisagées car elles pourraient constituer une alternative efficace à des solutions plus anthropiques.

Les SfN constituent un moyen d'adapter les villes et les territoires au changement climatique et d'atténuer ses effets, mais en travaillant avec la nature plutôt qu'en essayant de la contrer avec des moyens techniques conventionnels. Une question qui peut alors se poser est :

Les SfN jouent-elles un rôle efficace dans l'atténuation et l'adaptation au changement climatique au sein des villes européennes ?



I. Les SfN et l'Atténuation : Barcelone (Espagne)

1. La contribution des SfN urbaines dans l'atténuation du changement climatique

1.1 Le rôle des villes dans le changement climatique

Afin de stabiliser la hausse des températures moyennes mondiales sous le seuil de 2° C par rapport à l'ère préindustrielle et limiter les conséquences du changement climatique, l'Union Européenne (EU) s'est fixée comme objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 (AEE, 2020). Un tel objectif nécessite de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'Europe de 80 à 95 % par rapport aux niveaux de 1990 (AEE, 2020). Certains gaz comme la vapeur d'eau sont d'origine naturelle tandis que d'autres sont issus des activités humaines. Les principaux GES sont : le dioxyde de carbone (CO₂), libéré lors de la combustion d'énergie fossile et de la déforestation tropicale, le méthane (CH₄), émis par l'agriculture, l'élevage, les décharges et certains procédés industriels et enfin le protoxyde d'azote (N₂O), libéré par l'agriculture, certains procédés industriels et l'utilisation d'engrais (Commissariat général au développement durable, 2021).

D'après le 3^{ème} volet du rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) sur l'atténuation du changement climatique publié en 2021, 67 à 72 % des émissions globales de GES étaient attribuées aux villes en 2019. Si les villes contiennent aujourd'hui 54,5 % de la population mondiale, ce chiffre pourrait atteindre 70 % d'ici 2050, aggravant de ce fait les émissions de GES par les villes (OCDE, 2012). L'atténuation du changement climatique, c'est-à-dire la mise en place de mesures visant à limiter fortement les émissions de gaz à effet de serre (OCDE, 2015), est donc primordiale dans les milieux urbains.

1.2 Les SfN urbaines

1.2.1 Les forêts urbaines

D'après la FAO, les forêts urbaines comprennent les zones boisées, les groupes d'arbres et les arbres individuels situés dans les zones urbaines et périurbaines. Sont donc inclus dans le terme de forêt urbaine, les arbres de rues, les arbres des parcs et des jardins ainsi que les forêts (FAO, 2016).

1.2.2 La restauration des rivières et cours d'eau

Plusieurs actions sont développées pour redonner aux cours d'eau leur dynamique naturelle. La restauration des rivières consiste parfois à supprimer des remblais de béton et la végétation présente dans le lit et les berges afin d'offrir plus de place à l'écoulement de la rivière (World Bank, 2021).

1.2.3 Les toits et façades végétalisés

La construction de toits et de façades végétalisées sur le nouveau bâti ou existant a considérablement augmenté ces dernières années (World Bank, 2021). Les toits végétalisés sont composés de plusieurs couches horizontales : la couche supérieure soutient les plantes et accueille leurs racines, la couche intermédiaire collecte, filtre, stocke ou évacue l'eau, et enfin la couche inférieure constitue la couche structurelle isolante du toit. Les façades végétalisées sont constituées de plantes grimpantes enracinées dans le sol, poussant directement sur le mur ou sur un support fixé au mur (**Figure 1**) (Eisenberg and Polcher, 2020).

1.2.4 Les espaces verts

Les espaces verts englobent un grand nombre de structures telles que des jardins, des parcs et de manière générale, tout espace non goudronné et « biologiquement actif » (**Figure 2**). Ils incluent à la fois des espaces privés et des espaces publics et varient significativement de taille selon les lieux (World Bank, 2021).

1.2.5 Les trames vertes

Les trames vertes sont des bandes d'arbres ou de végétation qui connectent différents espaces verts urbains. Elles créent ainsi un vaste réseau d'infrastructures vertes à travers la ville (World Bank, 2021).

1.2.6 Les bassins de rétention biologiques

Les bassins de rétention sont des SfN utilisées pour améliorer la capacité des villes à absorber les eaux de pluie (**Figure 3**). Ils sont formés par d'étroites dépressions végétales pouvant être adaptées à tout type de paysage. L'efficacité et la capacité d'absorption des bassins de rétentions sont déterminées par le type de sol, la profondeur du relief et le type de végétation utilisé (World Bank, 2021).



Figure 1 : Le projet BiodiverCity à Malmö, Suède. Source : malmo.se. **Figure 2** : Le parc Belvoir à Zurich, Suisse. Source : Zuerich.com. **Figure 3** : Un bassin de rétention à Hanovre, Allemagne. Source: northernarchitecture.us

1.3 Les SfN : des puits de carbone au sein des milieux urbains

En s'appuyant sur le fonctionnement des écosystèmes, notamment grâce au processus de photosynthèse, les Solutions fondées sur la Nature urbaines peuvent contribuer à atteindre l'objectif de neutralité carbone de l'UE.

1.3.1 La photosynthèse : le moteur de la séquestration du carbone par les végétaux

La photosynthèse est le processus par lequel un végétal fabrique sa propre matière organique, de type glucide, à partir d'eau (H₂O), de dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique absorbé par les feuilles et du dioxygène (O₂) est émis (**Figure 4**). La lumière est la source d'énergie (Rumelhard Guy, 1985). Ce mécanisme naturel de captation du CO₂ est aussi appelé séquestration du carbone. Le stockage du carbone fait quant à lui référence au carbone stocké dans l'arbre lorsque celui-ci est coupé.

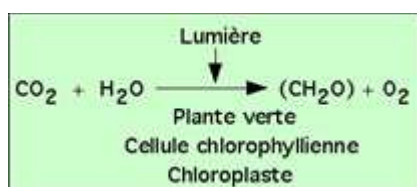


Figure 4 : Equation bilan de la photosynthèse. Source : Roger Prat, François Moreau.

Grâce à la photosynthèse, la végétation joue un rôle majeur dans la réduction de la quantité de CO₂ présent dans l'atmosphère.

1.3.2 Les variations de l'activité photosynthétique

Cependant, l'activité photosynthétique des végétaux, et donc la capacité de séquestration du carbone, n'est pas identique tout au long de la vie d'une plante. Celle-ci varie en fonction de plusieurs facteurs qui doivent être pris en compte par les aménageurs pour optimiser la séquestration du carbone par la végétation.

L'âge de la plante est un facteur important quant à la quantité de carbone déjà stockée et la masse de carbone séquestrée chaque année par le végétal. Un jeune arbre dont le feuillage est encore modeste possède une faible activité photosynthétique et retire moins de carbone de l'atmosphère qu'un arbre ayant atteint son stade de maturité (Évelyne Thiffault, 2019).

Une étude de Mildrexler et al. a montré que si les arbres de grand DBH (diameter at breast height, diamètre à hauteur de poitrine) ne représentaient que 2 à 3,7 % des tiges de la forêt observée, ils stockaient entre 33 à 46 % du carbone total hors-sol (Mildrexler et al., 2020). L'étude recommande donc de laisser aux arbres le temps d'atteindre un large diamètre afin de maximiser leurs capacités de stockage. Cette méthode est, d'après l'étude, plus efficace que la reforestation puisque les jeunes arbres ne sont pas capables d'accumuler d'aussi grandes quantités de carbone. Ainsi, plus un arbre est âgé, plus le diamètre de son tronc est grand, plus l'arbre séquestre de carbone.

Au facteur âge s'ajoute celui de l'espèce. L'analyse du stockage moyen de carbone de cinq espèces végétales à Daegu, en Corée du sud, par Yoon et al. a montré que quatre espèces ont une capacité moyenne de stockage de carbone de 24,9 t/ha tandis que la cinquième, *Platanus orientalis* a une capacité de 69,7 t/ha (Yoon et al., 2013). Certaines espèces d'arbres ont une croissance rapide, absorbant ainsi le dioxyde de carbone plus rapidement que d'autres espèces à croissance lente. En revanche, certaines espèces à croissance lente ont une durée de vie plus longue, ils absorbent donc davantage de CO₂ sur le long terme. Le choix de l'espèce influe donc sur la temporalité de séquestration du carbone.

Par ailleurs, les espèces végétales sont adaptées à un climat particulier. Cependant, à cause du réchauffement climatique, les conditions climatiques évoluent très rapidement. Les aménageurs doivent ainsi prendre en compte ce phénomène afin de choisir des espèces qui seront adaptées au climat futur. Par ailleurs, le changement climatique apporte avec lui son lot d'événements extrêmes : vagues de chaleur, période de sécheresse allongée, diminution des précipitations ... La plantation d'arbres et autres plantes résistantes à ces nouvelles conditions climatiques est primordiale, notamment dans les rues, où les facteurs de stress sont plus importants que dans les parcs ou les jardins (Master Plan for Barcelona's Trees 2017-2037).

Enfin, l'environnement a un impact déterminant sur l'activité photosynthétique de la végétation et donc sur la capacité de séquestration du carbone. Sous une certaine valeur seuil d'éclairement, la photosynthèse est nulle (**Figure 5**).

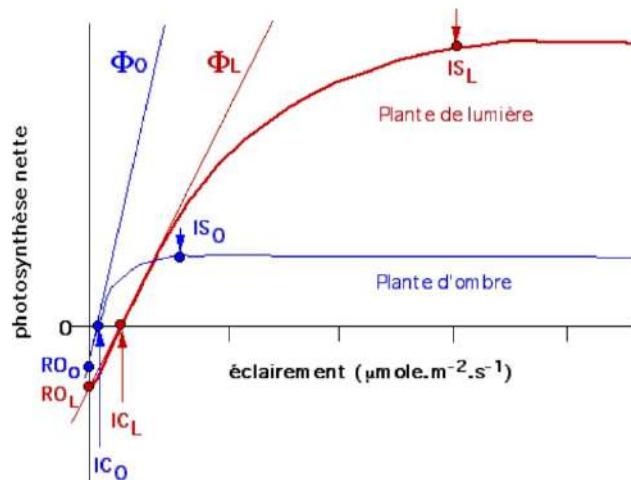


Figure 5 : L'influence de la lumière sur la photosynthèse. En bleu : plantes d'ombre ; en rouge : plantes de lumière.

IC : intensité de compensation ; IS : intensité saturante ; Φ : rendement

Source : Roger Prat, François Moreau

L'éclairement est donc un facteur limitant (Roger Prat, François Moreau, 2004). Le choix de l'espèce est là encore primordial, car les plantes d'ombre ou de lumière n'ont pas les mêmes caractéristiques et ne s'adaptent pas de la même manière à leur environnement. Les plantes d'ombre possèdent une activité photosynthétique inférieure à celle des plantes de lumière (figure 5). Elles séquestrent donc également moins de carbone.

1.4 Des émissions de GES évitées grâce aux SfN

Les Solutions fondées sur la nature permettent de séquestrer une partie du CO₂ émis directement dans l'atmosphère. Mais ce n'est pas tout. La végétation peut également, dans certains cas, éviter l'émission de certains gaz à effet de serre. On parle alors d'émissions évitées.

1.4.1 L'isolation thermique du bâti par les SfN

La végétation contribue à lutter contre le phénomène d'îlot de chaleur urbain en réduisant les températures en ville. Ce phénomène fait référence aux températures sensiblement plus élevées dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales (**Figure 6**) (M. Santamouris, 2013). Il s'explique par l'absorption des rayonnements solaires et de la chaleur liée aux activités humaines par le bâti et le mobilier urbain. La chaleur est absorbée au cours de la journée et libérée le soir. L'îlot de chaleur a un impact considérable sur la consommation d'énergie nécessaire au refroidissement des bâtiments (M. Santamouris, 2013).

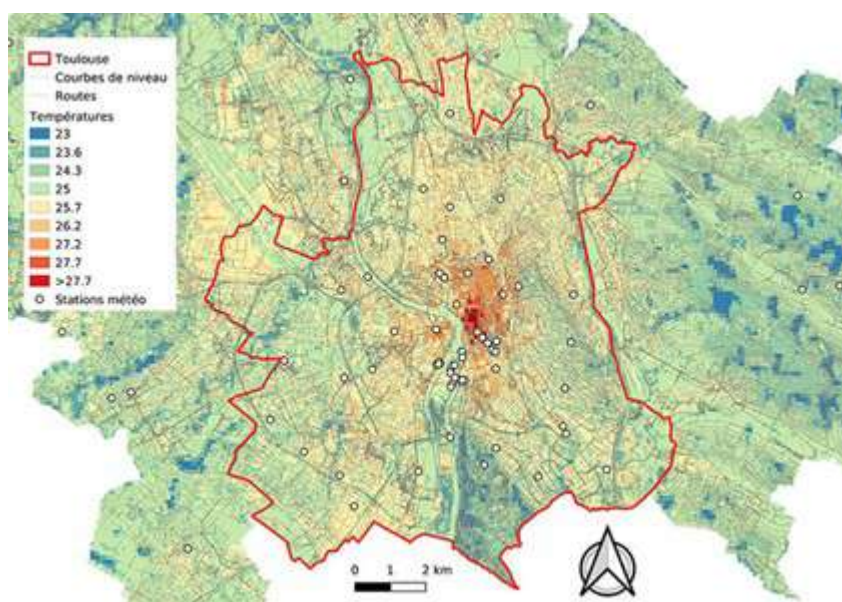


Figure 6 : Îlot de chaleur en soirée (entre 21h et 22h) mesuré à Toulouse en août 2021. Source : CNRM; Toulouse Métropole; Données source : <http://mapuce.orbisgis.org>

D'après une étude menée en 2002 par H. Akbari, l'ombre des arbres a un impact considérable sur la réduction de la consommation énergétique des bâtiments. En été, et

lorsque les arbres sont correctement placés, l'ombre des arbres protège les fenêtres, les murs ou le toit des rayonnements solaires. Le bâtiment reçoit donc moins de chaleur. Les arbres à feuilles caduques sont particulièrement adaptés puisqu'ils protègent le bâtiment du soleil en été tout en permettant au soleil de le réchauffer en hiver (H. Akbari, 2002). Des matériaux ombragés peuvent voir leur température réduite jusqu'à 25°C en été par rapport à des matériaux non-ombragés (Akbari et al. 1997). Des études menées à l'aide de bâtiments expérimentaux ont montré que la présence de végétation pouvait conduire à une économie d'énergie allant de 30 à 50 % (J.H. Parker, 1981, Akbari et al. 1997).

Les arbres ont un effet coupe-vent en réduisant la vitesse du vent ambiant. Les arbres à feuillage persistant peuvent permettre de réaliser des économies de chauffage en hiver en protégeant les bâtiments des vents froids. Cet écran au vent a plusieurs conséquences : la chaleur emmagasinée par les surfaces ensoleillées se dissipe plus lentement, ce

phénomène concerne uniquement les bâtiments non isolés et peut-être bénéfique en hiver, mais néfaste en été ; des vents plus faibles implique une infiltration d'air moindre dans les bâtiments anciens et peu étanches conduisant à une réduction des besoins de refroidissement (H. Akbari, 2002).

La plantation d'arbres en ville peut induire une réduction de 25 % de la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation (H. Akbari, 2002). À titre d'exemple, un arbre planté à Los Angeles éviterait la combustion de 18 kg de carbone par an (Rosenfeld et al. (1998) in H. Akbari, 2002), l'équivalent à 3 à 5 arbres forestiers. Néanmoins, les résultats de cette étude doivent être nuancés. En effet, l'étude a été menée sur le territoire américain, les conditions climatiques diffèrent donc des conditions retrouvées en Europe. Par ailleurs, le mix énergétique diffère également selon les pays. Selon le mode de production de l'énergie, les économies d'énergie réalisées par les arbres seront potentiellement inférieures ou supérieures à ces 25 %. Par exemple, en France, une centrale nucléaire émet 6 g de CO₂ pour produire un kWh, tandis qu'une centrale à charbon émet 1058 g de CO₂ par kWh (ADEME, 2021).

Enfin, les toitures et murs végétalisés font office d'isolant thermique permettant de ce fait de réduire les consommations de chauffage ou de climatisation (Boudes et al., 2014).

Par conséquent, la végétation permet de réaliser des économies d'énergies et donc d'éviter certaines émissions de GES.

1.4.2 Une ville plus fraîche grâce aux SfN

Les trames bleues jouent un rôle dans le rafraîchissement des villes grâce à l'évaporation de l'eau et à l'absorption de la chaleur par l'étendue d'eau (Commission européenne, 2020).

L'évapotranspiration, c'est-à-dire, l'évaporation d'une partie de l'eau contenue dans les sols et la végétation, contribue à abaisser les températures ambiantes en été (Kramer and Kozlowski, 1960 in H. Akbari, 2002). L'énergie nécessaire au refroidissement des bâtiments est donc également moins importante. Cet effet est néanmoins négligeable en hiver du fait de l'absence de feuilles et des températures plus faibles (H. Akbari, 2002).

En diminuant la température ambiante grâce à l'évapotranspiration ou l'évaporation de l'eau, les SfN permettent de diminuer les besoins de climatisation ou de chauffage des bâtiments. Ainsi, la présence de SfN en ville permet de réaliser des économies d'énergie et, indirectement, de réduire les émissions de GES associées.

1.4.2 Les modes de déplacement doux favorisés par les SfN

Une petite partie du protoxyde d'azote, un gaz à effet de serre, est émise par les pots catalytiques des voitures. La réduction de la voiture en ville permettrait donc de réduire les émissions de ce gaz à effet de serre (Commission européenne, 2020). Or, il apparaît que la présence de trames vertes urbaines favorise les déplacements doux comme la marche ou le vélo (Boudes et al., 2014). Les trames vertes sont des espaces préservés pour la marche à pied ou l'implantation de pistes cyclables. Les SfN telles que les trames vertes permettent donc d'éviter certaines émissions de GES en limitant l'utilisation de la voiture.

1.4.3 Les émissions de GES évitées dans le secteur de l'industrie

Grâce à la végétalisation des villes et la désimperméabilisation des sols, la mise en place de SfN peut également contribuer à diminuer l'usage de béton et d'acier, deux secteurs importants d'émission de GES en Europe (Commission européenne, 2020).

1.5 La séquestration du carbone varie selon le type de SfN

Parcs, trames bleues, arbres de rues ou toits végétalisés, les SfN n'ont pas toutes les mêmes capacités de séquestration du carbone (**Figure 7**). Cette diversité doit être prise en compte par les aménageurs.

Les parcs et les espaces verts semi-naturels ont la plus grande capacité de séquestration du carbone (score 5 d'après Naturvation). En revanche, les toits et les murs végétalisés ainsi que les espaces verts pour la gestion de l'eau n'ont qu'une faible contribution au stockage du carbone (score 2) (Cohen-Shacham et al., 2016).

Solution fondée sur la Nature	Score	Valeur moyenne (kg carbone/m3)
Parcs et espaces verts urbains (semi) naturels	5	32.6
Espaces verts connectés à des infrastructures grises	4	28.9
Trames bleues	5	36.1
Toits et murs végétalisés	2	5.4
Jardins familiaux et communautaires	4	23.7
Espaces verts pour la gestion de l'eau	2	12.5

Figure 7 : Contribution relative des SfN dans différents domaines urbains pour le stockage du carbone. 5 : relativement bonne contribution au stockage du carbone. 1 : relativement faible contribution au carbone. Source : Cohen-Shacham et al., 2016. Naturvation (2019a). NATURVATION Project.

2. La séquestration du carbone par les Solutions fondées sur la Nature en milieu urbain, l'étude de la ville de Barcelone

Actuellement, les forêts de l'UE absorbent 7 % des émissions de GES totales de l'UE (Parlement européen, 2022). Reboiser et mettre fin à la déforestation font partie des mesures proposées par le Parlement européen pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. L'UE s'est donc fixée comme objectif de planter 3 milliards d'arbres supplémentaires en Europe d'ici 2030 (Parlement européen, 2022).

Ainsi, à travers toute l'Europe, de nombreux projets de plantation d'arbres de plus ou moins grande ampleur émergent dans les zones urbaines. En Pologne, 118 arbres ont été plantés en 2016 dans le quartier Grunwald de Poznan ; au Portugal, c'est une plantation de plus de 100 000 arbres qui a vu le jour dans l'aire métropolitaine de Porto et 100 hectares de forêt urbaine qui ont été restaurés avec des espèces locales (2011-2018) ; en Italie, des arbres ont été plantés sur deux hectares dans la Valle dei Casali située dans l'aire urbaine de Rome (Urban Nature Atlas, 2022).

Barcelone a également élaboré plusieurs plans de grande ampleur qui mettent les SfN et notamment l'arbre au cœur des projets : le « Master Plan for Barcelona's Trees 2017-2037 » et le « Barcelona green infrastructure and biodiversity plan 2020 ».

2.1 Barcelone, une ville au cœur des enjeux climatiques

En raison du changement climatique, Barcelone fait face à plusieurs menaces. L'élévation des températures et la multiplication des vagues de chaleur font craindre une augmentation des décès attribuables à la chaleur. La diminution des précipitations, estimée à 26 %, associée à la hausse des températures augmente la pression sur l'eau potable et le risque de feu de forêts (Ville de Barcelone). En parallèle, la ville doit s'adapter à des pluies diluviennes plus fréquentes pouvant entraîner des inondations importantes et la dégradation d'infrastructures urbaines. La hausse du niveau de la mer pourrait entraîner une perte de 30 à 46 % des plages, la plage de Saint Sébastien pourrait disparaître (Ville de Barcelone).

La ville bénéficie d'un climat méditerranéen caractérisé par un hiver doux et un été chaud et sec et des pluies irrégulières tout au long de l'année. De telles conditions climatiques imposent de choisir des espèces végétales locales, sous peine de voir les espèces introduites succomber à un niveau de stress trop important (Master Plan for Barcelona's Trees 2017-2037).

2.2 Le contexte géographique et urbain

Implantée entre les montagnes de la Serra de Collserola, le littoral et la rivière Llobregat, Barcelone est la capitale de la Catalogne et deuxième ville d'Espagne en termes de population (**Figure 8**) (Ayuntamiento de Barcelona, 2020).

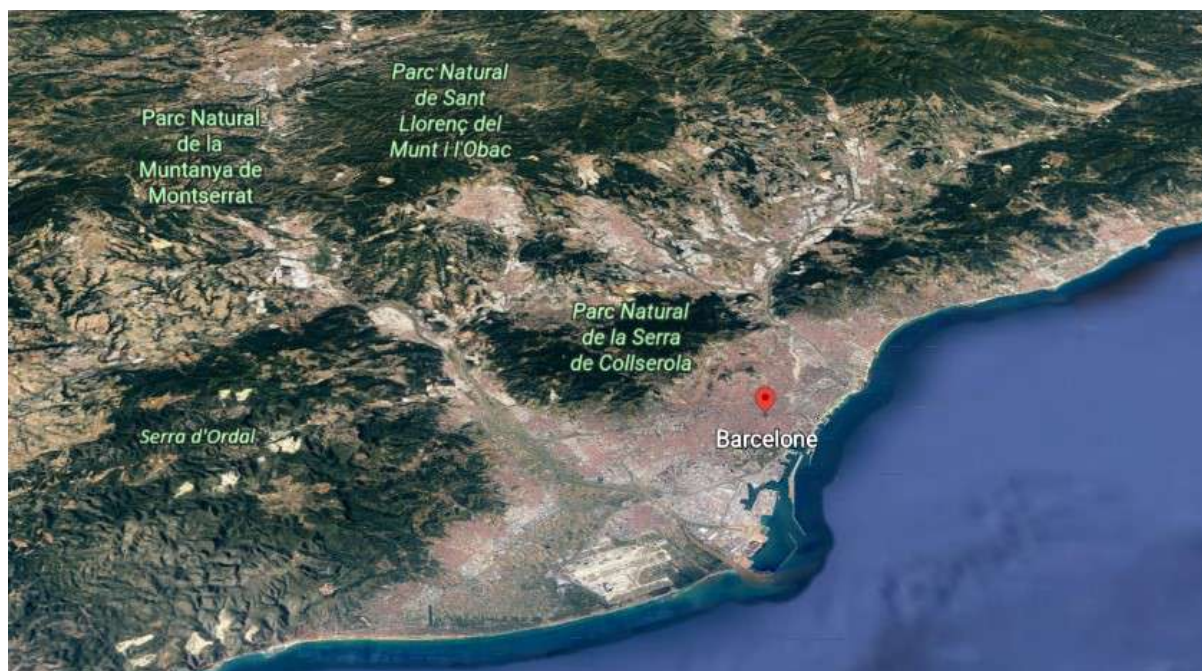


Figure 8 : Localisation de la ville de Barcelone. Source : Google Earth.

80 % de la surface de la municipalité de Barcelone sont urbanisés ou est en passe de l'être. Les 20 % de terres restantes sont occupées par des forêts : principalement le parc naturel de Serra de Collserola. Limitée spatialement par des contraintes géographiques, Barcelone est caractérisée par une structure urbaine compacte, où le manque d'espace et le tracé urbain rendent l'implantation de parcs, de jardins ou d'arbres difficile (Ayuntament de Barcelona, 2017).

L'air pollué combiné à une densité élevée de la population ont incité la ville de Barcelone à mettre en place des plans d'aménagement urbain en faveur de la nature en ville. Les concepteurs de ces plans sont partis du constat que les espaces verts de la ville, tels que les parcs et jardins, forment des îlots peu connectés les uns aux autres et présentent une biodiversité relativement faible (**Figure 9**). La plupart des zones végétalisées sont de petite taille : 57 % font moins de 1 500 m² et sont relativement fragmentées notamment en raison des limites physiques de la ville et de sa grande densité de population. En 2010, 3.5 ha de toits étaient végétalisés alors que le potentiel s'élève à 65 ha en ne considérant que les bâtiments publics (Ayuntament de Barcelona, 2020).

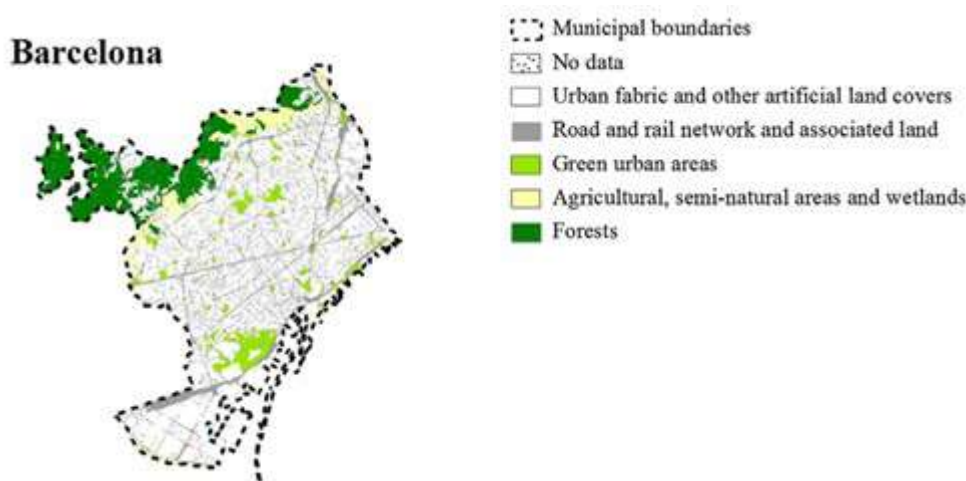
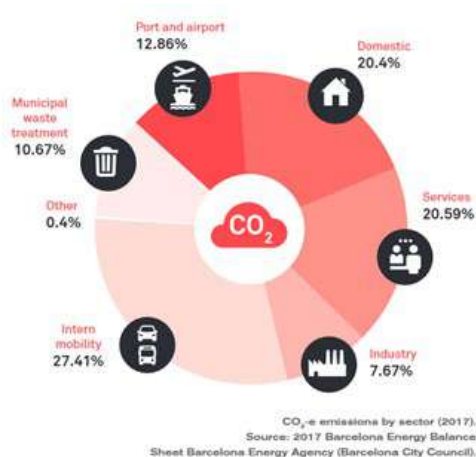


Figure 9 : Occupation des sols de la ville de Barcelone. Source : Baro et al., 2015.

La municipalité compte plus de 1,4 million d'arbres sur son territoire, en incluant les arbres des forêts de Collserola, Montjuïc et Tres Turons, les arbres de rues, les parcs et les jardins publics et privés. Les arbres présents dans la municipalité de Barcelone représentent tout de même 25 % des arbres du pays en termes de biomasse. Les arbres présents dans les rues constituent une majeure partie des infrastructures vertes de Barcelone avec plus de 150 espèces différentes. Au cours des 30 dernières années, le nombre d'arbres dans les rues a doublé jusqu'à atteindre 153 000 arbres en 2013, équivalant à un arbre tous les 8,6 m (Ayuntamiento de Barcelona, 2020). Barcelone est l'une des villes européennes comptant le plus grand nombre d'arbres dans les rues (Baro et al.). Cependant, trois espèces d'arbres représentent 49 % du nombre total d'arbres, 50,5 % de la surface du feuillage des arbres et 43,1 % de la biomasse (Ayuntamiento de Barcelona, 2020). Ces trois espèces sont : le chêne vert ou *Quercus ilex* (22.1 %), le pin d'Alep ou *Pinus halepensis* (20.5 %) et le Platane commun ou *Platanus x acerifolia* (6.6 %). La propagation d'une maladie spécifique aurait donc un effet dévastateur sur ces arbres. Par ailleurs, le pin d'Alep et le platane commun sont des espèces considérées comme vulnérables au changement climatique (Ayuntamiento de Barcelona, 2020).

2.3 Les sources d'émission de GES de Barcelone



D'après la municipalité, Barcelone est une ville peu consommatrice d'énergie et qui génère peu d'émissions comparée à d'autres villes (Ayuntamiento de Barcelona, 2020). La mobilité urbaine représente le secteur d'émission de CO₂e principal avec 27,41 % suivi par les services (20,59 %) et le secteur domestique (20,4 %) (**Figure 10**).

Figure 10 : Sources d'émissions de CO₂e par secteurs de la ville de Barcelone en 2017. Source : Agence de l'énergie de Barcelone.

La consommation d'énergie s'élève à 14,995 GWh d'énergie finale en 2017, équivalent à 9,25 MWh par habitant en moyenne. Le mix énergétique de Barcelone est composé à 50 % de nucléaire et seulement 5 % d'énergie renouvelable (Ayuntamiento de Barcelona, 2020).

La ville émet 3 413 260 t CO₂e, soit 2,11 t CO₂ par habitant (Ayuntamiento de Barcelona, 2020).

2.4 Les SfN mises en place par la ville de Barcelone

2.4.1 L'inclusion de la population

Selon l'OFB (Office français de la Biodiversité), un projet de SfN peut être porté par n'importe quelle structure soucieuse d'adapter son territoire au changement climatique et d'atténuer le climat. Un même projet peut ainsi réunir différents types d'acteurs, qu'il s'agisse de collectivité territoriale, d'association, d'entreprise, d'établissement public ou de gestionnaire d'espaces naturels (OFB, 2022). En revanche, d'après les critères de l'UICN (Union internationale pour la conservation de la nature), un projet de SfN doit impérativement inclure les citoyens afin que ceux-ci s'approprient le projet (UICN Comité français, 2021).

Le « Barcelone green infrastructure and biodiversity plan 2020 » s'est déroulé selon une approche participative. En 2008, une enquête d'opinion auprès des citoyens a été conduite. Les résultats de l'enquête mettent en évidence que les citoyens associent les espaces verts à la santé, la liberté, la nature, la relaxation, ils veulent voir des fleurs, des arbres et des pelouses ainsi que de la propreté et de la sécurité dans ces espaces. En 2009, plusieurs réunions ont été organisées avec des représentants du gouvernement, des chercheurs et des membres d'institutions privées, afin de discuter de la mise en place de SfN dans la ville et des défis auxquels faire face sur le long terme, et réunir des propositions pour améliorer la biodiversité et les infrastructures vertes existantes (Ayuntamiento de Barcelona, 2013).

2.4.2 Une ville qui mise sur les arbres

La ville de Barcelone a adopté le plan « Master Plan for Barcelona's Trees 2017-2037 » dont le budget s'élève à 9.6 millions d'euros par an. L'objectif de ce plan est d'améliorer la connectivité entre les espaces verts urbains et naturels et d'avoir une population d'arbres diversifiée, adaptés et résilients au changement climatique. Pour ce faire, la ville prévoit d'augmenter le couvert arboré de la ville de 5 % afin de couvrir 30 % de la surface totale de la ville. La municipalité a pour objectif d'atteindre 40 % d'espèces d'arbres adaptées au changement climatique contre 30 % actuellement et de faire en sorte qu'aucune espèce d'arbre ne compte pour plus de 15 % du total de la population d'arbres dans l'environnement urbain. D'un point de vue pédagogique, la ville souhaite également s'assurer que les enfants des écoles primaires soient capables d'identifier les arbres présents dans leur voisinage. (Ayuntamiento de Barcelona, 2017).

Le plan Climat 2018-2030 contient également un certain nombre d'actions en faveur de la biodiversité et la mise en place de Solutions fondées sur la Nature.

D'ici 2024, 10 nœuds de biodiversité et réserves naturelles seront créés et 15 km de rues seront transformés en axes verts. De manière générale, Barcelone souhaite promouvoir les corridors urbains, notamment le corridor Ciutadella-Collserola. La ville interviendra dans 10 espaces ensoleillés pour assurer l'ombrage et le confort thermique (végétation, tissus, pergolas photovoltaïques...). Le plan Climat prévoit de désimperméabiliser 3 ha et d'augmenter la surface des espaces verts de 40 ha, en donnant la priorité à l'avenue Meridiana, le parc La Sagrera, La Marina ... 10 toits et façades municipales seront végétalisés afin de servir d'exemple et développer un type de bâti dit « productif » (toits végétalisés, énergétiques, réflecteurs, citernes...). Enfin, la ville souhaite développer des programmes pour protéger les espèces les plus vulnérables au changement climatique.

Néanmoins, la municipalité n'a pas attendu le plan Climat pour réaliser des actions en faveur de la biodiversité. Depuis 2013, notamment grâce au plan pour les infrastructures vertes et la biodiversité (*Barcelona green infrastructure and biodiversity plan 2020*), de nouveaux espaces verts ont été créés ainsi qu'un réseau de trames vertes conçue pour connecter ces espaces entre eux ainsi qu'aux espaces naturels situés en dehors de la ville (**Figure 11**).



Figure 11 : Le jardin vertical de Tarradellas. Source : urbangardensweb.com (photo : Robin Plaskoff Horton). Trame verte au cœur de Barcelone. Source : Naturvation.

Des actions ont été menées dans cinq zones majeures de la ville : Collserola, Els Tres Turons, Montjuïc, Parc de la Ciutadella et le quartier Eixample. Des corridors verts ont été déployés dans toute la ville à partir de ces zones (**Figure 12**). Au sein de la ville, ponts, toits, murs ou balcons sont vus comme des « zones d'opportunités » et ont été investis et végétalisés... (**Figure 11**) (Ayuntament de Barcelona, 2020).



Figure 12 : Principaux corridors verts reliant les quatre espaces naturels majeurs. Source : Barcelona green infrastructure and biodiversity plan 2020.

3. Les limites des SfN en ville pour atténuer le changement climatique

3.1 Le milieu urbain offre des conditions climatiques et géomorphologiques peu propices à la séquestration du carbone par la végétation urbaine

Les végétaux ont des besoins spécifiques pour que la photosynthèse soit optimale et assurer leur croissance. Ensoleillement, disponibilité en eau et en nutriments, température ou encore humidité, lorsqu'ils travaillent avec la végétation, les aménageurs doivent prendre en compte de nombreux paramètres. Les aménageurs doivent être d'autant plus vigilants que les milieux urbains présentent de nombreuses contraintes au développement des végétaux (**Figure 13**). À titre d'exemple, le sol des villes est plus compact, moins riche en nutriments, le rayonnement solaire est plus faible en raison de la présence du bâti... (Master Plan for Barcelona's Trees 2017-2037).

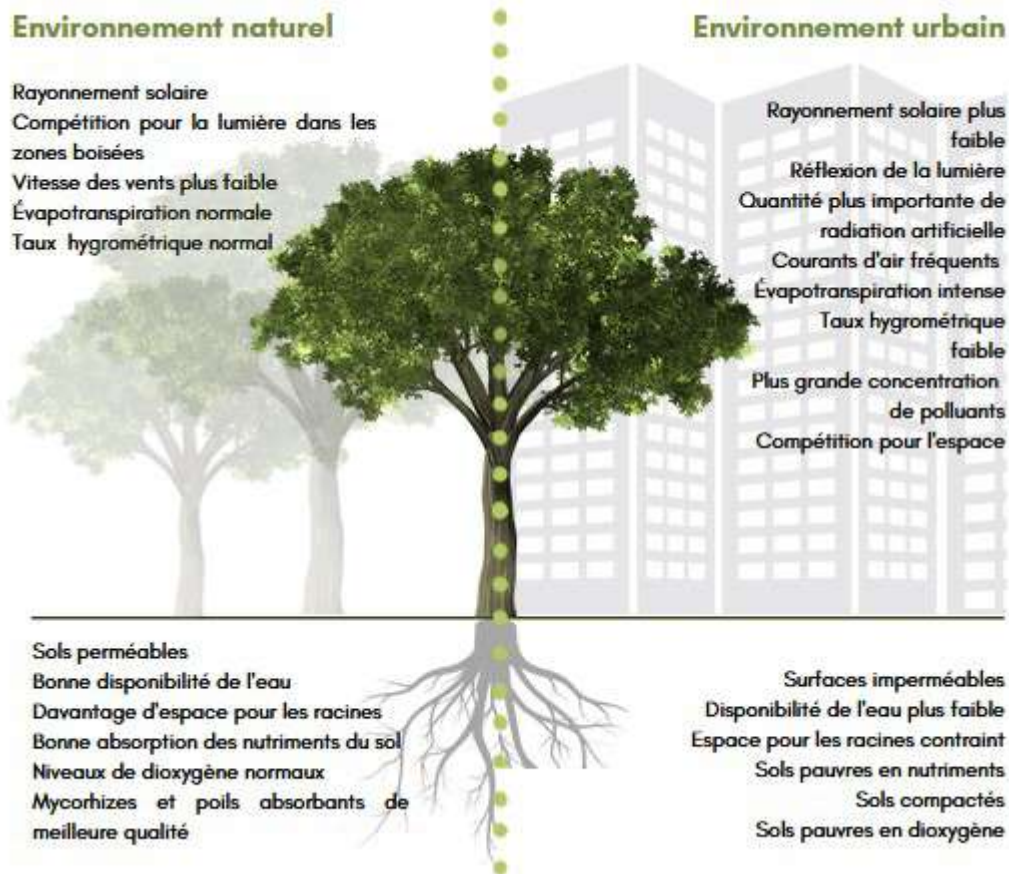


Figure 13 : Comparaison des conditions environnementales des milieux naturels et urbains.
Source : Master Plan for Barcelona's Trees 2017-2037.

Dans le cas des arbres urbains, ceux-ci ne disposent souvent que de peu d'espace pour leurs racines. La croissance et la capacité à survivre des arbres peuvent donc sensiblement varier d'un milieu naturel à un milieu urbain, notamment dans le cas d'espèces sensibles ou fragiles (Master Plan for Barcelona's Trees 2017-2037).

3.2 La végétation urbaine : un rôle limité dans la séquestration du carbone

3.2.1 Les SfN ne permettent pas d'atteindre les objectifs de réduction du CO₂ dans les villes

Une étude conduite par Baro et al. (2015) s'est intéressée à l'adéquation des Solutions fondées sur la Nature aux normes environnementales dans cinq villes d'Europe, dont Barcelone. Les auteurs ont cherché à savoir, entre autres, si les services écosystémiques permettent à eux seuls d'atteindre les objectifs de régulation du climat dans les zones urbaines. La norme choisie ici est la réduction d'au moins 20 % des émissions de GES selon l'engagement des villes pris en signant l'Initiative de la Convention des maires.

Pour ce faire, les auteurs comparent la demande en termes de séquestration du CO₂ et l'offre de SfN disponible dans les villes de Barcelone, Berlin, Stockholm, Rotterdam et Salzbourg. Les SfN urbaines étudiées sont les parcs, les forêts urbaines, les jardins résidentiels, les arbres de rue, les murs et toits végétalisés ainsi que les trames bleues. La demande correspond à la quantité de CO₂ équivalent (CO₂.eq) émis par hectare et par habitant qui doit être séquestrée. L'offre définit la quantité de CO₂ stocké (t ha⁻¹) et séquestré (t ha⁻¹ year⁻¹) par les SfN. La méthode de quantification s'est appuyée sur les estimations issues de l'outil i-Tree basées sur la couverture végétale et la durée de la saison de croissance (www.itreetools.org, Nowak et al. (2013) ; Baró et al. (2014)).

$$C' = \frac{C - GS}{174}$$

C' : Taux de séquestration du carbone moyen (kg C m⁻² tree cover year)

C : Taux de séquestration du carbone moyen aux US (kg C m⁻² tree cover year)(Nowak et al. (2013))

GS : durée de la saison de croissance (jours ; en anglais : growing season)

L'inadéquation des SfN pour la régulation du climat a été définie comme le déficit des puits de carbone urbains aux objectifs de réduction des émissions de CO₂ dans chaque ville.

En comparant la capacité de séquestration du CO₂ offerte par les infrastructures vertes dans les villes étudiées par rapport aux objectifs fixés en matière de réduction des émissions de GES, les résultats montrent que la contribution des services écosystémiques à l'objectif de réduction est inférieure à 10 % (**Figure 14**).

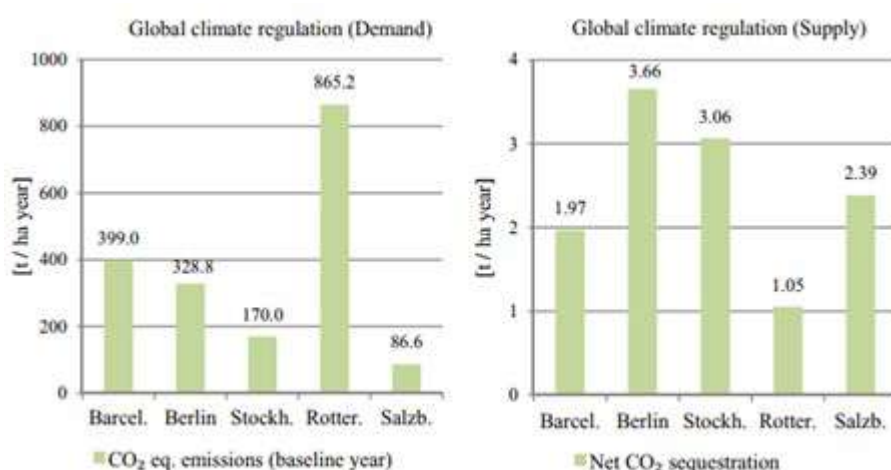


Figure 14 : Résultats de la quantification des indicateurs de l'offre et de la demande de séquestration du CO₂ pour les cinq villes étudiées. Source : Baró et al., 2015.

L'étude conclut donc que les SfN en milieu urbain offrent une contribution modeste à l'objectif visé de séquestration du CO₂. Par ailleurs, il est également peu probable qu'il soit atteint malgré une augmentation du piégeage du carbone par les services écosystémiques (par exemple en doublant la densité des arbres). En conclusion, les Solutions fondées sur la Nature n'ont qu'un rôle mineur ou complémentaire à d'autres mesures de réduction des émissions de GES telles que la gestion du trafic routier ou des mesures d'efficacité énergétique.

Cette étude présente toutefois quelques limites puisque la séquestration du carbone se base principalement sur la couverture végétale des arbres. Elle ne prend pas en compte la séquestration du carbone dans les sols, d'autres types de végétaux ni les émissions de GES évitées grâce aux SfN.

Une autre étude conduite par Chaparro et al. (2014) s'est penchée plus spécifiquement sur le cas de la forêt urbaine de Barcelone. Le résultat de cette étude indique que la séquestration directe du carbone par la forêt urbaine apporte une très faible contribution à l'atténuation du changement climatique puisqu'elle ne représente que 0,47 % de l'ensemble des émissions de GES de la ville. L'étude conclut que la mise en œuvre d'infrastructures vertes comme le prévoit le Plan Barcelona Green Infrastructure and biodiversity 2020 aura peu d'influence sur la compensation des émissions de GES. Cependant, les auteurs insistent sur le fait que les Solutions fondées sur la nature pourraient compléter d'autres politiques visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et fournissent de nombreux services écosystémiques, sans coûts monétaires supplémentaires.

Une étude conduite par Getter et al. (2009) montre que les toits végétalisés ont une capacité de séquestration du carbone inférieure à celle du sol. La différence de sol et des propriétés du substrat peuvent être une partie de l'explication, ainsi que la capacité du système à couvrir la totalité de la surface. En outre, la construction d'un toit végétalisé émet des quantités importantes de carbone qui ne sont totalement absorbées par la végétation qu'au minimum 3 ans plus tard. Les auteurs concluent donc que la séquestration du carbone par les toits végétalisés n'est probablement qu'un bénéfice secondaire à l'installation d'une telle structure.

Néanmoins, il semble que les études conduites par Chaparro et al. et Getter et al. ne prennent pas en compte les émissions de CO₂ évitées dans les calculs. Il est donc probable que les résultats sous-estiment l'importance des forêts urbaines ou des toits végétalisés dans l'atténuation du changement climatique.

4. L'atténuation du changement climatique par les SfN en dehors des villes

Bien que participant à la réduction de la demande énergétique et à la séquestration d'une petite partie des GES, les SfN en ville jouent un rôle limité dans l'atténuation du changement climatique. Le potentiel de séquestration et de stockage du carbone se trouve plutôt dans les zones rurales (Commission européenne, 2020). Les SfN pour l'atténuation du climat correspondent principalement à des mesures de conservation, restauration ou amélioration des zones humides, des terres agricoles, des forêts et des prairies. Ces mesures ont une plus grande capacité de stockage et de séquestration du carbone que les SfN urbaines (Commission européenne, 2020).

4.1 L'importance des sols dans la séquestration des GES

D'après l'INRA, les trente premiers centimètres stockent 2 à 3 fois plus de carbone que la végétation ou l'atmosphère à l'échelle mondiale (INRAE, 2019).

Néanmoins, les changements d'occupation des sols transforment parfois ces puits de carbone en source de gaz à effet de serre. D'après le rapport du GIEC sur l'occupation des sols, entre 2007 et 2016, les activités agricoles, forestières et autres utilisations des terres ont été à l'origine de 13 % des émissions de CO₂, 44 % des émissions de méthane et 81 % des émissions de protoxyde d'azote. Au total, les sols ont contribué à 23 % des émissions de GES anthropiques (GIEC, 2019).

Le GIEC avance donc qu'une meilleure gestion des écosystèmes terrestres et de l'agriculture permettrait d'augmenter les puits de carbone et ainsi de fournir 30 % de l'atténuation du CO₂ nécessaire jusqu'en 2030 pour limiter le réchauffement sous le seuil des 2° C (GIEC, 2019).

4.2 L'impact des villes sur l'occupation des sols

Les villes sont responsables de l'émission de 67 à 72 % des émissions globales de GES (GIEC, 2021). En outre, en Europe, l'artificialisation des sols est une conséquence directe de l'expansion des villes (Commission européenne, 2020), or, l'urbanisation croissante est également source de GES (Baroche et al., 2006). L'artificialisation d'un sol est la transformation d'un sol naturel, forestier ou agricole par des opérations d'aménagement pour lui attribuer des fonctions urbaines ou de transport (Baroche et al., 2006). Les sols artificialisés désignent tous les usages humains autres qu'agricoles et forestiers (Desrousseaux et Schmitt, 2018).

L'artificialisation est due en majorité à la croissance des villes et au développement de zones industrielles et commerciales (Baroche et al., 2006). L'artificialisation des sols est aujourd'hui l'une des causes principales du changement climatique et de l'érosion de la biodiversité (Ministère de la Transition écologique, 2022). L'expansion des villes entraîne la disparition d'habitats pouvant mener à la disparition locale d'une espèce. Ensuite, un sol artificialisé perd sa fonction de puits de carbone et ne contribue donc plus à l'atténuation du changement climatique. Au contraire, selon les activités créées sur ce territoire (activités industrielles, récréatives, transports, habitats...) l'espace peut devenir une source de gaz à effet de serre et contribuer au changement climatique. L'imperméabilisation des sols empêche l'infiltration de l'eau dans les sols, en cas de fortes intempéries, l'eau de ruissellement peut donc causer ou aggraver le phénomène d'inondation. Enfin, l'artificialisation des sols induit une perte de productivité agricole et apporte avec elle son lot de nuisance et de pollution (sonore, lumineuse, etc.).

En France, entre 16 000 et 60 000 d'hectares d'espaces naturels, agricoles et forestiers sont artificialisés chaque année (Ministère de la Transition écologique, 2022). Des politiques de réduction de l'artificialisation ont vu le jour comme le Plan Biodiversité et le « Zéro artificialisation nette ». L'objectif du « Zéro artificialisation nette » consiste à limiter autant que faire se peut l'artificialisation de nouveaux espaces, et, lorsque l'aménagement est indispensable, de désimperméabiliser la superficie équivalente. Cette maîtrise de l'urbanisation est progressivement introduite à l'échelle locale, dans les PLU (Plan local

d'Urbanisme) et les SCOTT (Schéma de Cohérence Territoriale). De telles mesures contribuent à protéger les sols et à conserver leur rôle de puits de carbone.

4.3 La séquestration des gaz à effet de serre par les zones humides

Pour atteindre l'objectif de neutralité carbone d'ici 2050, Le Parlement européen propose de favoriser les puits de carbone naturels de l'UE en restaurant les zones humides et les tourbières (Parlement européen, 2022).

4.3.1 L'importance des zones humides dans la séquestration des GES (CO₂ et CH₄)

Les zones humides sont caractérisées par des sols saturés d'eau où la profondeur d'eau n'excède pas 1 mètre (Tardieu, 2017). D'après la législation française, une zone humide présente des sols hydromorphes et/ou des plantes hygrophiles. Elles stockent 25 à 30 % du carbone dans les écosystèmes terrestres, jouant ainsi un rôle essentiel dans l'atténuation du changement climatique.

Néanmoins, les zones humides peuvent également agir comme des sources de carbone. Si les tourbières stockent un tiers du carbone du sol à l'échelle mondiale (FAO, 2016), elles sont également responsables de 30 % des émissions mondiales de méthane (CH₄; Roger et al.). Or, le méthane a un pouvoir de réchauffement 20 à 30 fois supérieur à celui du CO₂ (Roger et al.). La méthanogenèse est réalisée par des bactéries méthanogènes dans les sols submergés ($C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3 CO_2 + 3 CH_4$) (Roger et al.). Du CO₂ est également émis lors de ce processus.

Du fait de l'extraction de la tourbe ou de l'assèchement des tourbières par le creusement de fossés de drainage, les tourbières ont subi un grand nombre de perturbations. Alors que les tourbières sont initialement des puits de carbone, elles sont progressivement devenues des sources d'émissions de GES contribuant au changement climatique (Francez, 2000). Dans les tourbières de Finlande, la fonction de puits de carbone aurait diminué de 20 à 30 % et de 50 % dans les tourbières d'Europe de l'Ouest (Francez and Vasander, 1995).

Le drainage des tourbières est ainsi à l'origine de 10 % des émissions mondiales de GES dans le secteur de l'agriculture, de la foresterie et des autres affectations des terres (FAO, 2016). L'augmentation de la fréquence des incendies augmente également les émissions de GES (FAO, 2016).

D'après un rapport publié par les Nations Unies en 2021, la réduction des émissions de méthane serait l'une des stratégies les plus efficaces pour limiter le réchauffement climatique en dessous de 1.5 °C. Afin de favoriser la séquestration des GES par les tourbières, la FAO préconise de protéger et préserver les tourbières des dégradations, de réhumidifier les tourbières asséchées et d'adopter des pratiques de gestion responsables.

4.3.2 La restauration d'écosystèmes péri-urbains pour améliorer la séquestration du carbone : l'exemple de la revitalisation et renaturation de la zone humide d'Elster-Luppe.

Située au nord-ouest de Leipzig, en Allemagne, la forêt alluviale d'Elster-Luppe est l'une des plus grandes forêts alluviales d'Allemagne (Sachsen.nabu, 2022). Après 150 ans d'interventions humaines sur le cours de la rivière, digues, drainage de terres agricoles et de prairies ou fragmentation de ses plans d'eau ont entraîné le retrait de sa nappe d'eau souterraine. La plaine alluviale s'assèche progressivement, affectant alors fortement sa biodiversité (Sachsen.nabu, 2022).

Le plan de restauration consiste à connecter les différents plans d'eau de la zone humide en un seul cours d'eau continu afin d'améliorer le bilan hydrique et rétablir les services écosystémiques.

Le cours d'eau d'origine est restauré et connecté à deux cours d'eau situés au nord et au sud de la zone humide (**Figure 15**). Plusieurs anciens cours d'eau sont également restaurés et de nouveaux fossés de connexion sont créés pour connecter les plans d'eau et améliorer l'écoulement des eaux.



Figure 15 : La revitalisation et renaturation de la zone humide d'Elster-Luppe. Source : Lebendige Luppe.

La revitalisation de la zone humide est conduite par la NABU Sachsen, les villes de Leipzig et de Schkeuditz ainsi que l'Université de Leipzig et le Centre Helmholtz de recherche environnementale (UFZ). Le programme de financement s'achèvera en 2023.

Le projet s'inscrit dans une démarche pédagogique d'éducation à l'environnement. Les animateurs de la zone humide proposent des sentiers naturels multimédia, des visites guidées thématiques adaptées à toutes les tranches d'âge et des cours spécifiques pour les enfants.

La restauration de la zone a pour objectif d'accroître la séquestration du carbone dans le sol, d'assurer la conservation de la biodiversité et de sensibiliser le public.

4.3.3 La séquestration du méthane : l'exemple de la restauration des tourbières du Jura

Les tourbières exploitées ayant fait l'objet d'une restauration peuvent retrouver leur fonction de puits de carbone (Chapman et al. 2003). En effet, les zones humides inondées peuvent séquestrer de grandes quantités de carbone sur le long terme (Valach et al., 2021).

En France, dans le Jura, le programme Life pour la restauration des tourbières s'est donné pour mission de réhabiliter 60 tourbières du massif jurassien franc-comtois réparties au sein de 16 sites Natura 2000. Ce programme permettra de neutraliser 16 km de drains, de restaurer plus de 600 ha d'habitats et d'améliorer le fonctionnement de 35 % des surfaces tourbeuses du territoire. La restauration des tourbières doit permettre de recréer des conditions optimales pour l'installation de communautés végétales productrices de tourbes comme les sphaignes, puits de carbone naturel. L'objectif final étant de réduire les émissions de gaz à effet de serre issues de la dégradation des tourbières et de rétablir la fonction de puits de carbone des tourbières.

Plusieurs actions de restauration sont mises en œuvre. Afin de rétablir l'hydrologie du site, les drains sont colmatés avec de la tourbe ou un matériau similaire (sciure d'épicéa, broyat d'arbre de petit diamètre mélangé à la tourbe ou à la sciure (**Figure 16**). En cas d'impossibilité de comblement total des drains des barrages sont construits. Le comblement des drains induit la remontée de la nappe phréatique permettant ainsi de saturer la tourbe en eau et de favoriser le retour des communautés végétales turfigènes, c'est-à-dire capables de produire de la tourbe. La tourbière est alors capable de stocker du carbone.



Figure 16 : La Neutralisation de drains - Tourbière du Forbonnet. Source : Programme Life Jura.

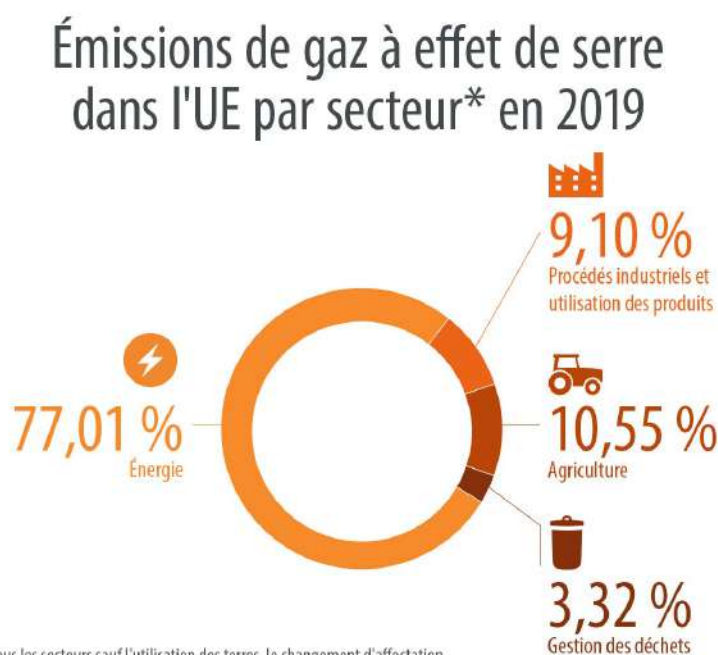
11 km de cours d'eau reméandrés répartis dans 5 sites Nature 2000 ont été reméandrés. Cette technique consiste à réactiver l'ancien lit méandriforme d'un cours d'eau où à créer un nouveau lit. Pour ce faire, un nouveau lit est creusé et l'ancien tracé rectiligne est comblé. Le reméandrement réhausse la nappe d'eau souterraine induisant une nette amélioration des états de conservation des habitats de marais.

5. Les SfN urbaines : greenwashing ou réel impact sur l'environnement ?

5.1 Des politiques de réduction des émissions de GES

Le bilan de l'atténuation du changement climatique des solutions fondées sur la nature en ville est mitigé. Les SfN ne peuvent donc pas se substituer à des politiques de réduction des émissions de GES pour atteindre les objectifs de neutralité carbone.

Responsable de 77 % des émissions de gaz à effet de serre dans l'Union Européenne en 2019, l'énergie est le secteur le plus polluant (**Figure 17**) (Agence européenne pour l'environnement, 2019). Les transports représentent un tiers de ces émissions.



* Tous les secteurs sauf l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie (UTCATF)

En raison des arrondis, la somme des pourcentages n'est pas égale à 100 %

Source : Agence européenne pour l'environnement



Figure 17 : Les émissions de GES dans l'UE par secteur en 2019. Source : Agence européenne pour l'environnement.

La réduction ou la modification de la consommation d'énergie et de matériaux, l'électrification des usages et l'amélioration de l'absorption et du stockage du carbone seraient donc des mesures efficaces pour réduire les émissions de GES. Néanmoins, si la végétalisation des villes bénéficie en général d'une bonne image auprès des citoyens, de telles mesures sont coûteuses et ne disposent pas de la même adhésion. La plantation d'arbres et la création d'espaces verts sont donc souvent favorisées à la mise en place de politiques plus contraignantes. Les collectivités craignent-elles des levées de bouclier ou qu'un éventuel mécontentement ne se répercute dans les urnes ? Peut-on dans ce cas parler de greenwashing ? Il ne faudrait pas, par exemple, que la plantation d'arbres détourne

l'attention de la nécessité de protéger les écosystèmes et de changer de modèle de production et de consommation d'énergie.

D'après le 6^{ème} rapport du GIEC relatif à l'atténuation du changement climatique, les villes ont un rôle majeur à jouer dans la réduction des émissions de GES. Néanmoins, la ville fait partie d'un système et ne pourra atteindre la neutralité carbone que si les émissions sont réduites à l'intérieur et à l'extérieur des limites administratives de la ville par le biais des chaînes d'approvisionnement (GIEC, 2022).

5.2 Des politiques d'atténuation du changement climatique : l'exemple de Barcelone

Nous avons vu que la ville de Barcelone avait mis en place un grand plan de végétalisation de la ville. Néanmoins, elle a bien compris que l'atténuation du changement climatique par les SfN ne pouvait pas être l'unique option. Barcelone a donc élaboré un Plan Climat 2018-2030, comprenant 240 mesures pour atteindre une réduction des émissions de GES de 45 % d'ici 2030 par rapport à 2005. Le plan implique un changement de modèle dans tous les domaines (Modèle urbain, Mobilités et infrastructures, Energie, Consommation). En 2020, la ville a également déclaré « l'état d'urgence climatique » et s'est fixé plusieurs objectifs afin de réduire les émissions de GES de la ville.

En termes de mobilité, dont les émissions de GES représentent 30 % des émissions de la ville (Ayuntamiento de Barcelona, 2020), Barcelone a pour objectif de changer de modèle de mobilité. La ville souhaite réduire l'utilisation des voitures individuelles dans l'espace urbain afin de diminuer la dépendance aux énergies fossiles et améliorer la qualité de l'air. Par exemple, les trames vertes doivent permettre d'augmenter l'espace dédié aux piétons et aux mobilités actives. La ville veut également améliorer les conditions de trafic pour les transports en commun et consolider le réseau cycliste existant (Climate emergency declaration, 2020).

La ville a également pour ambition de changer de modèle énergétique, principalement basé sur les hydrocarbures. Cette transition implique une utilisation plus raisonnable de l'énergie, produite à partir de sources renouvelables. Pour cela, Barcelone souhaite installer des panneaux solaires sur les toits de la ville. D'ici 2030, 50 % de la consommation l'électricité sera issue de sources renouvelables. La ville a mis en place une politique publique d'encouragement à la rénovation énergétique des logements afin d'atteindre 10 000 logements rénovés par an (Climate emergency declaration, 2020).

De nombreuses autres actions sont également mises en place pour changer de modèle économique, de modèle de consommation et de déchets, de modèle alimentaire ou encore de modèle scolaire (Climate emergency declaration, 2020). Toutes ces initiatives peuvent contribuer à atténuer le changement climatique.

5.3 Les co-bénéfices associés aux SfN en milieu urbain

La végétalisation des villes peut apparaître comme une mesure non contraignante et peu ambitieuse pour atténuer le changement climatique et l'on peut être tenté de parler de greenwashing. Cependant, cet argument est à nuancer au regard des nombreux co-bénéfices associés aux Solutions fondées sur la Nature.

5.3.1 La restauration de la biodiversité

L'un des objectifs principaux associé aux SfN est la lutte contre l'érosion de la biodiversité. A travers l'implantation de jardins, toits et murs végétalisés et autres espaces verts, la ville contribue aux efforts de restauration de la biodiversité. Ces espaces fournissent des habitats et de la nourriture à de nombreuses plantes et animaux. La création de trames vertes permet de restaurer des réseaux écologiques en connectant des écosystèmes entre eux. Intégrer la nature aux projets d'aménagement permet ainsi de restaurer la biodiversité érodée par l'urbanisation des territoires (FAO, 2018). Dans les milieux naturels, la restauration des écosystèmes dégradés et l'amélioration de la gestion des écosystèmes ont également un impact positif sur la biodiversité.

5.3.2 La réduction de l'effet îlot de chaleur urbain

Point développé dans la partie 1.3.

5.3.3 L'amélioration de la qualité de l'air

Les végétaux filtrent l'air et éliminent les polluants nocifs, contribuant de ce fait à améliorer la qualité de l'air que nous respirons (FAO, 2018). Les stomates participent à l'élimination de certains polluants comme CO, NOx, O₃ et SO₂ ((Smith, 1984; Fowler, 1985 in H. Akbari, 2002). Tout d'abord, le refroidissement de l'air grâce aux arbres urbains permet de ralentir le processus de formation du smog (Akbari, 2002). Les SfN contribuent ainsi à dépolluer l'air urbain.

5.3.4 La réduction du risque inondation

Les SfN ont également une fonction de stockage des eaux de pluie. Les toits et murs végétalisés, les jardins, les parcs ou encore les arbres urbains absorbent, filtrent et dirigent l'eau. A ceux-ci s'ajoutent des bassins de rétention et autres zones de drainage ou stockage de l'eau (World Bank, 2021). Les SfN participent donc à la gestion de l'eau et la protection des villes contre les inondations et améliore la qualité des eaux en filtrant les polluants (FAO, 2018). Des solutions mixtes associant les SfN et les infrastructures grises peuvent parfois être mises en place (**Figure 18**). Les infrastructures dites « grises », issues de l'ingénierie traditionnelle, sont des infrastructures bâties telles que les routes, les égouts, les digues etc. De manière générale, de telles infrastructures peuvent contribuer à fragiliser les écosystèmes ou empêcher la libre circulation de l'eau (Simard, C et al, 2019).

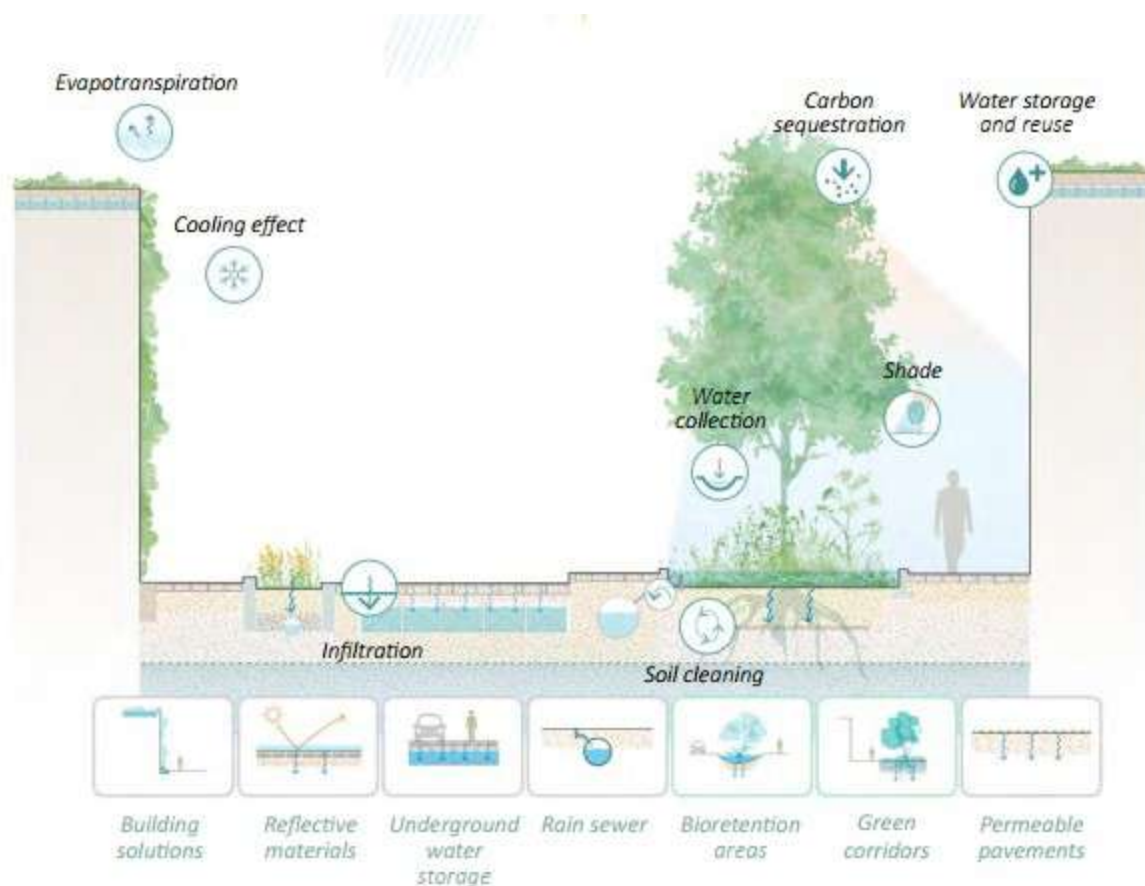


Figure 18 : Exemple de solution associant des SfN et des infrastructures grises (World Bank, 2021).

5.3.5 L'amélioration de la qualité de vie en ville et de la santé

Le changement climatique et la crise sanitaire ont contribué à faire émerger un besoin d'espaces verts en ville (CEREMA). De nombreuses études montrent que la végétation rend la ville plus agréable à vivre et influe de façon positive sur la santé mentale et le bien-être de ses habitants (Bourdeau-Lepage 2019). Les personnes ayant un espace vert dans leur cadre de vie se sentent moins stressées et ont le sentiment d'avoir moins de problèmes de santé (Maas et al. 2009). En incitant les habitants à passer davantage de temps à l'extérieur ou en privilégiant la marche ou le vélo plutôt que la voiture dans leur déplacement quotidien, les espaces verts favorisent la pratique d'une activité physique et donc des modes de vie plus sains (FAO, 2018). Ces espaces permettent également de créer du lien entre les habitants et d'améliorer les relations sociales (Bourdeau-Lepage 2019).

5.3.6 Le développement de l'économie locale

Parfois perçus comme des vecteurs de développement de l'économie locale, les espaces verts peuvent renforcer l'attractivité d'un lieu (FAO, 2018). La proximité d'un espace vert peut augmenter la valeur d'un bien immobilier (Brander and Koetse 2011).

Les solutions fondées sur la nature apportent donc de nombreux bénéfices et sont donc bel et bien indispensables pour lutter contre le changement climatique et pour l'adaptation des villes (**Figure 19**).

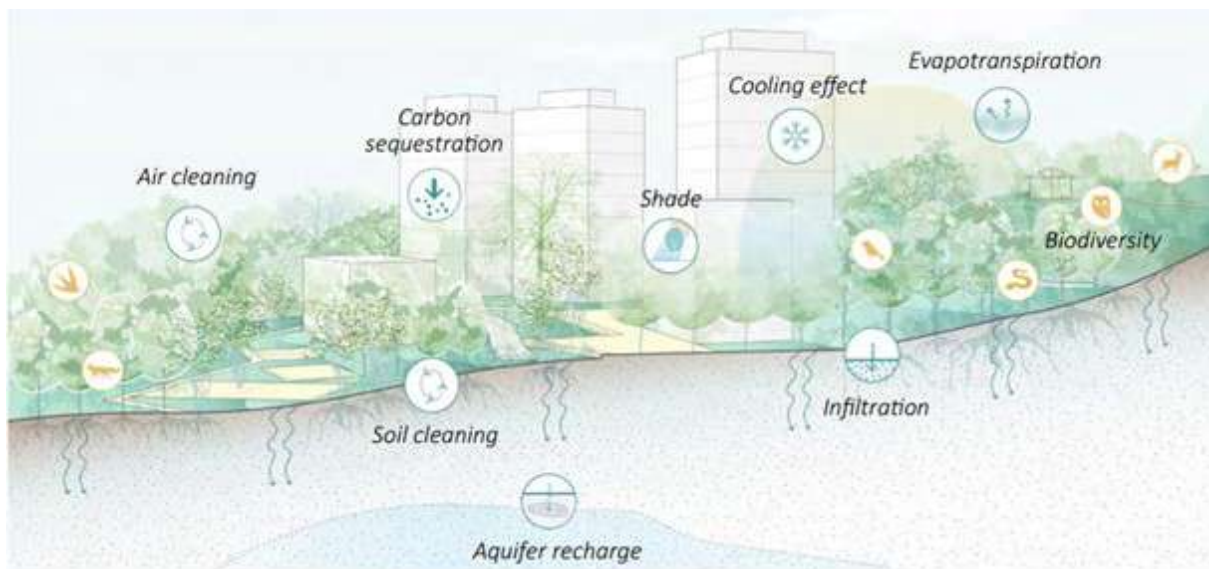


Figure 19 : Les co-bénéfices associés aux SfN. Source : World Bank, 2021.



II. Les SfN et l'Adaptation : Le Sand Motor à la Haye (Pays-Bas)

1. Le moteur de sable et l'adaptation

1.1. Généralités

Le « Sand Motor » (« Moteur de sable ») est une péninsule en forme d'hameçon qui est artificiellement créée sur la côte près de La Haye aux Pays-Bas afin de protéger la ville et sa côte sur le long terme (**Figure 20**). Projet débuté en 2011, il s'agit d'une péninsule de 128 hectares pour laquelle 21,5 millions de m³ de sable ont été placés. Le projet a coûté plus de 4 000 000 €. Non seulement le « moteur de sable » offre une protection côtière, mais il permet également de nouvelles formes de loisirs et soutient la biodiversité, car il crée un habitat et permet à plus d'espèces de vivre dans la région. Le Sand Motor est un projet pilote unique en matière de gestion côtière et suit le principe de « Solution Fondée sur la Nature ». (Deltares, 2016)



Figure 20 : Localisation du «Sand Motor» à La Haye, aux Pays-Bas (Deltares)

Le projet présente de nombreux objectifs, dont le principal est de protéger les écosystèmes côtiers pour prévenir l'érosion et la pollution côtière. Plus précisément, il souhaite restaurer les milieux humides et/ou les écosystèmes côtiers pour dissiper les effets des inondations et/ou des tempêtes. De manière globale, la création de cette péninsule artificielle permet de protéger la ville de l'élévation du niveau de la mer, en contribuant à une protection côtière durable qui favorise la biodiversité. En effet, en raison des eaux peu profondes, de nouvelles espèces peu communes le long de la côte néerlandaise peuvent apparaître sur et autour du moteur de sable, tout comme de la végétation et de nouveaux habitats pour les espèces. Le moteur de sable est par ailleurs accessible au public et permet des activités récréatives comme la randonnée et le surf. Ce projet porte des intérêts à l'innovation en matière de gestion côtière au moyen de recherches et de rapports publics sur les résultats. Cette Solution fondée sur la Nature a également pour objectif de sécuriser la qualité de la réserve naturelle Natura 2000 dans les dunes situées à proximité qui pourraient être affectées par les développements. (Rebel, 2021)

Le projet a été mis en œuvre en réponse à une politique ou une stratégie nationale. Dans le Plan National de l'Eau, la Loi sur l'Eau et la Stratégie Nationale pour l'Infrastructure et l'Aménagement du Territoire, les objectifs de maintien durable de la protection contre les inondations en mer sont précisés. Le moteur de sable s'inscrit dans la stratégie de gestion côtière durable, car il contribuera à la protection côtière à long terme. Les politiques nationales précisent également que le ministère de l'Infrastructure et de l'Environnement du pays est responsable de la gestion côtière. En raison de la stratégie nationale, le ministère est toujours à la recherche d'une gestion côtière plus efficace et plus durable, d'autant plus que la protection côtière augmente les coûts liés à l'augmentation du niveau de la mer. (Rijkswaterstaat, 2021)

Nous allons mener une analyse de ce projet afin de déterminer si les objectifs énoncés sont atteints, notamment en s'assurant que les résultats obtenus concordent avec les attentes de l'utilisation d'une Solution fondée sur la Nature. Après une présentation détaillée reprenant les différents points du projet, nous chercherons à savoir si les bénéfices environnementaux sont réels, et si cet aménagement permet une réelle adaptation de la ville de la Haye au changement climatique.

1.2. Les objectifs

Le Sand Motor (**Figure 21**) est un projet pilote pour une approche innovante de la protection côtière et de l'entretien du littoral qui consiste à utiliser la nature pour fournir une protection contre la mer et de créer une zone temporaire pour la nature et les activités de loisirs. Le vent, les vagues et les courants répandent le sable du Sand Motor le long de la côte de Delfland, créant une protection supplémentaire contre la mer.



Figure 21 : Le "Sand Motor" (Deltares)

Les trois objectifs suivants ont été formulés pour le moteur de sable :

- L'encouragement de la croissance naturelle des dunes sur la côte de Delfland entre Hook of Holland et Scheveningen. Cette croissance des dunes profitera à la protection côtière, à la nature et aux activités de loisirs.

- Le développement des connaissances et l'innovation dans le but de déterminer dans quelle mesure l'entretien du littoral et la valeur ajoutée pour les loisirs et la nature peuvent être réalisés conjointement.
- Créer une zone de loisirs et de nature attrayante sur la côte de Delfland.

Le quatrième objectif à évaluer est "la bonne gestion du moteur de sable et de la zone environnante". Cet objectif concerne principalement la sécurité des touristes et l'assurance que le moteur de sable n'a pas d'effets indésirables sur les valeurs écologiques existantes. (Rebel, 2021)

Afin de déterminer si les quatre objectifs mentionnés ici ont été atteints et afin de rendre possible le développement des connaissances, un plan de suivi et d'évaluation a été élaboré pendant la préparation du moteur de sable. Il énonce trois objectifs de surveillance :

- Recherche visant à déterminer si les objectifs énoncés ont été atteints.
- Collecte d'informations suffisamment précises pour que le moteur de sable puisse être géré correctement.
- Respect des conditions d'autorisation relatives à la fourniture des données de surveillance.

Des programmes de surveillance ont été élaborés pour les thèmes suivants :

- Conditions météorologiques et marines générales et hydrodynamique
- Morphologie de la plage et de l'estran
- Écologie des plages et de l'estran
- Nature et dunes
- Loisirs
- Eaux souterraines

1.3. La politique néerlandaise

Le projet est au cœur de la politique et de la gestion côtières néerlandaises. Cette politique est énoncée dans le Plan National de l'Eau, la Loi sur l'Eau et dans la Stratégie Nationale pour l'Infrastructure et l'Aménagement du Territoire. Le principal objectif de la politique côtière nationale est le maintien durable de la protection de l'arrière-pays contre les inondations en mer. Il comprend trois lignes qui visent chacune à maintenir les niveaux de sécurité dans l'arrière-pays à différentes échelles de temps :

- Maintenir des défenses afin de faire face aux niveaux d'eau élevés et aux vagues pendant les tempêtes ;
- Maintenir le littoral ;
- Préserver l'équilibre de la fondation côtière dans le contexte de l'élévation relative du niveau de la mer.

Barrages, digues et dunes sur la côte protègent l'arrière-pays des inondations. Pour ce qui est de la côte sablonneuse, il faut qu'il y ait suffisamment de sable dans les dunes primaires de défense maritime, et les défenses sont évaluées tous les six ans. Des mesures sont prises lorsque les digues ou les dunes ne respectent pas les exigences de sécurité. Le principe directeur est que ces interventions doivent impliquer l'utilisation de sable autant que possible et des infrastructures dures aussi peu que possible. (Rijkswaterstaat, 2021)

1.4. Les premières tendances

La côte néerlandaise est faite de sédiments, en particulier de sable, mais aussi d'argile et de tourbe par endroits. L'accrétion ou l'érosion de la côte est déterminée par l'équilibre entre la quantité de sédiments disponibles dans la zone côtière (l'approvisionnement) et la quantité de sable nécessaire pour maintenir l'équilibre du système (la demande). Cette « demande » dépend des changements du niveau de la mer et des endroits où le sable peut se déposer. Si l'offre de sédiments dépasse la demande, l'accrétion côtière en sera le résultat : les bancs de sable s'étendront et la côte se déplacera vers le large. Si moins de sable est disponible, le littoral, les deltas à marée descendante, les hauts-fonds de sable et/ou les ravins s'éroderont. En outre, presque aucun sable supplémentaire n'est apporté de la mer à la côte parce que l'élévation du niveau de la mer signifie que le fond marin est devenu plus profond. Le système côtier sablonneux perd donc des sédiments en équilibre lorsqu'il y a une élévation relative du niveau de la mer, de sorte que la tendance naturelle est à l'érosion du littoral. (Deltares, 2016)

L'alimentation par le sable est un moyen important de mettre en œuvre la politique côtière. Le sable provient des zones les plus profondes de la mer du Nord. Le vent, les vagues et la marée répandent ensuite le sable sur la fondation côtière. Le sable qui dérive de la plage aux dunes aide à protéger la fonction des dunes comme défenses de la mer. Un système sablonneux robuste est donc une base stable pour les défenses hydriques à long terme. Au départ, les opérations d'alimentation en sable consistaient à déposer du sable directement sur la plage. Au fil du temps, le sable s'est déposé de plus en plus sous l'eau sur l'estran. Cette approche est beaucoup moins coûteuse car elle permet aux forces naturelles (les vagues et les courants) de répandre le sable dans la direction de la plage. (Deltares, 2016)

2. Le moteur de sable pour la protection côtière

2.1. Les attentes

Il est prévu que le Sand Motor, en raison de la plus grande quantité de sable qu'il contient, améliorera la protection de la côte entre Hook of Holland et Scheveningen (**Figure 22**). On suppose également qu'au cours des vingt prochaines années, il faudra moins de sable pour maintenir le littoral de base sur cette partie de la côte. Il a été calculé que le volume de sable dans le moteur de sable et la reconstitution supplémentaire de l'estran seront suffisants pour maintenir le bilan de sable dans la fondation côtière de la côte de Delfland pendant environ 50 ans, en supposant une élévation moyenne du niveau de la mer de 3 mm par an. Les calculs du modèle ont indiqué que la tête du moteur de sable serait particulièrement dynamique et sujette à l'érosion dans les premières années après la construction, et que le sable se déplacerait dans la direction de la côte. Les calculs indiquent que la section du crochet qui est attachée à la côte au moment de la construction sera probablement encore visible après une période de dix ans. À long terme, on s'attend à ce qu'un littoral plus ou moins rectiligne émerge. (Rebel, 2021)



Figure 22 : Les différentes parties du Sand Motor après réalisation (Deltares)

2.2. Les développements réels

Depuis la construction du Sand Motor en 2011, le sable s'est répandu le long de la côte. L'accrétion côtière a été observée au sud et au nord du moteur de sable. L'épandage du sable a entraîné un changement dans la forme du moteur de sable : d'une forme de cloche presque symétrique dans une forme plus triangulaire avec des formes d'arc concave dans la côte. Après 10 ans, la largeur du corps de sable a diminué de moitié (500 mètres de moins), et sa longueur a doublé (2,5 kilomètres plus long) (**Figure 23**).

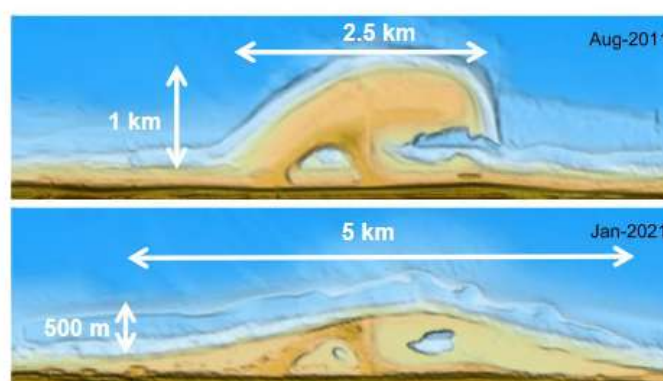


Figure 23 : Développement du moteur de sable entre 2011 et 2021 (Deltares)

La forme a le plus changé dans les deux premières années après la construction. Les conditions les plus dynamiques se trouvaient du côté nord, là où se trouvent la lagune et le chenal. Depuis la construction du moteur de sable, diverses formations temporaires ont été créées, comme la « flèche de sable », le chenal, la plaine littorale du côté sud du moteur de sable et toutes sortes de motifs de bancs de sable (**Figure 24**). (Deltares, 2021)



Figure 24 : Photos aériennes en 2011 (gauche) et 2015 (droite) (Deltares)

- **Flèche de sable**

La flèche de sable est un haut-fond de sable allongé qui a commencé à se former à la pointe du moteur de sable pendant la construction (**Figure 25**). Cette forme est caractéristique d'une côte en expansion rapide. Fin 2015, la flèche de sable mesurait environ 2,5 kilomètres de long et 350 mètres de large.

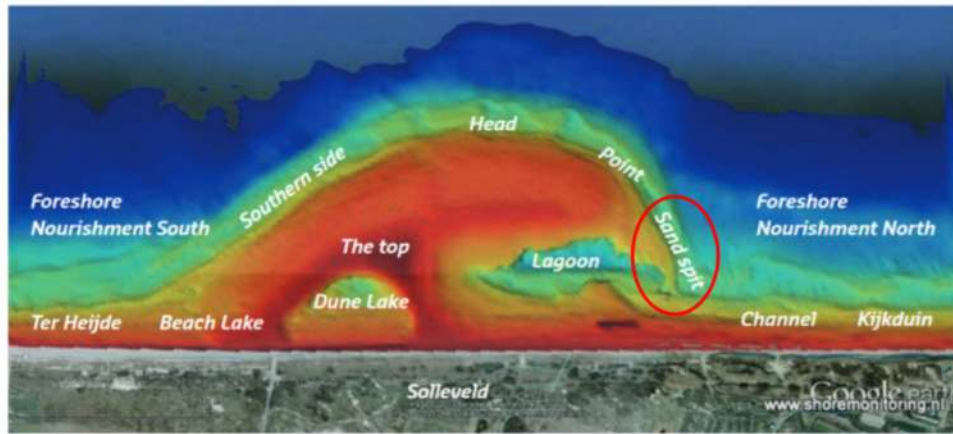


Figure 25 : La flèche de sable ("Sand spit") (Deltares)

- **Canal**

L'extension de la flèche de sable a donné lieu à un canal reliant la mer du Nord à la lagune (**Figure 26**). Au cours des premières années suivant la construction, ce chenal était étroit, profond et assez court. L'eau s'écoulait relativement rapidement. À mesure que la flèche de sable s'étendait, le chenal devenait plus long, passant de 1,2 kilomètre en avril 2012 à 2,7 kilomètres fin 2015. Le chenal a commencé à serpenter et il est devenu de plus en plus peu profond. Les vitesses d'écoulement ont également diminué et l'amplitude de la marée dans la lagune a diminué.



Figure 26 : Canal reliant la mer à la lagune (Deltares)

- **Lac de dunes et lagune**

De grandes quantités de sable dérivent dans le lac de dunes, rendant la situation dynamique. À une certaine distance de la ligne de flottaison, on a observé un ruban de végétation peu abondant. Une végétation abondante est maintenant présente dans le lac de dunes lui-même. La lagune est également devenue de plus en plus petite depuis sa construction en 2011. Contrairement au lac dunaire, tout le sable n'a pas été déposé par le vent, une partie est entrée dans la lagune par le canal.

- **Plaine de plage et ruisseaux**

De grandes quantités de sable ont été déposées dans la partie sud de la zone de surveillance. Peu après la construction, cet angle a été abrité par des bancs de sable (zones peu profondes créées par l'action des vagues) qui se sont étendus dans une direction vers la terre au fil du temps. Il en a résulté la création d'une large plaine de plage drainée par des chenaux peu profonds (ruisseaux).

- **Falaises**

La partie centrale du moteur de sable est sujette à l'érosion. Un niveau maximal d'érosion d'environ 350 mètres a été observé à la tête du moteur de sable au cours des quatre premières années. Le sable est érodé sur le côté de la mer du moteur de sable de manière à former des falaises. Le sable retiré de la tête du moteur de sable est transporté plus loin le long de la côte dans une direction nord ou sud par les courants. Cela a entraîné la formation d'un certain nombre de larges bancs de sable perpendiculairement au littoral.

- **Bancs de sable**

Des bancs de sable se sont formés du côté nord du moteur de sable. Après une tempête en 2013, les bancs irréguliers ont été aplanis, ce qui a donné lieu à un banc de sable allongé et pratiquement uniforme le long de la côte. De nouvelles dunes primaires ont également été formées, couvrant une superficie totale d'environ un hectare. (Deltares, 2021)

2.3. L'évolution des stocks de sable

Les volumes de sable et leur emplacement autour du moteur sont surveillés de près. Les mesures montrent que la zone de surveillance contient encore, en comparaison avec la situation antérieure à la construction du moteur à sable, une quantité supplémentaire de sable équivalant à environ 95 % du volume de sable apporté par le moteur de sable. La côte de Delfland est un « système ouvert » dans lequel le sable est échangé avec les zones adjacentes. Un courant dominant transporte le sable le long de la côte vers le nord. La plupart des 5 % du volume de sable qui n'est plus présent dans la zone de surveillance se trouve probablement juste à l'extérieur, dans les dunes et dans les eaux plus profondes (Figure 27).

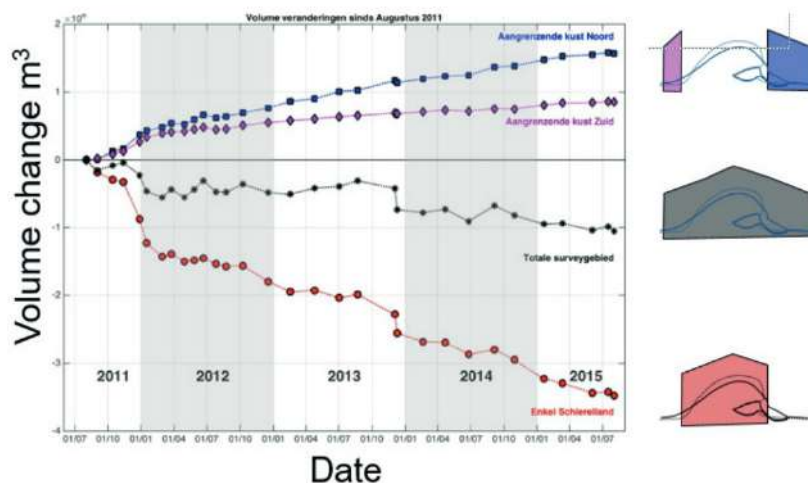


Figure 27 : Évolution des volumes de sable lors des 4 premières années (Deltares)

Il y a donc eu une légère augmentation de la quantité de sable dans les eaux plus profondes autour du moteur de sable (à l'extérieur de la zone de surveillance). Ici aussi, ce sable fait partie de la fondation côtière et il contribuera, à long terme, à contrer l'érosion.

Les dunes ne reculent pas, car le sable est redistribué sur la partie supérieure de la plage. Le volume de dunes lui-même augmente, mais pas aussi rapidement qu'avant la construction du moteur de sable. Il est raisonnable de s'attendre à ce que le sable du moteur de sable se propagera plus au long de la côte dans les années à venir (**Figure 28**). (Rebel, 2021)

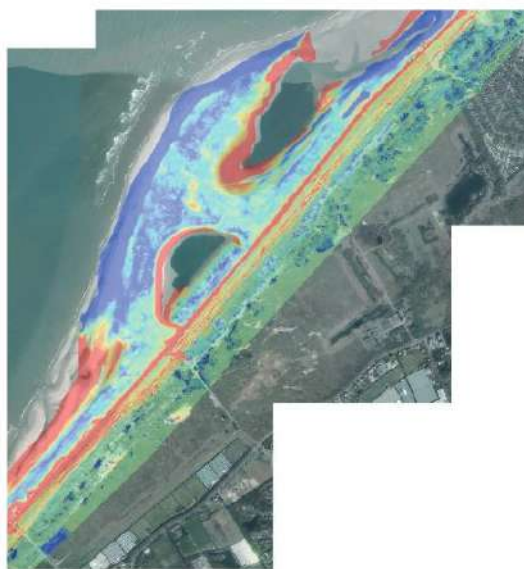


Figure 28 : Différences d'altitude entre 2011 et 2015 (rouge = accrétion / bleu = érosion)
(Deltares)

2.4. L'impact à long terme

L'ensemble de données de quatre ans est relativement court pour décrire l'impact du moteur de sable sur la protection côtière à long terme. Il n'est possible de tirer des conclusions que sur l'effet initial du renforcement côtier et du moteur de sable. Les résultats obtenus jusqu'alors indiquent que la protection côtière a eu un bénéfice dans un premier temps, en particulier à proximité du moteur à sable. Ce n'est pas surprenant puisque beaucoup plus de sable a été déposé que ce qui aurait été nécessaire pour les opérations d'alimentation standard au cours des quatre années. D'autre part, il est également évident que, sur une période de vingt ans (la durée de vie du moteur de sable prévu initialement), il aurait fallu moins de sable au total pour maintenir le littoral de base en utilisant des approches de gestion normalisées que ce qui a été utilisé pour la construction du moteur de sable. Dans l'approche standard, le sable aurait été déposé exactement au bon moment et au bon endroit. Cependant, le volume supplémentaire utilisé pour le moteur de sable contribue, dans l'ensemble, à l'entretien de la fondation côtière. (Deltares, 2016)

3. Le moteur de sable pour la nature

3.1. Les attentes

La zone côtière abrite un grand nombre de variétés végétales et animales. L'un des objectifs du moteur de sable était de créer un nouvel espace attrayant pour ces plantes et animaux sous la forme d'un nouveau tronçon de côte dynamique (**Figure 29**). En raison de l'élimination des mesures de contrôle, les vagues, les courants et le vent sont laissés libres de répandre l'excès de sable et d'établir une nouvelle nature dans la mer peu profonde, sur la plage et dans les dunes. La biodiversité de la zone côtière peu profonde (l'estran) et de la plage intertidale dépend dans une large mesure de facteurs tels que l'abondance alimentaire, les niveaux de dynamisme (morphologie du lit, vitesses d'écoulement) et la composition des sédiments. Les principales espèces présentes dans cette zone sont le benthos, les poissons, les oiseaux et les mammifères. Ces groupes sont liés par la chaîne alimentaire. Par conséquent, tout effet sur le benthos affectera également d'autres espèces. Sur la plage sèche, l'habitat de la flore et de la faune est déterminé par la dynamique locale (en particulier la dispersion du vent, les dépôts de sable et les inondations périodiques), la bathymétrie, le bilan hydrique du sol, la salinité, l'abondance de nourriture et les activités humaines. L'herbe est maintenue en bon état par la dérive du sable et cela lui permet de capturer encore plus de sable.



Figure 29 : Un espace attrayant pour de nombreuses espèces (Deltares)

Lorsque le moteur de sable a été construit, on s'attendait à ce qu'il y ait une augmentation de la variation de l'habitat en raison de la plus grande variation de la dynamique et de la composition des sédiments, ce qui donnerait lieu à un plus large éventail d'espèces. Pour le benthos, on s'attendait à ce que la construction du moteur de sable crée plus de possibilités pour les espèces qui vivent plus longtemps parce que l'alimentation en sable tous les 3 à 5 ans ne serait plus nécessaire. Le benthos est enfoui à plusieurs reprises sous une couche de sédiments pendant les opérations habituelles d'alimentation de l'estran et des plages. Le benthos de l'estran dynamique s'est, en principe, déjà adapté à ce processus de couverture par une mince couche de sable résultant du transport de sable près de la côte. En outre, on s'attendait à ce que la morphologie de l'estran et l'emplacement abrité de la lagune aient une incidence positive sur la population et le développement des poissons juvéniles. On s'attendait également à ce que la lagune attire les échassiers et les oiseaux de mer, et qu'elle soit un lieu d'alimentation et de repos attrayant pour les mammifères marins. (Rijkswaterstaat, 2021)

3.2. Les développements réels

Il est apparu que le moteur de sable affecte le classement des sédiments, ce qui a entraîné une plus grande variation de la composition du lit. Par exemple, des zones où les sédiments sont relativement fins ont été créées dans l'estran plus profond juste au nord et au sud du Sand Motor. Le sable d'une variété beaucoup plus grossière se trouve sur la tête du moteur de sable. Dans la lagune, les sédiments relativement fins prédominent, ce qui est différent des matériaux trouvés sur la plage. Les bords de la lagune ressemblent à des vasières et sont riches en benthos et en oiseaux fourragers. (Deltares, 2021)

- **Benthos et juvéniles**

Les communautés benthiques sont très variées, et la composition change d'année en année. Le facteur dominant qui détermine la composition de la communauté est la profondeur de l'eau. Comme les sédiments autour du moteur de sable varient en fonction de la taille des grains, il y a des tendances locales dans la communauté benthique. Les zones avec des sédiments relativement fins juste au nord et au sud du moteur de sable sont relativement riches en espèces et elles ont une biomasse élevée. Le benthos est relativement rare sur le moteur de sable lui-même, où le sable est plus grossier. Rien n'indique que la zone au nord du Sand Motor, où une partie du sable du Sand Motor est déposée, se développe différemment dans son ensemble des zones comparables de la côte. Immédiatement après la construction du moteur de sable, un grand nombre de benthos étaient présents dans les eaux plus profondes de la lagune (**Figure 30**). Par la suite, il y a eu des problèmes de niveau d'oxygène, très probablement à cause de l'accumulation de matière organique et des échanges limités d'eau avec la mer du Nord.



Figure 30 : Des coquillages retrouvés aux abords du lagon (Deltares)

- **Oiseaux**

Entre 2011 et 2015, près de quarante espèces d'oiseaux ont été observées sur et autour du moteur de sable (**Figure 31**). La répartition du nombre d'individus pour chaque espèce varie énormément. Le goéland à tête noire est de loin l'espèce la plus nombreuse. D'autres variétés de goélands, comme le goéland commun et le goéland argenté, représentent une proportion relativement importante des oiseaux observés. De plus, le grèbe et le grand cormoran ont été observés fréquemment. Cinq espèces d'échassiers ont été observées. Cependant, les chiffres sont relativement faibles, à l'exception de l'huître. On trouve davantage de bécasseaux sanderlings et de barges à queue barrée dans la partie centrale du moteur de sable, qui se compose principalement de plages, que dans des zones comparables. Compte tenu du nombre d'oiseaux observés dans la lagune, on soupçonne que la lagune constitue un habitat convenable pour environ treize espèces d'oiseaux, en particulier les échassiers, quelques espèces de mouettes et le grand cormoran. Le plus grand nombre d'espèces d'oiseaux est observé au-dessus de la mer. Les plages et la mer

sont importantes pour un bon nombre d'espèces, alors qu'il n'y a que quelques espèces qui sont principalement observées sur les plages. Pratiquement aucun oiseau n'a été observé dans le lac de dunes. Jusqu'à présent, aucun oiseau n'a été observé nichant sur le moteur de sable. Il semble que le Pluvier annelé et le Pluvier kent aient tenté de se reproduire ici. En tant que biotope, le Sand Motor semble convenir aux oiseaux nicheurs côtiers. Il semble également y avoir des aires de nidification convenables pour l'huîtrier, la sterne pierregarin et la sterne naine. On peut supposer que l'utilisation relativement intensive de la zone par différents groupes de visiteurs et le nombre élevé de chiens sont les principales raisons de l'absence virtuelle de ces oiseaux nicheurs côtiers, qui sont facilement perturbés.



Figure 31 : *De nombreuses espèces d'oiseaux sont présentes (Deltares)*

- **Mammifères marins**

Étant donné que peu de dénombrements ont été effectués et que peu de mammifères marins ont été observés, aucune conclusion ne peut être tirée au sujet de l'effet du moteur de sable sur le phoque commun, le phoque gris et le marsouin commun dans la région. Il semble évident que le Sand Motor est à peine utilisé par les phoques pendant la journée, en raison des visiteurs de loisirs.

- **Végétation**

Le corps du moteur de sable se compose principalement de plages larges, relativement plates et très dynamiques. La plage intertidale autour du lac dunaire est passée de moins d'un hectare en 2011 à plus de 5 hectares en 2014. La propagation du moteur de sable au nord et au sud a principalement donné lieu à des plages intertidales. Il est apparu que le développement de petites dunes dans les sections nord et centrale du moteur de sable est principalement associé à la croissance de l'herbe de Marram ; dans la section sud, il dépend principalement de couches de sable. Les graminées peuvent germer sur la plage. Dès que les petites dunes commencent à augmenter en taille, l'herbier marin est presque toujours la variété dominante. Les feuilles rigides capturent beaucoup de sable, et leurs rhizomes verticaux et horizontaux leur permettent de se propager rapidement. Le sol sec et pauvre, le vent de mer salé et la dérive intense du sable en font un environnement extrême pour les plantes. La végétation est lente à s'installer ici. Les plantes qui parviennent à croître sont souvent espacées et, au mieux, se traduisent par des parcelles de végétation clairsemées (**Figure 32**). En raison de l'environnement très dynamique, une partie de cette végétation disparaît à nouveau en un ou deux ans. Ce n'est que sur le bord terrestre élevé du moteur de sable qu'il y a maintenant des zones de végétation plus stables et plus denses avec l'herbe de Marram. (Deltares, 2021)



Figure 32 : Une végétation clairsemée typique des plages (Deltares)

4. Le moteur de sable pour les loisirs

4.1. Les attentes

Beaucoup de Néerlandais apprécient les paysages ouverts de plage et de dunes, et aiment aller sur la côte. Compte tenu de cela, la Province de Hollande-Méridionale était, depuis un certain temps, à la recherche d'opportunités pour créer une nouvelle zone attrayante sur la côte. On s'attendait à ce que la construction du moteur de sable crée plus d'espace pour les activités de loisirs (**Figure 33**). (Rebel, 2021)



Figure 33 : Une zone dynamique pour des activités de loisirs (Deltares)

4.2. Les développements réels

Les enquêtes sur les loisirs ont montré que les quatre principaux groupes de loisirs sont les baigneurs, les promeneurs de chiens, les randonneurs et les surfeurs (le lagon leur fournit à la fois le vent de mer nécessaire et des conditions de vagues légèrement plus sûres et plus calmes). Avec une grande gamme d'activités de plein air telles que l'équitation, la pêche et la course, il y a maintenant plus de types d'activités de loisirs que précédemment sur la plage (**Figure 34**). Des recensements et des enquêtes récentes ont montré que la plupart des activités de loisirs sont situées sur les bords du moteur de sable. La moitié des gens restent sur la plage d'origine. Les enquêtes ont montré que les visiteurs sont de plus en plus familiers avec les différents aspects du moteur de sable. Pendant et immédiatement après la construction, les attitudes étaient légèrement critiques. Un groupe de plus en plus nombreux approuve désormais le moteur de sable et le projet bénéficie d'un large soutien. (Deltares, 2021)



Figure 34 : Le Sand Motor offre de nouvelles possibilités d'activités (Deltares)

5. La gestion du moteur de sable

Le moteur de sable est situé sur une zone Natura 2000. Les zones de ce type sont strictement protégées, non seulement contre les interventions dans les zones elles-mêmes, mais aussi contre les facteurs externes indésirables. Une évaluation appropriée a donc été faite avant la construction du moteur de sable pour identifier tout effet possible. Il a été conclu que le moteur de sable n'aurait pas d'impact significatif sur la nature protégée (« objectifs de conservation ») si la gestion dans les dunes extérieures était intensifiée. Le permis de construction du moteur à sable comprenait l'exigence qu'il y ait une surveillance efficace des effets possibles. (Rijkswaterstaat, 2021)

5.1. Dépôts et projections de sable

La construction du moteur de sable a conduit à la formation d'un grand sable plat qui a été soumis à l'effet du vent. Si tant de sable commence à dériver et que de grandes zones de sable sont créées, cela est considéré comme indésirable car ces emplacements ne peuvent être attribués à aucun type d'habitat. En plus du moteur de sable, il y a plusieurs facteurs qui influent sur la dynamique du sable dans cette zone, tels que le renforcement côtier, la plantation annuelle de l'herbe de Marram et le pâturage dans la partie des dunes bordant la mer avant le renforcement.

Concernant les habitats, les résultats suivants ont été observés :

- La dynamique du sable juste à l'extérieur du Sand Motor a considérablement augmenté. Beaucoup de sable dérive vers la terre depuis le moteur de sable jusqu'au renfort côtier. En conséquence, des formes de dunes plus naturelles, avec des zones dénudées et beaucoup de fougères, ont été créées sur le profil artificiel du renfort côtier.
- La zone située plus au nord est devenue moins dynamique depuis la construction du moteur de sable. Il y a moins de zones et d'emplacements dénudés avec des niveaux élevés de dépôts de sable. Ce déclin de la dynamique du sable est probablement attribuable au renforcement côtier plutôt qu'au moteur de sable. La

dynamique de déclin est partiellement compensée par des interventions de gestion, en particulier pour prévenir l'empiétement par les arbustes.

- Les dunes situées encore plus loin vers la terre ne sont, comme auparavant, pas particulièrement dynamiques. De façon générale, la zone continue de se stabiliser. Cela n'est probablement attribuable ni au moteur de sable ni au renforcement côtier.

Des mesures avec des jauges de sable ont montré que le sable dérive vers l'intérieur lorsqu'il y a des vents forts en particulier. Depuis la construction du moteur de sable, la quantité de sable qui dérive vers les dunes extérieures a légèrement augmenté chaque année. En termes absolus, cependant, la quantité de sable qui dérive dans la zone intérieure est limitée. (Rebel, 2021)

5.2. Brouillard salin

Le brouillard salin est le processus par lequel le vent transporte les particules de sel vers les dunes extérieures. Ces particules interfèrent avec le développement des arbustes. Les embruns salins sont donc importants pour préserver certains types d'habitat. Sans épandage de sel, une végétation buissonnante moins tolérante au sel peut se développer au profit des plantes caractéristiques des prairies dunaires appartenant à ce type d'habitat. Des mesures ont montré que les embruns salins dans la dune extérieure étaient déjà relativement faibles avant la construction par rapport à d'autres sites de surveillance sur la côte néerlandaise. Il est également apparu que le Sand Motor a eu un impact significatif sur les embruns salins. Aucune conclusion ne peut encore être tirée quant à la mesure dans laquelle cela a un effet négatif sur la végétation. Il est possible que la réduction des embruns salins dans les dunes à la suite de la construction du Sand Motor soit déjà en baisse, car le Sand Motor a déjà été érodé du côté de la mer. (Deltares, 2016)

5.3. Changements dans la végétation et les oiseaux

- **Végétation**

Entre 2011 et 2015, il n'y a eu pratiquement aucun changement dans l'habitat au niveau des dunes extérieures à une distance relativement courte du moteur de sable. Certains changements sont apparents à des endroits plus intérieurs. Il s'agit de changements dans les types d'habitats ayant une végétation étroitement apparentée. Les habitats peuvent donc être constitués de toutes sortes de formes transitoires et des changements relativement mineurs dans la composition des espèces peuvent entraîner des classifications différentes. La qualité des habitats n'a pas changé de façon évidente. On ne sait pas encore si la superficie totale des habitats protégés a changé. C'est pourquoi le développement de la végétation est suivi par l'analyse de photos aériennes.

- **Oiseaux nicheurs**

De nombreux oiseaux rares qui sont caractéristiques des dunes ouvertes, des lacs dunaires et des marais dunaires, se reproduisent dans les dunes (**Figure 35**). La construction du moteur de sable pourrait affecter la population d'oiseaux nicheurs en provoquant des changements dans la végétation. Les résultats de la surveillance des oiseaux nicheurs en

2010-2013 montrent que les changements dans le nombre de certaines espèces diffèrent des tendances nationales. Certaines espèces font mieux que la tendance nationale, d'autres font pire. Le moteur de sable ne semble pas avoir un effet négatif ici. Le nombre de grands cormorans augmente considérablement dans les dunes centrales. Ces oiseaux se nourrissent en mer et utilisent le moteur de sable pour se reposer et sécher leurs ailes. L'augmentation des effectifs peut être attribuable à la construction du moteur de sable, mais l'espèce prospère également dans d'autres zones dunaires. (Deltares, 2021)



Figure 35 : Des espèces rares se trouvent sur le Sand Motor (Deltares)

5.4. Mouillage dû à une élévation du niveau des eaux souterraines

Beaucoup de précipitations qui tombent sur le moteur de sable traversent le sable en direction des eaux souterraines. L'eau douce est plus légère que les eaux souterraines salines, ce qui donne une lentille d'eau de pluie douce qui flotte sur les eaux souterraines salines. Si cette lentille d'eau douce s'épaissit, le niveau des eaux souterraines augmentera. Généralement, cela se produit dans toutes les zones dunaires et les plages adjacentes. Le moteur de sable produit une plus grande zone où une lentille d'eau douce peut se former et modifie les débits dans les eaux souterraines. Cela peut entraîner des risques pour les stocks d'eau potable. Par conséquent, peu après la construction du Sand Motor, des puits d'extraction d'eau ont été installés dans la nouvelle rangée de dunes du renfort côtier de 2010. Les changements peuvent entraîner une élévation de la nappe phréatique, le sol peut donc devenir humide dans des emplacements relativement bas, ce qui peut avoir une incidence sur la végétation dans ces emplacements, notamment la présence d'habitats protégés dans des conditions sèches. La végétation est donc surveillée à quatre endroits qui pourraient être sensibles à ce processus. Cette surveillance a montré qu'il n'y a eu aucun changement dans le nombre d'espèces indiquant des changements dans les conditions sèches et humides entre 2012 et 2015. Cependant, on ne peut pas encore conclure qu'il n'y aura pas d'effets à long terme. (Rebel, 2021)

6. Le moteur de sable : connaissance et innovation

Il existe aux Pays-Bas une interaction considérable entre la recherche, la gestion des côtes et la politique côtière. Cela peut être constaté, par exemple, dans l'utilisation des résultats de recherche pour optimiser les volumes et la conception des opérations d'alimentation en sable. Le Sand Motor s'inscrit dans cette tradition puisqu'il est associé à un vaste programme de développement des connaissances à long terme. Il s'est avéré être un "laboratoire" unique pour l'entretien de la côte. Les principaux domaines de recherche sont le développement morphologique de la plage, le transport du sable par le vent, l'écologie de la mer peu profonde et la zone de surf, et les effets écologiques des principales opérations d'alimentation. (Rijkswaterstaat, 2021)

6.1. Application des connaissances

Le moteur de sable génère de grandes quantités de connaissances qui peuvent être utilisées dans la gestion du littoral néerlandais. En particulier, d'importants progrès ont été réalisés en ce qui concerne la compréhension des méga opérations d'alimentation et des effets des opérations d'alimentation sur l'écologie et le développement des dunes. La surveillance étroite des effets du moteur de sable fait beaucoup apprendre sur la composition des sédiments et l'écologie. Les recherches sur les effets écologiques de l'alimentation en sable ont commencé relativement récemment. Le moteur de sable a conduit à l'établissement de séries de données étendues et longues, et ces données peuvent être analysées et utilisées pour concevoir d'autres opérations d'alimentation. (Rijkswaterstaat, 2021)

6.2. Innovation à l'international

L'approche néerlandaise de l'entretien du littoral a une réputation internationale et est donc un produit d'exportation important. De ce point de vue, le moteur de sable présente un intérêt national et international considérable. Le projet pilote de Sand Motor visait également à donner aux entreprises et aux instituts de recherche la possibilité d'acquérir des connaissances et de l'expérience dans le domaine de l'entretien innovant du littoral. «Building with Nature», sur lequel est basé le moteur de sable, est une priorité pour le secteur du génie hydraulique, et il est propagé par Ecoshape, un effort conjoint impliquant des entreprises de dragage et d'ingénierie, le secteur de la connaissance et le gouvernement. Le secteur du génie hydraulique peut utiliser le moteur de sable comme un cas pour démontrer à l'étranger que le génie hydraulique et l'écologie peuvent aller de pair au profit de la protection côtière, du développement économique et de l'environnement de vie. Il y a plusieurs endroits en dehors des Pays-Bas où des solutions comme le Sand Motor sont envisagées, à la fois en Europe (Suède, Royaume-Uni, Belgique) et ailleurs (États-Unis, Mexique). (Rebel, 2021)

7. Analyse bilan

La **figure 36** présente l'ensemble des services écosystémiques rendus par le Sand Motor.

Services écosystémiques		Fonctions/Processus écologiques associés
Régulation	Climat	- Adaptation au changement climatique - Renforcement de la capacité à confronter les risques naturels
	Côtes	- Amélioration de la protection côtière (renforcement côtier) - Auto-entretien - Amélioration de la qualité du sol
	Inondations	- Protection contre l'élévation du niveau de la mer - Protection contre les inondations (dispersion de la houle)
	Infiltrations	- Absorption des précipitations vers les eaux souterraines - Amélioration de la qualité de l'eau
Approvisionnement	Espace vert	- Augmentation de la superficie d'espaces verts - Dynamique locale
	Alimentation	- Capture d'une grande quantité de sable - Sédiments fins et riches en nutriments - Chaîne alimentaire
Support	Biodiversité	Habitats : → Nouvelle diversité d'habitats → Protection et restauration naturelle des écosystèmes présents → Écotopes abrités Faune : → Augmentation du nombre d'espèces (diversité) → Lieu de reproduction et de repos → Nouvelles espèces rares Flore : → Augmentation du nombre d'espèces (diversité) → Renouvellement rapide → Présence de variétés en liste rouge
Culturel	Sensibilisation et éducation	- Recherche et expérimentations scientifiques - Apport de connaissances aux locaux - Découverte faune et flore - Prise de conscience accrue des NBS et de leurs bénéfices
	Récréation et activités de loisirs	- Attractivité touristique (aspect économique) - Offre d'activités et d'usages : baignade, balades, course, surf, équitation, pêche (aspect social)
	Aménités paysagères	Plaisir sensoriel et visuel d'espace naturel

Figure 36 : Services écosystémiques du Moteur de sable

Les services écosystémiques renvoient à la valeur des écosystèmes, qui fournissent des biens et services essentiels aux développements et au bien-être de l'humanité. Il est donc nécessaire de préserver la nature afin que les services rendus ne soient pas altérés ou dégradés. L'analyse globale des services écosystémiques rendus par le Sand Motor montre une certaine efficacité de cette solution fondée sur la Nature. En effet, ce projet offre de nombreuses fonctions écologiques dans chacune des catégories.

Le service de base à l'origine du Moteur de sable concerne le renforcement de la protection côtière afin de permettre une adaptation au changement climatique. Les premiers résultats ont prouvé la pertinence de ce service, et aucune dégradation de la côte ou inondation n'a été reportée. Le Sand Motor apporte quelques ressources de par sa dynamique locale et la richesse des sédiments. Ces ressources sont plutôt destinées aux animaux, à l'image des nutriments disponibles pour certaines espèces. Le service le plus important rendu par cet aménagement côtier concerne le support pour la biodiversité. En effet, il a été observé l'apparition de nouveaux habitats et donc la venue d'une nouvelle diversité d'espèces, dont certaines sont rares. Le lieu est idéal pour l'approvisionnement alimentaire et la reproduction de la faune, et le climat local favorise l'implantation naturelle d'une nouvelle flore sauvage. Enfin, d'un point de vue sociétal, ce projet a permis de nouvelles activités de loisirs pour de nombreuses personnes. Les usages ont évolué et cet espace est devenu beaucoup plus attractif et attrayant, notamment grâce au panorama visuel qu'il propose. Par ailleurs, le Sand Motor a mené à une sensibilisation de la population aux enjeux environnementaux actuels, et à la nécessité de préserver ces espaces naturels. Le lieu est également une base pour la recherche scientifique et une inspiration pour de nombreux pays.

Globalement, nous pouvons donc affirmer que les objectifs initiaux ont été atteints, les résultats obtenus concordent avec les attentes d'une Solution Fondée sur la Nature. Les bénéfices environnementaux sont nombreux et divers, et ils permettent avant tout une réelle adaptation au changement climatique.

Il est cependant nécessaire de rappeler qu'il subsiste tout de même certaines limites en lien avec cet aménagement côtier. Tout d'abord, les précipitations qui tombent sur le moteur de sable peuvent faire augmenter le niveau des eaux souterraines, entraînant un risque pour le stock d'eau potable. Certains emplacements peuvent devenir humides et avoir une incidence sur la végétation implantée mais également sur la sécurité des visiteurs. Concernant la sécurité justement, le lieu peut présenter certains dangers de par sa fonction primaire de protection de la côte. Il disperse les vagues et protège du vent, le rendant donc sujet à des phénomènes météorologiques importants. Il est alors nécessaire de mettre en place un programme de surveillance de la côte et de la baignade afin d'éviter de tels problèmes. Par ailleurs, l'attractivité du site devenant de plus en plus importante, les nouvelles espèces apparues pourraient être perturbées par l'activité humaine. Une régulation des activités et usages serait alors favorable afin d'éviter toute nuisance aux espèces. Pour finir, le suivi de l'évolution morphologique du moteur de sable semble montrer qu'il disparaît au cours du temps, ou plus précisément qu'il se fond avec un lissage sur la côte originelle. Ce constat donne à penser que cette Solution Fondée sur la Nature a un aspect éphémère. Il est alors nécessaire de se poser la question d'une solution durable, relativement difficile lorsqu'il s'agit de constructions anthropiques essayant d'imiter la Nature, qui finit toujours par reprendre ses droits. L'adaptation au changement climatique

doit donc rester une solution parallèle, car il est avant tout nécessaire de résoudre cet enjeu mondial à sa source.

Conclusion

Si les Solutions fondées sur la Nature s'avèrent être un puits de carbone efficace dans les milieux naturels, le rôle de la végétation urbaine dans l'atténuation du changement climatique divise la communauté scientifique. D'une part, les SfN et plus particulièrement la végétation permettent de retirer une partie du CO₂ présent dans l'atmosphère et contribue à éviter qu'une certaine quantité de GES ne soit émise. D'autre part, il apparaît clairement que la séquestration du carbone par la végétation au sein des villes ne peut pas, à elle-seule, atténuer efficacement le changement climatique. Dans le cas de l'atténuation, il est donc nécessaire de coupler la mise en œuvre de SfN à des mesures de réduction des émissions de GES. De telles mesures impliquent des politiques ambitieuses de réduction des émissions de GES dans les secteurs de l'énergie, des transports ou encore du bâtiment et un changement de nos modes de vie. Les SfN sont toutefois essentielles dans les milieux urbains car elles offrent de nombreux bénéfices pour la biodiversité, la santé ou encore pour l'adaptation au changement climatique.

Les Solutions fondées sur la Nature reposant sur l'**adaptation** au changement climatique restent intéressantes pour de nombreux pays européens, à l'image du Sand Motor aux Pays-Bas. Se basant uniquement sur des ressources naturelles (sable, vent, vagues...), il permet une protection côtière efficace de la ville face aux marées et aux inondations. Il propose même en parallèle un support favorable à l'implantation d'une nouvelle biodiversité, ainsi que de nouvelles activités de loisirs pour la population locale. Tous ces avantages, sous forme de services écosystémiques, manquent cependant de durabilité, et sont certainement voués à disparaître au cours du temps. Il est alors nécessaire de proposer des solutions aux bases plus pérennes, ou combattre le problème du réchauffement climatique à sa source.

Bibliographie

I. Atténuation

Agence européenne de l'environnement, 2019. *Urban land take* [en ligne]. Consulté le : 10/01/2023. Disponible sur :

<https://www.eea.europa.eu/airs/2018/natural-capital/urban-land-expansion>.

Ajuntament de Barcelona, 2013. *Barcelona green infrastructure and biodiversity plan 2020* [en ligne]. Consulté le : 10/11/2022. Disponible sur :

<https://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana/sites/default/files/Barcelona%20green%20infrastructure%20and%20biodiversity%20plan%202020.pdf>.

Ajuntament de Barcelona, 2017. *Government measure: stimulus programme for the city's urban green infrastructure* [en ligne]. Consulté le : 10/11/2022. Disponible sur :

https://bcnroc.ajuntament.barcelona.cat/jspui/bitstream/11703/104928/1/eng_Mesura%20de%20govern%20increment%20verd_08_06_2017.pdf

Ajuntament de Barcelona, 2020. *Climate emergency declaration* [en ligne]. Consulté le : 13/11/2022. Disponible sur : <https://www.barcelona.cat/emergenciaclimatica/en>

Ajuntament de Barcelona, 2022. *The Barcelona Superblock model reaches the C40 World Mayors Summit* [en ligne]. Consulté le : 13/11/2022. Disponible sur :

https://www.barcelona.cat/infobarcelona/en/tema/environment-and-sustainability/the-barcelona-superblock-model-reaches-the-c40-world-mayors-summit_1219228.html.

Akbari H., 2002, *Shade trees reduce building energy use and CO2 emissions from power plants*. Environmental Pollution, 116, pp. 119-126. Consulté le : 12/01/2023. Disponible sur : [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00264-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00264-0).

Akbari, Hashem, Dan M. Kurn, Sarah E. Bretz, and James W. Hanford, 1997. *Peak Power and Cooling Energy Savings of Shade Trees*. Energy and Buildings 25 (2): 139–48. Consulté le : 12/01/2023. Disponible sur: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01003-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01003-1).

Ajuntament de Barcelona, 2017. *Trees for life. Master Plan for Barcelona's Trees, 2017 – 2037*. Àrea d'Ecologia Urbana. Consulté le : 23/01/2023. Disponible sur :

<https://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana/sites/default/files/Pla-director-arbrat-barcelona-ENG.pdf> .

B. Laroche, J. Thorette et J.-Cl. Lacassin, 2006. *L'artificialisation des sols : pressions urbaines et inventaire des sols*. Etude et Gestion des Sols, Volume 13, 3, 2006 - pages 223 à 235. Consulté le : 10/01/2023. Disponible sur :

https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/10/EGS_13_3_laroche.pdf.

Bocquet, M. & Cavailhès, J., 2020. *Conversion urbaine de terres et métropolisation du territoire*. Revue d'Économie Régionale & Urbaine, 859-886. Consulté le : 10/01/2023. Disponible sur : <https://doi-org.proxy.scd.univ-tours.fr/10.3917/reru.205.0859>.

Bourdeau-Lepage Lise, 2019. *De l'intérêt pour la nature en ville. Cadre de vie, santé et aménagement urbain*. Revue d'Économie Régionale & Urbaine. Décembre (5) : 893–911. Consulté le : 18/11/2022. Disponible sur : <https://doi.org/10.3917/reru.195.0893> .

Brander, Luke M., and Mark J. Koetse, 2011. *The Value of Urban Open Space: Meta-Analyses of Contingent Valuation and Hedonic Pricing Results*. Journal of Environmental Management 92 (10) : 2763–73. Consulté le 18/11/2022. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.019>.

Chapman S., Buttler A., Francez A.-J., Laggoun-Défarge F., Vasander H., Schlöter M., Combe J., Grosvernier P., Harms H., Epron D., Gilbert D., Mitchell E., 2003. *Exploitation of northern peatlands and biodiversity maintenance: a conflict between economy and ecology*. Front. Ecol. Environ., 1(10): 525-532. Consulté le : 25/11/2022. Disponible sur : <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/hal-00069337/file/Chapman-Frontieresinecology-2003.pdf>.

Cohen-Shacham E., Walters G., Janzen, C. and Maginnis, S., 2016. *Nature-based Solutions to address global societal challenges*. Gland, Switzerland : IUCN. xiii + 97pp. Consulté le : 29/10/2022. Disponible sur : <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-036.pdf>.

Commissariat général au développement durable, 2021. *Les émissions de gaz à effet de serre et l'empreinte carbone* [en ligne]. Consulté le : 17/01/2023. Disponible sur : <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/climat/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-l-empreinte-carbone> .

Commission européenne, 2021. *Protecting our precious peat* [en ligne]. Consulté le : 10/01/2023. Disponible sur : https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/protecting-our-precious-peat-2021-05-12_en.

Desrousseaux, M. & Schmitt, B., 2018. *Réduire l'impact de l'artificialisation des sols*. L'Économie politique, 78, 54-68. Consulté le : 10/01/2023. Disponible sur : <https://doi-org.proxy.scd.univ-tours.fr/10.3917/leco.078.0054>

E. N. Koffi, P. Bergamaschi, R. Alkama, A. Cescatti, 2020. *An observation-constrained assessment of the climate sensitivity and future trajectories of wetland methane emissions*. Sci. Adv.6, eaay4444. Consulté le : 25/11/2022. Disponible sur : <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aay4444>.

Eisenberg, B. and Polcher, V., 2020. *Nature-Based Solutions Technical Handbook*. UNaLab Horizon. Consulté le : 19/01/2023. Disponible sur : <https://unalab.eu/system/files/2020-02/unalab-technical-handbook-nature-based-solutions2020-02-17.pdf>.

Elise Muller, 2022. *Les effets du changement climatique sur la croissance des plantes [en ligne]*. PlanetVie. Consulté le : 15/11/2022. Disponible sur : <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/vegetaux/les-effets-du-changement-climatique-sur-la-croissance-des-plantes>

European Commission, 2020. Directorate-General for Research and Innovation, Bulkeley, H., Naumann, S., Vojinovic, Z., et al. *Nature-based solutions: state of the art in EU-funded projects*. Freitas, T.(editor), Vandewoestijne, S.(editor), Wild, T.(editor), Publications Office of the European Union, 2020. Consulté le : 18/01/2023. Disponible sur : <https://data.europa.eu/doi/10.2777/236007>

European Environment Agency, 2021. Greenhouse gas emissions from land use, land use change and forestry [en ligne]. Consulté le : 15/11/2022. Disponible sur : <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-land/assessment>.

FAO, 2016. *Guidelines on urban and peri-urban forestry*. F. Salbitano, S. Borelli, M. Conigliaro and Y. Chen. FAO Forestry Paper No. 178. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Consulté le : 19/01/2023. Disponible sur : <https://www.fao.org/3/i6210e/i6210e.pdf>.

FAO, 2016. *Les tourbières et le changement climatique [en ligne]*. Consulté le : 25/11/2022. Disponible sur : <https://www.fao.org/3/c0068f/c0068f.pdf>.

FAO, 2016. *Les tourbières et le changement climatique [en ligne]*. Programme d'atténuation du changement climatique dans l'agriculture. Consulté le : 18/01/2023. Disponible sur : <https://www.fao.org/3/c0068f/c0068f.pdf>.

Fatima Laggoun-Déforge, 2011. *Fonctionnement et dynamique des tourbières Impact de l'anthropisation et du changement climatique*. Géochimie. Université d'Orléans. Consulté le 25/11/2022. Disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-00603695v2/document>.

Francez A.-J., 2000. *La dynamique du carbone dans les tourbières à Sphagnum, de la sphaigne à l'effet de serre*. Année Biologique, 39: 205-270. Consulté le : 25/11/2022. Disponible sur : [https://doi.org/10.1016/S0003-5017\(00\)90002-3](https://doi.org/10.1016/S0003-5017(00)90002-3).

Francez A.-J., Vasander H., 1995. *Peat accumulation and decomposition after human disturbance in French and Finnish mires*. Acta Oecol., 16: 599-608. Consulté le : 25/11/2022. Disponible sur : <https://researchportal.helsinki.fi/en/publications/peat-accumulation-and-peat-decomposition-after-human-disturbance->.

Francisco J. Escobedo, Timm Kroeger, John E. Wagner, 2011. *Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices*. Environmental Pollution, Volume 159, Issues 8–9, 2011, Pages 2078-2087, ISSN 0269-7491. Consulté le : 17/01/2023. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010>.

Gest H., 2002. *History of the word photosynthesis and evolution of its definition*. Photosynthesis Research **73**, 7–10. Consulté le : 15/11/2022. Disponible sur : <https://doi-org.proxy.scd.univ-tours.fr/10.1023/A:1020419417954> .

Gissol, 2020. *Sol et émissions de gaz à effet de serre* [en ligne]. Consulté le : 10/01/2023. Disponible sur : <https://www.gissol.fr/thematiques/sol-et-attenuation-du-changement-climatique-87>.
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000019151510/>

IPCC, 2019. P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, R. van Diemen, E. Haughey, J. Malley, M. Pathak, J. Portugal Pereira. Technical Summary. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley,

K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. Consulté le : 04/01/2023. Disponible sur : <https://doi.org/10.1017/9781009157988.002>.

IPCC, 2022. Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (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. 3–33. Consulté le : 27/11/2022. Disponible sur : 10.1017/9781009325844.001.

Kramer, P.J., Kozlowski, T., 1960. *Physiology of Trees*. McGrawHill, New York. Consulté le : 12/01/2023. Disponible sur : <https://doi.org/10.2307/3797872> .

Krauss, K.W., Z. Zhu, and C.L. Stagg, 2021. *Managing wetlands to improve carbon sequestration*. Eos, 102. Consulté le: 10/01/2023. Disponible sur: <https://doi.org/10.1029/2021EO215004> .

Lebendige Luppe, 2021. Den Auwald per Erlebnis-App entdecken [en ligne]. Consulté le : 30/11/2022. Disponible sur : https://lebendige-luppe.de/index.php?article_id=25.

Légifrance, 2009. *Arrêté du 24 juin 2008 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du code de l'environnement* [en ligne]. Consulté le : 18/01/2023. Disponible sur :

Leigh J. Whittinghill, D. Bradley Rowe, Robert Schutzki, Bert M. Cregg, 2014. *Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems*. Landscape and Urban Planning, Volume 123, Pages 41-48, ISSN 0169-2046. Consulté le : 25/11/2022. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.015>.

Lena R. Boysen, Wolfgang Lucht, Dieter Gerten, Vera Heck, Timothy M. Lenton, Hans Joachim Schellnhuber, 2017. The limits to global-warming mitigation by terrestrial carbon removal. *Earth's Future*. Consulté le : 14/11/2022. Disponible sur : [http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/hub/journal/10.1002/\(ISSN\)2328-4277/](http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/hub/journal/10.1002/(ISSN)2328-4277/).

LIFE, 2022. *Neutralisation de drains* [en ligne]. Consulté le : 25/11/2022. Disponible sur : <http://www.life-tourbieres-jura.fr/neutralisation-drains-rubrique.html>.

LIFE, 2022. *Reméandrement* [en ligne]. Consulté le : 25/11/2022. Disponible sur : <http://www.life-tourbieres-jura.fr/reméandrement-rubrique.html>.

LIFE, 2022. *Programme de réhabilitation fonctionnelle des tourbières du massif jurassien franc-comtois* [en ligne]. Consulté le : 25/11/2022. Disponible sur : <http://www.life-tourbieres-jura.fr/>.

M. Santamouris, 2013. *Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 26, 2013, Pages 224-240, ISSN 1364-0321. Consulté le : 12/01/2023. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047> .

Maas, J, R A Verheij, S de Vries, P Spreeuwenberg, F G Schellevis, and P P Groenewegen, 2009. *Morbidity Is Related to a Green Living Environment*. *Journal of Epidemiology & Community Health*. Consulté le : 10/01/2023. Disponible sur : <https://doi.org/10.1136/jech.2008.079038> .

Mildrexler DJ, Berner LT, Law BE, Birdsey RA and Moomaw WR, 2020. *Large Trees Dominate Carbon Storage in Forests East of the Cascade Crest in the United States Pacific Northwest*. *Front. For. Glob. Change* 3:594274. Consulté le : 25/11/2022. Disponible sur : [10.3389/ffgc.2020.594274](https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.594274).

Ministère de la transition écologique, 2021. *Plan Biodiversité* [en ligne]. Consulté le : 29/10/2022. Disponible sur: <https://www.ecologie.gouv.fr/plan-biodiversite>.

Food and Agriculture Organization of the United Union, 2018. *Forêts et villes durables*. Unasyva, 250, Vol. 69 (1). Consulté le : 29/10/2022. Disponible sur : <https://www.fao.org/3/I8707EN/i8707en.pdf>.

Ministère de la Transition écologique, 2022. *Artificialisation des sols* [en ligne]. Consulté le : 10/01/2023. Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/artificialisation-des-sols>.

Ministère de la transition écologique, 2022. *Émissions de GES liées à l'agriculture, la foresterie et l'affectation des terres* [en ligne]. Consulté le : 10/01/2023. Disponible sur : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2022/14-emissions-de-ges-liees-a>

Morgane Colombert et Philippe Boudes, 2012. *Adaptation aux changements climatiques en milieu urbain et approche globale des trames vertes* [en ligne]. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Hors-série 12, mai 2012. Consulté le : 14 janvier 2023. Disponible sur : <https://doi.org/10.4000/vertigo.11821> .

NABU Sachsen, 2021. Das Projekt „Lebendige Luppe [en ligne]. Consulté le : 30/11/2022. Disponible sur : <https://sachsen.nabu.de/naturundlandschaft/gewaesser/20084.html>.

OCDE, 2012. *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2050 : Les conséquences de l'inaction* [en ligne]. Consulté le : 17/01/2023. Disponible sur : <https://www.oecd.org/fr/env/indicateurs-modelisation-perspectives/49884240.pdf>.

OCDE, 2015. *Atténuation du changement climatique : Politiques publiques et progrès réalisés* [en ligne]. Éditions OCDE, Paris. Consulté le : 17/01/2023. Disponible sur : <https://doi.org/10.1787/9789264241718-fr>.

ORCAE Auvergne Rhône-Alpes, 2022. *Absorption de carbone* [en ligne]. Consulté le 30/11/2022. Disponible sur : <https://www.orcae-auvergne-rhone-alpes.fr/methodologie/climat/absorption-de-carbone>.

Parlement européen, 2021. Émissions de gaz à effet de serre par pays et par secteur [en ligne]. Consulté le 13/11/2022. Disponible sur : <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/priorities/climat/20180301STO98928/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-par-pays-et-par-secteur-infographie>

Parlement européen, 2022. *L'Union européenne et les forêts* [en ligne]. Consulté le : 17/01/2023. Disponible sur : https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/fr/FTU_3.2.11.pdf.

Parlement européen, 2022. Réduction des émissions de gaz à effet de serre dans l'UE : objectifs nationaux pour 2030 [en ligne]. Consulté le 13/11/2022. Disponible sur : <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20180208STO97442/reduction-de-s-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-dans-l-ue-objectifs-pour-2030>.

Pierre Roger, Jean Le Mer et Catherine Jouliau, 1999. *L'émission et la consommation de méthane par les sols : mécanismes, bilan, contrôle*. Consulté le : 18/01/2023. Disponible sur : http://www.pierre-armand-roger.fr/publications/pdf/207_ch4acad.pdf.

Roger Prat, François Moreau, 2004. *La photosynthèse : généralités*. PlanetVie. Consulté le : 20/11/2022. Disponible sur : <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/manipulations-en-svt/la-photosynthese-generalites>.

Rosenfeld, A.H., Romm, J.J., Akbari, H., Pomerantz, M., 1998. *Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction*. Energy and Building 28, 51–62. Consulté le : 12/01/2023. Disponible sur: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00063-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00063-7).

Rumelhard Guy, 1985. *Quelques représentations à propos de la photosynthèse*. In: Aster, recherches en didactique des sciences expérimentales, n°1, 1985. Apprendre les sciences. pp. 37-66; doi : 10.4267/2042/9204. Consulté le : 17/01/2023. Disponible sur : https://www.persee.fr/doc/aster_0297-9373_1985_num_1_1_890.

Sebastiaan Luyssaert, Gwenaél Abril, Robert J. Andres, David Bastviken, Valentin Bellassen, et al., 2012. *The European land and inland water CO₂, CO, CH₄ and N₂O balance between 2001 and 2005*. Biogeosciences, 9, pp.3357-3380. Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01150807v2/document>. Consulté le : 10/01/2023.

Smith, W.H., 1984. *Pollutant uptake by plants*. In: Treshow, M. (Ed.), *Air Pollution and Plant Life*. John Wiley, New York. Consulté le: 12/01/2023. Disponible sur: <https://doi.org/10.2134/jeq1979.00472425000800040022x>.

Tardieu Bernard, 2017. "*Chapitre 7 • Le méthane*". Le climat: Sciences, diplomatie et solidarité, Les Ulis: EDP Sciences, 2017, pp. 75-94. Consulté le : 18/01/2023. Disponible sur : <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2115-0.c012>

Tardieu, Bernard, 2017. *Chapitre 7 - Le méthane*. Le climat : Sciences, diplomatie et solidarité, Les Ulis : EDP Sciences, 2017, pp. 75-94. Consulté le 10/01/2023. Disponible sur : <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2115-0.c012>.

UICN Comité français, 2021. *8 questions à se poser pour mettre en œuvre les Solutions fondées sur la Nature – un guide d'appropriation du Standard mondial de l'UICN* [en ligne]. Paris, France. Consulté le : 23/09/2022. Disponible sur : <https://uicn.fr/wp-content/uploads/2021/07/questions-sfneau-web.pdf>.

UICN France, 2016. *Des solutions fondées sur la nature pour lutter contre les changements climatiques* [en ligne]. Consulté le : 10/10/2022. Disponible sur : https://uicn.fr/wp-content/uploads/2016/09/Plaque-Solutions-FR-07.2016.web_.pdf.

United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition, 2021. *Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions*. Consulté le : 10/01/2023. Disponible sur : file:///C:/Users/33783/AppData/Local/Temp/2021_Global-Methane-Assessment_summary.pdf.

United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition (2021). *Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions*. Nairobi: United Nations Environment Programme. Consulté le : 18/01/2023. Disponible sur : file:///C:/Users/33783/AppData/Local/Temp/2021_Global-Methane-Assessment_summary.pdf.

Urban nature atlas, 2021. Elster-Luppe wetland: Revitalization and renaturalization [en ligne]. Consulté le : 30/11/2022. Disponible sur : <https://una.city/nbs/leipzig/elster-luppe-wetland-revitalization-and-renaturalization>.

Urban Nature Atlas, 2022. *A collection of more than 1000 inspiring nature-based solutions from European cities and beyond* [en ligne]. Consulté le : 28/11/2022. Disponible sur : <https://una.city/>.

Valach AC, Kasak K, Hemes KS, Anthony TL, Dronova I, Taddeo S, Silver WL, Szutu D, Verfaillie J, Baldocchi DD, 2021. *Productive wetlands restored for carbon sequestration quickly become net CO₂ sinks with site-level factors driving uptake variability*. PLoS One. Mar 25 ;16(3). Consulté le : 10/01/2023. Disponible sur : [10.1371/journal.pone.0248398](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248398).

Valach AC, Kasak K, Hemes KS, Anthony TL, Dronova I, Taddeo S, Silver WL, Szutu D, Verfaillie J, Baldocchi DD., 2021. *Productive wetlands restored for carbon sequestration quickly become net CO₂ sinks with site-level factors driving uptake variability*. PLoS One.

2021 Mar 25;16(3). Consulté le : 18/01/2023. Disponible sur :
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33765085/>

World Bank, 2021. *A Catalogue of Nature-based Solutions for Urban Resilience*. Washington, D.C. World Bank Group. Consulté le : 13/01/2022. Disponible sur :
<http://hdl.handle.net/10986/36507>.

II. Adaptation

Site de l'Urban Nature Atlas [en ligne]. Disponible sur :
<<https://una.city/nbs/hague/sand-motor>>.

Vidéo Youtube : “*The Sand Motor - Passionate Research*” [en ligne]. Disponible sur :
<https://www.youtube.com/watch?v=wtY4_QXcVsM>.

Vidéo Youtube : “*The Sand Motor Five years of Building with Nature*” [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.youtube.com/watch?v=m1H-58W7QDk>>

Deltares, 2016. “*Development of the Sand Motor, concise report describing the first four years of the Monitoring and Evaluation Programme (MEP)*”. Disponible sur :
<https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/sand-motor-2013-building-with-nature-solution-to-improve-coastal-protection-along-delfland-coast-the-netherlands/delfland-coast_document-1.pdf>

Deltares, 2021. “*10-years evaluation of the Sand Motor, Results of the Monitoring- and Evaluation Program (MEP) for the period 2011 to 2021*”. Disponible sur :
<<https://dezandmotor.nl/app/uploads/2022/01/Sand-Motor-in-perspective-Monitoring-and-Evaluation-report.pdf>>

Rijkswaterstaat, 2021. “*The Sand Motor, 10 years of Building with Nature*”. Disponible sur :
<https://dezandmotor.nl/app/uploads/2021/06/Publiekssamenvatting-Zandmotor_ENG_digitaal.pdf>

Rebel, 2021. “*Policy evaluation Sand Engine*”. Disponible sur :
<https://dezandmotor.nl/app/uploads/2021/06/Beleidsevaluatie_Zandmotor_2021-Hoofdrapport-EN.pdf>

Deltares, 2015. “*A framework for sandy strategy development*”. Disponible sur :
<https://dezandmotor.nl/app/uploads/2020/10/sand-motor-businesscase-def.pdf>



Directeur de recherche :
Vincent ROTGE

GRANDJEAN Charlotte
MENDES Félix
PFE/DAE5
Génie de l'Aménagement
et de l'Environnement
(ADAGE/IMA)
2022-2023

**Les territoires européens face au changement climatique :
L'utilisation de Solutions Fondées sur la Nature pour répondre aux défis
environnementaux.**

Résumé :

Ce PFE traite de la question des **“Solutions fondées sur la Nature”** (SfN), ou **“Nature-based Solutions”** (NbS) en anglais, en tant que réponse aux problématiques de **réduction/séquestration des émissions de gaz à effet de serre** et d'**adaptation des villes aux risques climatiques**. Notre sujet se concentrera sur l'exemple de projets de développement de SfN dans deux villes européennes : Barcelone (Espagne) et La Haye (Pays-Bas). Nous nous sommes demandés si ces projets étaient réellement des SfN, en remplissant bien les objectifs auxquels ils étaient destinés et s'ils étaient durables à long terme. Nous avons mené une analyse de ces projets afin de déterminer si les objectifs énoncés sont atteints, notamment en s'assurant que les résultats obtenus concordent avec les attentes de l'utilisation d'une Solution fondée sur la Nature.

Mots Clés :

**Solution fondée sur la Nature, atténuation, adaptation,
changement climatique, Europe**