



**ETUDE GEOMATIQUE DE L'EFFET DES SECHERESSES SUR
LA VITALITE ET LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES DE
REGULATION DES INFRASTRUCTURES VERTES DU PARC
NATUREL DES VOSGES DU NORD, FRANCE (2014-2024)**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE **MASTER
SPECIALITE GENIE DE L'EAU DE L'ASSAINISSEMENT ET DES AMENAGEMENTS HYDRO-
AGRICLES**

Présenté et soutenu publiquement le 18 juillet 2024 par
Aïssatou DEME

Directeur de mémoire : Mr Harinaivo Anderson ANDRIANISA, Maître de Conférences (CAMES), Enseignant-Chercheur en Eau et Assainissement Urbain

Encadreur 2iE : Mr Ousmane Roland YONABA, Enseignant-Chercheur en Hydraulique et Hydrologie appliquée, Maître-Assistant (CAMES), 2iE

Maître de stage : Mme Aude Hamed-Zingraff, Maître de Conférences, Enseignante-Chercheuse en Géographie Environnementale dans le domaine de l'Eau, CNRS LIVE, ENGEES, France

Structure d'accueil de la stagiaire : Parc Régional des Vosges du Nord (France)

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Lawani Adjadji MOUNIROU

Membres et correcteurs : TAZEN FOWE
Patindé Axel BELEMTOUGRI

Promotion [2024/2025]

DEDICACES

AU NOM d'ALLAH LE TOUT MISERICORDIEUX LE TRES MISERICORDIEUX

Je rends grâce à Dieu, le tout puissant, pour tous ses bienfaits ; qui nous a assisté durant ce parcours et a permis qu'on arrive jusque-là.

Je dédie ce travail,

À ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui,

À mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection

Particulièrement à mon père, pour le goût de l'effort qu'il a suscité en moi, par sa rigueur

À celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoirs, ma mère

À ma tante qui m'a accordé son soutien inconditionnel

À mes chers frères pour leur soutien permanent et leurs encouragements,

À mon grand-père, ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel amour

À mes amies Maïmouna et Florence pour ces longues années et riches de soutien infaillible

Et à tout qui ont participé de près ou de loin à ma réussite pendant toute ces longues années

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien inconditionnel.

Merci d'être toujours là pour moi.

CITATION

«La meilleure de toutes les pluies est celle qui vient après la pire de toutes les sécheresses.»

Mehmet Murat Ildan

Remerciements

Mes remerciements vont à l'endroit de :

- L'ensemble du personnel (corps professoral et administratif) de l'institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement ;
- Pr. El Hadji Bamba DIAW, Directeur Général de l'Institut International de l'Eau et de l'Environnement (2iE) ;
- Dr. Mahamadou KOÏTA, Directeur des Enseignements et des Affaires Académiques ;
- Mon directeur de Mémoire, Dr. Harinaivo Anderson ANDRIANISA, chef du département Génie de l'Eau de l'Assainissement et des Aménagements Hydro-Agricoles (GEAAH) pour sa collaboration tout au long de ce stage ;
- Mon encadreur Dr. Ousmane Roland YONABA pour l'encadrement, ses orientations de l'élaboration des termes de références de cette étude jusqu'à la réalisation de ce document ;
- Mon maître de Stage Aude Zingraff-Hamed (Maître de conférences au Laboratoire Image, Ville, Environnement, (LIVE)) pour sa disponibilité, sa confiance, son soutien inconditionnel, son suivi régulier et ses conseils qui m'ont permis de réaliser ce travail ;
- Mon encadreur Mme Romy BAGHDADI chargée de mission Paysage et transitions au Parc Naturel Régional Des Vosges du Nord ;
- Monsieur Sébastien MORELLE et l'ensemble du personnel du Parc naturel Régional des Vosges du Nord ;
- Mes frères et sœurs, toute la famille DEME ;
- Mes amies et connaissances ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ma formation.

RESUME

La végétation constitue un élément essentiel des écosystèmes terrestres, jouant un rôle crucial dans la régulation du climat, la conservation de la biodiversité et le maintien des services écosystémiques. Le **changement climatique** engendre une intensification des extrêmes météorologiques tels que les extrêmes chaleurs. Ce mémoire explore les effets **des événements climatiques extrêmes**, en particulier les sécheresses, sur **la vitalité des écosystèmes forestiers** du Parc naturel régional des Vosges du Nord, à l'aide **d'outils de télédétection** et de données météorologiques. En combinant plusieurs indices biophysiques (**Liés à la végétation , à l'eau et aux températures**) et en croisant ces informations avec des données d'occupation du sol et de typologie forestière, l'étude permet d'identifier les **essences** les plus sensibles ou résilientes aux stress hydriques et thermiques. Les résultats montrent une baisse du **NDVI (indice de végétation Normalisée)** atteignant jusqu'à **40 %** pour certaines essences feuillues en période de stress hydrique. Les **résineux** comme le pin sylvestre (PS) ou le douglas (DOU) conservent en revanche des niveaux de vitalité plus élevés, avec des **NDVI** restant au-dessus de **0,7** dans certains cas. L'humidité du sol, mesurée via l'indice d'humidité du sol (SWI), apparaît comme un facteur déterminant dans la capacité des végétaux à **résister** aux **sécheresses**. Le SWI révèle des taux d'**humidité** du sol inférieurs à **10 %** dans les couches superficielles pendant les sécheresses, mais atteignant plus de **30 %** dans certains sols argileux en profondeur (**>60 cm**). La baisse du NDVI pendant les épisodes extrêmes entraîne une réduction du **CO₂** stocké, soulignant l'impact du changement climatique sur le rôle de puits de carbone des forêts. Le stockage de carbone, estimé à partir du NDVI, montre des pertes significatives pendant les périodes sèches. Pour le hêtre (HET), qui couvre une grande surface, la capacité de stockage peut chuter de plus de **10 %**, soit une perte estimée de plusieurs milliers de tonnes de **CO₂**. Cette étude met en évidence l'intérêt d'une approche intégrée, mobilisant des données satellites, climatiques et écologiques pour améliorer la compréhension de la résilience des forêts aux aléas climatiques. Elle ouvre la voie à des stratégies de gestion plus adaptées aux enjeux actuels de durabilité et de changement global.

Mots Clés :

-
- 1 – Climat
 - 2 – Forêts
 - 3 – Résilience
 - 4 – Sécheresse
 - 5 – Télédétection

ABSTRACT

Vegetation is an essential component of terrestrial ecosystems, playing a crucial role in climate regulation, biodiversity conservation and the maintenance of ecosystem services. **Climate change** is causing an increase in extreme weather events such as heatwaves. This thesis explores the effects of **extreme weather events**, particularly droughts, on the **vitality of forest ecosystems** in the Northern Vosges Regional Nature Park, using **remote sensing tools** and meteorological data. By combining several biophysical indices (**related to vegetation, water and temperatures**) and cross-referencing this information with land use and forest typology data, the study identifies the **species** that are most sensitive or resilient to water and heat stress. The results show a decrease in **NDVI** (Normalised Difference Vegetation Index) of up to **40%** for certain deciduous species during periods of water stress. Conifers such as Scots pine (PS) and Douglas fir (DOU), on the other hand, maintain higher levels of vitality, with NDVI remaining above 0.7 in some cases. Soil moisture, measured using the soil water index (SWI), appears to be a determining factor in the ability of plants to **withstand drought**. The SWI reveals soil **moisture** levels below **10%** in the surface layers during droughts but reaching over **30%** in some deep clay soils (**>60 cm**). The decline in NDVI during extreme episodes leads to a reduction in stored **CO₂**, highlighting the impact of climate change on the role of forests as carbon sinks. Carbon storage, estimated by NDVI, shows significant losses during dry periods. For beech (HET), which covers a large area, storage capacity can fall by more than **10%**, representing an estimated loss of several thousand tons of **CO₂**. This study highlights the value of an integrated approach, using satellite, climate and ecological data to improve our understanding of the resilience of forests to climate hazards. It paves the way for management strategies that are better suited to the current challenges of sustainability and global change.

Key words:

-
- 1 – climate
 - 2 – Drought
 - 3 – Forests
 - 4 – Remote sensing
 - 5 – Résilience

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

2iE	: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
BOV	: Bouleau verruqueux
CHA	: Charme
CHP	: Chêne pédonculé
CHS	: Chêne Sessile
CHX	: Chêne rouvre
CO₂	: Dioxyde de Carbone
DOU	: Douglas
EVI	: Enhanced Vegetation Index (Indice de la végétation améliorée)
FAMD	: Analyse multivariée des données mixtes
HET	: Hêtre
LST	: Land Surface Temperature (Température à la surface du sol)
LSWI	: Land Surface Water Index (Indice des Eaux de Surfaces Terrestres)
MEE	: Mélèze d'Europe
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index (Indice de Végétation Normalisé)
NDWI	: Normalized Difference Water Index (Indice de différence Normalisée de l'Eau)
PS	: Pin sylvestre
SP	: Sapin pectine
SSM	: Soil Surface Moisture (Humidité du sol en surface)
SWI	: Soil Water Index (Indice d'humidité du sol)
UNESCO	: Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

SOMMAIRE

DÉDICACES	I
CITATION.....	II
RÉSUMÉ	IV
ABSTRACT	V
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	VI
LISTE DE TABLEAUX.....	IX
LISTE DE FIGURES	X
INTRODUCTION.....	1
I. OBJECTIFS DU TRAVAIL ET HYPOTHÈSES.....	3
II. REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
II.1. Introduction	5
II.2. Vue d'ensemble de la littérature mobilisée	6
II.3. Objectifs.....	8
II.4. Limites	9
II.5. Conclusion partielle	11
III. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	12
III.1. Présentation du cadre expérimental.....	12
III.2. Organigramme méthodologique.....	14
III.3. Analyse des données météorologiques.....	15
III.4. Télédétection et indices biophysiques.....	20
III.5. Estimation du stockage de carbone	25
III.6. Occupation des sols et essences forestières.....	25
III.7. Analyse statistique multivariée	27
IV. RÉSULTATS	29
IV.1. Présentation des périodes extrêmes identifiées	29
IV.2. Effet des sécheresses sur la vitalité de la végétation.....	37
IV.3. Analyse statistique par type d'essence.....	50
IV.4. Analyse du rôle éponge des sols	53

V. DISCUSSIONS.....	58
V.1. Rappel des objectifs.....	58
V.2. Interprétation des résultats par axe d'étude.....	58
V.3. Limites de l'étude.....	62
V.4. Apports de l'approche par télédétection.....	62
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	63
RECOMMANDATIONS	64
BIBLIOGRAPHIE.....	65
LISTE DES ANNEXES.....	70
ANNEXE	71

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1:Tableau synthétique des limites rencontrées dans la littérature	10
Tableau 2: Caractérisation des périodes extrêmes à partir de la bibliographie	16
Tableau 3:Typologie des sécheresses.....	17
Tableau 4:Avantages et inconvénients des satellites MSI (en vert les satellites choisis).	21
Tableau 5:Rôle, avantages et inconvénients des indices de télédétection utilisées	23
Tableau 6: Caractérisation de la vitalité de la végétation en fonction du NDVI	24
Tableau 7:Caractérisation de la vitalité de la végétation en fonction du NDWI.....	24
Tableau 8:Tableau des périodes extrêmes communes aux stations	35
Tableau 9:Tableau des périodes extrêmes analysées	37
Tableau 10:Essences dominantes et surfaces occupées	44
Tableau 11: Equivalent réel du pourcentage d'humidité du sol en volume	53

LISTE DE FIGURES

Figure 1: Répartition des articles en fonction des zones géographiques.....	6
Figure 2: Graphique de répartition des sources satellitaires	7
Figure 3: Graphique des indices utilisés dans la littérature.....	7
Figure 4: Diagramme de Sankey	9
Figure 5 : Situation géographique du Parc des Vosges du Nord, région Grand-Est	13
Figure 6: Organigramme méthodologique	15
Figure 7: Méthodologie de traitement des données météorologiques.....	18
Figure 8: Carte de répartition des stations en fonction des zones climatiques.....	19
Figure 9: Graphique d'évolution de la température et des précipitations de 2014 à 2024 :STATION DE MOUTERHOUSE	34
Figure 10 : Graphique d'évolution de la température et des précipitations de 2014 à 2024 :STATION DE VOLMUNSTER.....	34
Figure 11 : Graphique d'évolution de la température et des précipitations de 2014 à 2024 :STATION DE UHRWILLER.....	34
Figure 12: Evolution NDVI avant et pendant la sécheresse en fonction de l'occupation du sol par Corine :P1 2018.....	38
Figure 13: Evolution du NDVI avant et pendant la sécheresse en fonction de l'occupation du sol par Corine: P2 2020.....	39
Figure 14: Evolution du NDVI avant et pendant la sécheresse en fonction de l'occupation du sol par Corine : P3 2022	39
Figure 15: Evolution simulée du NDVI au printemps 2020	40
Figure 16: Evolution annuelle du NDVI des essences les plus sensibles dans le parc en 2020	42
Figure 17: Evolution NDVI par essence 2018	42
Figure 18: Evolution NDVI par essence 2020	42
Figure 19: Evolution NDVI par essence 2022	43
Figure 20: Evolution du NDVI par essence dominante 2018	44
Figure 21: Evolution du NDVI par essence dominante 2020	45
Figure 22: Evolution du NDVI par essence dominante 2022	45
Figure 24: Végétation stressée	46
Figure 23: Végétation saine.....	46

Figure 25: Evolution NDWI essence dominante P1	47
Figure 26: Evolution NDWI essence dominante P2	47
Figure 27: Evolution NDWI essence dominante P3	48
Figure 28: Evolution CO2 avec surface	48
Figure 28: Evolution CO2 avec surface	49
Figure 30 : Stockage CO2 20200730-0815	49
Figure 29: Stockage CO2 20200315-0430	49
Figure 31: Graphique des variables Feuillus	51
Figure 32: Graphique des variables Résineux	52
Figure 33: Evolution SWI 2018 profondeur 002-010	54
Figure 34: graphique des individus SWI_Feuillus	55
Figure 35: Graphique des variables SWI Résineux	55
Figure 36: SWI couche inférieure	57

INTRODUCTION

Phénomène mondialement reconnu et largement débattu sur la scène internationale, le changement climatique est aujourd'hui au cœur des préoccupations scientifiques, politiques et environnementales. Il s'accompagne d'une intensification des événements météorologiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur, les sécheresses prolongées ou encore les fortes précipitations. Selon le Rapport de synthèse du GIEC (2023), l'élévation des températures contribue directement à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité de ces phénomènes.

Ces aléas climatiques affectent profondément le fonctionnement des écosystèmes terrestres, en particulier les milieux forestiers et humides, et posent des défis majeurs à la gestion durable des environnements naturels. Pourtant, ces milieux jouent un rôle essentiel dans l'atténuation des effets du changement climatique et dans la régulation du climat, tant à l'échelle locale que régionale. Souvent désigné sous le terme d'infrastructures vertes, les forêts et les zones humides assurent des services écosystémiques de régulation cruciaux, tels que la rétention d'eau, le stockage du carbone ou encore la régulation thermique. Le *Millennium ecosystem Assessment (2005)* soulignait déjà que « les services écosystémiques de régulation, tels que le climat local, la qualité de l'eau et la stabilité des sols étaient directement dépendants de l'intégrité des systèmes naturels. »

Cependant, la récurrence et l'intensification des sécheresses remettent en question la capacité de ces infrastructures à assurer durablement leurs fonctions écologiques, notamment dans les zones tempérées. Dans ce contexte, il devient essentiel de mieux comprendre l'impact de ces stress climatiques sur la vitalité de la végétation et la pérennité des services écosystémiques qu'elle rend.

Le Parc Naturel des Vosges du Nord, reconnu Réserve de biosphère par l'UNESCO, constitue à cet égard un terrain d'étude particulièrement pertinent. Riche en habitats naturels et en peuplement forestiers diversifiés, il joue un rôle écologique majeur à l'échelle régionale. Situé à l'interface de plusieurs influences climatiques, ce territoire offre des conditions propices à l'analyse des effets écologiques des épisodes de sécheresse. Malgré sa diversité écologique, le parc subit lui aussi les impacts croissants de ces phénomènes. Dès lors, une question centrale se pose : **comment les sécheresses et autres extrêmes climatiques affectent-ils la vitalité des**

écosystèmes naturels et l'évolution des services de régulation qu'ils assurent ?

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude, qui mobilise les outils de la géomatique et de la télédétection spatiale afin d'évaluer l'impact des sécheresses sur la végétation et les fonctions écologiques associées dans le parc. Cette approche permet d'analyser différents indicateurs biophysiques, tels que l'indice de végétation (NDVI), la température de surface (LST) ou encore l'humidité des sols (SWI).

L'objectif principal est de quantifier les effets des sécheresses sur la vitalité des écosystèmes forestiers du Parc Naturel Régional des Vosges du Nord, et d'évaluer les altérations potentielles des services écosystémiques de régulation qu'ils assurent. Pour ce faire, des données météorologiques sont mobilisées afin d'identifier les épisodes de sécheresses les plus marquants sur la période 2014-2024. Ces périodes sont ensuite croisées avec les données de télédétection dans le but de caractériser leur intensité, d'en analyser les effets sur la végétation, et de mieux comprendre la résilience écologique des infrastructures vertes du parc. L'ensemble de cette démarche vise à apporter des éléments d'aide à la décision en matière de gestion adaptative des milieux naturels face aux conditions climatiques futures.

I. OBJECTIFS DU TRAVAIL ET HYPOTHESES

Ce travail vise à comprendre comment les écosystèmes naturels du Parc Naturel Régional des Vosges du Nord réagissent aux sécheresses dans un contexte de changement climatique. En mobilisant les outils de la télédétection et de l'analyse spatiale, il s'agit de documenter, quantifier et interpréter les effets des extrêmes climatiques sur les principaux services écosystémiques de régulation rendus par la végétation. Cela soulève plusieurs questions de recherches :

- Comment la capacité de fixation du CO₂ varie en fonction des conditions climatiques ? On s'intéresse ici à quantifier le CO₂ fixé via l'activité photosynthétique et de quantifié l'effet des extrêmes climatiques sur la vitalité de la végétation. La réponse spécifique en fonction des types de végétation sera un focus.
- Comment la capacité de régulation du microclimat varie en fonction des conditions climatiques et photosynthétique et à quel point les extrêmes climatiques perturbent-ils les processus de refroidissement ? On s'intéresse au pouvoir refroidissant en fonction des types de végétation. Cette étude permettra d'identifier les constellations avec les meilleures performances en temps de sécheresses et tolérance aux extrêmes climatiques.
- Comment le rôle éponge du sol (rétention d'eau du sol) varie en fonction des conditions climatiques et la couverture végétale et quelle est l'effet des extrêmes climatiques sur les réserves hydrologiques ?

L'objectif Général de cette étude est d'analyser, à l'aide d'outils géomatiques et de télédétection, l'impact des sécheresses sur la vitalité des infrastructures vertes du Parc des Vosges du Nord entre 2014 et 2024, et d'évaluer l'évolution de leurs fonctions de régulation face aux pressions climatiques croissantes. Il s'agira spécifiquement de:

- Quantifier les services de régulation du parc dans le contexte d'extrême climatique,
- Analyser les effets des extrêmes climatiques sur les écosystèmes sensibles protégés ,
- Formuler des propositions techniques pour soutenir les politiques publiques et les gestionnaires dans le développement de stratégie territoriale dans le cadre du changement climatique (objectif à long-terme pour les gestionnaires).

Ces objectifs répondent à un enjeu double : produire des connaissances utiles à la science sur

Etude géomatique de l'effet des sécheresses sur la vitalité et les services écosystémiques de régulation des infrastructures vertes du parc naturel des Vosges du nord (2014-2024)

les effets du changement climatique dans les aires protégées, et fournir des éléments d'aide à la décision aux gestionnaires territoriaux dans l'adaptation des politiques forestières. Les hypothèses principales qui guident ce travail sont les suivantes :

- Les épisodes de sécheresses impactent fortement la capacité de stockage en CO₂
- Les écosystèmes naturels, grâce à leur surface et bonne condition écologique - sont relativement résilients aux extrêmes climatiques
- les écosystèmes naturels du parc présentent des réponses différenciées face aux sécheresses selon les types de peuplements et les caractéristiques édaphiques.

Cette étude est effectuée dans le but d'apporter des réponses à ces questionnement.

II. REVUE DE LA LITTERATURE

II.1. Introduction

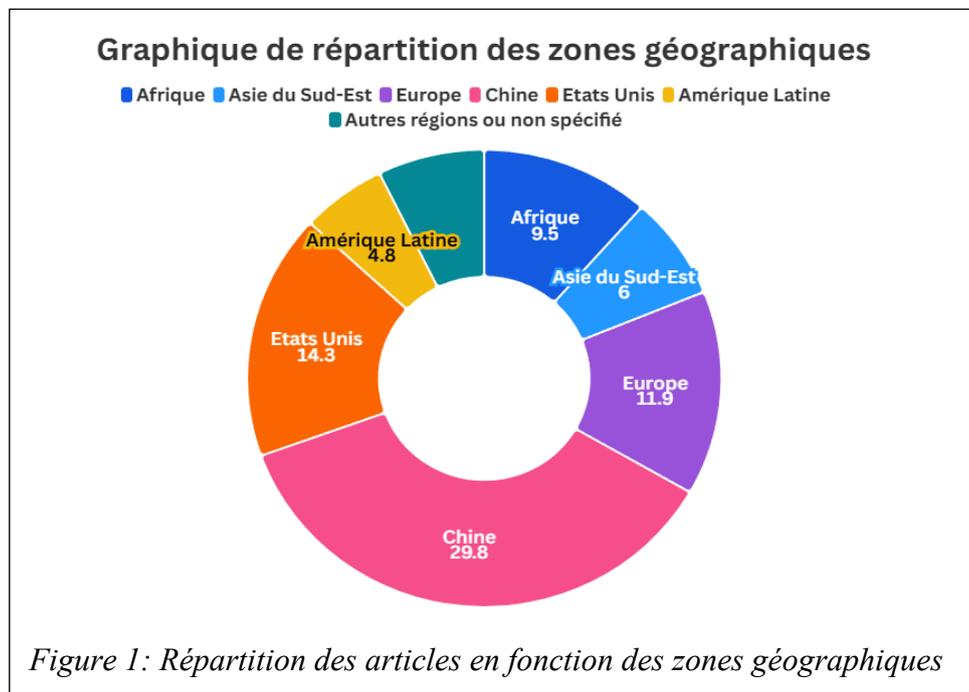
Ce chapitre décrit les principales conclusions de l'analyse de la littérature menée pour déterminer l'état de l'art et l'état de la pratique liés à la recherche dans le domaine de la télédétection, des services écosystémiques, de la séquestration du carbone et de la vitalité des plantes et écosystèmes. En préparation à cette étude, une recherche bibliographique dont l'objectif est de rassembler, d'analyser et de faire une synthèse des différentes études menées sur le sujet. Dans cette partie, il y a donc la description des méthodologies, objectifs principaux et limites des différentes études traitant de ces thèmes obtenus après une sélection méticuleuse. Les documents scientifiques utilisés proviennent de bases de données bibliographiques tels que Google scholar, Web of science et Elsevier.

La récupération des articles qui incorporant les thèmes d'intérêt s'est faite grâce une recherche effectuée dans le champ du sujet (c'est-à-dire mot-clé /titre/résumé). Différents mots clés ont été systématiquement définis, fournissant ainsi une requête de recherche bibliographique logique pour localiser des références très pertinentes dans la base de données. Les mots-clés : « services écosystémiques », « séquestration de carbone », « outils de télédétection » et « indice de télédétection » ont permis d'obtenir 724 documents de base comprenant des articles, des revues ainsi que quelques thèses, dans la période allant de 2015 à 2025 pour se concentrer sur les recherches les plus récentes.

Un processus de sélection a ensuite été instauré afin de les réduire au minimum, constituer en premier lieu d'un focus sur la thématique (Choix de 500 articles), suivis d'un filtrage des titres (choix de 200 articles), une lecture des résumés (choix de 100 articles) et la lecture de ces articles a permis une sélection finale de 84 articles constituant l'ensemble de la revue littéraire utilisé pour cet état de l'art. Etant donné le fait que cette étude concerne le parc des Vosges du Nord qui est une zone à végétation dense, les articles traitant similaires ou s'y rapprochant ont été prioriser par rapport à ceux se concentrant sur les populations humaines ou les zones urbaines.

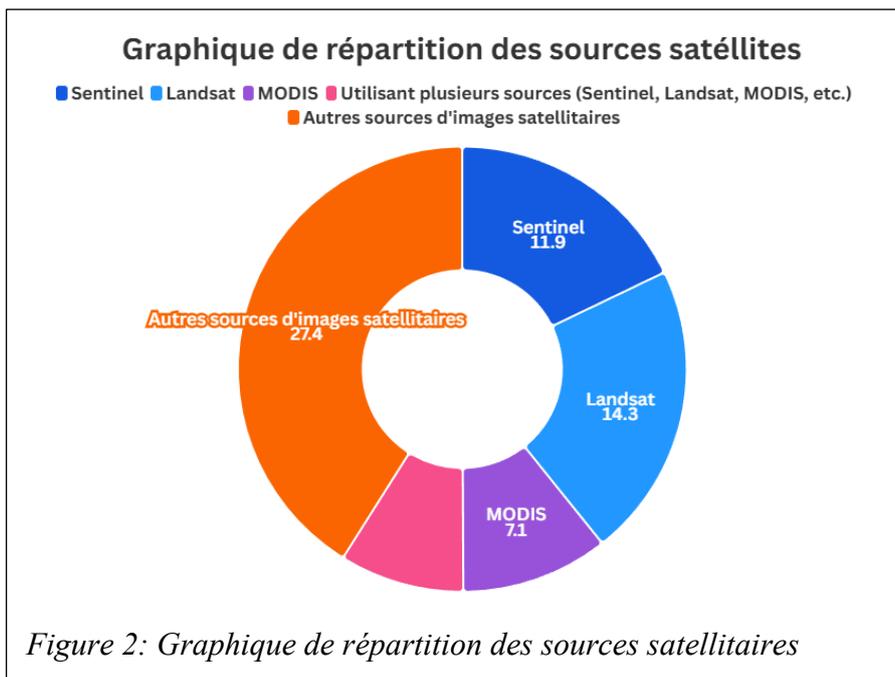
II.2. Vue d'ensemble de la littérature mobilisée

La revue de littérature s'appuie sur 84 publications scientifiques sélectionnées après lecture intégrale, incluant principalement des articles de recherche (83,3 %), mais aussi des revues systématiques, actes de conférences et rapports. Les études recensées couvrent majoritairement l'Asie, l'Europe et l'Amérique du Nord, avec une forte progression du nombre de publications entre 2015 et 2023, traduisant un intérêt croissant pour les services écosystémiques face au changement climatique. La figure 1 montre la répartition des articles en fonction de leur zone géographique.

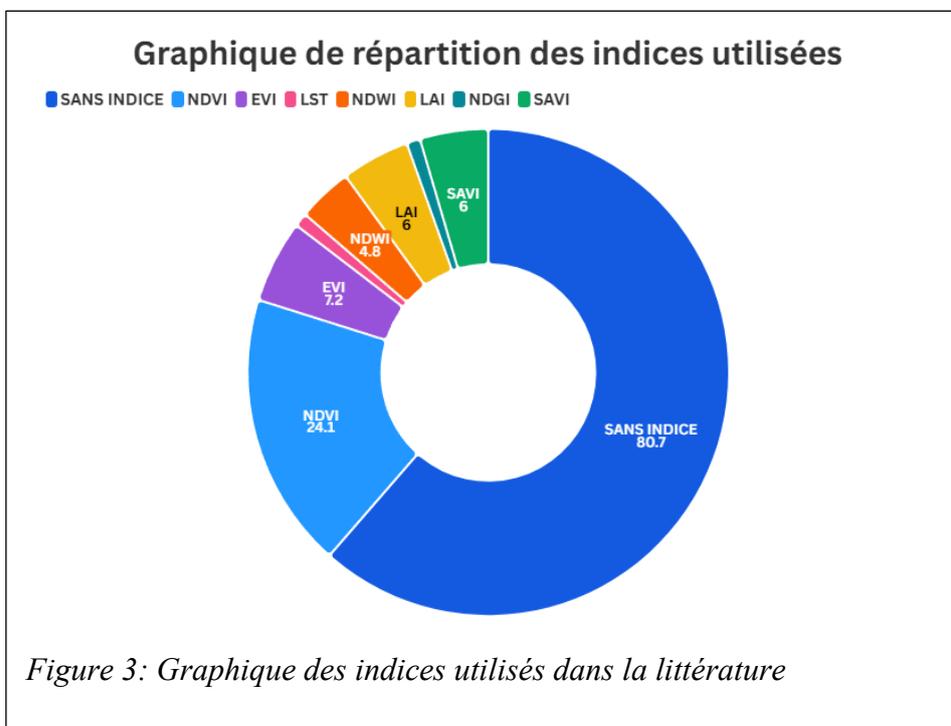


Les approches méthodologiques se répartissent en quatre grandes catégories : traitement de données (notamment par télédétection), modélisation, planification/gestion, et incitations économiques. On observe une montée en puissance de la télédétection couplée à des outils avancés comme l'intelligence artificielle ou l'analyse multi-sources, surtout après 2020.

Concernant les données utilisées, 66,7 % des études reposent sur des images satellites (Sentinel, Landsat, MODIS), parfois croisées avec d'autres sources (données de terrain, rapports, bases socio-économiques). L'imagerie Sentinel est mobilisée dans 11,9 % des cas, Landsat dans 14,3 % et MODIS dans 7,1 %, tandis que 27,4 % des publications utilisent d'autres sources satellites combinées ou alternatives. La figure 2 présente le graphique de répartition des sources satellites.



Enfin, l'usage des indices de télédétection demeure partiel : seuls 24 % des publications utilisent le NDVI, suivi du EVI (7,2 %), du LAI (6 %) et du SAVI (6 %). Des indices plus spécifiques comme le NDWI, le LST ou le NDGI restent encore marginaux. Cette diversité reflète à la fois l'évolution des outils disponibles et l'adaptation des méthodologies aux objectifs écologiques ciblés.



Les objectifs et méthodes utilisés dans ces études évoluent allant de la simple observation à des objectifs plus stratégiques et orientés vers l'action tandis que pour les méthodes, la sophistication des outils et des analyses a clairement progressé avec le temps, en parallèle avec les avancées technologiques et l'accessibilité accrue des données satellitaires.

II.3. Objectifs

Les objectifs des études analysées couvrent un large éventail de thématiques liées aux services écosystémiques, à la télédétection et au changement climatique. Ces objectifs peuvent être regroupés en cinq grandes catégories qui sont :

- L'Évaluation des services écosystémiques 40,5% (34 articles) : Quantification des services (eau, carbone, biodiversité) à l'aide de la télédétection et de données spatiales.
- Changement climatique et résilience 15,5% (13 articles) : Etudes sur l'effet des changements d'usage des terres et du climat sur la vitalité des écosystèmes.
- Conservation de la biodiversité 10,7%(9 articles) : Méthodes de gestion et stratégies de préservation face à la vulnérabilité des écosystèmes.
- Planification et gestion urbaine 11,9%(10 articles) : Approches visant à intégrer les écosystèmes dans les politiques d'adaptation au changement climatique.
- Innovations méthodologiques 21,4%(18 articles) : Développement de nouveaux outils ou modèles, notamment en télédétection ou intelligence artificielle.

On remarque une nette prédominance des travaux orientés vers l'évaluation des services écosystémiques (40,5%), tandis que les approches basées sur la conservation ou la planification urbaine sont minoritaires. Cette répartition met en lumière un intérêt croissant pour les dimensions fonctionnelles des écosystèmes souvent abordées via des outils de télédétection.

Chaque type d'étude privilégie une approche unique en fonction des objectifs fixés. Le choix de sources de données et les indices utilisés sont directement dépendants de ces objectifs.

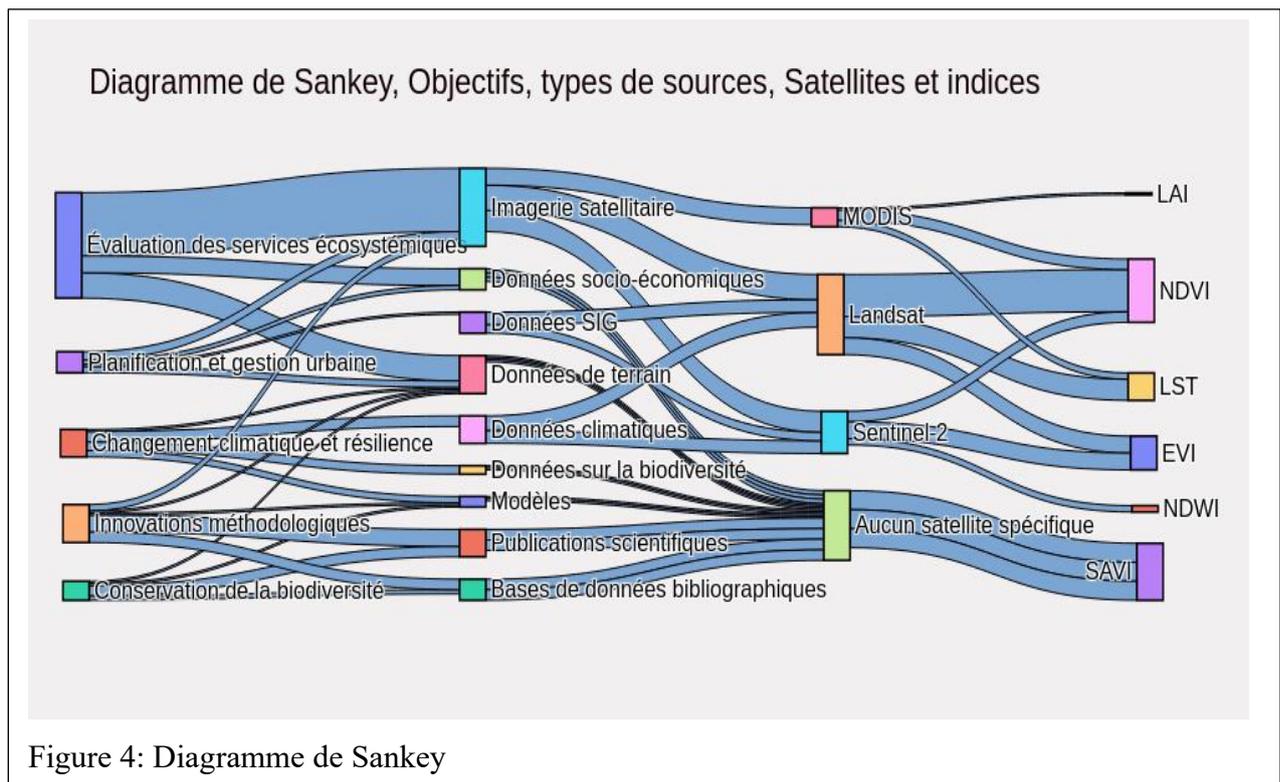


Figure 4: Diagramme de Sankey

Comme illustré sur la Figure 4, lorsque l'objectif de l'étude vise principalement l'évaluation des services écosystémiques, la source de données la plus utilisée est l'imagerie satellite et les indices de télédétection en l'occurrence tout ceux présentés dans le diagramme. A cela est combiné les données de terrain et les données socio-économiques.

Les études sur la planification urbaine et le changement climatique se basent aussi sur ces indices utilisant plusieurs satellites ainsi que des données climatiques et de biodiversité disponible. Les principaux indices utilisés pour l'étude du changement climatique sont le NDVI, le NDWI, le LST et le LAI. La planification urbaine se base plus sur le SAVI.

Les études sur la conservation de la biodiversité et l'innovation méthodologique font, quant à eux, moins appel à l'imagerie satellite et aux indices. Cela s'explique par le fait que la majorité des articles qu'on a rencontré et qui ont traité du sujet, étaient soit des revues, soit des études se basant sur d'autres recherches existantes. On peut aussi voir la combinaison de plusieurs modèles et données de sources différentes.

II.4. Limites

Bien que les techniques de télédétection soient de plus en plus utilisées dans les études environnementales, beaucoup de publications mettent en évidence certaines limites

méthodologiques ou techniques. Celles-ci concernent notamment la résolution des données, l'intégration de sources multiples, les échelles spatiales, les modèles utilisés et l'applicabilité contextuelle. Le tableau 1 présente une synthèse de ces limites

Tableau 1: Tableau synthétique des limites rencontrées dans la littérature

Limite identifiée	Part des articles	DESCRIPTION	Exemples d'études
Manque de données à haute résolution spatio-temporelle	29,8 % (25 articles)	Données anciennes ou trop espacées dans le temps, limitant les analyses fines ou longues	Nhan et al. (2015), Radeva et al. (2018)
Difficulté d'intégration des données multisources	17,9 % (15 articles)	Incompatibilités entre jeux de données ou modèles ; fiabilité dépendante de la qualité des données d'entrée.	Sun et al. (2019)
Problèmes d'échelle spatiale (local vs global)	14,3 % (12 articles)	Décalage entre la résolution des données et les processus écologiques ; dépendance à la validation terrain.	Articles non spécifiés
Limites des modèles utilisés	23,8 % (20 articles)	Hypothèses simplificatrices, manque de calibration, difficulté à projeter les tendances à long terme.	Grêt-Regamey et Weibel (2020)
Limites contextuelles et applicabilité géographique	14,3 % (12 articles)	Modèles efficaces localement mais peu transférables à d'autres régions ou types d'écosystèmes	Zhao et al. (2023), Yan et al. (2016)

Toutes ces limites montrent la nécessité de renforcer la qualité des données, de mieux calibrer les modèles utilisés et de concevoir des méthodologies plus facilement transposables à d'autres contextes géographiques. Elles orientent également les choix méthodologiques de la présente étude, notamment en matière de sélection des données et de traitement croisé.

II.5. Conclusion partielle

L'analyse de ces 84 articles montre une évolution notable des méthodes et des objectifs au fil des années, avec une tendance vers l'intégration de nouvelles technologies et une attention accrue à la résilience écologique face au changement climatique. Cette analyse servira de base solide pour orienter la suite de la rédaction du mémoire, en mettant en avant les approches méthodologiques et les enjeux clés liés aux services écosystémiques et à la télédétection.

III. MATERIEL ET METHODES

III.1. Présentation du cadre expérimental

III.1.1. Présentation du Parc Naturel des Vosges

Le parc naturel régional des Vosges situé dans la région Grand Est en France, couvre une surface d'environ 1305 km², à cheval sur les départements de la Moselle(57) et du Bas-Rhin(67). Créé en 1976, il est classé Réserve mondiale de biosphère par l'UNESCO en 1989 pour sa richesse naturelle, sa gestion durable et ses interactions entre les sociétés humaines et les écosystèmes (UNESCO, 1989).

Ce territoire se caractérise par une grande diversité de milieux : forêts feuillues (hêtres, chênes), forêts résineuses (pins, sapins), zones humides, tourbières, prairies, pelouses sèches, ainsi qu'un relief vallonné de basse altitude. Il se situe à l'interface entre plusieurs influences climatiques (océanique, continentale et montagnarde), ce qui en fait un site particulièrement sensible aux aléas climatiques tels que les sécheresses prolongées, les vagues de chaleur ou les pluies extrêmes (Parc naturel régional des Vosges du Nord, 2020).

Sa position écologique et géographique fait du parc un territoire démonstrateur pertinent pour étudier l'impact des événements climatiques extrêmes sur la vitalité de la végétation, la résilience des écosystèmes et les services écosystémiques de régulation (climat, eau, carbone). Il représente ainsi un laboratoire à ciel ouvert pour les études de dynamique forestière et de gestion durable.

III.1.2. Situation géographique

Le Parc naturel régional des Vosges du Nord est situé dans le nord-est de la France, à cheval sur les départements de la Moselle (région Grand Est) et du Bas-Rhin (Alsace). Il couvre une superficie d'environ 130 500 hectares et s'étend au sein du massif des Vosges du Nord, une région de moyenne montagne caractérisée par des paysages forestiers, des vallées encaissées et un important réseau hydrographique.

Le parc est délimité :

- au nord par la frontière allemande, avec une continuité écologique transfrontalière assurée par le Naturpark Pfälzerwald en Rhénanie-Palatinat,

- à l'est par la plaine d'Alsace,
- au sud par le piémont vosgien,
- à l'ouest par le plateau lorrain.

Il regroupe 111 communes, dont des villes comme La Petite-Pierre, Bitche, Wissembourg ou encore Niederbronn-les-Bains. Ce territoire se distingue par une forte naturalité, une densité forestière supérieure à 65 %, et une importante diversité écologique, justifiant son classement en Réserve de biosphère par l'UNESCO depuis 1989. Son positionnement à l'interface des influences atlantiques et continentales en fait un site privilégié pour l'étude des effets du changement climatique en zone tempérée.

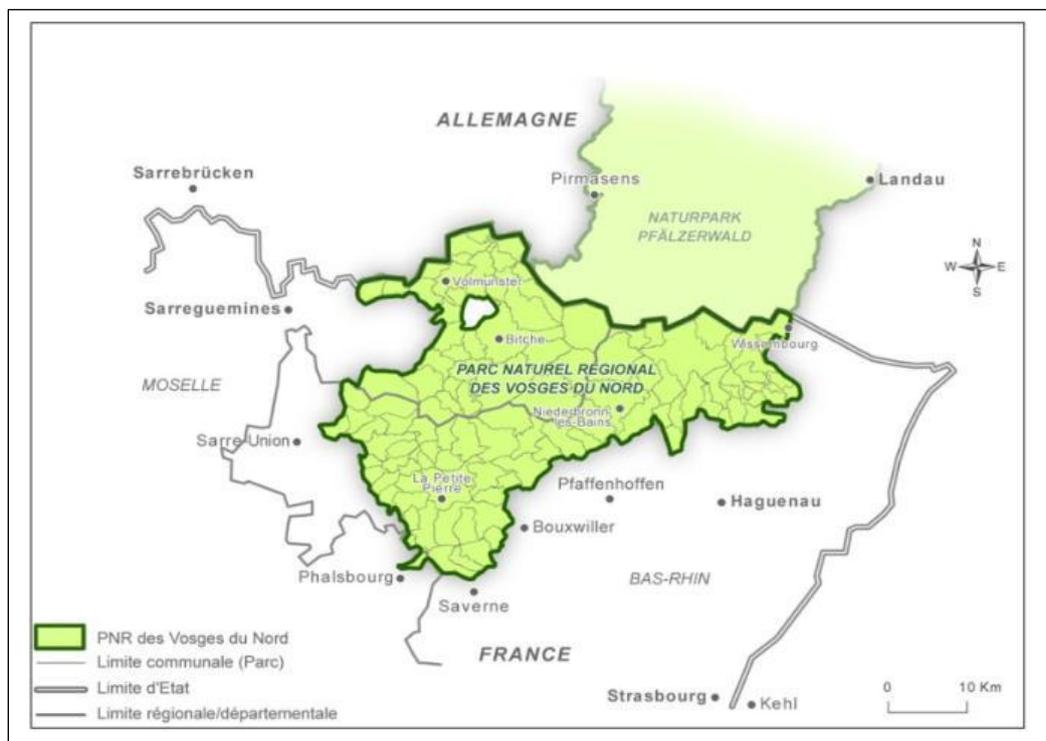


Figure 5 : Situation géographique du Parc des Vosges du Nord, région Grand-Est

Source : Ville de Bitche – page "Parc Naturel Régional des Vosges du Nord"

III.1.3. Présentation projet INTEREG V A-Horizon 2025

Le projet INTEREG V A "Horizon 2025" est un programme européen de coopération transfrontalière entre la France, l'Allemagne et le Luxembourg, cofinancé par le FEDER (Fonds européen de développement régional). Il s'inscrit dans une démarche de résilience climatique des territoires ruraux et naturels, en particulier les espaces protégés.

L'objectif principal du projet est de :

- Renforcer les infrastructures vertes transfrontalières
- Valoriser les services écosystémiques (eau, climat, biodiversité),
- Mettre en œuvre des outils de gestion adaptative basés sur la science,
- Partager les bonnes pratiques entre partenaires du Rhin supérieur

Le Parc naturel régional des Vosges du Nord, en tant que territoire pilote, participe à la construction de méthodologies partagées pour évaluer les impacts du changement climatique sur les milieux forestiers et humides. Ce projet mobilise des outils comme la télédétection, la cartographie, l'observation des indicateurs de végétation ou encore des analyses statistiques à l'échelle fine.

Ce travail s'inscrit pleinement dans les objectifs d'Horizon 2025, puisqu'il a pour but de :

- Quantifier l'effet des sécheresses sur la vitalité de la végétation forestière à l'aide d'indices issus de la télédétection (NDVI, LST, SWI, etc.),
- Évaluer la capacité de régulation des forêts et zones humides en période de stress climatique,
- Fournir des éléments concrets pour la gestion adaptative à l'échelle locale.

En mobilisant des outils de géomatique, des données spatiales et des méthodes quantitatives (analyses multivariées), cette étude contribue directement à l'ambition du projet : adapter les stratégies de gestion écologique au changement climatique à travers une approche fondée sur les données.

III.2. Organigramme méthodologique

La figure 6 ci-dessous présente l'organigramme méthodologique adopté pour cette étude.

Etude géomatique de l'effet des sécheresses sur la vitalité et les services écosystémiques de régulation des infrastructures vertes du parc naturel des Vosges du nord (2014-2024)

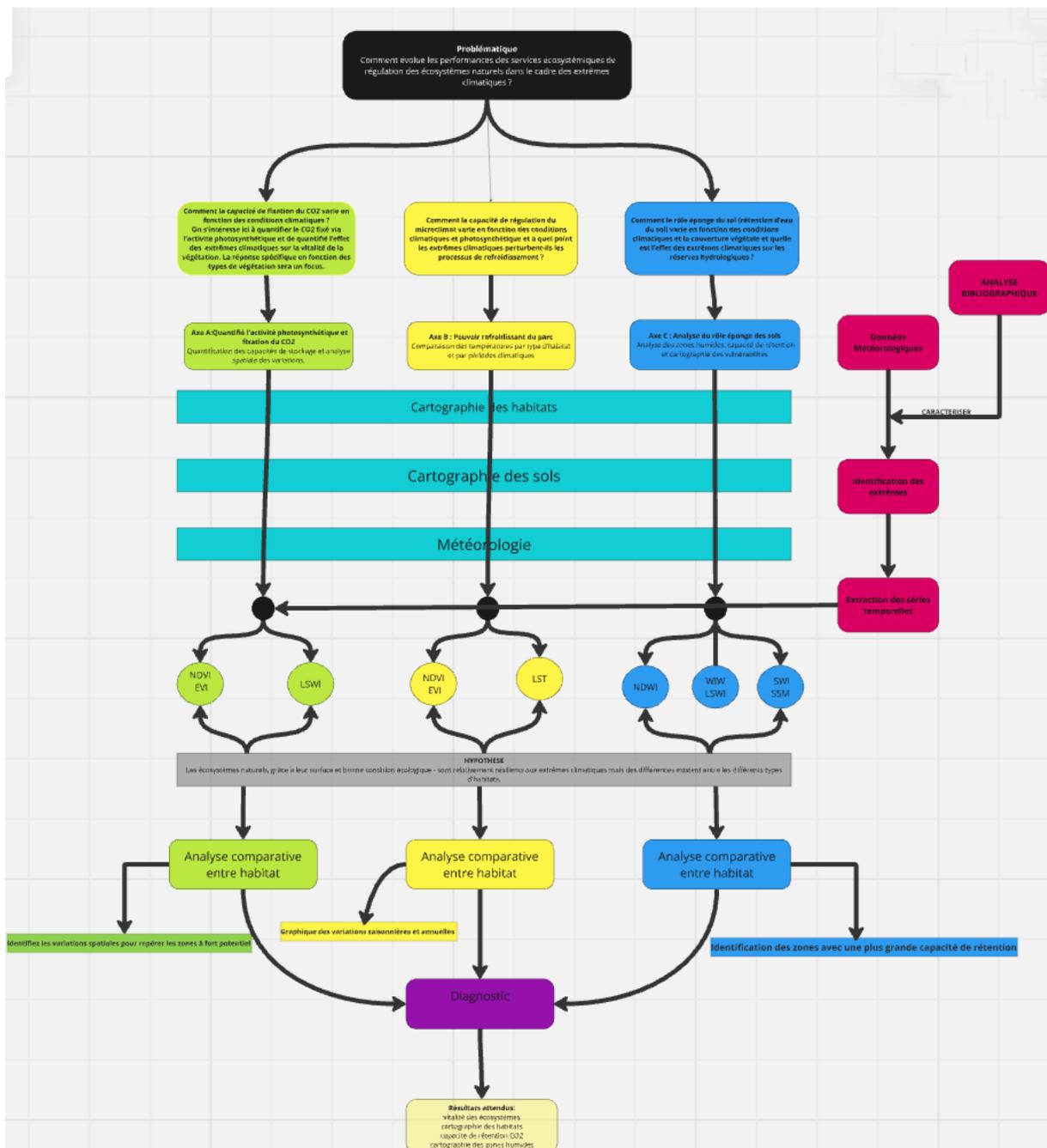


Figure 6: Organigramme méthodologique

III.3. Analyse des données météorologiques

Les données météorologiques utilisées, issues de Météo-France, portent sur les précipitations et les températures maximales journalières enregistrées entre 2014 et 2024. L'analyse a été restreinte à la période végétative (avril à octobre), correspondant à la phase où la végétation est la plus sensible aux stress climatiques (Koch, 2022). L'identification des épisodes extrêmes

repose sur un traitement statistique de ces variables, fondé sur des seuils établis à partir d'une revue bibliographique.

III.3.1. Sélection bibliographique et critères d'identification des extrêmes

La méthodologie utilisée pour la sélection des articles mobilisés pour cette revue bibliographique est la même que celle décrite dans l'état de l'art. A l'exception des mots-clés qui sont ici « Réchauffement climatiques », « Changement climatique », « extrêmes climatiques » et « évènements climatiques extrêmes » et des Critères d'inclusion et d'exclusion 2010 à 2024 dans ce cas-ci. A l'issue de cette analyse 30 articles ont été retenus et regroupés dans un tableau récapitulatif des extrêmes abordés dans ces études en fonction des températures et précipitations (min et max) de la fréquence et de la zone géographique. Le tableau 2 est basée sur le contexte et les caractéristiques climatiques des Vosges du Nord, avec des seuils exprimés comme anomalies par rapport aux normales mensuelles de températures (Tn, Tx) et de précipitations.

Tableau 2: Caractérisation des périodes extrêmes à partir de la bibliographie

Type d'extrême	Seuil journalier calculé par rapport aux normales mensuelles	Durée
1. Evènements uniques		
1.1 Anomalie chaude	Chaud (Tx=+3°C à +5°C)	≥ 1 jour
1.2 Anomalie très chaude	Très chaud (Tx> +5°C)	≥ 1 jour
1.3 Déficit de pluie sur 10 jours glissants	Précipitations ≤ 50% de la moyenne mensuelle	≥ 10 jours consécutifs
1.4 Pluviométrie extrême sur 10 jours glissants	Précipitations ≥ 150% de la moyenne mensuelle	≥ 10 jours consécutifs
1.5 Pluviométrie extrême hebdomadaire	Cumul ≥ 200% de la moyenne mensuelle/5 jours	5 jours consécutifs
1.6 Pluviométrie extrême journalière	Précipitations ≥ 50 mm/jour	Quelques heures à 1 journée
2. Evènements combinés		
2.1 Déficit de pluies + froid	Déficit de pluie(≤ 1 mm/jour) + Froid (Tn=-3°C à -5°C)	≥ 1 jour
2.2 Pluies froides	Excès de pluie+ Froid (Tn=-3°C à -5°C)	≥ 1 jour

2.3 Déficit de pluies + très froide	Déficit de pluie+ Très froid ($T_n < -5^{\circ}\text{C}$)	≥ 1 jour
2.4 Pluies très froides	Excès de pluie + Très froid ($T_n < -5^{\circ}\text{C}$)	≥ 1 jour
2.5 Sécheresse modérée	Déficit de pluie+ Chaud ($T_x = +3^{\circ}\text{C}$ à $+5^{\circ}\text{C}$)	≥ 1 jour
2.6 Pluies chaudes	Excès de pluie + Chaud ($T_x = +3^{\circ}\text{C}$ à $+5^{\circ}\text{C}$)	≥ 1 jour
2.7 Sécheresse intense	Déficit de pluie+ Très chaud ($T_x > +5^{\circ}\text{C}$)	≥ 1 jour
2.8 Pluies tropicales	Excès de pluie + Très chaud ($T_x > +5^{\circ}\text{C}$)	≥ 1 jour

Légende : T_n : Température minimale en $^{\circ}\text{C}$. T_x : Température maximale en $^{\circ}\text{C}$. Les seuils de précipitations sont exprimés en fonction des moyennes mensuelles pour tenir compte des variations saisonnières locales.

III.3.2. Classification des sécheresses

La sécheresse est un dérèglement du cycle de l'eau caractérisé par un manque d'eau assez important pour impacter la faune et la flore. Il existe trois principaux types de sécheresses (Le Centre d'Information sur l'eau, France) :

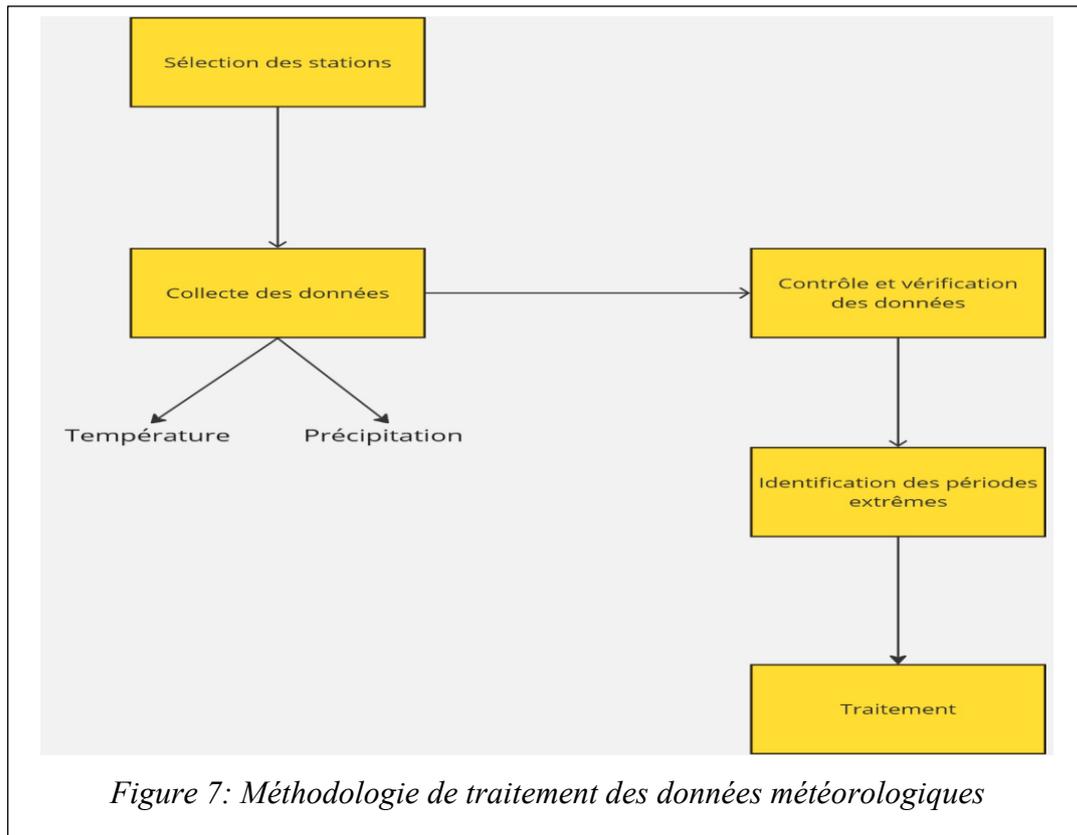
Tableau 3: Typologie des sécheresses

TYPE	DESCRIPTIF
Sécheresse météorologique	Pas de pluie sur une longue période (10jrs)
Sécheresse hydrologique	Diminution des écoulements d'eau
Sécheresse Géologique	Absence d'eau dans les couches superficielles du sol

Les périodes extrêmes de cette étude seront définis à partir des sécheresses météorologiques.

III.3.3. Collecte et vérification des données

Le traitement des données météorologiques a été réalisé afin d'identifier les périodes extrêmes et de faciliter leur corrélation avec les réponses écologiques observées. Les étapes méthodologiques sont consignées dans la figure 7 :

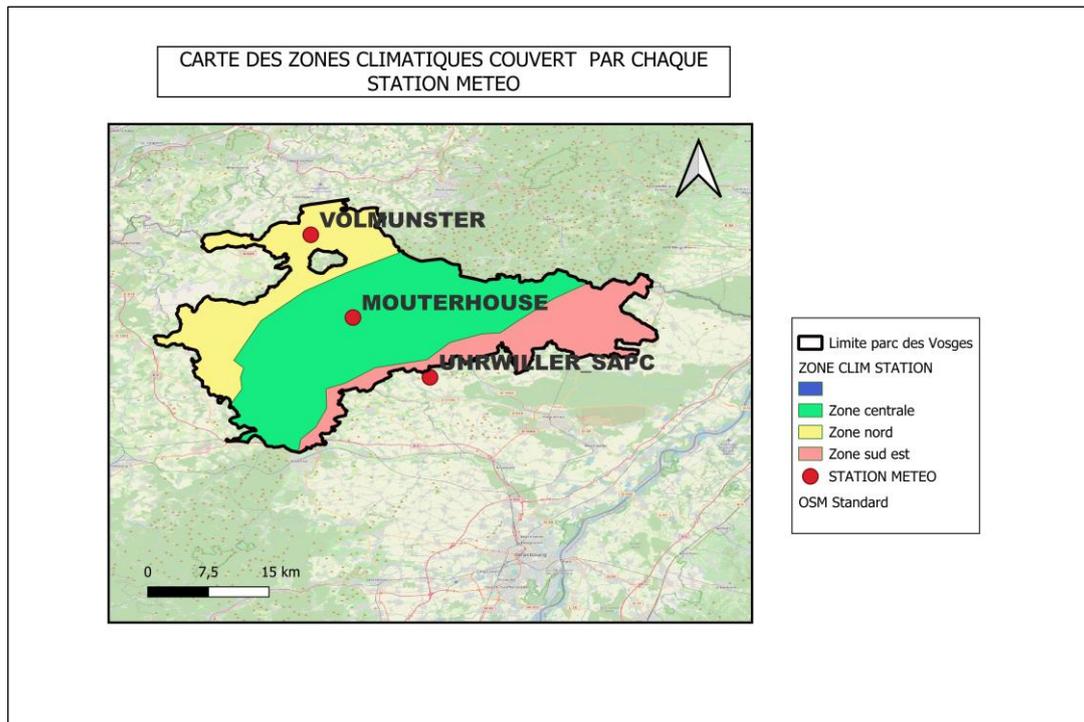


Le parc n'ayant pas de station météo fonctionnelle (il s'agit ici d'une station monitorée et appartenant au parc) il a été jugé raisonnable de choisir des stations météo situées dans le parc appartenant à météo France et qui sont toujours fonctionnelles. Les plus proches sont au nombre de quatre(4) et présents dans le département de la Moselle(2) et dans celle du Bas-Rhin (2). Une étape de contrôle qualité a été menée pour détecter les valeurs manquantes ou aberrantes. Les méthodes suivantes ont été utilisées :

- Identification des données manquantes dans les relevées des stations météo.
- Sélection des stations ayant une base de données complète allant de 2014 à 2024

Trois stations météorologiques ont par la suite été retenues : VOLMUNSTER, MOUTERHOUSE et UHRWILLER. La quatrième station n'a pas été retenue car située en dehors du périmètre du parc et étant trop éloignée du parc par rapport aux trois autres. Le choix de ces trois stations permet une diversité de contextes topographiques et hydrologiques. En particulier, la station de MOUTERHOUSE, située en plein cœur du massif forestier et qui se trouve dans une zone relativement humide. Les deux autres, situées en périphérie du parc dans des zones plus exposées au stress hydrique, ont donc été sélectionnées afin de ne pas manquer

d'éventuelle période de sécheresse qui pourraient être atténuées ou non enregistrées sur cette station. La station de UHRWILLER a été retenue malgré le manque de données en 2017 et 2019 car elle couvre une zone climatique plus sèche que les deux autres et qu'elle est nécessaire pour ne pas rater certaines périodes de sécheresses.



III.3.4. Calcul des Indices Climatiques

III.3.4.a. Température

Les relevés journaliers de températures minimales (TN) ne sont pas pertinents dans cette étude. Elles (TN) sont le résultat des mesures de nuit et sont souvent utilisés dans des études visant le confort ou l'impact des hausses de température sur les humains. Ces mesures étant effectués généralement dans la nuit, tôt le matin ou en début de matinée, période durant laquelle l'activité photosynthétique nécessaire à cette étude est très faible, voire absente.

Les données de température maximales (TX) sont les plus importantes, on considère ici la température maximale journalière relevé probablement en milieu de journée garantissant une activité photosynthétique maximale. Elles permettront donc de constater les effets directs des changements de températures sur la vitalité des plantes.

Le calcul des moyennes mensuelles à partir des relevés journaliers (TX) serviront comme base de comparaison pour observer les fluctuations quotidiennes de la température.

- TN : Température minimum en °C

- TX : Température maximum en °C

III.3.4.b. Précipitation

Les moyennes de précipitations sont calculées sur une période glissante de 10 jours considérant que les signes d'une sécheresse hydrologique sont visibles à partir de 10 jours. Elles sont ensuite comparées aux moyennes mensuelles, 50% de plus ou moins par rapport à la moyenne mensuelle si différents de 0, pour déterminer les périodes les plus sèches ou les plus humides.

Des indicateurs climatiques spécifiques ont été calculés pour identifier les événements extrêmes sur la période de 2014 à 2024 en se basant sur le tableau 2 représentant les caractéristiques des périodes extrêmes.

Ces événements extrêmes sont ensuite catégorisés grâce à la rencontre des différentes périodes, permettant d'étudier le comportement de la végétation face à chaque événement et à la substitution des périodes extrêmes. Les précipitations sont exprimés en mm

La méthode de traitement des données météorologiques garantit une identification précise des événements extrêmes, essentielle pour analyser leurs impacts sur les écosystèmes du Parc des Vosges du Nord. Les données sont ensuite agrégées sur des périodes spécifiques pour faciliter leur corrélation avec les indices de végétation (NDVI, SWI, etc.). Toutes les analyses météorologiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Excel.

III.4. Télédétection et indices biophysiques

III.4.1. Introduction à la télédétection et au choix des capteurs

La télédétection désigne l'acquisition d'informations sur la surface terrestre à distance, généralement à l'aide de capteurs embarqués sur des satellites. Elle permet de surveiller l'état et l'évolution des milieux naturels à différentes échelles spatiales et temporelles, en mesurant l'énergie réfléchie ou émise par la surface. Dans les sciences environnementales, elle est

particulièrement utile pour le suivi de la végétation, de la température de surface et de l'humidité des sols (Lillesand et al., 2015 ; Jensen, 2007).

Pour acquérir des images satellitaires une étape préalable de choix d'un satellite adapté à l'étude est nécessaire. Il existe plusieurs types de satellites ayant leurs avantages et leurs inconvénients et qui permettent d'acquérir différents indices en fonction de nos besoins. Un résumé de synthèse est présenté dans le tableau 4 suivant : Copernicus (Sentinel-2), NASA (LANDSAT,MODIS), DataTerra Dinamis (SPOT, Pléiades), ESA (Worldview-3)

Tableau 4:Avantages et inconvénients des satellites MSI (en vert les satellites choisis).

Satellites	Avantages	Inconvénient
Sentinel-2	<ul style="list-style-type: none"> • Haute résolution (10 m) • Passe tous les 5 jours • Lancer en 2015 • 13 bandes spectrales • Open data prétraiter 	Données de surface accessible directement en open data que depuis 2017
SPOT 6-7	<ul style="list-style-type: none"> • Très haute résolution (1 m) • Spécifique à des zones pour un besoin 	<ul style="list-style-type: none"> • Programmation nécessaire, pas de mesures automatiques répétitives de la terre • 5 bandes spectrales sont mesurées
MODIS	<ul style="list-style-type: none"> • Image complète de la terre en 2 jours • 36 bandes spectrales 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible résolution (250 m) Date de lancement 1999
Landsat-8	<ul style="list-style-type: none"> • 11 bandes spectrales • Open data prétraiter • Lancer en 2013 • Données de surface accessible depuis 2013 	<ul style="list-style-type: none"> • Une bonne résolution (30 m) mais insuffisante pour cette étude • Passe tous les 16 jours
Worldview-3	<ul style="list-style-type: none"> • Très Haute résolution (30 cm) 	<ul style="list-style-type: none"> • 4 à 6 semaines pour obtenir les données
Pléiades(1A-1B)	<ul style="list-style-type: none"> • Très hautes résolution (50 cm) • Revisite en 1 jour 	<ul style="list-style-type: none"> • Programmation nécessaire, pas de mesures automatiques répétitives de la terre. • 5 bandes spectrales sont mesurées • Les lancements ont eu lieu en 2011et 2012

Cette étude utilise principalement les données issues des satellites Sentinel-2 appartenant à l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Ces 2 satellites sont polyvalents, le premier a été lancé le 27/06/2015 et le deuxième le 28/03/2017. Ils mesurent en continue 13 bandes spectrales allant du visible (400 nm, 800 nm) aux ondes courtes infrarouges (1300 nm, 2500 nm) en passant par les proches infrarouges (800 nm, 1300 nm) . Ils ont une résolution maximum de 10 mètres et peuvent prendre une photo sur un site tous les 5 jours. Ils génèrent deux niveaux de mesures qui sont L1C (top of the atmosphere) et L2A (surface reflectance). Les données L2A ne sont disponibles que depuis le lancement du deuxième 17. Ce satellite nous permet d'obtenir les images de la majorité de nos indices comme le NDWI, NDVI , EVI, LSWI, mais pour les indices comme LST, SWI, SSM nous avons dû utiliser le satellite MODIS ou directement le site COPERNICUS BROWSER pour le WIW qui est un nouvel indice.

Critères de sélection :

- Niveau des images : L2A et L1C
- Type d'image : COPERNICUS/S2_HARMONIZED
- Plage temporelle : 2015-2024
- Couverture nuageuse maximum : 10%, 20% et 30%
- Zone spatiale : Parc Naturel des Vosges du Nord
- Masquer les nuages

III.4.2. Indices de télédétection utilisés

Le tableau 7 présente les différents indices, leurs rôles dans notre étude ainsi que les avantages et inconvénients de chacun .

Tableau 5: Rôle, avantages et inconvénients des indices de télédétection utilisées

Indice	Formule	Plage de valeurs	Rôle dans l'étude	Avantages	Inconvénients	Source
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$	-1 à +1	Suivre la vigueur et la densité de la végétation ; détecter les anomalies saisonnières ou les tendances de dégradation	Simple, largement utilisé, compatible multi-capteurs	Saturation en végétation dense	Tucker, 1979
EVI (Enhanced Vegetation Index)	$2.5 \times (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + 6 \times \text{RED} - 7.5 \times \text{BLUE} + 1)$	-1 à +1 / parfois > 1	Alternative au NDVI ; mieux adaptée aux forêts denses du parc	Moins sensible à la saturation et à l'effet du sol	Plus complexe à calculer ; dépend du canal bleu	Huete et al., 2002
NDWI (Normalized Difference Water Index)	$(\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$	-1 à +1	Suivre l'humidité de la végétation et des sols ; indicateur d'état hydrique	Sensible aux variations d'humidité	Moins fiable en sol nu ou en climat sec	Gao, 1996
LST (Land Surface Temperature)	Dérivée thermique satellite	Variable selon capteur (°C ou K)	Quantifier les effets de stress thermique (ex. îlots de chaleur, évapotranspiration)	Indique directement le stress hydrique et thermique	Affectée par la couverture nuageuse ; nécessite correction atmosphérique	Wan & Dozier, 1996
SWI (Soil Water Index)	Produit dérivé des micro-ondes (SMOS, ASCAT...)	0 (sec) à 1 (humide)	Évaluer l'humidité du sol en profondeur ; cartographier la vulnérabilité à la sécheresse	Insensible aux nuages, suivi sur longue période	Résolution spatiale faible	Wagner et al., 1999
SSM (Surface Soil Moisture)	Produit dérivé (0-5 cm)	0 à 100 % ou 0 à 1	Suivre rapidement l'humidité de surface, utile après précipitations ou en période sèche	Données fréquentes, temps de réponse court	Influence de la végétation sur la précision	Brocca et al., 2017
LSWI (Land Surface Water Index)	$(\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$	-1 à +1	Détecter l'eau dans la végétation ou les sols ; utile dans le suivi des cycles hydriques	Complémentaire à NDVI ; utile en période sèche	Moins stable en forêt dense	Xiao et al., 2004

Le tableau 6 présente le niveau de vitalité de la végétation en fonction du NDVI

Tableau 6: Caractérisation de la vitalité de la végétation en fonction du NDVI

Valeur NDVI	Code couleur	État de la végétation	Description
0.7 à 1.0	Vert foncé	Végétation très saine	Végétation dense, active et non stressée, en pleine croissance.
0.5 à 0.7	Vert clair	Végétation saine	Bonne couverture végétale, peu de stress.
0.3 à 0.5	Jaune	Végétation modérément saine	Végétation clairsemée ou sous léger stress.
0.2 à 0.3	Orange	Végétation sous stress	Stress visible, potentiel besoin en eau ou en nutriments.
0.1 à 0.2	Rouge clair	Végétation très stressée	Plantes en souffrance, croissance très limitée.
0 à 0.1	Rouge foncé	Végétation morte ou absente	Peu ou pas de végétation vivante, présence de sol nu ou de végétation morte.

Le tableau 7 montre les plages de vitalité de la végétation mesurée à partir du NDWI

Tableau 7: Caractérisation de la vitalité de la végétation en fonction du NDWI

NDWI	0,2 à 1	Surfaces d'eau
	0,0 à 0,2	Inondations, forte humidité
	-0,3 à 0,0	Sécheresse modérée, surfaces non aquatiques
	-1 à -0,3	Sécheresse, surfaces non aquatiques

III.4.3. Traitement et analyse des images satellitaires

Pour l'obtention des données d'indice le processus suivant a été adopté:

- Ecrire un code sur google Colab ou Google Engine et rattaché au drive pour le stockage
- Télécharger les images satellites pour les différents indices
- Traiter les images avec QGIS et essayer d'obtenir des images les plus net possibles en évitant les trous dû à une trop forte couverture nuageuse et en les corrigeant si nécessaire.

- Faire des cartes représentatives de l'état de la végétation avant, pendant et après une période extrême
- Faire des cartes comparatives en fonction des habitats et des périodes
- Calcul des max, min et moy des indices en fonction des habitats et des types de végétations
- Exporter les valeurs des indices sous format Excel pour traitement
- Représentation graphique de la variation des indices en fonction des périodes et du temps

En fonction des axes d'études et de l'objectif visé plusieurs indices ont été utilisés, ce qui a abouti à plusieurs milliers d'images à traité dans la période de 2014 à 2024.

III.5. Estimation du stockage de carbone

Le calcul du dioxyde de carbone stocké dans la biomasse forestière repose sur une méthode adaptée aux écosystèmes forestiers tempérés. À partir de l'indice de végétation NDVI, utilisé comme proxy de la densité de végétation, une estimation de la biomasse aérienne a été réalisée. Cette biomasse est ensuite convertie en carbone (en appliquant un facteur de 0,5 selon les recommandations du GIEC, 2006), puis en équivalent CO₂ (via un facteur de 3,67, correspondant au ratio masse molaire CO₂/C).

Contrairement à certains modèles globaux empiriques (comme celui proposé par Baniya, 2018), intégrant latitude et longitude, cette approche se base sur des coefficients validés pour les forêts tempérées européennes, garantissant une meilleure cohérence avec le contexte écologique du Parc naturel régional des Vosges du Nord. Elle permet une estimation plus réaliste du stock de carbone, en lien direct avec la dynamique de végétation mesurée par télédétection

III.6. Occupation des sols et essences forestières

III.6.1. Sources de données

Trois jeux de données géographiques ont été mobilisés pour caractériser les occupations du sol et les peuplements forestiers du Parc naturel régional des Vosges du Nord :

- **CORINE Land Cover 2018** : base européenne fournissant une cartographie des grands types d'occupation du sol (forêts, zones agricoles, surfaces artificialisées, etc.), à

une résolution de 100 mètres. Elle a été utilisée pour obtenir une vue d'ensemble de la couverture du sol à l'échelle régionale.

- **CARHAB** : base nationale française cartographiant les habitats naturels selon une approche typologique, utile pour croiser les réponses écologiques avec les types de sols et les groupements végétaux. Elle a permis de raffiner la lecture des conditions pédologiques et écologiques du territoire.
- **Données internes du parc** : shapefiles vectoriels fournis par la structure gestionnaire du parc, comprenant les **essences forestières par polygone**. Ces données renseignent les essences dominantes et secondaires à travers plusieurs champs attributaires (ESS1, ESS2, ESS3)

III.6.2. Méthode de traitement des données spatiales

Les données CORINE a été utilisées pour identifier et extraire les zones forestières au sein du périmètre d'étude. Les couches CARHAB ont été croisées avec les cartes d'essences pour mieux comprendre les interactions entre composition forestière et caractéristiques édaphiques (types de sols et habitats naturels).

Les couches d'essences ont été standardisées afin d'harmoniser les noms d'espèces et leur codification, facilitant ainsi le traitement statistique et l'analyse comparative. Des jointures attributaires ont été effectuées dans QGIS pour rattacher les informations écologiques aux polygones forestiers. Les couches résultantes ont ensuite été utilisées comme support pour les analyses zonales sur les indices de télédétection (NDVI, LST, SWI, etc.)

III.6.3. Calcul des surfaces occupées par les essences dominantes

Afin d'identifier les essences dominantes à analyser plus spécifiquement dans les différentes phases du traitement, un calcul de surface a été effectué à partir de la couche d'essences du parc.

Chaque polygone forestier a été associé à une valeur de surface (en m² ou hectares), calculée via le champ \$area dans QGIS. Les valeurs ont été agrégées par essence en fonction des champs ESS1, ESS2, ESS3, permettant de déterminer la répartition surfacique de chaque espèce ou groupe d'espèces sur l'ensemble du parc.

Les essences représentant les plus grandes superficies ont ensuite été sélectionnées comme essences dominantes. Un seuil empirique a été retenu pour cette sélection.

Si Polygone= ESS1 ESS2 ESS3 alors : ESS1=50% ESS2=30% et ESS3=20%

SI Polygone= ESS1 ESS2 alors : ESS1=70% et ESS2=30%

Ces espèces ont fait l'objet d'analyses différenciées dans les comparaisons de réponse écologique face aux stress climatiques (par axe, par indice, par combinaison d'essences)

III.7. Analyse statistique multivariée

Les analyses statistiques permettent d'observer les corrélations qui existent entre les différentes variables étudiées. Il existe plusieurs types d'analyse statistiques adapter aux types de données . Certaines concernent uniquement les valeurs numériques (variables quantitatives) , d'autres des données non numérique (variables qualitatives) et enfin certaines inclus les deux types de données. Ce dernier cas est celui qui correspond à cette étude étant données les données de répartition des essences et les résultats de l'analyse des indices.

III.7.1. Préparation des données

Ces jeux de données sont prétraités en fonction des périodes extrêmes afin d'enlever les valeurs NA, de ranger les dates dans l'ordre chronologique, de sélectionner les résultats avant et pendant une période extrême des différents indices en fonction du phénomène ou groupe d'essences étudié. Ce jeu de données est ensuite chargé sur R STUDIO pour analyse.

III.7.2. Analyse factorielle de données mixtes (FAMD)

L'analyse factorielle de données mixtes (AFDM) est la méthode factorielle dédiée aux tableaux dans lesquels un ensemble d'individus est décrit par un ensemble de variables quantitatives et qualitatives. Le terme « mixte » renvoie à la présence simultanée, en tant qu'éléments actifs, de variables quantitatives et qualitatives. De façon simplifiée, on peut dire que l'AFDM fonctionne comme une analyse en composantes principales (ACP) pour les variables quantitatives et comme une analyse des correspondances multiples (ACM) pour les variables qualitatives.

III.7.3. Axes d'analyse et traitement par groupe

Cinq axes d'analyse ont été retenus afin d'explorer les relations entre la vitalité de la végétation, les indices environnementaux et les conditions climatiques extrêmes.

- 1ère analyse : toutes essences, tout indices.
- 2e : feuillus vs résineux avec tous les indices.
- 3e : feuillus avec indices photosynthèse (NDVI, EVI, LST, CO₂), résineux avec indices d'eau (NDWI, SWI, LSWI...) : les feuillus avec les indices qui se base fortement sur l'activité photosynthétique comme le NDVI, le CO₂, le EVI et avec le LST. puis avec les résineux dont la réponse ne peut pas être directement obtenu avec ces indices de vitalités du fait que leur réaction au stress n'est pas visible sur leurs feuillages. Pour ces derniers les indices basés sur le stockage de l'eau ont été prioriser à l'instar du NDWI, LSWI et le LST,
- 4e : focus sur indices d'humidité du sol (SSM, SWI) : l'analyse se focalise sur les indices d'humidité du sol dans le but de vérifier l'impact de la rétention en eau du sol sur la réponse des différentes essences en périodes extrêmes.

5e : analyse des combinaisons d'essences dominantes : un focus a été fait sur les essences dominantes qui occupent les surfaces les plus importantes et sur les regroupements d'essences pour voir si certaines combinaisons augmentent ou réduisent la résistance des essences.

IV. RESULTATS

IV.1. Présentation des périodes extrêmes identifiées

IV.1.1. Evolution climatique sur la période d'étude

A partir des seuils définis dans le tableau 2 plusieurs événements extrêmes ont pu être définis (déficit et excès de pluies) pour chaque station grâce aux données de températures et de précipitations : 314 dont 163 périodes de sécheresses pour Volmunster , 300 dont 155 périodes de sécheresses pour Mouterhouse et 249 dont 135 sécheresses pour UHWILLER.

IV.1.2. Visualisation des tendances climatiques

Les figures 9, 10 ET 11 présentent l'évolution combiné des maximums journaliers et moyenne mensuelle des températures et des précipitations pour chaque station.

• Température max quotidienne (rouge) • Moyenne mensuelle température (bleu foncé) • Précipitation quotidienne (bleu clair) • Moyenne précipitation mensuelle (jaune)

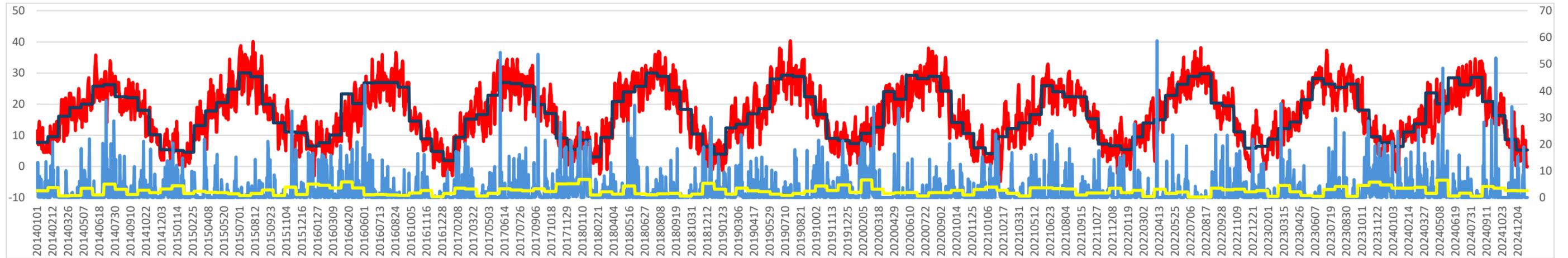


Figure 9: Graphique d'évolution de la température et des précipitations de 2014 à 2024 : STATION DE MOUTERHOUSE

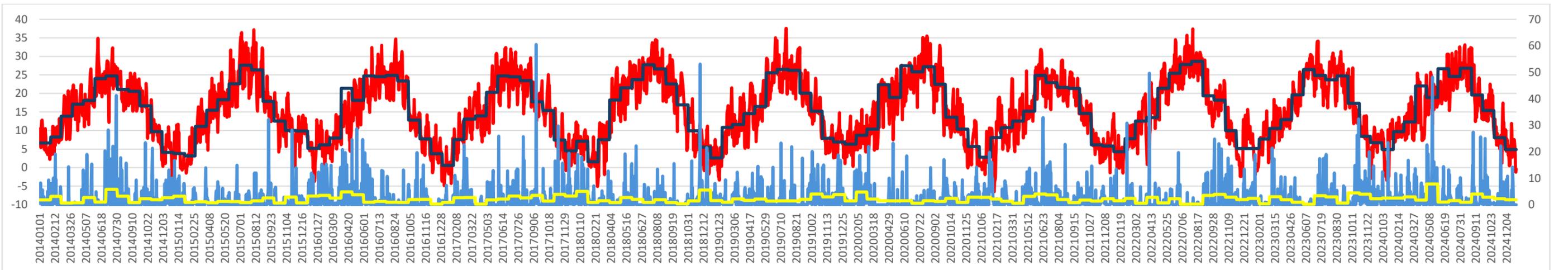


Figure 10 : Graphique d'évolution de la température et des précipitations de 2014 à 2024 : STATION DE VOLMUNSTER

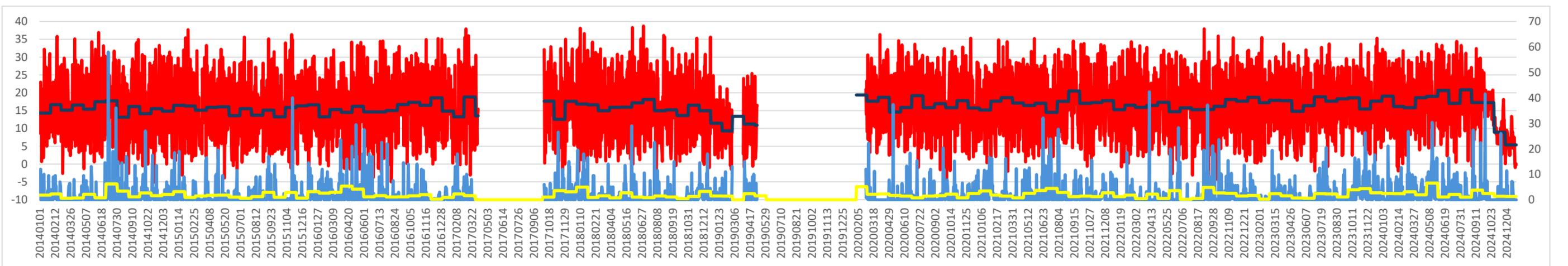


Figure 11 : Graphique d'évolution de la température et des précipitations de 2014 à 2024 : STATION DE UHRWILLER

Pour les stations de Mouterhouse et VOLMUNSTER , les courbes montrent une dynamique thermique saisonnière stable avec des pics en été et des baisses progressives à l'automne. En revanche à UHRWILLER cette tendance est moins nette visuellement. Cette différence s'explique en partie par la situation géographique spécifique à cette station. En effet située à 217 m d'altitude, UHRWILLER est la station avec la plus basse altitude (265 m pour MOUTERHOUSE, et 358 m pour Volmunster). Elle se trouve également à l'extrémité EST du parc, en bordure de zones agricoles plus ouvertes et moins boisées. Cette situation lui confère un microclimat local distinct, avec une inertie thermique plus faible et des pics de température moins accentués.

Bien que sa courbe puisse sembler moins expressive, les données de cette station ont bien permis l'identification fiable des périodes extrêmes, communes aux autres stations. C'est la raison pour laquelle elle a été maintenue dans l'analyse, tout en faisant l'objet d'une interprétation prudente.

IV.1.3. Synthèse des périodes extrêmes détectées

A partir des périodes de sécheresses détectées pour chaque station nous avons regroupé les périodes communes aux stations (les trois ou au moins deux)d'une durée supérieure ou égale à 3 jours pour au moins une des trois stations pendant la période végétative (avril- Octobre). L'objectif étant d'identifier les périodes les plus longues enregistrer pendant la période végétative sur toute la durée de l'étude (2014-2024) . Le tableau 8 présente les périodes de sécheresses communes aux différentes stations.

Tableau 8:Tableau des périodes extrêmes communes aux stations

STATION	UHRWILLER			VOLMUNSTER			MOUTERHOUSE		
	Date de début	Date de fin	Durée (jours)	Date de début	Date de fin	Durée (jours)	Date de début	Date de fin	Durée (jours)
2015	13/04/2015	26/04/2015	12	12/04/2015	26/04/2015	15	13/04/2015	26/04/2015	14
	08/06/2015	17/06/2015	10	08/06/2015	17/06/2015	10	08/06/2015	17/06/2015	10
	07/07/2015	17/07/2015	17	06/07/2015	17/07/2015	12	17/07/2015	23/07/2015	7
	03/09/2015	13/09/2015	10	06/09/2015	13/09/2015	8	06/09/2015	13/09/2015	8
	15/10/2015	27/10/2015	34	15/10/2015	27/10/2015	13	15/10/2015	27/10/2015	13
		18/11/2015		01/11/2015	18/11/2015	18	01/11/2015	18/11/2015	18
2016	25/04/2016	29/04/2016	5	26/04/2016	29/04/2016	4	26/04/2016	29/04/2016	4
	04/07/2016	19/07/2016	9	07/07/2016	19/07/2016	13	08/07/2016	19/07/2016	12
	02/08/2016	16/09/2016	18	30/08/2016	16/09/2016	17			

Etude géomatique de l'effet des sécheresses sur la vitalité et les services écosystémiques de régulation des infrastructures vertes du parc naturel des Vosges du nord (2014-2024)

STATION	UHRWILLER			VOLMUNSTER			MOUTERHOUSE		
ANNEE	Date de début	Date de fin	Durée (jours)	Date de début	Date de fin	Durée (jours)	Date de début	Date de fin	Durée (jours)
	30/08/2016	19/10/2016	17	11/10/2016	19/10/2016	9			
2017	28/03/2017	14/04/2017	20	27/03/2017	14/04/2017	19	28/03/2017	15/04/2017	19
	01/11/2017	10/09/2017	9	22/08/2017	10/09/2017	20	17/06/2017	26/06/2017	10
		01/10/2017		24/09/2017	01/10/2017	8	25/08/2017	01/09/2017	8
		21/10/2017		15/10/2017	21/10/2017	7	23/09/2017	01/10/2017	9
							17/10/2017	21/10/2017	5
2018	20/04/2018		8				20/04/2018	27/04/2018	8
	01/05/2018	12/05/2018	12	01/05/2018	12/05/2018	12	01/05/2018	12/05/2018	12
	22/06/2018	03/07/2018	12	22/06/2018	03/07/2018	12	21/06/2018	03/07/2018	13
	30/07/2018	08/08/2018	12	25/07/2018	08/08/2018	14	15/07/2018	26/07/2018	12
	19/08/2018	20/09/2018	18	09/09/2018	20/09/2018	12	16/09/2018	20/09/2018	5
	03/10/2018	25/10/2018	25	03/10/2018	25/10/2018	23	03/10/2018	25/10/2018	23
2019	19/04/2019	03/04/2019	5	25/03/2019	03/04/2019	10	25/03/2019	03/04/2019	10
		10/07/2019		29/06/2019	10/07/2019	12	25/06/2019	10/07/2019	16
		06/09/2019		27/08/2019	06/09/2019	10	21/08/2019	07/09/2019	18
		31/10/2019		29/10/2019	31/10/2019	3	29/10/2019	31/10/2019	3
2020	31/03/2020	29/04/2020	30	19/03/2020	29/04/2020	42	19/03/2020	29/04/2020	42
	09/09/2020	23/09/2020	15	09/09/2020	23/09/2020	15	09/09/2020	23/09/2020	15
	15/10/2020	24/10/2020	10	26/09/2020	24/10/2020	29	16/10/2020	24/10/2020	9
2021	25/03/2021	10/04/2021	33	25/03/2021	10/04/2021	17	24/03/2021	04/04/2021	12
	27/05/2021	21/06/2021	25	31/05/2021	21/06/2021	21	03/06/2021	07/06/2021	5
	14/10/2021	19/10/2021	6	15/10/2021	19/10/2021	5	13/06/2021	21/06/2021	9
							15/10/2021	19/10/2021	5
2022	18/04/2022	25/04/2022	8	18/04/2022	25/04/2022	8	18/04/2022	03/05/2022	16
	10/07/2022	19/07/2022	10	10/07/2022	19/07/2022	10	10/07/2022	19/07/2022	10
	30/07/2022	04/08/2022	17	30/07/2022	04/08/2022	6	04/08/2022	16/08/2022	13
	31/10/2022	13/10/2022	3	12/10/2022	13/10/2022	2	30/10/2022	02/11/2022	4
2023	19/05/2023	17/06/2023	31	23/05/2023	17/06/2023	26	19/05/2023	17/06/2023	29
	01/07/2023	14/07/2023	10	01/07/2023	14/07/2023	14	30/06/2023	14/07/2023	15
	14/08/2023	28/08/2023	15				15/08/2023	24/08/2023	10
	08/09/2023	17/09/2023	10	10/09/2023	17/09/2023	8	10/09/2023	17/09/2023	8
	10/01/2023	18/10/2023	17	01/10/2023	18/10/2023	18	01/10/2023	18/10/2023	18
2024	13/04/2024	15/04/2024	3	14/04/2024	15/04/2024	2	14/04/2024	14/04/2024	1
		22/07/2024		13/07/2024	22/07/2024	10	20/07/2024	22/07/2024	3
	27/08/2024	02/09/2024	9	27/08/2024	02/09/2024	7	27/08/2024	04/09/2024	9
	17/09/2024	24/09/2024	8	15/09/2024	24/09/2024	10	15/09/2024	24/09/2024	10

Etude géomatique de l'effet des sécheresses sur la vitalité et les services écosystémiques de régulation des infrastructures vertes du parc naturel des Vosges du nord (2014-2024)

STATION	UHRWILLER			VOLMUNSTER			MOUTERHOUSE		
ANNEE	Date de début	Date de fin	Durée (jours)	Date de début	Date de fin	Durée (jours)	Date de début	Date de fin	Durée (jours)
	20/10/2024	17/11/2024	29	24/10/2024	17/11/2024	24	22/10/2024	17/11/2024	27

En vert nous avons les périodes communes à UHR et VOL, en Jaune celles communes à MOUT et VOL et en Bleu les périodes communes à UHR et MOUT. Les cellules colorisées en rouge représentent les périodes les plus longues enregistré à différentes étapes de la période végétative (début, milieu et fin).

Les données manquantes à la station de UHRWILLER en 2017 et 2019 se font ressentir dans ce tableau par l'absence de période, il n'y a aucune assurance que celle-ci n'a pas enregistré de période de sécheresse durant ce laps de temps raison pour laquelle, les dates correspondantes pour les autres stations ne sont pas enregistrées comme des périodes uniques à elles seules. On peut aussi remarquer qu'une période prolongée peut être pour deux stations peut être entrecoupé d'une période de pluie sur la dernière.

IV.1.4. Sélection des périodes longues pour analyse par télédétection

Cette sous-section explique le choix méthodologique de trois grandes périodes de déficit hydrique (P1,P2,P2), identifié dans les graphiques de tendances climatiques plus haut, en fonction de leur durée et leur position dans le période végétative (début, milieu et fin).

Tableau 9:Tableau des périodes extrêmes analysées

Période	Dates	Phase végétative	Durée
P1	19 mars-30 avril 2020	Début	42 jours
P2	30 juillet-15 août 2022	Milieu	17 jours
P3	3-27 octobre 2018	fin	25 jours

Ces trois épisodes, choisis pour leurs longueurs et pour leur position dans le cycle végétatif, ont servi de support principal pour les analyses croisées avec les indices de télédétection.

IV.2. Effet des sécheresses sur la vitalité de la végétation

Après l'identification des principales périodes de sécheresse entre 2014 et 2024, cette partie vise à analyser l'impact de ces événements extrêmes sur la vitalité de la végétation du parc naturel des Vosges du Nord. A partir d'indice tels que le NDVI, EVI ou LST, il s'agit d'évaluer

la réponse globale du couvert végétale, puis de distinguer les dynamiques propres à certains types de peuplement forestier.

IV.2.1. Analyse par occupation CORINE (vue d'ensemble des types de couverts végétales

Les graphiques 12 ,13 et 14 présentent l'évolution du NDVI pour les différents types de couverts végétales fournis par CORINE pour les trois principales périodes de sécheresse. Il y est représenté les valeurs de NDVI avant la sécheresse puis leur évolution tout au long de la sécheresse.

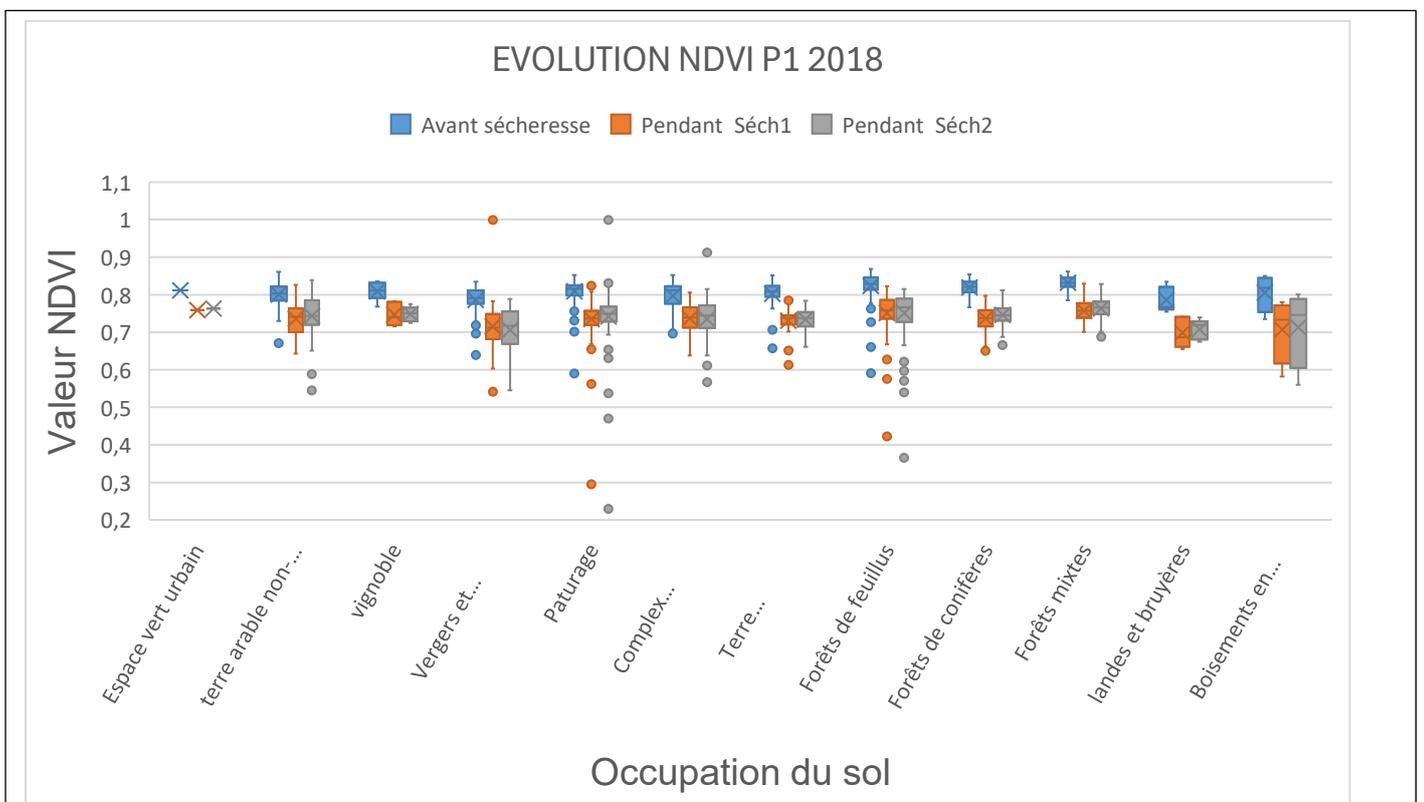


Figure 12: Evolution NDVI avant et pendant la sécheresse en fonction de l'occupation du sol par Corine :P1 2018

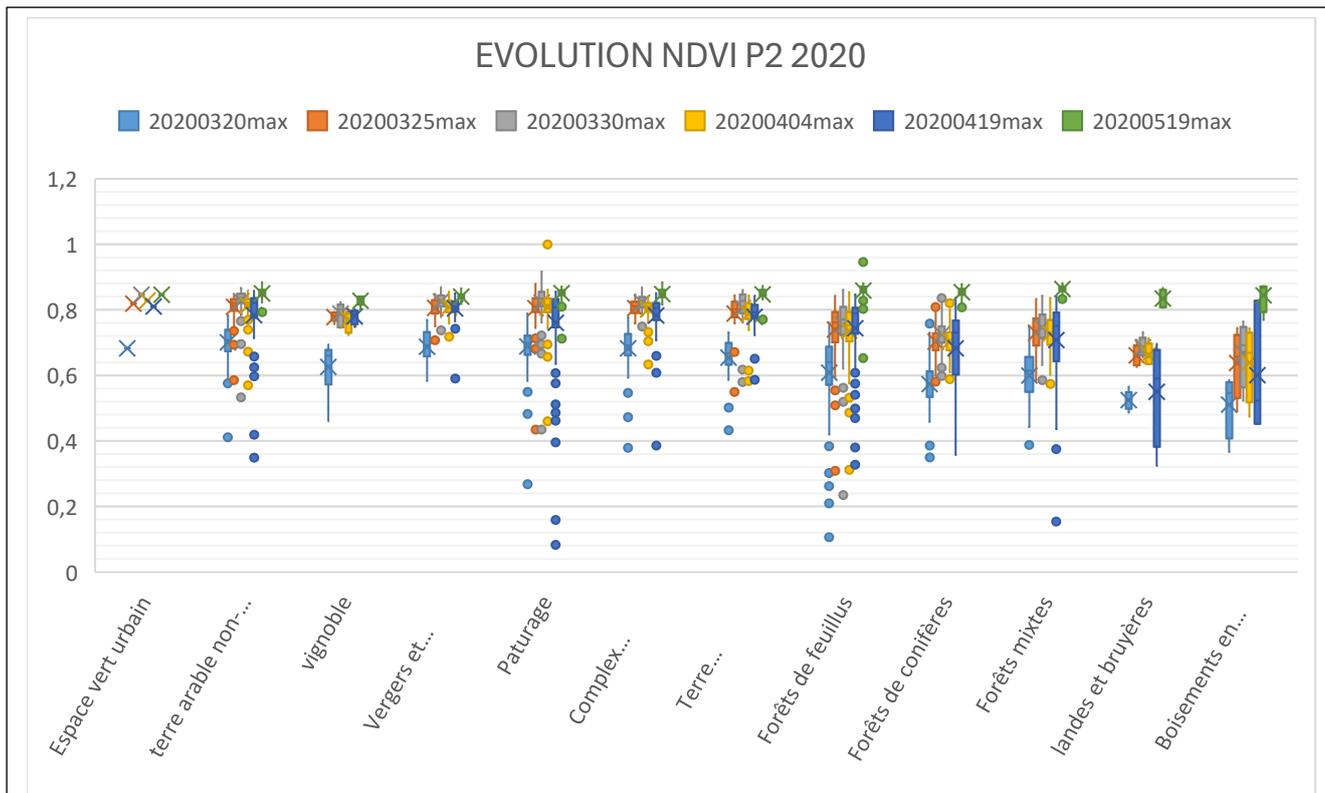


Figure 13: Evolution du NDVI avant et pendant la sécheresse en fonction de l'occupation du sol par Corine: P2 2020

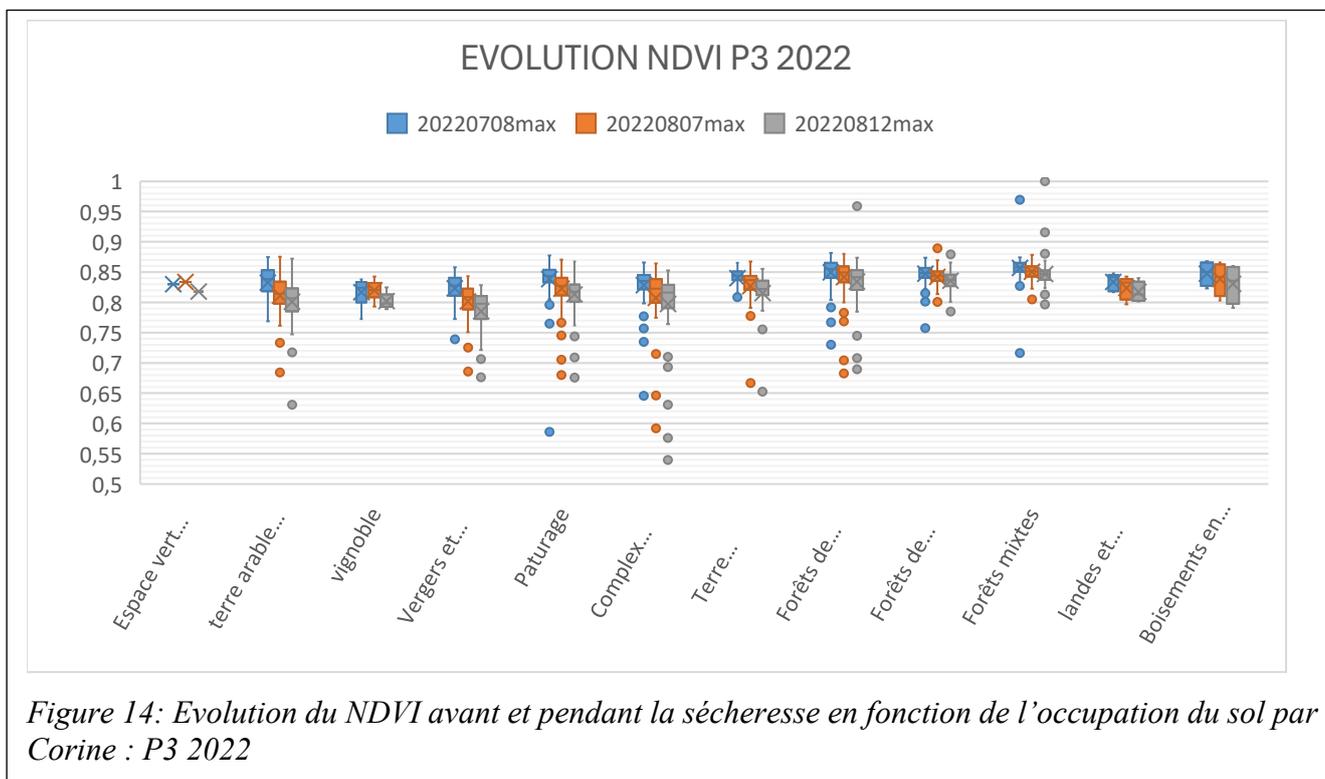


Figure 14: Evolution du NDVI avant et pendant la sécheresse en fonction de l'occupation du sol par Corine : P3 2022

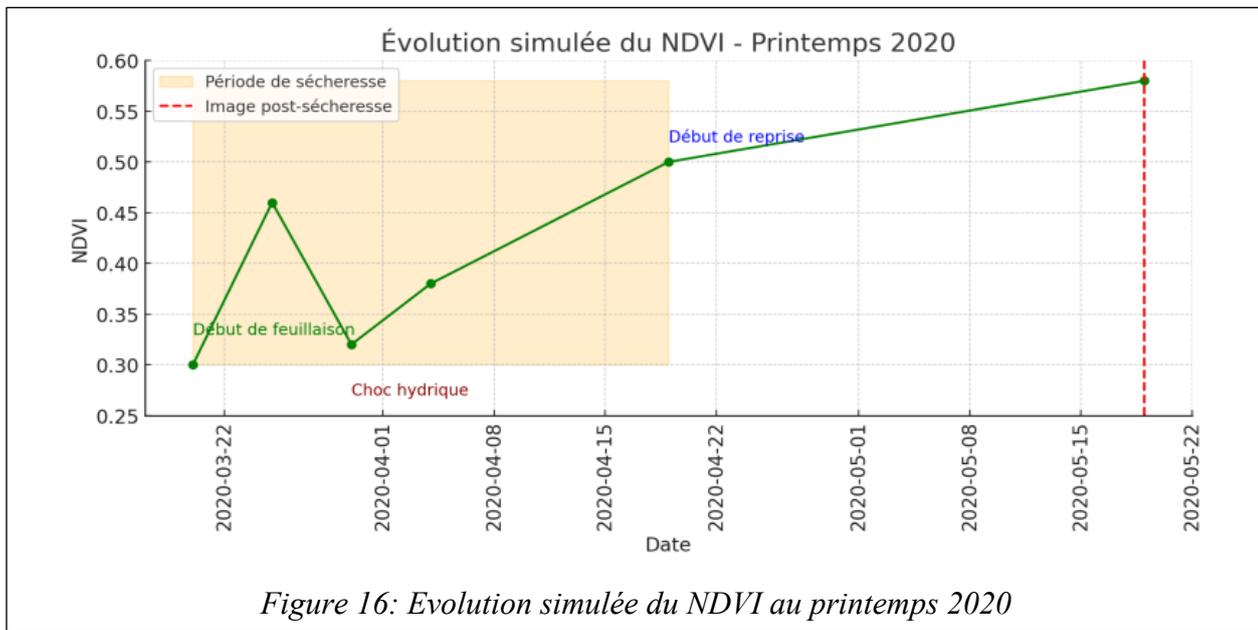
L'analyse des boxplots NDVI sur les périodes de sécheresse de 2018, 2020 et 2022 met en évidence des réponses contrastées de la végétation aux stress climatiques.

En 2018, une baisse rapide et marquée du NDVI est observée, traduisant une perte brutale de vitalité végétale, notamment chez certains peuplements feuillus. Cette chute est suivie d'une récupération modérée, indiquant une résilience partielle mais lente.

En 2020, la dynamique est plus progressive. La sécheresse, survenant en début de période végétative, est suivie d'une phase de montée du NDVI, interrompue par une baisse progressive. Une remontée notable n'apparaît qu'un mois après la fin de la sécheresse, suggérant un temps de récupération plus long et un stress ayant durablement affecté l'activité photosynthétique. Cette forme en « dent de scie » pourrait refléter une tentative de feuillaison précoce contrariée par le stress hydrique.

En 2022, une baisse marquée du NDVI est visible, notamment à partir de début août, succédant à une période de stabilité en juillet. La chute devient plus nette autour du 22 août, indiquant une réponse différée au stress hydrique. Une première baisse, dès le mois de juin, précède la période de sécheresse principale, suggérant un stress accumulé ou un effet résiduel. Certaines classes CORINE, telles que les forêts de feuillus, les landes et bruyères ou encore les boisements en transition, montrent une sensibilité marquée.

Dans l'ensemble, la durée et le moment de survenue de la sécheresse influencent fortement la réponse végétale. Les épisodes longs ou précoces, comme en 2020, peuvent compromettre les mécanismes de reprise habituels, y compris chez les espèces habituellement tolérantes.



La figure 15 ci-dessous présente une simulation de l'évolution du NDVI au printemps 2020. L'effet dent de scie causé par la tentative de feuillaison précoce contrariée par le stress hydrique est clairement visible.

IV.2.2. Analyse par type de végétation-toutes essences confondues

IV.2.2.a. Courbes NDVI annuelles

Le graphique 16 présente l'évolution du NDVI tout le long de l'année 2022 (2018 et 2020 en annexe) avec encadré en rouge la période étudiée.

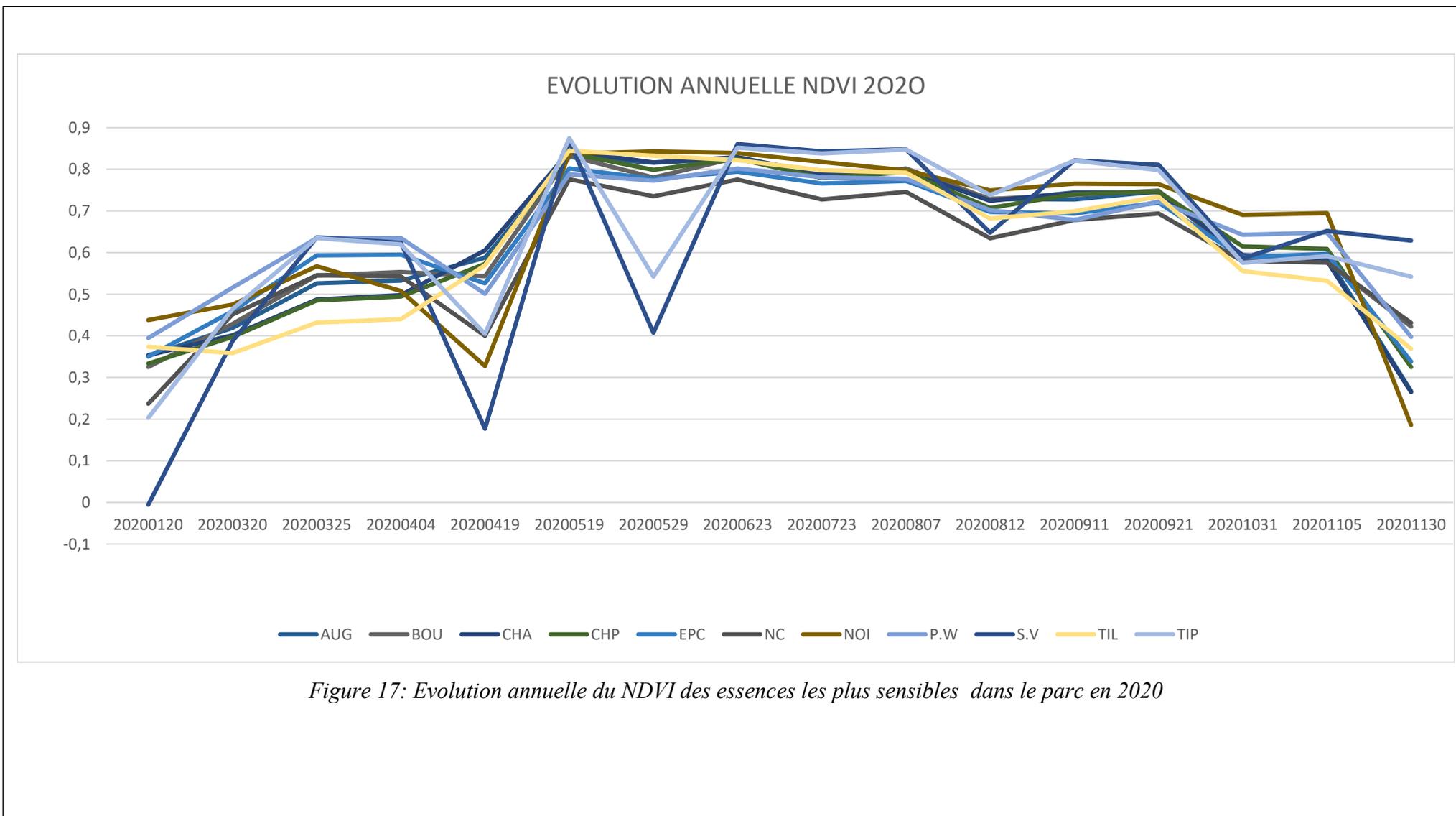


Figure 17: Evolution annuelle du NDVI des essences les plus sensibles dans le parc en 2020

Etude géomatique de l'effet des sécheresses sur la vitalité et les services écosystémiques de régulation des infrastructures vertes du parc naturel des Vosges du nord (2014-2024)

Le graphique ci-dessus montre que plusieurs périodes de sécheresse ont été observés durant l'année 2020. Ces périodes sont caractérisées par des baisses de la vitalité caractérisé ici par la baisse du NDVI, l'ampleur de l'effet de cette sécheresse varie d'une essence à une autre avec représenté ci-dessus les essences les plus sensibles.

IV.2.2.b. Zoom NDVI pendant les sécheresses

Le parc a fourni des données de peuplement, une couche QGIS avec au total 48000 polygones réparties sur les deux départements renseignés avec les trois ou deux essences dominantes trouvé dans chaque parcelles, l'ordre de dominance allant de ESS1 ESS2 à ESS3. Les figures 17,18 et 19 présentent la réponse des différentes essences aux périodes de sécheresses.

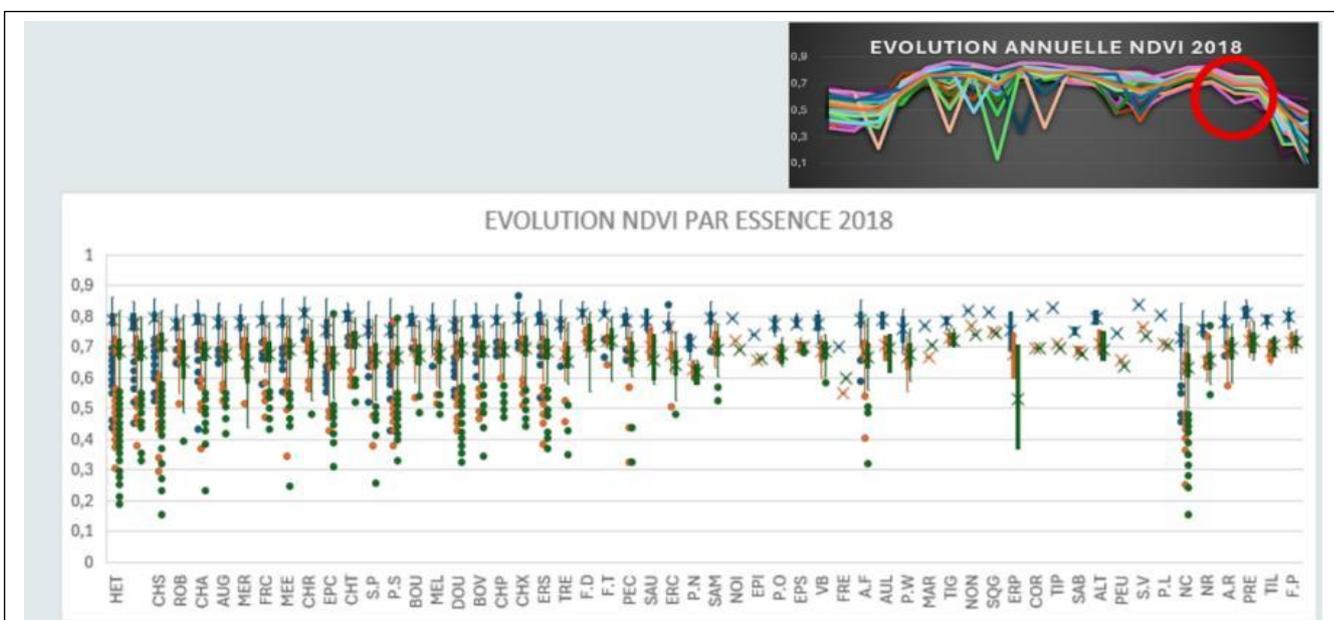


Figure 18: Evolution NDVI par essence 2018

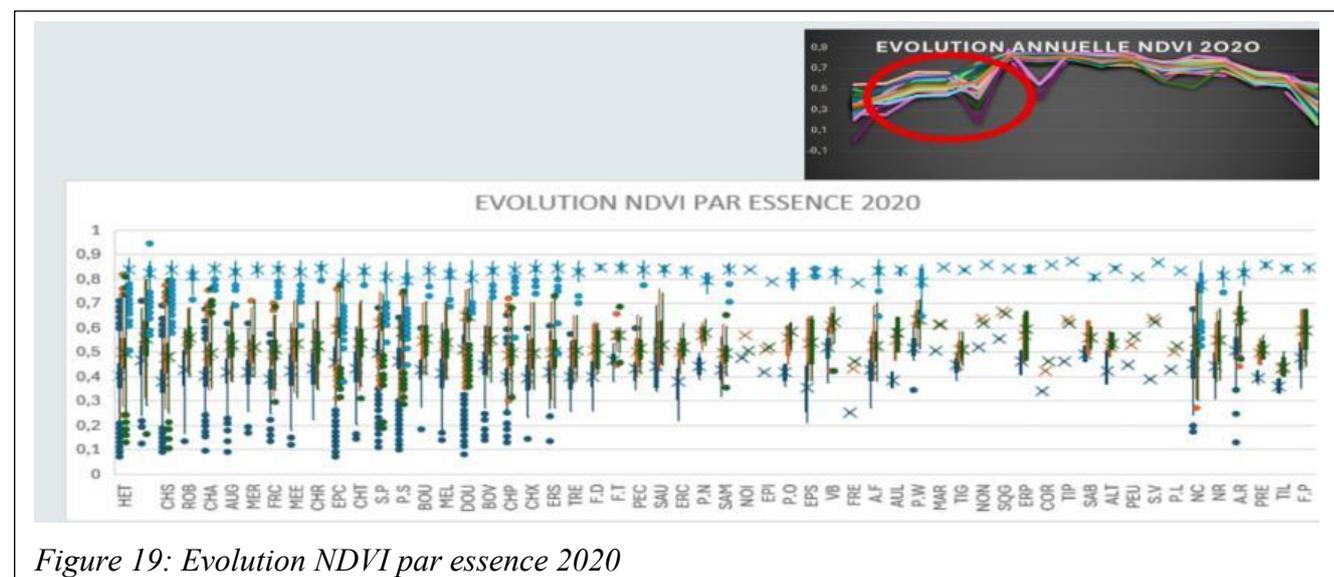


Figure 19: Evolution NDVI par essence 2020

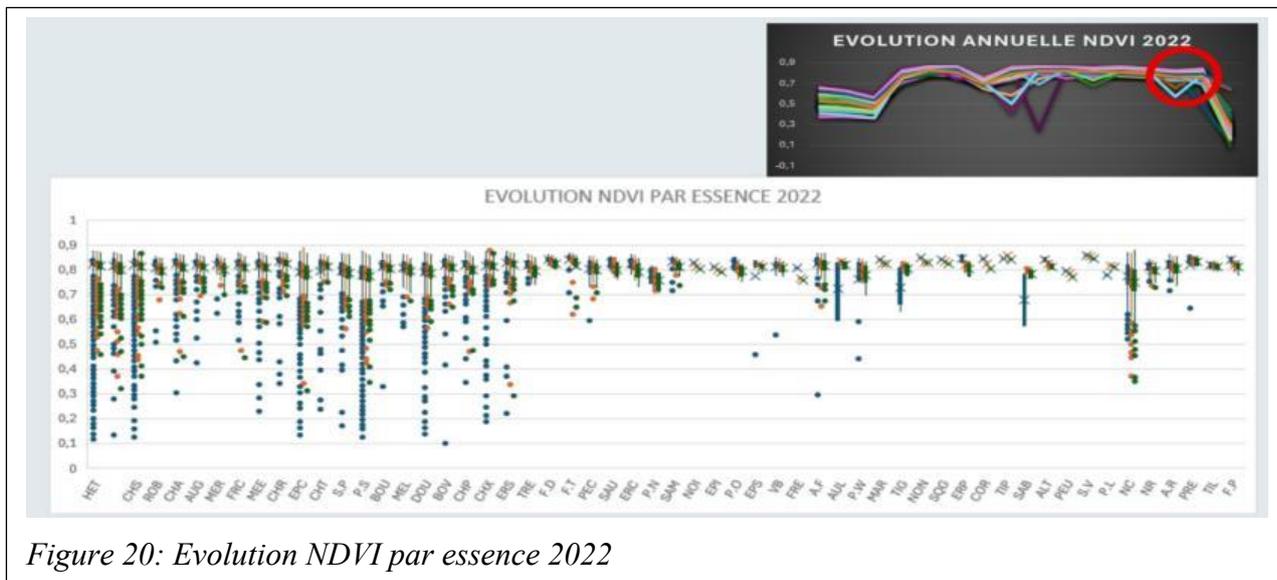


Figure 20: Evolution NDVI par essence 2022

Les dynamiques générales observées à l'échelle des essences forestières sont les mêmes que pour CORINE. L'analyse des courbes NDVI par essence forestière confirme une baisse généralisée de la vitalité végétale au cours des périodes de sécheresse étudiées. L'ensemble des espèces montre une diminution progressive du NDVI, traduisant un affaiblissement de l'activité photosynthétique.

En 2018, certaines essences telles que le hêtre (HET), le chêne sessile (CHS), l'épicéa (EPC), le pin sylvestre (PS) ou le douglas (DOU) enregistrent les valeurs de NDVI les plus faibles. L'intensité et la durée de la sécheresse se traduisent par un stress marqué, en particulier chez des espèces pourtant réputées tolérantes. À titre d'exemple, les essences comme le chêne pédonculé (ROB), le charme (CHA), l'aulne glutineux (AUG), le chêne rouge (CHR) ou l'érable plane (ERP) présentent également une réponse nettement plus prononcée en 2018 qu'en 2022.

En 2020, les effets sont encore plus marqués. La longueur exceptionnelle de la sécheresse affecte fortement les peuplements : plusieurs essences basculent vers des seuils critiques de vitalité. Toutefois, on observe une remontée générale du NDVI environ un mois après la fin de l'événement, traduisant une reprise fonctionnelle, avec un retour dans des valeurs élevées (0.7 à 0.9), indicatives d'un bon état de santé végétatif.

Ainsi, la durée et le moment de survenue des épisodes de sécheresse influencent directement la

réponse des différentes essences. Certaines espèces montrent une capacité de récupération rapide, tandis que d'autres révèlent une sensibilité persistante ou cumulative selon les années.

IV.2.3. Analyse par essences dominantes

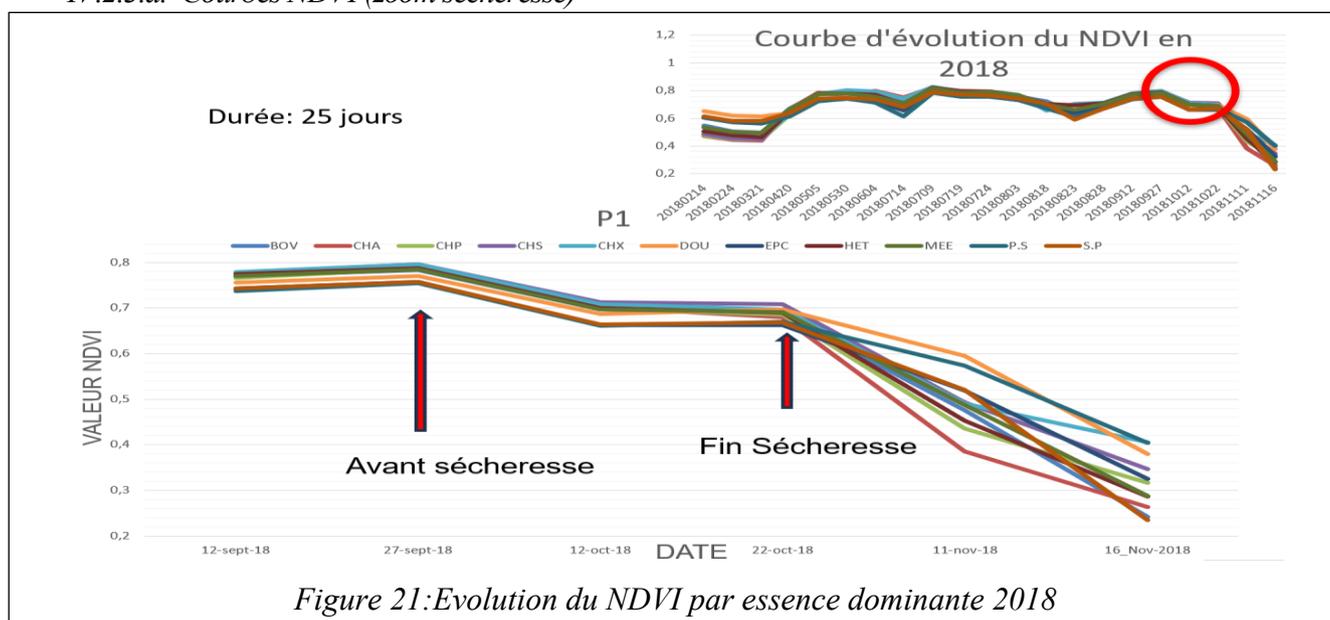
Après le calcul des surfaces certaines essences se sont avérées être plus importantes que d'autres à cause de la surface qu'ils occupent (tableau résultats calcul de la surface occupée par chaque essence EN annexe). Les essences consignées dans le tableau 11 :

Tableau 10: Essences dominantes et surfaces occupées

ESS	surface totale (ha)	%
CHA	6761,53	1,20
CHS	89622,28	15,91
CHX	28718,28	5,10
DOU	16219,37	2,88
EPC	33318,63	5,91
HET	188981,83	33,54
MEE	7498,81	1,33
P.S	131972,99	23,42
S.P	11015,33	1,95
Total général	563449,51	100

Ces essences qui occupent une surface très importante ont fait l'objet d'un focus spécial

IV.2.3.a. Courbes NDVI (zoom sécheresse)



Etude géomatique de l'effet des sécheresses sur la vitalité et les services écosystémiques de régulation des infrastructures vertes du parc naturel des Vosges du nord (2014-2024)

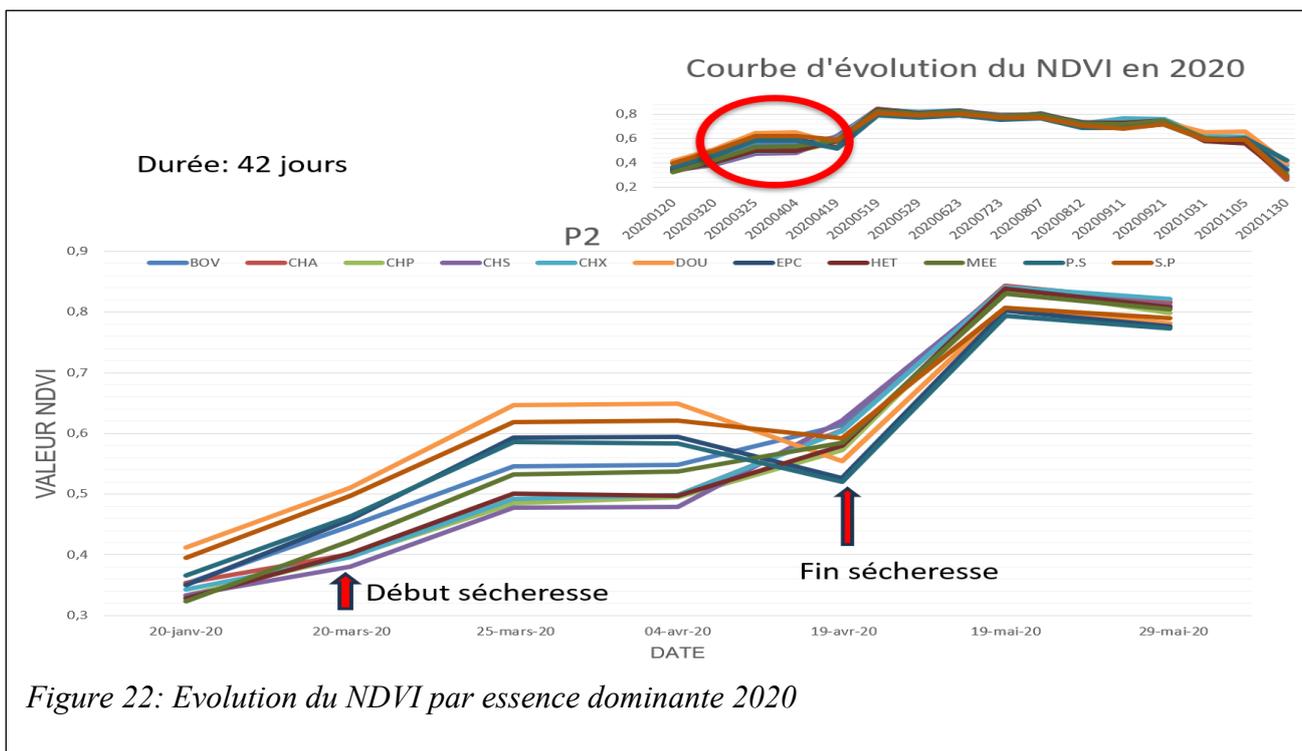


Figure 22: Evolution du NDVI par essence dominante 2020

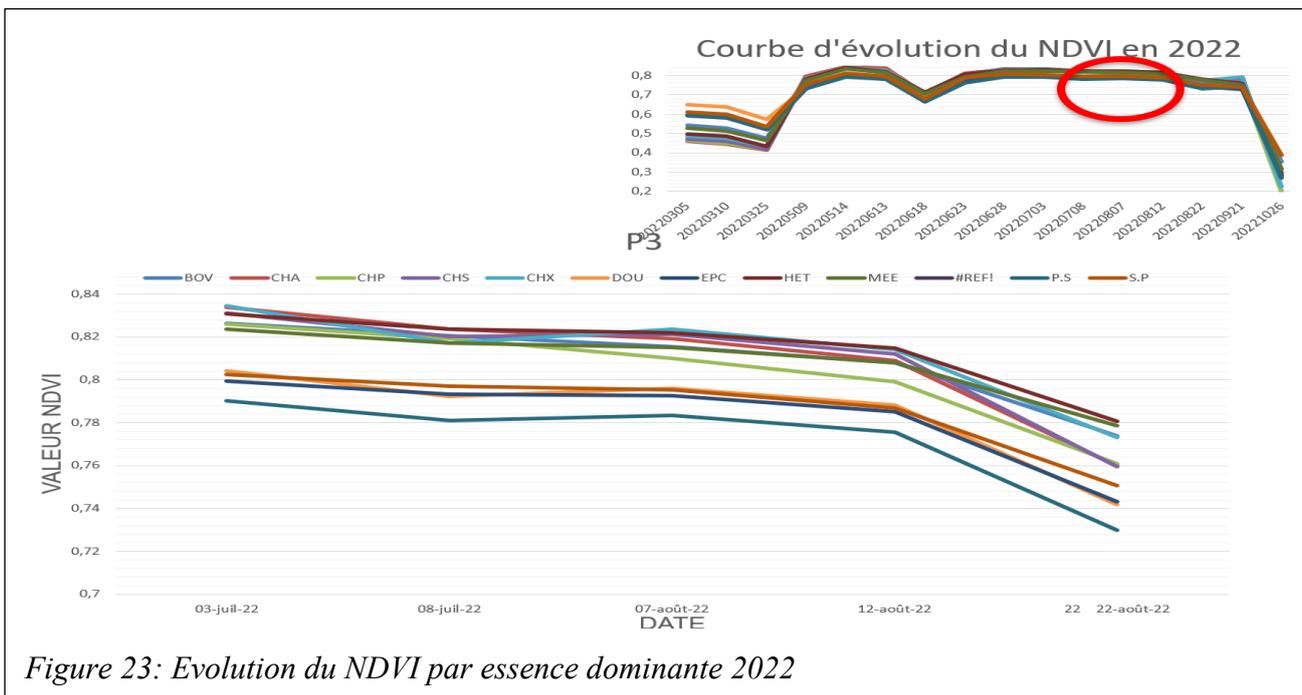


Figure 23: Evolution du NDVI par essence dominante 2022

L'analyse des essences dominantes met en évidence des dynamiques différenciées de réponse face aux sécheresses, en particulier lors des épisodes les plus longs comme celui de 2020.

Les essences feuillues telles que l'EPC, le CHA, le HET, le CHX, le CHP et le CHS montrent une forte sensibilité, avec une chute marquée du NDVI durant l'événement. À l'inverse, les

résineux comme le PS, le DOU et le SP apparaissent plus résistants, maintenant des niveaux de vitalité plus élevés. Cette tendance se retrouve également en 2018, bien que l'on observe cette fois une diminution notable du NDVI des résineux en fin de période végétative, phénomène également visible en 2022.

Les autres essences présentent quant à elles des valeurs de NDVI relativement stables, se situant autour de la moyenne, sans variation extrême notable.

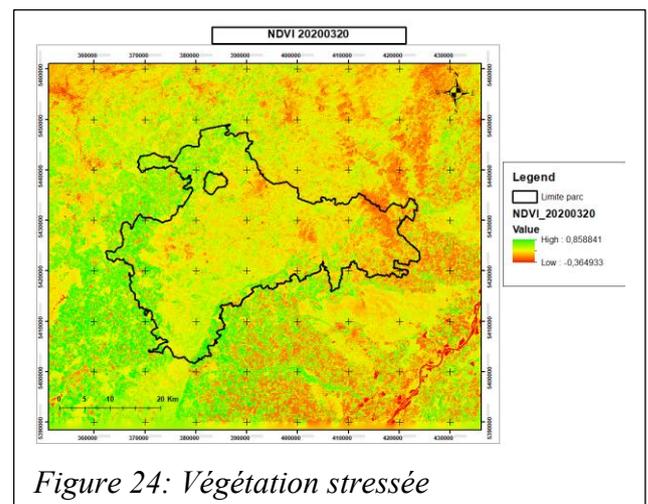
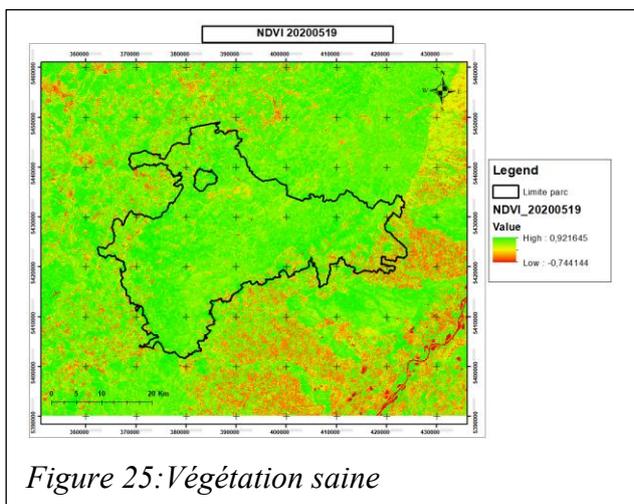
En ce qui concerne la phase de récupération post-sécheresse (2020, 2022), certaines espèces feuillues comme le CHS, suivi du BOV et du CHX, montrent une capacité de rebond rapide, malgré des niveaux de stress initiaux importants. À l'inverse, l'EPC, bien que moins fortement impactée, affiche une reprise plus lente, suggérant une résilience moindre.

En 2018, la fin de la sécheresse coïncide avec la fin de la période végétative : les feuillus entrent en sénescence, ce qui se traduit par une chute normale du NDVI, tandis que les résineux présentent une légère remontée de vitalité.

Il convient toutefois de souligner que l'interprétation du NDVI chez les résineux reste délicate. Ces espèces conservant leur feuillage même en situation de stress avancé, les indices basés sur la réflectance, tels que le NDVI, peuvent sous-estimer l'ampleur réelle de leur affaiblissement.

IV.2.3.b. Carte d'évolution du NDVI

L'illustration suivante permet une visualisation de l'effet des sécheresses sur la végétation avec le NDVI



IV.2.3.c. Analyse de la vitalité avec le NDWI

Comme spécifié plus haut le NDVI à lui tout seul ne suffit pas à déterminer l'état de la vitalité de certaines essences (les résineux), Pour apporter une analyse complémentaire et voir l'effet réelle de la sécheresse sur ces essences le NDWI sera utilisé.

Les figures 25,26 et 27 présentent l'évolution de cet indice durant les périodes de sécheresses pour les essences dominantes, les graphiques pour toutes les essences seront en annexe.

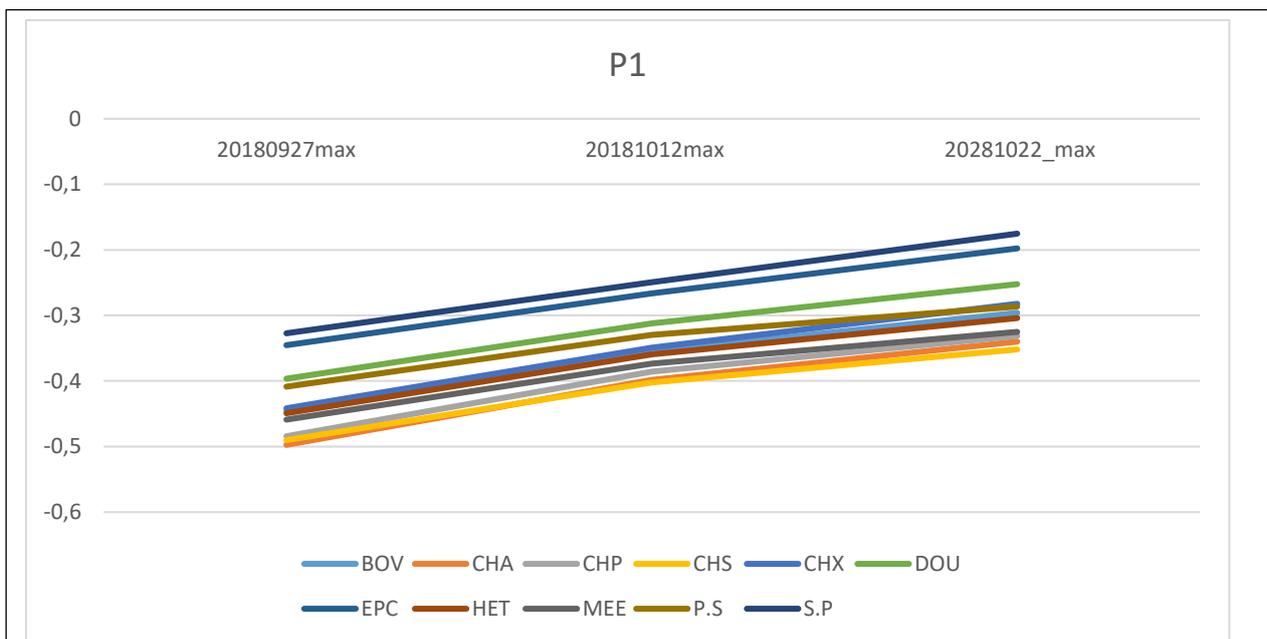


Figure 26: Evolution NDWI essence dominante P1

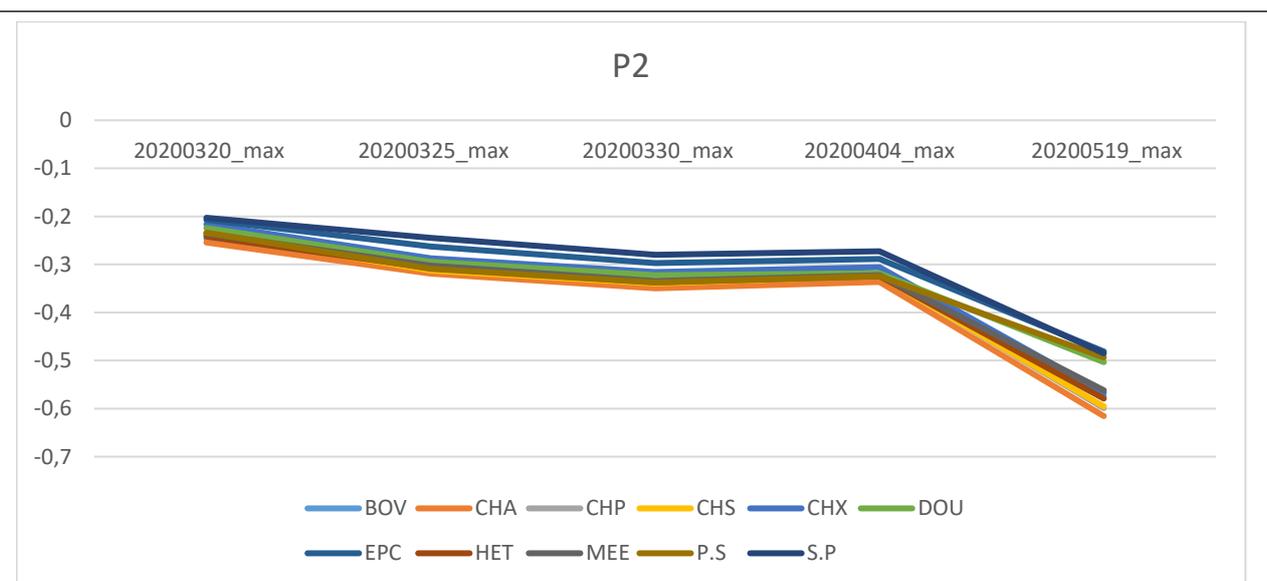
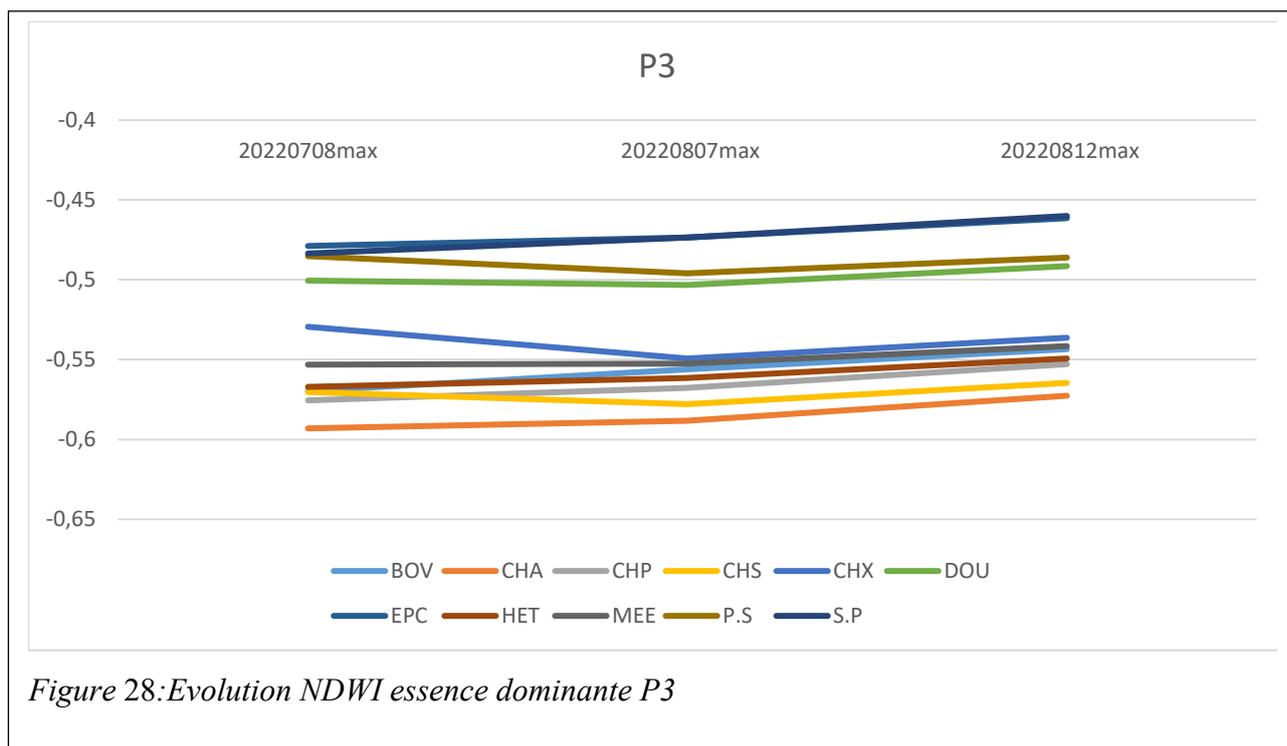


Figure 27: Evolution NDWI essence dominante P2

Etude géomatique de l'effet des sécheresses sur la vitalité et les services écosystémiques de régulation des infrastructures vertes du parc naturel des Vosges du nord (2014-2024)



L'analyse avec le NDWI viens confirmer ce qui a été établis précédemment quant à la résistance plus importante des résineux face aux feuillus. Le CHA,CHS,CHP ont les réserves en eau les plus faible tandis que l'EPC, le SP et PS ont les réserves en eau les plus importantes.

IV.2.3.d. Séquestration en carbone

Les résultats NDVI obtenues précédemment permettent d'estimer une séquestration en carbone en fonction des essences(graphiques en annexe). La capacité de stockage du CO₂ étant estimé à partir du NDVI la tendance de baisse est la même. L'ajout des surfaces permet de voir que la capacité de stockage est proportionnelle à la surface occupée par l'essence. Les essences dominantes ont donc une capacité de stockage bien plus grande par rapport aux autres essences.

Etude géomatique de l'effet des sécheresses sur la vitalité et les services écosystémiques de régulation des infrastructures vertes du parc naturel des Vosges du nord (2014-2024)

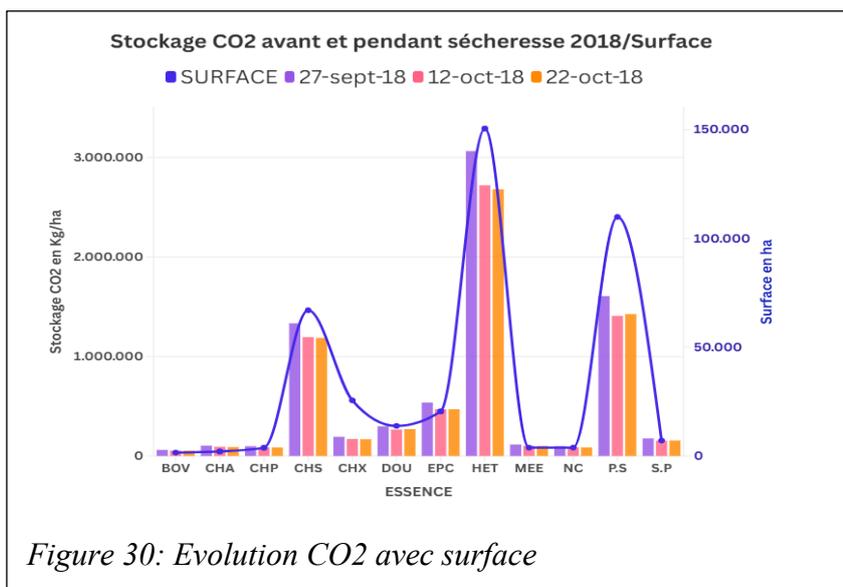


Figure 30: Evolution CO2 avec surface

La variation de la capacité de stockage de BOV, CHA, CHP, MEE, DOU et NC avant et pendant la sécheresse est très faible, elle est à peine perceptible, comparé à des essences comme le CHS HET PS CHX qui présente une variation bien plus importante. Ces essences ayant été définis comme très sensible aux sécheresses dans les analyses précédentes et étant principalement des feuillus, la baisse dans leur capacité de stockage est logique.

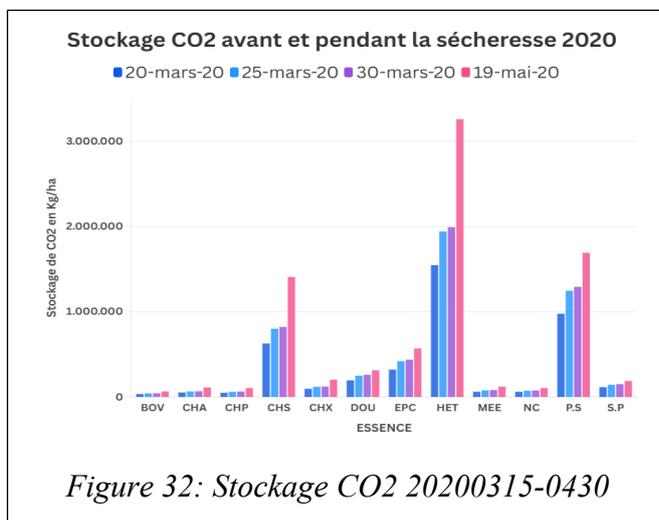


Figure 32: Stockage CO2 20200315-0430

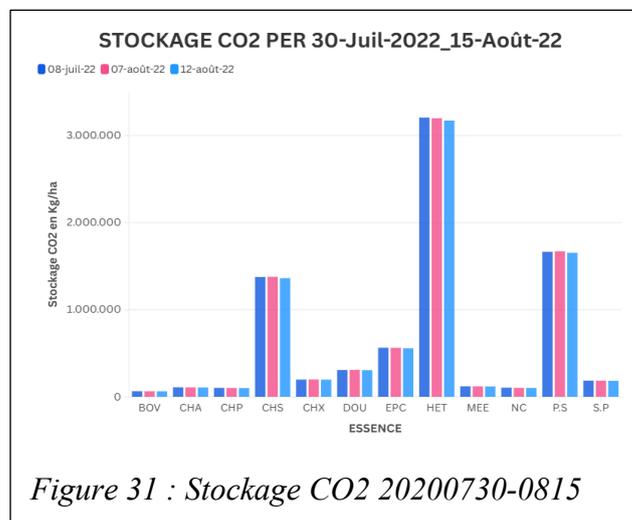


Figure 31 : Stockage CO2 20200730-0815

L'année 2022 présente légère diminution de la capacité de stockage par rapport à 2018, toutefois elle est plus ou moins constante par rapport à celle-ci. Tandis que 2020 présente encore un effet en dent de scie à cause du début de la période végétative. Malgré les fluctuations, la capacité de stockage du CO₂ est très importante pouvant aller jusqu'à 3 000 000 Kg CO₂ /ha stockées.

Conclusion Partielle : L'analyse croisée des indices NDVI et NDWI révèle que la végétation entre souvent en stress hydrique avant même le début officiel des sécheresses, dès la fin des premières pluies. Si certaines formations parviennent à récupérer rapidement, d'autres montrent des signes de fragilité persistante. La fin d'un épisode extrême ne rime pas toujours avec un retour immédiat à la vitalité : le stress peut perdurer, voire s'intensifier. Ces réponses physiologiques ont un impact direct sur le stockage de carbone : les périodes de sécheresse prolongée réduisent l'activité photosynthétique, compromettant temporairement la capacité des écosystèmes à fixer le CO₂. Ce lien entre vitalité végétale, hydratation et séquestration de carbone souligne l'importance de mieux anticiper les effets du changement climatique sur les forêts.

IV.3. Analyse statistique par type d'essence

L'analyse par type de peuplement révèle des réactions contrastées face aux sécheresses. Les feuillus, étudiés à l'aide du NDVI et du EVI, présentent des baisses de vitalité plus nettes, en particulier lors des sécheresses longues (2018, 2020). Le EVI permet de mieux capturer les variations dans les forêts denses.

Chez les résineux, dont les aiguilles persistent même en cas de stress, les indices hydriques comme le NDWI et le LSWI ont été privilégiés. Ces indices révèlent une perte d'humidité foliaire plus discrète mais perceptible, notamment chez le PS et le DOU.

Ces différences de réponse justifient une analyse statistique multivariée pour mieux comprendre les interactions entre types d'essences, indices biophysiques et sécheresses. Ces premiers résultats soulignent la complexité des réponses écologiques face aux sécheresses. Pour explorer plus en profondeur les interactions entre essences, indices de télédétection et conditions climatiques, une FAMD a été mise en œuvre.

IV.3.1. Analyse Factorielle multivariée

La température de surface (LST), qui influence l'évapotranspiration et la photosynthèse, a été intégrée à l'analyse FAMD aux côtés des indices de végétation. Bien que les analyses aient été menées pour 2018 et 2022 pour l'ensemble des essences et les différents groupes en fonction de toutes les indices et les plus appropriées suivant le groupe, l'absence de données LST justifie un focus sur 2022, seule période permettant d'explorer pleinement les interactions entre stress

thermique et vitalité végétale. A cela est ajouté la surface occupée par chaque essence, afin d'évaluer l'effet de la dominance spatiale sur la réponse écologique.

IV.3.1.a. Feuillus

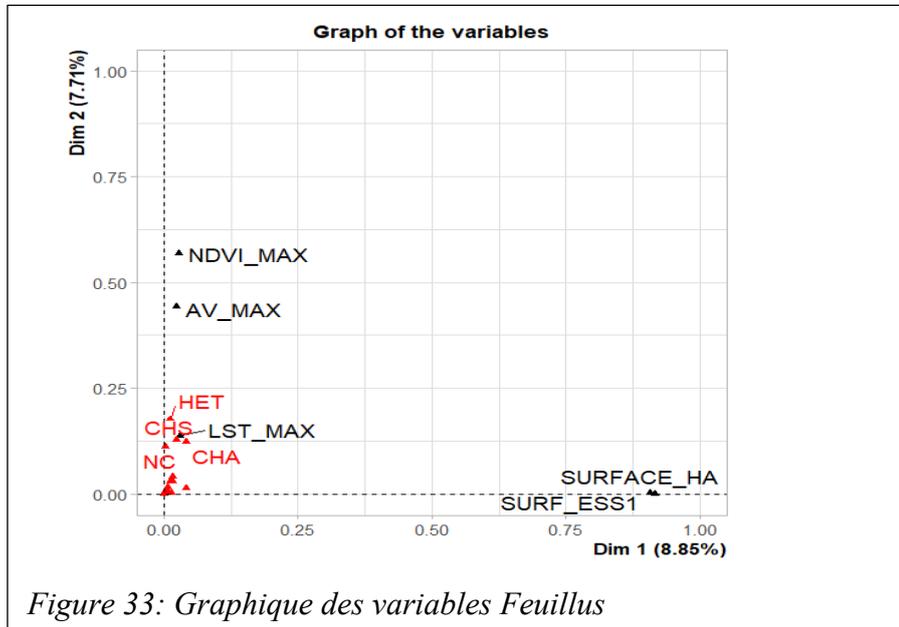


Figure 33: Graphique des variables Feuillus

L'analyse factorielle réalisée sur les essences feuillues met en évidence une forte structuration des individus selon deux axes : la température de surface (LST), les indices de végétation NDVI avant et pendant la sécheresse (dimensions 1 et 2), ainsi que la surface occupée. Le graphique des variables, celui des individus et celui des catégories (annexe) montrent la distribution des essences feuillues selon leurs niveaux de NDVI, de température LST et leur surface spatiale. Certaines essences comme le HET, le CHS et le CHA se positionnent dans des zones associées à de faibles valeurs de NDVI et de hautes températures. Les NC sont des essences non catégorisées ils ne sont donc pas pertinents ici. L'intégration de la surface montre que la dominance spatiale ne garantit pas nécessairement une meilleure résilience. Certaines essences très présentes (ex : CHS) présentent malgré tout une baisse marquée du NDVI.

IV.3.1.b. Résineux

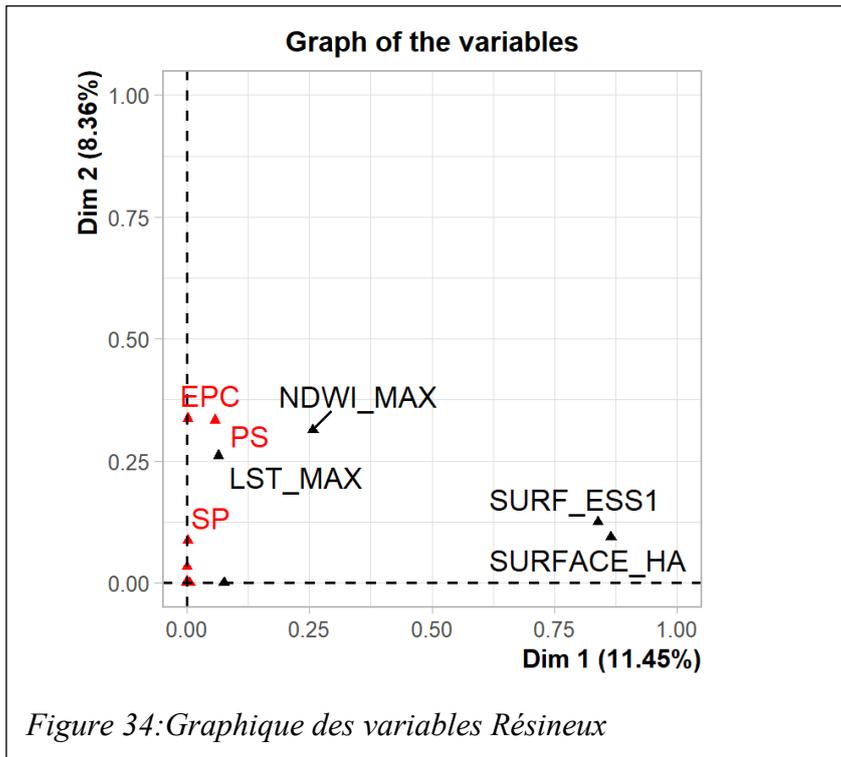


Figure 34: Graphique des variables Résineux

Chez les résineux, la FAMD a été réalisée en croisant les indices hydriques (NDWI, LSWI), la température de surface (LST) et la surface occupée. Les essences comme DOU, PS et EPC montrent des valeurs de NDWI/LSWI relativement plus élevées, traduisant une meilleure capacité de rétention d'eau. En revanche SP se situent dans des zones associées à un stress hydrique plus fort. Contrairement aux feuillus beaucoup de résineux semblent moins affectés par la température (EPC,DOU,SP ,PS), mais leur réponse varie en fonction de leur capacité à conserver l'humidité. D'autres part certaines essences comme PO,PN,SAB ou MEL semblent particulièrement sensibles aux hausses de températures. L'indice NDVI n'étant pas pertinent pour ce groupe (en raison de leur feuillage persistant) , les indices hydriques s'avèrent plus adaptés pour évaluer leur résistance.

Conclusion partielle :L'analyse multivariée (FAMD) a permis de mettre en évidence des contrastes marqués dans la réponse des différentes essences forestières face aux stress climatiques. Chez les feuillus, les températures élevées (LST) sont fortement corrélées à une baisse des indices de végétation (NDVI, EVI), particulièrement pour certaines essences dominantes, soulignant une vulnérabilité accrue. À l'inverse, les résineux montrent des réponses plus nuancées : leur vitalité semble davantage liée à leur capacité à maintenir une

teneur en eau stable (NDWI, LSWI) qu'à la température.

L'intégration des surfaces occupées dans l'analyse souligne également que l'importance spatiale d'une essence n'est pas toujours synonyme de résilience. Ces résultats confirment l'intérêt d'une approche croisée entre variables climatiques, hydriques et structurelles pour mieux comprendre la sensibilité écologique des peuplements forestiers.

IV.4. Analyse du rôle éponge des sols

Les sols sont des régulateurs dynamiques des écosystèmes. Leur rôle éponge est un atout crucial face aux changements climatiques. Cette section explorera ce mécanisme, en intégrant spécifiquement l'indice SWI et le SSM. Les différentes couches (0, 0.002, 0.005, 0.010, 0.020, 0.040, 0.060, 100) correspondent à des profondeurs en cm

- 0 à 0.02 m (2 cm) : surface (équivalent à SSM)
- 0.02 – 0.10 m (2 à 10 cm) : topsoil
- > 0.10 m (jusqu'à 1 m) : subsoil

Tableau 11: Equivalent réel du pourcentage d'humidité du sol en volume

Valeur brute	Equivalent réel	Commentaire
100	0.1 m ³ /m ³	10% humidité
250	0.25m ³ /m ³	25%humidité
500	0.5 m ³ /m ³	50% humidité

Dans cette sous-section nous allons voir comment évolue la rétention d'eau dans le sol en période de sécheresse et les types de sols avec la plus grande capacité de rétention en eau

IV.4.1. Rôle éponge

Les données d'humidité du sol utilisées proviennent de Copernicus Global Land Service. Elles sont exprimées en contenu volumique d'eau (VWC), en [m³/m³ × 1000], ce qui permet d'évaluer directement la quantité d'eau contenue dans le sol à différentes profondeurs. Cette unité diffère du SWI normalisé (variant entre 0 et 1), mais reste parfaitement adaptée à une évaluation fine de la rétention hydrique dans les sols.

La figure montre l' évolution de l'humidité contenue dans le sol (couche supérieure) pendant la période de sécheresse .

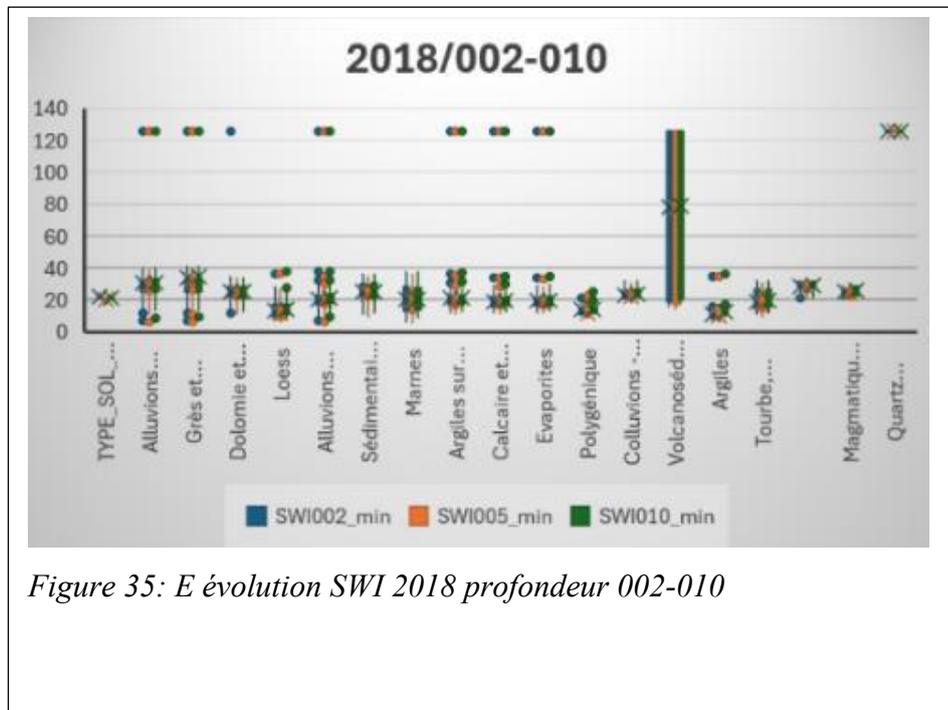


Figure 35: E évolution SWI 2018 profondeur 002-010

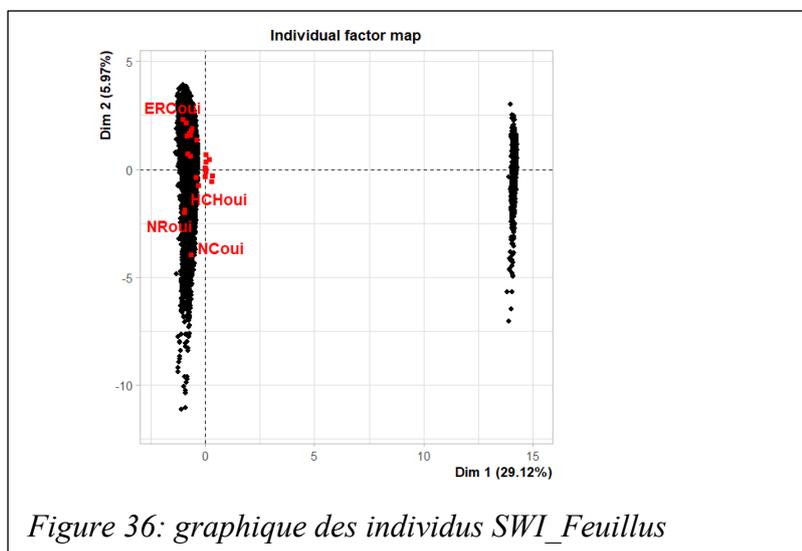
L'analyse de ces graphiques montre les sécheresses ont un impact très important sur l'humidité des sols. Dans la majorité des cas le taux pourcentage d'humidité du sol est inférieur à 10% , avec quelques pics dans certains endroits pour quelques des types de sols. Cela signifie que certains endroits gardent un taux d'humidité plus importants que d'autres malgré qu'ils aient le même type de sol. En termes de rétention d'eau , peu importe le degré de la sécheresse les couches superficielles (0-2 cm) perdent toutes leurs réserves en eau. Lorsque la sécheresse n'est pas trop prononcée, seules les couches supérieures (2-10) sont à sec, les réserves des couches inférieures sont bien plus importantes, même si fortement diminué à cause de la sécheresse, spécialement sur les sols volcano-sédimentaires. Une concentration élevée en argile dans ces sols pourrait justifier cette particularité. La présence de zones qui gardent des %

d'humidité supérieure malgré la sécheresse pourrait suggérer l'existence de zones humides dans ces parties du parc. Une période longue et intense assèche complètement les réserves du sol.

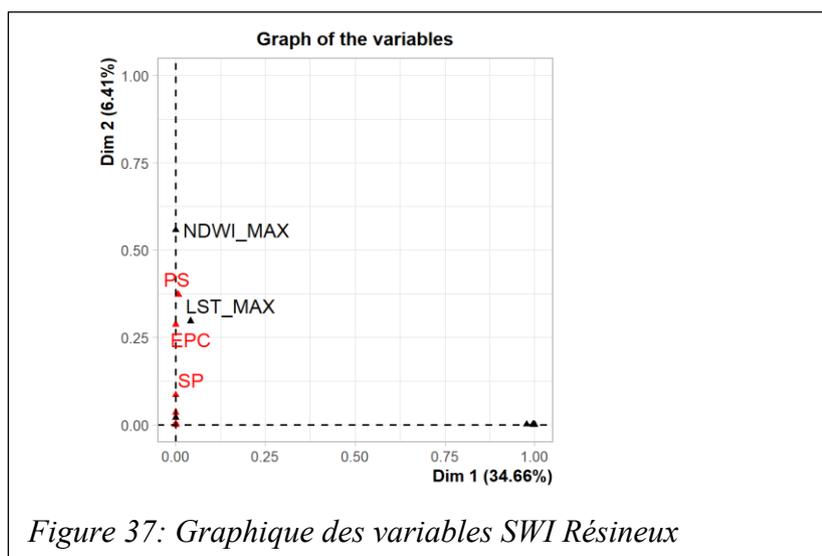
IV.4.2. Impact sur la vitalité des plantes

La rétention d'eau dans le sol peut avoir un effet non négligeable sur la réponse des végétaux en période de sécheresse, pour identifier une potentielle corrélation entre la résistance à la sécheresse des essences et la rétention d'eau dans le sol une FAMD a été réalisé.

FEUILLUS



RESINEUX



L'analyse multivariée révèle que l'humidité des sols, mesurée par le SWI (Dim 1, 29.12% de variance), est le facteur dominant de différenciation spatiale au sein du Parc Naturel des Vosges du Nord face aux sécheresses (2014-2024). Un second axe, moins influent (Dim 2, 5.97% de variance), est principalement lié à la vitalité de la végétation (NDVI_MAX, AV_MAX) et à la température de surface (LST_MAX).

Les individus (unités spatiales) se regroupent clairement selon leur niveau de SWI, distinguant des zones nettement plus sèches et plus humides. Les différentes catégories d'infrastructures vertes ou de peuplements forestiers montrent des réponses variées : certaines sont associées à des conditions de sécheresse (faible SWI) tout en maintenant une certaine vitalité, tandis que d'autres sont plus vulnérables, affichant à la fois de faibles SWI et une vitalité réduite. Cela met en évidence des profils de résilience contrastés face aux épisodes de sécheresse.

Ceci suggère que le SWI est un déterminant clé de la capacité des essences à faire face aux épisodes de sécheresse. La quantité d'eau disponible dans le sol influence directement leur capacité à résister aux épisodes de sécheresses. Les analyses effectuées avec la période de 2018(annexe) montrent une dynamique identique.

Evolution de l'humidité du sol en fonction des profondeurs

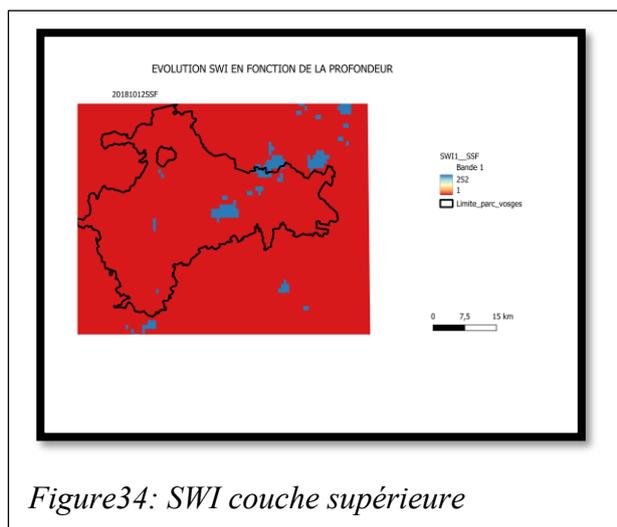


Figure 34: SWI couche supérieure

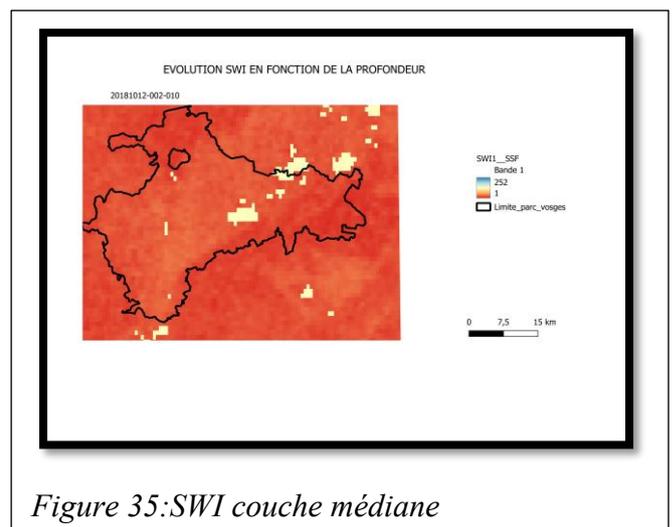


Figure 35: SWI couche médiane

La figure 34 montre que la couche supérieure située à 0 cm est complètement asséchée par la sécheresse à l'exception de certaines zones encore humides représentées en bleu. La figure 35 quant à elle permet de visualiser les couches allant de 2 à 10 cm une humidité un peu plus importante par rapport à la couche superficielle.

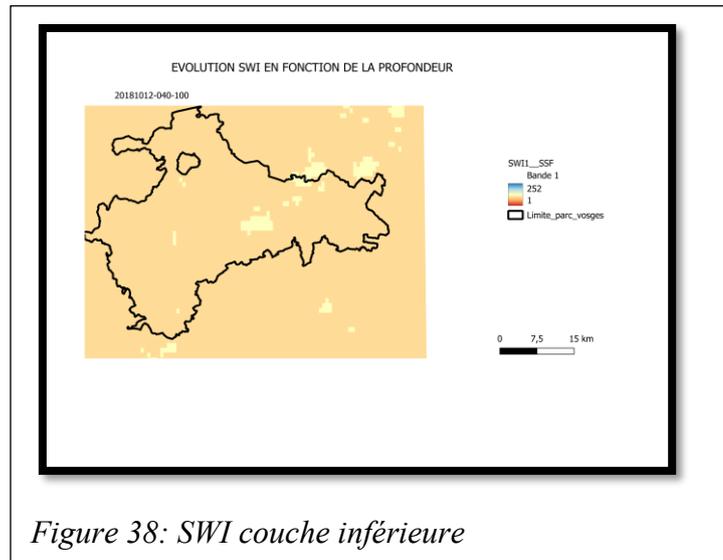


Figure 38: SWI couche inférieure

La figure 36 représente les profondeurs allant de 40 cm à 100 cm . On constate que la quantité d'eau contenu dans le sol est nettement supérieure comparé aux couches antérieures malgré qu'elle reste faible.

Conclusion partielle. L'étude des indices de soil water index SWI et Soil surface Moisture SSM a permis de comprendre le fonctionnement du sol à plusieurs niveaux de profondeur en période de sécheresse . Ceci a permis d'identifier les zones les plus vulnérables en cas de sécheresse et les zones qui ont une plus grande capacité de rétention d'eau. Ces zones participent à la résilience de la végétation en cas de stress.

V. DISCUSSIONS

V.1. Rappel des objectifs

L'objectif de cette étude est d'analyser, à l'aide d'outils géomatiques et de télédétection, l'impact des sécheresses sur la vitalité des infrastructures vertes du Parc des Vosges du Nord entre 2014 et 2024, et d'évaluer l'évolution de leurs fonctions de régulation face aux pressions climatiques croissantes. Pour cela trois axes d'étude ont été choisis :

- Quantifier l'activité photosynthétique et donc la fixation du CO₂ en faisant l'Etude de la vitalité photosynthétique en fonction des conditions climatique (extrêmes climatiques) pour chaque type de végétation.
- Évaluer le pouvoir refroidissant (évapo-transpiration et ombrage) des types de végétation présente dans le parc avec l'Etude des températures et des activités photosynthétiques en fonction des types de végétation.
- Analyser le rôle éponge des sols du parc Naturel des Vosges grâce à une étude des réserves en eau végétale et du sol en fonction des types de végétation lors d'extrêmes climatiques

V.2. Interprétation des résultats par axe d'étude

V.2.1. Vitalité photosynthétique et stress thermique

Les analyses menées à partir des indices NDVI, EVI et LST montrent des réponses marquées de la végétation forestière face aux épisodes de sécheresse, avec des dynamiques différenciées selon les années et les types d'essences. En 2018 et 2020, une baisse rapide du NDVI est observée pendant les sécheresses, traduisant une réduction de l'activité photosynthétique, en cohérence avec les observations de *Carnicer et al. (2011)* et *Bréda et al. (2006)*. L'année 2020 se distingue par une sécheresse précoce, survenant en début de période végétative, et provoquant une dynamique en « dent de scie » du NDVI, probablement liée à une feuillaison avortée par le stress hydrique. En 2022, les baisses de NDVI sont plus modérées mais précoces, suggérant une sensibilité cumulée aux conditions antérieures.

L'analyse par essence révèle que les feuillus (HET, CHS, CHA, ROB, etc.) sont généralement plus sensibles, présentant des chutes nettes de NDVI et EVI pendant les sécheresses. À

l'inverse, les résineux (PS, DOU, EPC) conservent des valeurs plus stables. Nos résultats confirment les observations de *Granier et al. (2007)* sur la plus grande tolérance des conifères aux stress hydriques, bien que leur feuillage persistant puisse biaiser la mesure du NDVI. L'utilisation conjointe du NDVI et de l'EVI a permis de limiter cet effet de saturation, en particulier pour les forêts denses.

V.2.2. Résilience et vulnérabilité selon les types d'essences et de peuplements

Les analyses comparatives (boxplots, courbes, FAMD) confirment une réponse différentielle des feuillus et des résineux. Les feuillus subissent une baisse marquée de vitalité pendant les sécheresses, alors que les résineux montrent une stabilité relative. Cette différence s'explique par plusieurs facteurs : un système racinaire plus profond chez les résineux, une phénologie plus stable, et une meilleure capacité de contrôle stomatique.

L'utilisation du NDWI et du LSWI s'est avérée pertinente pour évaluer la réponse des résineux, dont le feuillage persistant rend les indices optiques moins sensibles. Cette approche confirme les propos de *Xiao et al. (2004)*, soulignant l'utilité des indices hydriques pour caractériser le stress chez les conifères.

L'analyse par essence confirme que toutes ne réagissent pas de la même manière aux stress hydriques. Les essences feuillues telles que le hêtre (HET), le chêne sessile (CHS), le charme (CHA), le chêne pédonculé (ROB) ou encore l'érable plane (ERP) présentent des baisses significatives de NDVI pendant les épisodes de sécheresse, avec des réponses particulièrement marquées en 2020. Ces espèces, malgré leur dominance dans certaines zones du parc, apparaissent vulnérables aux perturbations climatiques.

Nos résultats confirment une sensibilité marquée de plusieurs essences feuillues, mais certaines études comme *Schuldt et al (2020)* montrent que certaines espèces à enracinement profond peuvent présenter une résistance plus forte, ce qui suggère que la réponse observée pourrait être modulée par la structure racinaire.

Les essences résineuses, notamment le pin sylvestre (PS), le douglas (DOU) ou l'épicéa (EPC), conservent généralement des niveaux de NDVI plus élevés, traduisant une meilleure tolérance. Toutefois, il convient de nuancer cette apparente résistance : en raison de leur feuillage persistant, le NDVI est moins sensible aux variations de leur état physiologique, ce qui peut

masquer un stress réel non détecté par les indices optiques. Et comme la note *Jia et al.(2016)*, le NDVI tant à saturer dans les forêts à feuillage persistant, limitant sa sensibilité aux stress hydriques.

D'autres part, certaines études comme celle d'*Anderegg et al(2015)* soulignent que les conifères peuvent aussi présenter une vulnérabilité accrue lors de sécheresses extrêmes, notamment en lien avec des facteurs secondaires comme les attaques de ravageurs ou les pathogènes, ce que nos données satellitaires ne peuvent pas détecter.

Les analyses post-sécheresse révèlent également des contrastes : certaines essences feuillues comme le CHS, le CHX ou le BOV montrent une reprise rapide après l'épisode, tandis que d'autres comme l'EPC, malgré une baisse moins brutale, présentent une récupération plus lente. La résilience ne dépend donc pas uniquement de la résistance initiale, mais aussi de la capacité de régénération. La rapide reprise du CHS,CHX qui possèdent des racines profondes viens appuyer les dire de *Schuldt et al (2020)* quant à l'impact de la structure racinaire.

V.2.3. Influence de l'humidité du sol (rôle du SWI)

L'intégration du Soil Water Index (SWI) a permis de mieux comprendre les disparités de réponse selon les conditions édaphiques. Les boxplots ont révélé des taux d'humidité souvent très bas (<10%) durant les épisodes secs, en particulier dans les couches superficielles (0-10 cm). Cependant, certaines zones profondes ou sur sols argileux (ex. volcano-sédimentaires) conservent une humidité significative, même en pleine sécheresse. Ce rôle tampon est essentiel pour maintenir une activité photosynthétique minimale dans les périodes critiques

La FAMD montre que le SWI explique la plus grande part de la variabilité spatiale de la résistance écologique(le SWI est la dimension dominante expliquant la répartition des individus). Les zones à fort SWI préservent mieux leur vitalité NDVI, traduisant un rôle protecteur des sols profonds et humides. Ce résultat rejoint ceux de *Bonal et al. (2008)*, qui insistent sur l'importance de la réserve utile du sol dans la résilience des écosystèmes forestiers et de *Obermeier et al. (2021)* qui identifient la disponibilité en eau du sol comme facteur central de résilience forestière, souvent plus déterminant que les précipitations elles-mêmes.

Certaines essences, implantées dans des zones plus humides, semblent bénéficier d'une protection naturelle, alors que d'autres, situées sur des sols peu rétenteurs, subissent un stress

cumulé. La variabilité spatiale de la réponse hydrique met en évidence la nécessité d'intégrer les conditions édaphiques dans les stratégies de gestion forestière. Il apparaît ainsi comme une variable déterminante dans la résilience écologique.

V.2.4. Stockage de carbone

L'estimation du carbone stocké, déduite du NDVI, met en évidence l'impact indirect mais marqué des sécheresses sur le rôle de puits de carbone des forêts. Les résultats montrent que les périodes de sécheresse provoquent une chute du NDVI, traduisant une réduction directe de la capacité des peuplements à fixer du CO₂. L'effet est particulièrement visible en 2020, où la baisse prolongée de vitalité se traduit par une perte nette en potentiel de stockage. Ces dynamiques locales rejoignent les constats globaux de *Pan et al (2011)*, qui alertent sur la menace que représentent les stress climatiques récurrents pour la stabilité du puits de carbone forestier à l'échelle mondiale.

Certaines essences comme le CHS, le HET ou le PS, qui montrent les plus grandes variations de NDVI, présentent également les plus fortes variations dans leur capacité de stockage. Inversement, les essences comme le BOV, CHA ou MEE montrent une variation plus faible, traduisant une stabilité relative. En termes de volume, les estimations pour les essences les plus représentées comme le HET atteignent plusieurs millions de kg de CO₂ stockés. Cependant, ces stocks sont directement affectés par la baisse de vitalité liée au stress hydrique. Cela confirme que la résilience physiologique des essences est un facteur clé pour garantir la fonction de puits de carbone des forêts, dans un contexte de changement climatique

Les valeurs estimées sont cohérentes avec celles observées dans les études régionales (*IGN, 2019*). Cependant, l'approche présente des limites : la formule simplifiée basée sur le NDVI ne prend pas en compte les différences de structure forestière, d'âge ou de biomasse réelle. De plus, le NDVI peut saturer dans les forêts denses, surestimant le carbone réellement stocké. L'utilisation de modèles plus intégrés, couplant indices, mesures de terrain et données Lidar, serait nécessaire pour des estimations plus précises.

V.2.5. Vers une compréhension intégrée de la résilience écologique

L'analyse multivariée croisée (FAMD) a permis d'identifier des profils écologiques contrastés : certaines essences, bien que dominantes spatialement, apparaissent vulnérables (ex. CHS),

tandis que d'autres plus marginales se révèlent plus résistantes ou stables. Chez les feuillus, la corrélation entre la température de surface (LST) et la baisse du NDVI/EVI est forte. Chez les résineux, la réponse est moins marquée sur les indices optiques, mais plus lisible sur les indices hydriques (NDWI, LSWI).

Cette complexité souligne l'intérêt d'une approche multi-indices croisant les variables climatiques, édaphiques et structurales. Elle permet d'aller au-delà d'une lecture simpliste de la vulnérabilité, en intégrant les conditions locales et les spécificités des essences. La mise en évidence de zones tampon (forte rétention d'eau) ou d'essences à forte résilience ouvre des pistes pour une gestion adaptative du parc, face aux défis climatiques à venir.

V.3. Limites de l'étude

Cette étude présente plusieurs limites méthodologiques et techniques. Tout d'abord, certaines données climatiques sont manquantes, notamment pour la station d'Uhrwiller en 2017 et 2019, ce qui a limité les comparaisons interannuelles. De même, les données LST de 2018 n'étaient pas disponibles pour le jour sélectionné, restreignant l'analyse thermique à 2022. Les périodes nuageuses fréquentes ont aussi réduit le nombre d'images exploitables, surtout au printemps.

Sur le plan des indices, le NDVI est sujet à saturation dans les formations végétales denses, et sa sensibilité est limitée pour les résineux. L'estimation du CO₂ à partir du NDVI repose sur une formule simplifiée, qui ne distingue pas les types de biomasse ni l'âge des peuplements. Enfin, la résolution spatiale des données satellitaires (10 à 250 m) peut masquer des hétérogénéités locales importantes.

V.4. Apports de l'approche par télédétection

L'approche par télédétection a permis de documenter à grande échelle et de manière temporelle fine la dynamique de la végétation face aux sécheresses. Contrairement aux relevés de terrain ponctuels, les images satellitaires ont permis de suivre l'évolution de la vitalité végétale (NDVI, EVI) et de l'humidité (NDWI, SWI) sur l'ensemble du parc pendant dix ans. Les croisements entre indices biophysiques, données climatiques et caractéristiques édaphiques ont révélé des mécanismes de résistance ou de vulnérabilité invisibles autrement. Cette approche multi-source (climat, sol, télédétection) constitue un outil puissant d'aide à la décision pour le suivi et la gestion forestière.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail avait pour objectif d'évaluer l'impact des événements climatiques extrêmes, en particulier les sécheresses, sur la vitalité des écosystèmes forestiers du Parc naturel régional des Vosges du Nord à l'aide d'outils de télédétection. En croisant données satellitaires (NDVI, EVI, NDWI, LSWI, LST, SWI) et données météorologiques issues de stations locales, nous avons pu caractériser les réponses différenciées de la végétation selon les types d'essences, les conditions édaphiques et les années.

Les événements météorologiques extrêmes, tels que les déficits de précipitation et les fortes chaleurs, ont un fort impact sur la capacité photosynthétique des infrastructures vertes et donc sur leur capacité d'évapotranspiration et leur pouvoir rafraichissant. Les résultats révèlent que les sécheresses ont un effet significatif sur la photosynthèse, la teneur en eau de la végétation, ainsi que sur la capacité de stockage du carbone.

Selon l'intensité et le cumul des pressions météorologiques les effets ne sont pas les mêmes sur la végétation. Les feuillus apparaissent plus sensibles, notamment lors d'épisodes précoces ou prolongés, tandis que les résineux montrent une résilience plus marquée, bien qu'également affectés en fin de période végétative. Lors de courts événements peu intenses, les végétaux parviennent à résister dans certaines zones du parc grâce à la réserve utile en eau du sol. L'humidité du sol, mesurée par le SWI, joue un rôle clé dans la capacité des peuplements à maintenir leur vitalité. Les données montrent l'importance de surveiller à la fois les indices d'humidité du sol (SWI, SSM) et les indices de végétation (NDVI, NDWI) pour comprendre pleinement l'impact des anomalies climatiques sur les écosystèmes.

Au-delà de l'analyse des dynamiques végétales, cette étude met en lumière l'apport essentiel de la télédétection dans le suivi des impacts du changement climatique sur les milieux forestiers. Elle démontre l'intérêt d'une approche multi-échelles et multi-sources pour anticiper les vulnérabilités, orienter la gestion forestière et contribuer aux politiques d'adaptation.

Toutefois, certaines limites méthodologiques (résolution spatiale, saturation des indices, manque de données terrain) rappellent la nécessité de poursuivre ces travaux en les enrichissant d'observations in situ et de modèles plus robustes. En ce sens, ce mémoire constitue une première base d'analyse pour des recherches futures sur la résilience des forêts tempérées face

aux dérèglements climatiques.

Les résultats obtenus ouvrent plusieurs perspectives. Un approfondissement des analyses par le biais d'un couplage avec des données de terrain (inventaires forestiers, mesures de biomasse réelle, humidité du sol in situ) permettrait de valider les observations issues de la télédétection. L'intégration de modèles prédictifs (ex. modélisation de la croissance ou du stress) pourrait également aider à anticiper les effets du changement climatique.

RECOMMANDATIONS

Du point de vue de la gestion, une cartographie des essences les plus sensibles ou des sols les plus vulnérables pourrait servir de base pour adapter les stratégies sylvicoles. Le suivi régulier via télédétection permettrait d'alerter rapidement sur les stress naissants et d'orienter les pratiques vers une plus grande résilience écologique.

BIBLIOGRAPHIE

- Abad-Segura, E., González-Zamar, M. D., Vázquez-Cano, E., & López-Meneses, E. (2020). Remote sensing applied in forest management to optimize ecosystem services: advances in research. *Forests*, *11*(9), 969.
- Abelleira Martínez, O. J., Fremier, A. K., Günter, S., Ramos Bendaña, Z., Vierling, L., Galbraith, S. M., ... & Ordoñez, J. C. (2016). Scaling up functional traits for ecosystem services with remote sensing: concepts and methods. *Ecology and Evolution*, *6*(13), 4359–4371.
- Acharya, S., & Basu, S. (2025). Climate Change Vulnerability and Conservation Strategies for Nepal's Ramsar Sites: Safeguarding Freshwater Biodiversity and Ecosystem Services. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, *51*(1), 15–26.
- Al-Qubati, A., Zhang, L., & Forkel, M. (2024). Urban and peri-urban agriculture under climate change: A review on carbon emissions and sequestration. *Sustainable Cities and Society*, 105830.
- Asbjornsen, H., Wang, Y., Ellison, D., Ashcraft, C. M., Atallah, S. S., Jones, K., ... & Yu, P. (2022). Multi-targeted payments for the balanced management of hydrological and other forest ecosystem services. *Forest Ecology and Management*, *522*, 120482.
- Avtar, R., Kumar, P., Oono, A., Saraswat, C., Dorji, S., & Hlaing, Z. (2017). Potential application of remote sensing in monitoring ecosystem services of forests, mangroves and urban areas. *Geocarto International*, *32*(8), 874–885.
- Aznar-Sánchez, J. A., Belmonte-Ureña, L. J., López-Serrano, M. J., & Velasco-Muñoz, J. F. (2018). Forest ecosystem services: An analysis of worldwide research. *Forests*, *9*(8), 453.
- Bakhronova, S., Khikmatullaev, S., Ochilova, M., Toshboyev, Z., Karimov, Y., Eshkuvvatov, B., & Hayitov, A. (2024). Assessment of Ecological Damage using GIS and Remote Sensing: A comprehensive literature review. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 563, p. 03009). EDP Sciences.
- Balvanera, P., Quijas, S., Karp, D. S., Ash, N., Bennett, E. M., Boumans, R., ... & Walz, A. (2017). Ecosystem services. In *The GEO handbook on biodiversity observation networks*, 39–78.
- Başak, E., Cetin, N. I., Vatandaşlar, C., Pamukcu-Albers, P., Karabulut, A. A., Çağlayan, S. D., ... & Atkin, G. (2022). Ecosystem services studies in Turkey: A national-scale review. *Science of The Total Environment*, *844*, 157068.
- Biao, Z. H. A. N. G., Yunting, S. H. I., & Shuang, W. A. N. G. (2022). A review on the

driving mechanisms of ecosystem services change. *Journal of Resources and Ecology*, 13(1), 68–79.

BRGM (2015). Carte géologique harmonisée du bassin rhénan occidental. Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

Brocca, L., et al. (2017). Soil moisture assimilation in hydrological modelling: Comparison between global and local satellite products. *Remote Sensing*, 9(1), 13.

Cavender-Bares, J., Schneider, F. D., Santos, M. J., Armstrong, A., Carnaval, A., Dahlin, K. M., ... & Wilson, A. M. (2022). Integrating remote sensing with ecology and evolution to advance biodiversity conservation. *Nature Ecology & Evolution*, 6(5), 506–519.

Chasmer, L., Cobbaert, D., Mahoney, C., Millard, K., Peters, D., Devito, K., ... & Niemann, O. (2020). Remote sensing of boreal wetlands 1: Data use for policy and management. *Remote Sensing*, 12(8), 1320.

Chatrabhuj, Meshram, K., Mishra, U., & Omar, P. J. (2024). Integration of remote sensing data and GIS technologies in river management system. *Discover Geoscience*, 2(1), 67.

Chauhan, S. (2022). A review of ecosystem services approach with particular reference to wetland ecosystem services. Available at SSRN 4185172.

Chen, C., Wang, Y., Jia, J., Mao, L., & Meurk, C. D. (2019). Ecosystem services mapping in practice: A Pasteur's quadrant perspective. *Ecosystem Services*, 40, 101042.

Daba, M. H., & Dejene, S. W. (2018). The role of biodiversity and ecosystem services in carbon sequestration and its implication for climate change mitigation. *Environmental Sciences and Natural Resources*, 11(2), 1–10.

Dawson, T. P., Cutler, M. E. J., & Brown, C. (2016). The role of remote sensing in the development of SMART indicators for ecosystem services assessment. *Biodiversity*, 17(4), 136–148.

Farooqi, T. J. A., Li, X., Yu, Z., Liu, S., & Sun, O. J. (2021). Reconciliation of research on forest carbon sequestration and water conservation. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 7–14.

FEDER Alsace-Lorraine. (2021). Coopération transfrontalière et infrastructures vertes.

Finizio, M., Pontieri, F., Bottaro, C., Di Febbraro, M., Innangi, M., Sona, G., & Carranza, M. L. (2024). Remote Sensing for Urban Biodiversity: A Review and Meta-Analysis. *Remote Sensing*, 16(23), 4483.

Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation

liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266.

Gómez-Baggethun, E., Barton, D. N., Berry, P., Dunford, R., & Harrison, P. A. (2016). Concepts and methods in ecosystem services valuation. *Routledge Handbook of Ecosystem Services*, 99–111.

Grêt-Regamey, A., & Weibel, B. (2020). Global assessment of mountain ecosystem services using earth observation data. *Ecosystem Services*, 46, 101213.

Grima, N., Jutras-Perreault, M. C., Gobakken, T., Ørka, H. O., & Vacik, H. (2023). Systematic review for a set of indicators supporting the Common International Classification of Ecosystem Services. *Ecological Indicators*, 147, 109978.

Habib, S., Tahir, F., Hussain, F., Macauley, N., & Al-Ghamdi, S. G. (2023). Current and emerging technologies for carbon accounting in urban landscapes: Advantages and limitations. *Ecological Indicators*, 154, 110603.

Hao, Y., Mao, J., Bachmann, C. M., Hoffman, F. M., Koren, G., Chen, H., ... & Dai, Y. (2025). Soil moisture controls carbon sequestration and greenhouse gas emissions: a review. *npj Climate and Atmospheric Science*, 8(1), 16.

Heliyon, Husain, H. J., Wang, X., Pirasteh, S., Mafi-Gholami, D., Chouhan, B., Khan, M. L., & Gheisari, M. (2024). Review and assessment of the potential restoration of ecosystem services through the implementation of the biodiversity management plans for SDG-15 localization.

Huete, A. R., et al. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213.

Huge, J., Rochette, A. J., de Béthune, S., Paitan, C. P., Vanderhaegen, K., Vandervelden, T., ... & de Bisthoven, L. J. (2020). Ecosystem services assessment tools for African Biosphere Reserves: A review and user-informed classification. *Ecosystem Services*, 42, 101079.

IFN (Inventaire Forestier National). Données d'occupation du sol et typologie forestière.

IGN / Corine Land Cover (2018). Occupation du sol dans les territoires du PNR des Vosges du Nord.

IGN (2020). Occupation du sol et structure forestière dans les Vosges du Nord – BD Forêt® V2.

INSEE (2022). Portrait social des territoires du Grand Est.

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Cambridge

University

Press.

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1>

Jafarzadeh, H., Mahdianpari, M., Gill, E. W., Brisco, B., & Mohammadimanesh, F. (2022). Remote sensing and machine learning tools to support wetland monitoring: a meta-analysis of three decades of research. *Remote Sensing*, 14(23), 6104.

Janse, J. H., Van Dam, A. A., Hes, E. M., de Klein, J. J., Finlayson, C. M., Janssen, A. B., ... & Verhoeven, J. T. (2019). Towards a global model for wetlands ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 36, 11–19.

Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* (2nd ed.). Prentice Hall.

Jia et al. (2016). Are we accurately estimating carbon sequestration in evergreen forests using NDVI?

Jiang, B., Wong, C. P., Chen, Y., Cui, L., & Ouyang, Z. (2015). Advancing wetland policies using ecosystem services – China's way out. *Wetlands*, 35, 983–995.

Jie, W. H., Xiao, C. L., Zhang, C., Zhang, E., Li, J. Y., Wang, B., ... & Dong, S. F. (2021). Remote sensing-based dynamic monitoring and environmental change of wetlands in southern Mongolian Plateau in 2000–2018. *China Geology*, 4(2), 353–363.

Kapsalis, V. C., Kyriakopoulos, G. L., & Aravossis, K. G. (2019). Investigation of ecosystem services and circular economy interactions under an inter-organizational framework. *Energies*, 12(9), 1734.

Kingsford, R. T., Basset, A., & Jackson, L. (2016). Wetlands: conservation's poor cousins. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 26(5), 892–916.

Knoke, T., Kindu, M., Schneider, T., & Gobakken, T. (2021). Inventory of forest attributes to support the integration of non-provisioning ecosystem services and biodiversity into forest planning — from collecting data to providing information. *Current Forestry Reports*, 7, 38–58.

Lal, R., Monger, C., Nave, L., & Smith, P. (2021). The role of soil in regulation of climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1834), 20210084.

Langan, C., Farmer, J., Rivington, M., & Smith, J. U. (2018). Tropical wetland ecosystem service assessments in East Africa: A review of approaches and challenges. *Environmental Modelling & Software*, 102, 260–273.

Li, T., Cui, L., Kuhnert, M., McLaren, T. I., Pandey, R., Liu, H., ... & Dang, Y. P. (2024). A comprehensive review of soil organic carbon estimates: Integrating remote sensing and

machine learning technologies. *Journal of Soils and Sediments*, 24(11), 3556–3571.

Li, X., Chen, W. Y., Sanesi, G., & Laforteza, R. (2019). Remote sensing in urban forestry: Recent applications and future directions. *Remote Sensing*, 11(10), 1144.

Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th ed.). Wiley.

Masenyama, A., Mutanga, O., Dube, T., Bangira, T., Sibanda, M., & Mabhaudhi, T. (2022). A systematic review on the use of remote sensing technologies in quantifying grasslands ecosystem services. *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), 1000–1025.

Matheus, F. S. (2018). The role of forests and protected areas in climate change mitigation: a review and critique of the ecosystem services and REDD+ approaches. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 46.

Météo-France (2023). Données climatiques régionales Grand Est – Synthèse décennale.

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press.

<https://www.millenniumassessment.org>

Obermeier et al. (2021). Soil water availability is a key driver of drought resilience in temperate forest ecosystems.

Pan et al. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests

PNRVN (2020). Charte du Parc naturel régional des Vosges du Nord. Parc naturel régional.

Programme INTERREG (2021). Projets transfrontaliers dans la Réserve de biosphère Vosges du Nord – Pfälzerwald.

UNESCO MAB (2020). Biosphere Reserve Information – Vosges du Nord-Pfälzerwald.

UNESCO MAB (2020). Vosges du Nord / Pfälzerwald Biosphere Reserve - Information Sheet.

Schmidt, A. et al. (2021). Hydrological vulnerability of sandstone forests to climate extremes in Northeastern France. *Forest Ecology and Management*, 482, 118905.

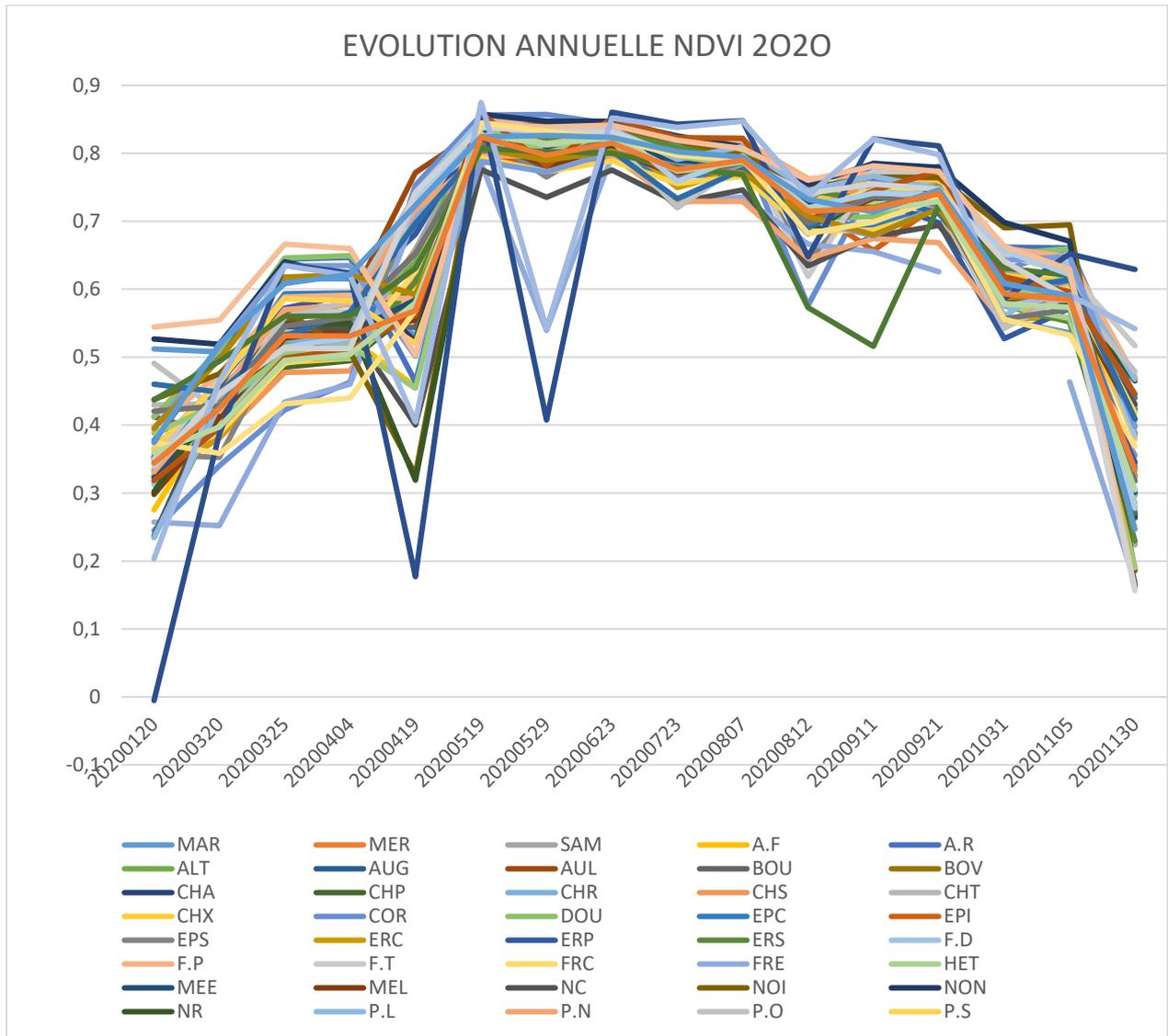
Schuldt et al. (2020). A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests.

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1:Evolution annuelle NDVI 2018	71
ANNEXE 2:Graphique d'évaluation du NDVI des différentes essences en 2018	71
ANNEXE 3:Graphique d'évaluation du NDVI des différentes essences en 2020	72
ANNEXE 4 :Evolution annuelle NDVI 2022	72
ANNEXE 5:Graphique d'évaluation du NDVI des différentes essences en 2022	73
ANNEXE 5:Tableau des surfaces occupée par chaque essence répertoriée	73
ANNEXE 6:Evolution NDWI toutes essences P1	76
ANNEXE 7:Evolution NDWI toutes essences P2	76
ANNEXE 8:Capacité de Stockage en CO ₂ des différentes essences	77
ANNEXE 9:Capacité de Stockage en CO ₂ des différentes essences	77
ANNEXE 10:Capacité de Stockage en CO ₂ des essences dominantes	77
ANNEXE 11:Analyse statistique par FAMD de la vitalité des feuillus	78
ANNEXE 12:Analyse statistique par FAMD de la vitalité des résineux	79
ANNEXE 13:Analyse statistique par FAMD de l'impact de l'humidité du sol sur les feuillus	79
ANNEXE 14:Analyse statistique par FAMD de l'impact de l'humidité du sol sur les résineux	80

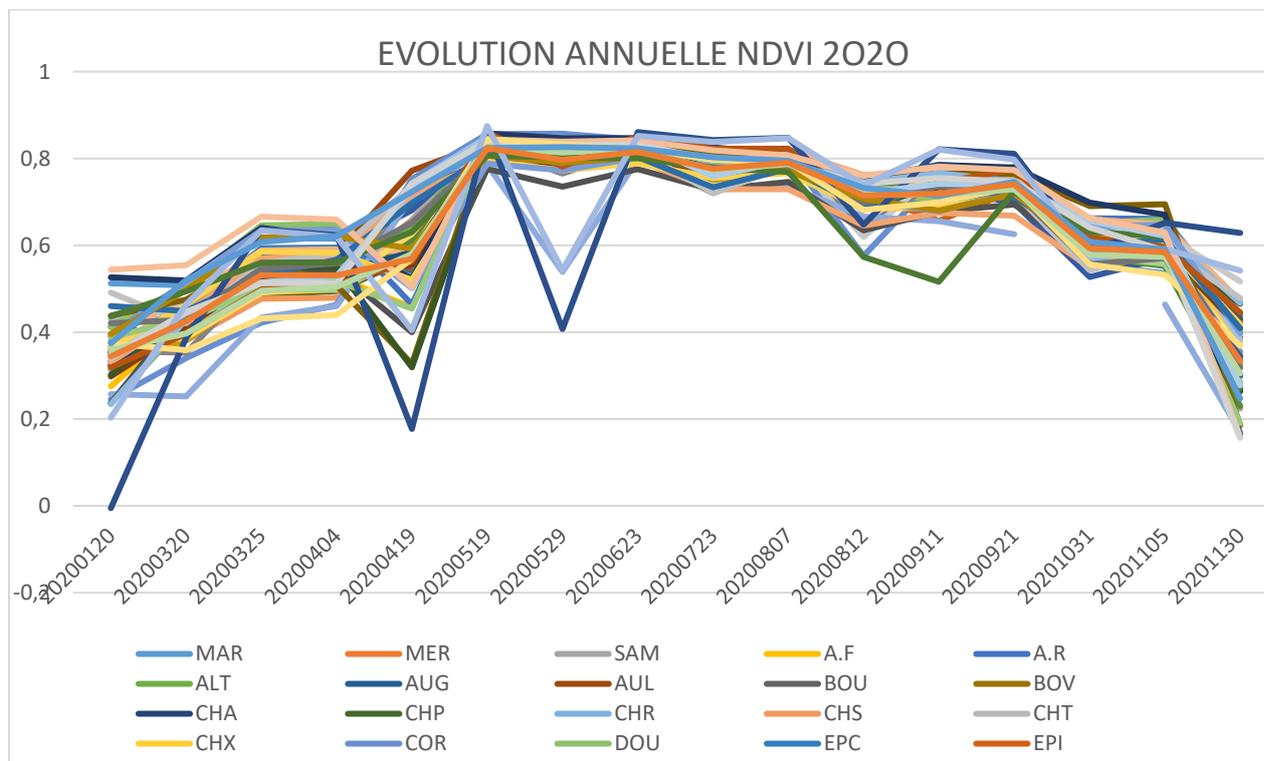
Etude géomatique de l'effet des sécheresses sur la vitalité et les services écosystémiques de régulation des infrastructures vertes du parc naturel des Vosges du nord (2014-2024)

ANNEXE 3: Graphique d'évaluation du NDVI des différentes essences en 2020



Etude géomatique de l'effet des sécheresses sur la vitalité et les services écosystémiques de régulation des infrastructures vertes du parc naturel des Vosges du nord (2014-2024)

ANNEXE 5: Graphique d'évaluation du NDVI des différentes essences en 2022



ANNEXE 6: Tableau des surfaces occupée par chaque essence répertoriée

ESS	Somme de Surface en ha	%
MAR	13,61080539	0,002415621
MER	1526,211829	0,270869316
SAM	363,0695805	0,064436933
(vide)	8558,19453	1,51889289
A.F	1872,400517	0,332310258
A.R	2446,051909	0,43412087
ALB	15,95819633	0,002832232
ALI	3,99483284	0,000708996
ALT	116,6540258	0,020703546
AUB	1,991945304	0,000353527
AUG	1364,030455	0,242085659
AUL	26,22825564	0,004654943
BOP	1,997411745	0,000354497
BOU	1452,271143	0,257746456
BOV	4752,458085	0,843457667

Etude géomatique de l'effet des sécheresses sur la vitalité et les services écosystémiques de régulation des infrastructures vertes du parc naturel des Vosges du nord (2014-2024)

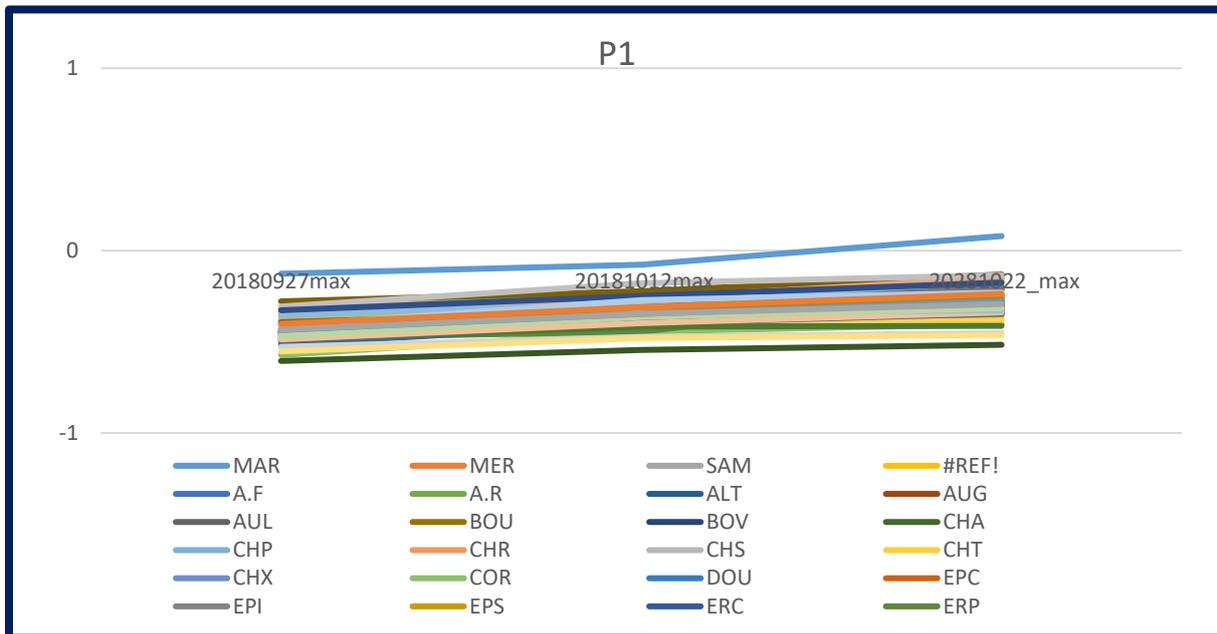
CHA	6761,525816	1,200023375
CHC	25,15982324	0,00446532
CHE	20,27193966	0,003597827
CHH	152,1936448	0,027011053
CHP	4948,525282	0,878255319
CHR	3089,642953	0,548344244
CHS	89622,27612	15,90599951
CHT	2111,795422	0,374797633
CHX	28718,27933	5,096868286
COR	9,945195802	0,001765055
CPS	39,85352511	0,007073132
DOU	16219,36707	2,878583938
EPC	33318,63245	5,913330639
EPI	2,713124122	0,00048152
EPS	37,49428429	0,006654418
ERA	3,994842869	0,000708997
ERC	272,4821012	0,048359631
ERP	35,69387389	0,006334884
ERS	2162,512454	0,3837988
F.D	501,1475778	0,088942766
F.P	72,08148214	0,012792891
F.T	642,9450558	0,114108726
FRC	1974,41785	0,35041611
FRE	17,10064108	0,003034991
HCH	658,9425565	0,116947933
HET	188981,8297	33,5401534
HPS	90,42304396	0,016048118
MEE	7498,810089	1,330875255
MEL	2250,573648	0,399427741
NC	3834,178289	0,680483029
NOI	12,3825958	0,002197641
NON	4,441031647	0,000788186
NOY	9,51759116	0,001689165
NR	1764,968507	0,313243419

Etude géomatique de l'effet des sécheresses sur la vitalité et les services écosystémiques de régulation des infrastructures vertes du parc naturel des Vosges du nord (2014-2024)

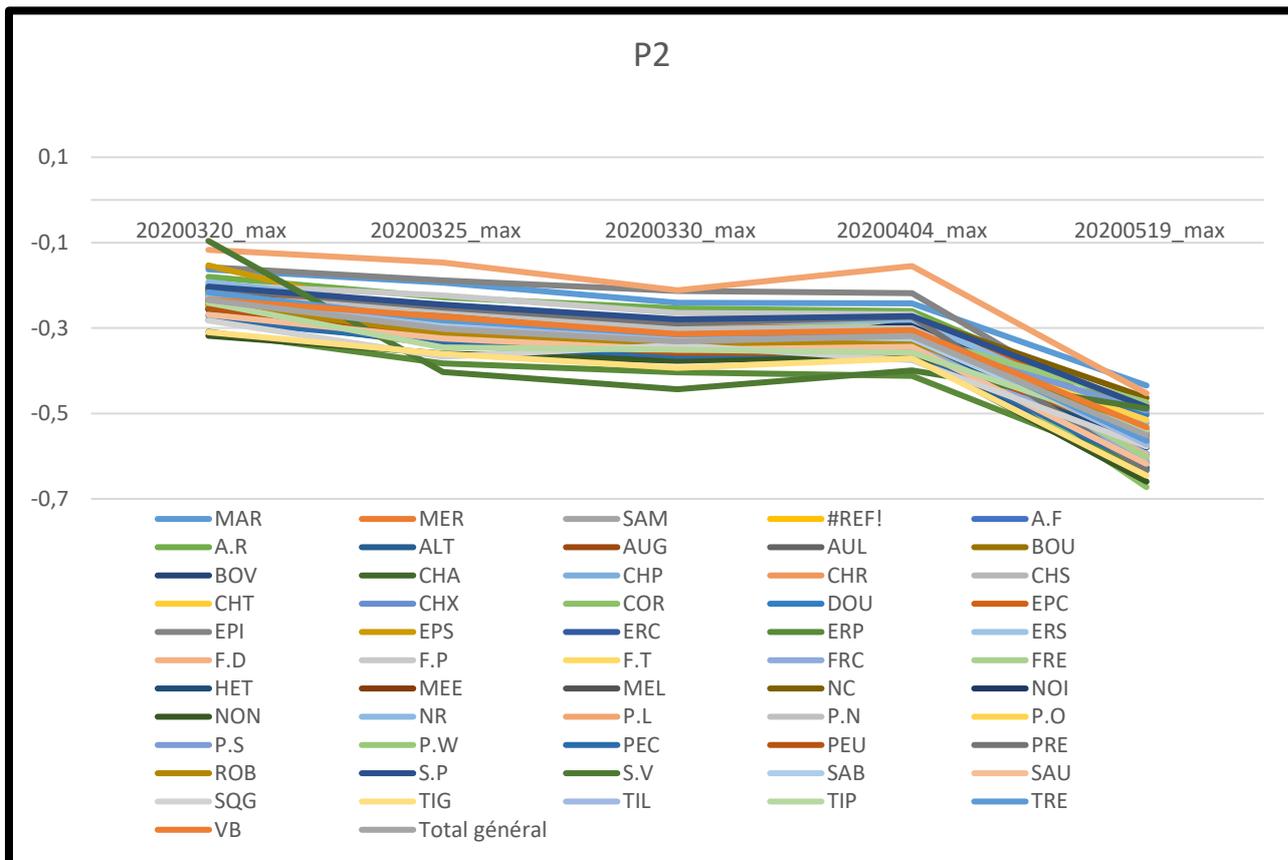
ORC	6,685839127	0,001186591
ORM	11,11490543	0,001972653
ORT	2,615685998	0,000464227
P.L	24,99836372	0,004436664
P.N	23,64647153	0,004196733
P.O	51,02850692	0,009056447
P.S	131972,9899	23,42232761
P.W	350,3443268	0,062178478
PEC	123,9026486	0,021990018
PEG	1,997360178	0,000354488
PEN	2,743817155	0,000486968
PEU	2,65510736	0,000471224
POI	3,27674775	0,000581551
POM	4,633529092	0,00082235
PRE	48,93918464	0,008685638
PSC	134,9460555	0,023949982
PSH	183,1798655	0,032510431
R.D	9,597781688	0,001703397
ROB	194,0205501	0,034434416
S.P	11015,32986	1,954980825
S.V	6,991083811	0,001240765
SAB	26,60025673	0,004720965
SAU	134,1185442	0,023803117
SOR	56,13191991	0,009962192
SQG	7,042705118	0,001249927
TIG	12,93723313	0,002296077
TIL	42,4818634	0,007539604
TIP	31,15784936	0,005529839
TRE	316,5358465	0,05617821
VB	265,622811	0,047142256
Total général	563449,509	100

Etude géomatique de l'effet des sécheresses sur la vitalité et les services écosystémiques de régulation des infrastructures vertes du parc naturel des Vosges du nord (2014-2024)

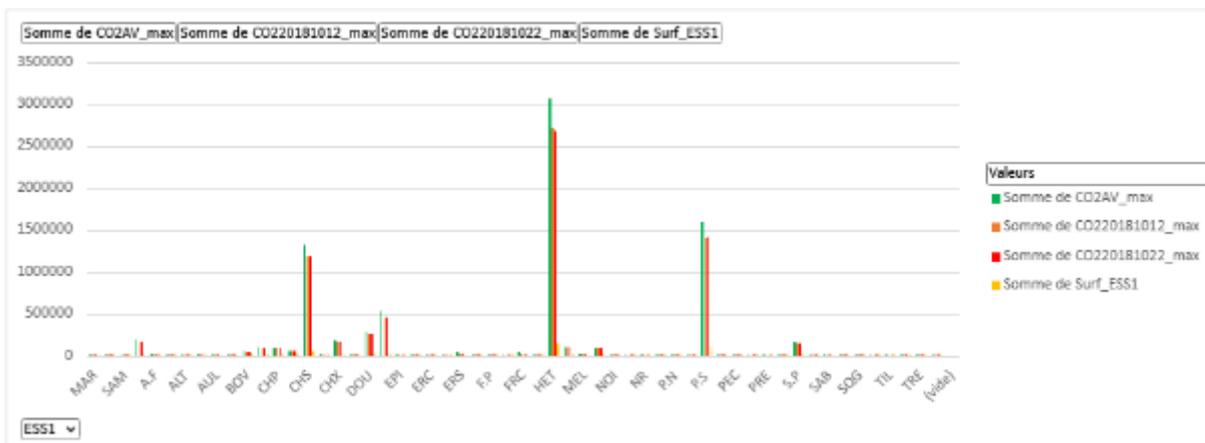
ANNEXE 7: Evolution NDWI toutes essences P1



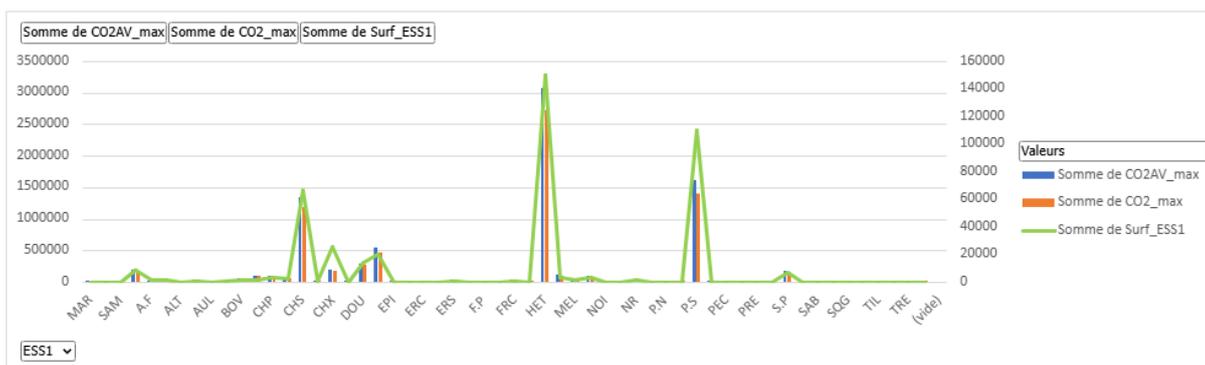
ANNEXE 8: Evolution NDWI toutes essences P2



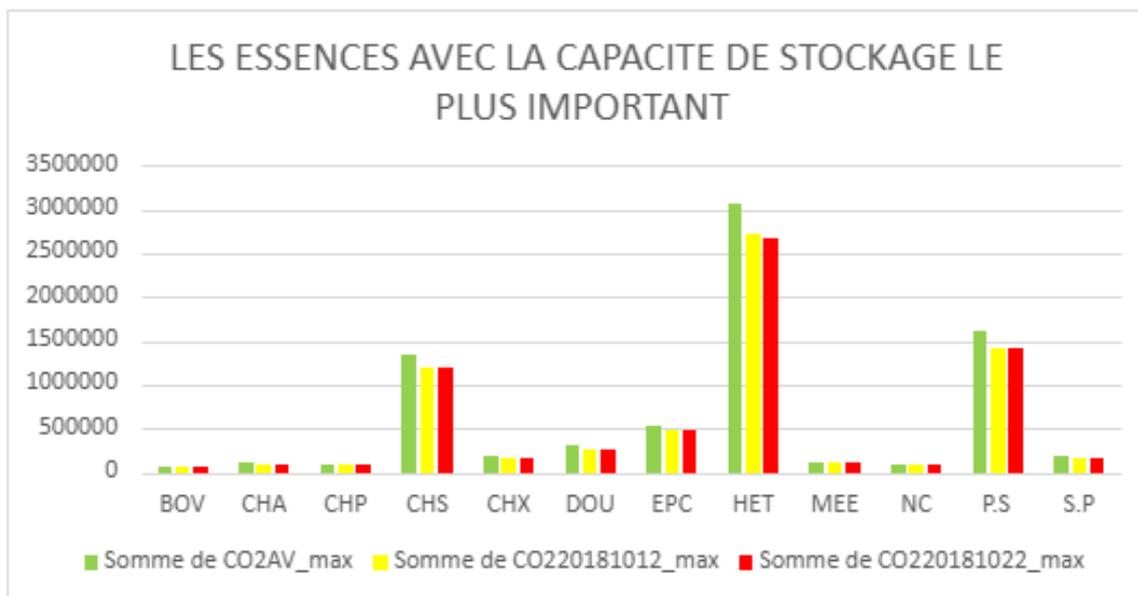
ANNEXE 9: Capacité de Stockage en CO₂ des différentes essences



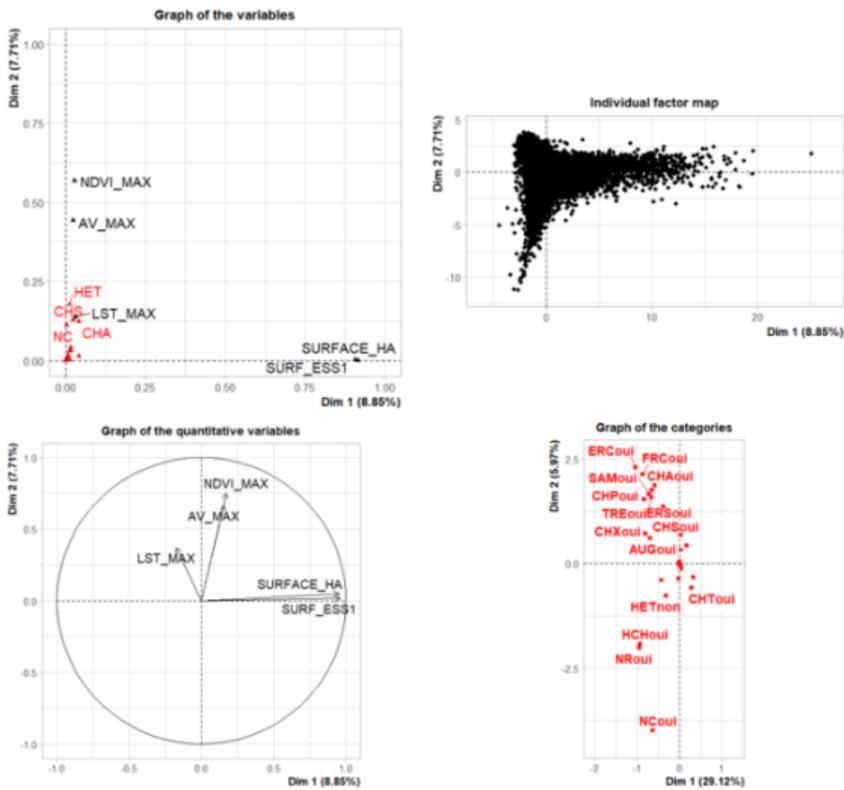
ANNEXE 10: Capacité de Stockage en CO₂ des différentes essences



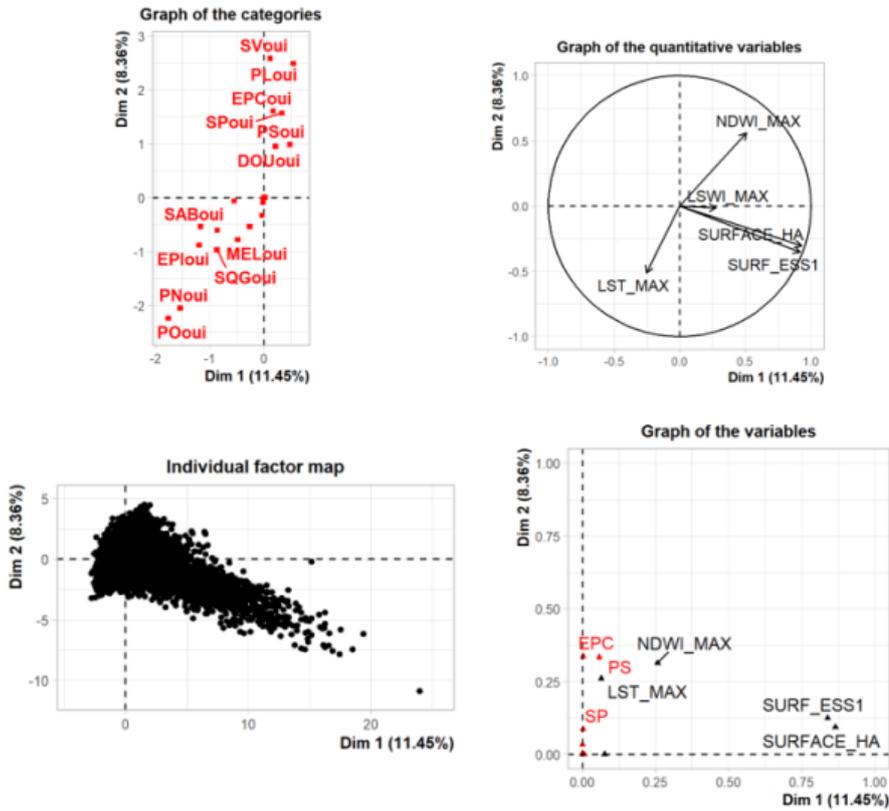
ANNEXE 11: Capacité de Stockage en CO₂ des essences dominantes



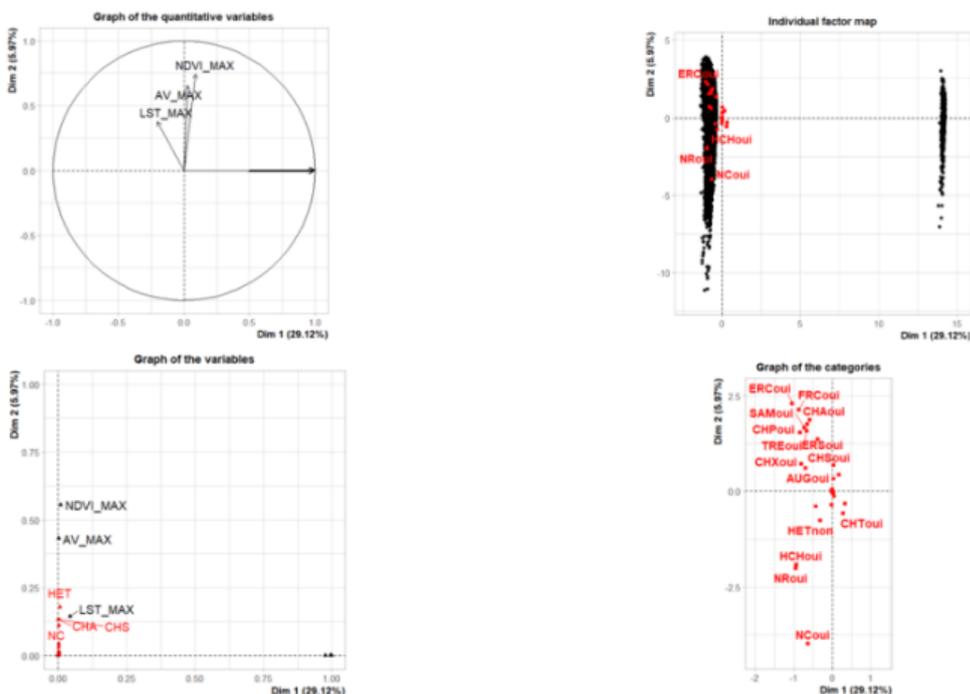
ANNEXE 12: Analyse statistique par FAMD de la vitalité des feuillus



ANNEXE 13: Analyse statistique par FAMD de la vitalité des résineux



ANNEXE 14: Analyse statistique par FAMD de l'impact de l'humidité du sol sur les feuillus



ANNEXE 15: Analyse statistique par FAMD de l'impact de l'humidité du sol sur les résineux

