

Mémoire

Auteur : Massart, Grégoire

Promoteur(s) : Wellens, Joost; Peereman, Jonathan

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23800>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

Analyse de la résistance et de la résilience de la végétation face aux variations climatiques dans deux zones rurales du Moyen Atlas marocain

Grégoire Massart

**MEMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT, A FINALITÉ SPECIALISÉE**

ANNÉE ACADEMIQUE 2024-2025

RÉDIGÉ SOUS LA DIRECTION DU PR. JOOST WELLENS (PROMOTEUR) & PR. JONATHAN PEEREMAN (CO-PROMOTEUR)

COMITÉ DE LECTURE :

MOUSSA EL JARROUDI

ZOUBIR CHATTOU

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège.

*L'autorité académique est représentée par le(s) (co-)promoteur(s), membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : MASSART Grégoire ; massartgregoire@gmail.com

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier particulièrement mon promoteur, le professeur Joost Wellens de la confiance qu'il m'a accordée pour pouvoir intégrer l'un de ses projets sur les oasis de montagne au Maroc. Monsieur Wellens a été d'un soutien inconditionnel et à l'écoute durant ce stage et à mon retour. Le sujet de cette étude a connu plusieurs rebondissements et a dû être très souvent rediscuté et retravaillé. Monsieur Wellens a toujours été très disponible, réactif et de bons conseils face à mes questionnements et à mes moments de doute.

Je tiens également à remercier Jonathan Peereman, assistant à la faculté des Sciences sur le Campus de l'environnement à Arlon, pour son temps, ses conseils avisés, sa disponibilité et ses explications concernant l'utilisation de la plateforme Google Earth Engine.

Je tiens enfin à remercier chaleureusement tous les membres de l'équipe de l'Ecole Nationale de l'Agriculture à Meknès impliqués dans le projet ARES sur la revitalisation des agroécosystèmes de montagne du Moyen Atlas marocain :

Ghizlane Echchgadda et Zoubir Chattou, tous deux professeurs et chercheurs à l'ENAM, pour leur accueil, leur partage de connaissance et leur engagement pour nous permettre de vivre cette belle expérience au Maroc.

Rania Belamalem et Hamza Nejjari, tous deux doctorants sur le projet, pour m'avoir appris tant de choses sur le Maroc, pour nous avoir accompagnés et fait découvrir de si beaux endroits et avoir permis la communication entre tous les agriculteurs et habitants des différentes communautés locales.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à Aziz Hadi et Mohamed Kharmouch, agriculteurs dans le Moyen Atlas dont les témoignages précieux, l'hospitalité chaleureuse, les moments de partage, la générosité et le sourire ont rendu ce mémoire possible.

Pour finir, j'adresse un remerciement particulier à mes parents qui m'ont toujours fait confiance depuis le début de mes études jusqu'à la fin de la réalisation de ce mémoire, qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu. Je les remercie également pour leur relecture attentive de ce mémoire.

Résumé

Dans le contexte du changement climatique actuel, les oasis de montagne du Moyen Atlas marocain font face à des pressions croissantes sur leurs ressources naturelles depuis plusieurs années. La variabilité et l'irrégularité dans les cycles des précipitations et l'augmentation des températures impactent fortement les écosystèmes végétaux qui sont pourtant essentiels au fonctionnement et au développement du Maroc où l'agriculture reste l'un des principaux pourvoyeurs d'emplois.

Dans ce contexte, cette étude vise à évaluer la résistance et la résilience de la végétation face aux années pluvieuses et aux années sèches dans deux zones rurales du Moyen Atlas marocain. Celles-ci sont situées dans la région de Fès-Meknès et dans la province d'Ifrane et présentent des caractéristiques et des réalités différentes. La méthodologie repose sur l'analyse de données satellitaires de végétation (NDVI), d'indices climatiques de précipitations (SPI) et de données d'occupation du sol, traités sur la plateforme Google Earth Engine.

L'observation des tendances permet de faire ressortir trois saisons clés : octobre-décembre, janvier-mars et avril-juin. Les différents résultats montrent une baisse générale de la résistance sur la période d'étude (2015-2025) dans les deux zones. La période d'octobre à décembre, essentielle pour le démarrage de la végétation après l'été apparaît comme la plus fragile. La résilience quant à elle montre une certaine variabilité selon les années mais tend également à diminuer notamment en janvier-mars.

Ces résultats soulignent l'importance d'une gestion et d'une prise de connaissance du territoire et des différentes typologies au sein de celui-ci. Ils mettent également en avant la nécessité de promouvoir l'adaptation et la sensibilisation vers des pratiques agroécologique et de mettre en place un suivi régulier des couvertures terrestres et des tendances climatiques notamment grâce à des outils tels que la télédétection.

Abstract

In the context of current climate change, the mountain oases of Morocco's Middle Atlas have been facing increasing pressure on their natural resources for several years. Variability and irregularity in precipitation cycles and rising temperatures are having a significant impact on plant ecosystems, which are essential to the functioning and development of Morocco, where agriculture remains one of the main sources of employment.

In this context, this study aims to assess the resistance and resilience of vegetation to wet and dry years in two rural areas of Morocco's Middle Atlas Mountains. These areas are located in the Fez-Meknes region and the province of Ifrane and have different characteristics and realities. The methodology is based on the analysis of satellite vegetation data (NDVI), precipitation climate indices (SPI), and land use data, processed on the Google Earth Engine platform.

Trend analysis highlights three key seasons: October-December, January-March, and April-June. The various results show a general decline in resistance over the study period (2015-2025) in both areas. The period from October to December, which is essential for vegetation to start growing after the summer, appears to be the most fragile. Resilience varies somewhat from year to year, but also tends to decrease, particularly in January-March.

These results highlight the importance of managing and understanding the territory and the different types of land within it. They also highlight the need to promote adaptation and awareness of agroecological practices and to establish regular monitoring of land cover and climate trends, in particular through tools such as remote sensing.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte.....	1
1.2 Problématique.....	2
1.3 Objectifs de l'étude.....	4
1.4 Méthodologie.....	6
2. MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	7
2.1 Présentation et contextes géographiques.....	7
2.1.1 Le Moyen Atlas.....	7
2.1.2 Localisation des deux zones d'étude.....	9
2.1.2.1 Première zone d'étude.....	11
2.1.2.2 Seconde zone d'étude.....	15
2.1.3 Carte topographique.....	19
2.2 La télédétection et Google Earth Engine.....	20
2.3 Résistance et résilience.....	23
2.4 Choix des indicateurs.....	26
2.4.1 Indicateurs climatiques et hydrologiques.....	26
2.4.2 Indicateurs climatiques et conditions de la végétation.....	29
2.5 Analyses.....	32
2.6 Sources de données pour l'analyse de la résistance et de la résilience.....	34
2.6.1 CHIRPS.....	34
2.6.2 NDVI.....	34
2.6.3 Land Cover.....	35
2.6.4 Organigramme des données.....	36
3. RÉSULTATS.....	37
3.1 Tendances climatiques dans les zones d'étude.....	37
3.1.1 Précipitations.....	37
3.1.2 Températures.....	40
3.2 Détection des périodes pluvieuses et végétatives dans les zones d'étude.....	42

3.3	Analyse comparative du Land Cover, NDVI et SPI dans la première zone.....	45
3.4	Analyse comparative du Land Cover, NDVI et SPI dans la seconde zone d'étude.....	52
3.5	Liens entre le SPI et le NDVI.....	59
3.6	Gestion des ressources dans les deux zones d'étude.....	63
3.7	Comparaisons et apprentissages sur les deux zones.....	66
3.7.1	Période octobre-décembre.....	69
3.7.2	Période janvier-mars.....	70
3.7.3	Période avril-juin.....	71
4.	DISCUSSION.....	73
4.1	Des outils.....	73
4.2	La démarche.....	75
4.3	Des résultats.....	77
4.4	Perspectives.....	79
5.	CONCLUSION.....	83
6.	BIBLIOGRAPHIE.....	84
7.	ANNEXES.....	90

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme de la méthodologie.....	6
Figure 2 : Cartographie du Moyen Atlas	7
Figure 3 : Photo d'un troupeau de moutons prise dans le Moyen Atlas marocain.....	8
Figure 4 : Cartographie de la localisation des zones d'étude.....	9
Figure 5 : Image Landsat / Copernicus ; © 2025 CNES / Airbus ; © 2025 Maxar Technologies ; image du 19/8/2019 extraite via Google Earth Pro de la première zone d'étude.....	11
Figure 6 : Image Landsat / Copernicus ; © 2025 CNES / Airbus, image du 24/4/2021 extraite via Google Earth Pro de la première zone d'étude.....	12
Figure 7 : Vue depuis la terrasse d'Aziz.....	13
Figure 8 : Les habitations voisines et les séguias.....	14
Figure 9 : : Image Landsat / Copernicus ; © 2025 CNES / Airbus, image du 10/7/2020 extraite via Google Earth Pro de la seconde zone d'étude.....	15
Figure 10 : Image Landsat / Copernicus ; © 2025 CNES / Airbus ; © 2025 Maxar Technologies ; image du 11/3/2024 extraite via Google Earth Pro de la seconde zone d'étude.....	16
Figure 11 : Vue depuis la terrasse de Mohamed.....	17
Figure 12 : Parcelle de Mohamed cultivée de pois.....	18
Figure 13 : Carte topographique générée à partir d'une couche Raster SRTM "USGS/SRTMGL1_003" travaillée dans le logiciel GEE.....	19
Figure 14 : Représentation de l'interface de Google Earth Engine.....	21
Figure 15 : Schéma illustrant les composantes de la résilience de la productivité végétale face à une perturbation climatique, (Runge et al., 2025).....	23
Figure 16 : L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) reflète l'activité photosynthétique, disponible sur : http://www.geoscience-environment.com/	30
Figure 17 : Organigramme des données.....	36
Figure 18 : Graphique des précipitations annuelles moyennes dans les deux zones d'étude.....	37
Figure 19 : Cascade de Bakrit à sec.....	38
Figure 20 : L'érosion des sols sur les parcelles agricoles.....	39
Figure 21 : Graphique des températures annuelles moyennes dans les deux zones d'étude entre 1981 et 2024.....	40
Figure 22 : Graphique des anomalies annuelles moyennes dans les deux zones d'étude entre 1981 et 2024.....	41

Figure 23 : Graphique des précipitations mensuelles moyennes des deux zones d'étude entre 2000 et 2024.....	42
Figure 24 : Graphique du NDVI mensuel moyen dans la première zone d'étude entre 2003 et 2024.....	43
Figure 25 : Graphique du NDVI mensuel moyen dans la seconde zone d'étude entre 2003 et 2024.....	43
Figure 26 : Graphique du SPI-12 (janvier-décembre) dans la première zone d'étude.....	45
Figure 27 : Graphique du SPI-3 (octobre-décembre) dans la première zone d'étude.....	45
Figure 28 : Graphique du SPI-3 (janvier-mars) dans la première zone d'étude.....	46
Figure 29 : Graphique du SPI-3 (avril-juin) dans la première zone d'étude.....	46
Figure 30 : Évolution de l'occupation du sol entre 2015 et 2024 dans la première zone d'étude.....	48
Figure 31 : Évolution de l'occupation du sol entre 2015 et 2024 dans la première zone d'étude.....	48
Figure 32 : Evolution conjointe du SPI et du NDVI moyen des herbacées et des arbres dans la première zone d'étude entre 2015 et 2025.....	49
Figure 33 : Evolution conjointe du SPI et du NDVI moyen des cultures et des arbustes dans la première zone d'étude entre 2015 et 2025.....	50
Figure 34 : Graphique du SPI-12 (janvier-décembre) dans la seconde zone d'étude.....	52
Figure 35 : Graphique du SPI-3 (octobre-décembre) dans la seconde zone d'étude.....	52
Figure 36 : Graphique du SPI-3 (janvier-mars) dans la seconde zone d'étude.....	53
Figure 37 : Graphique du SPI-3 (avril-juin) dans la seconde zone d'étude.....	53
Figure 38 : Évolution du Land Cover entre 2015 et 2024 dans la seconde zone d'étude.....	55
Figure 39 : Évolution de l'occupation du sol entre 2015 et 2024 dans la seconde zone d'étude.....	55
Figure 40 : Evolution conjointe du SPI et du NDVI moyen des herbacées et des arbres dans la seconde zone d'étude entre 2015 et 2025.....	56
Figure 41 : Evolution conjointe du SPI et du NDVI moyen des cultures, des arbustes et de la végétation inondée dans la seconde zone d'étude entre 2015 et 2025.....	57
Figure 42 : Nuage de points NDVI - SPI de la même période pour toute la végétation (zone 1).....	59
Figure 43 : Nuage de points NDVI – SPI de la période précédente pour toute la végétation (zone 1).....	59

Figure 44 : Nuage de points NDVI – SPI de deux périodes précédentes pour toute la végétation (zone 1).....	60
Figure 45 : Séguias avec la présence d'une source non visible en amont et bassin de stockage.....	63
Figure 46 : Séguias le long d'un cours d'eau et le barrage Ait Moulay Ahmed.....	64
Figure 47 : Radar chart - Comparaison des surfaces végétales entre les deux zones d'étude en 2015.....	68
Figure 48 : Radar chart - Comparaison des surfaces végétales entre les deux zones d'étude en 2024.....	68
Figure 49 : Radar chart – Evolution et comparaison du NDVI moyen des surfaces végétales entre les deux zones d'étude entre 2015 et 2024 pour la période octobre-décembre.....	70
Figure 50 : Radar chart – Evolution et comparaison du NDVI moyen des surfaces végétales entre les deux zones d'étude entre 2016 et 2025 pour la période janvier-mars.....	71
Figure 51 : Radar chart – Evolution et comparaison du NDVI moyen des surfaces végétales entre les deux zones d'étude entre 2016 et 2025 pour la période avril-juin.....	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Coordonnées géographiques de la première zone d'étude.....	11
Tableau 2 : Coordonnées géographiques de la seconde zone d'étude.....	15
Tableau 3 : Valeur de SPI (World Meteorological Organization (WMO) & Svoboda, Mark; Hayes, Michael; Wood, Deborah A., 2012).....	27
Tableau 4 : Corrélation de Spearman entre le NDVI et le SPI selon la classe et la période (zone 1).....	61
Tableau 5 : Corrélation de Spearman entre le NDVI et le SPI selon la classe et la période (zone 2).....	62
Tableau 6 : Comparaisons et enjeux principaux entre les deux zones.....	65

LISTE DES ABRÉVIATIONS

API	Application Programming Interface
ARES	Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur
CHIRPS	Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data
ETP	Évapotranspiration Potentielle
GEE	Google Earth Engine
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
LAI	Leaf Area Index
LC	Land Cover
LST	Land Surface Temperature
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIDIS	National Integrated Drought Information System
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
PDSI	Palmer Drought Severity Index
QGIS	Quantum Geographic Information System
RCP	Representative Concentration Pathway
SPEI	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
SPI	Standardized Precipitation Index
TCI	Temperature Condition Index
VCI	Vegetation Condition Index
VHI	Vegetation Health Index

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte

Les montagnes du Moyen Atlas, longtemps surnommées les « châteaux d'eau du Maroc », tendent à se fragiliser sous l'effet des sécheresses récurrentes, alors qu'elles jouent un rôle essentiel dans les cycles hydriques. Le Moyen Atlas, chaîne montagneuse emblématique du Maroc, se caractérise par une grande diversité de paysages variant entre forêts de cèdres, reliefs rocheux et zones agricoles. Son altitude pouvant atteindre 3700m et son climat de type méditerranéen lui réservent des hivers froids et neigeux et des étés parfois chauds et secs. Ce climat joue un rôle déterminant dans les dynamiques hydrologiques et écologiques locales (Jihad, 2016).

Les zones étudiées sont situées dans le Moyen Atlas au Sud et à l'Ouest dans la province d'Ifrane. Celles-ci présentent une diversité de milieux naturels alternant entre forêts, zones agricoles, cultures, prairies, zones humides... Dans ces zones rurales du Moyen Atlas, les techniques traditionnelles ancestrales et le couplage entre culture et élevage jouent un rôle fondamental dans les dynamiques socio-économiques locales. Ces deux zones sont fortement influencées par les caractéristiques du milieu, les ressources naturelles disponibles, leur accessibilité et les effets du changement climatique, ce qui a un impact direct sur le couvert végétal et renforce la vulnérabilité de ces territoires.

Cette étude s'inscrit dans la continuité d'un stage réalisé sur le terrain en février et mars 2025 dans deux zones rurales du Moyen Atlas marocain. Le projet financé par l'ARES vise à renforcer la résilience des agroécosystèmes oasiens de montagne face aux changements climatiques en favorisant une transition agroécologique. Il repose sur trois défis majeurs : améliorer la durabilité agricole en combinant pratiques traditionnelles et innovations, préserver le patrimoine agroécologique et produire des connaissances scientifiques pour soutenir l'agriculture familiale en montagne. Les agriculteurs, conscients de ces changements reconnaissent, l'importance de ce type de projet.

1.2 Problématique

Depuis plusieurs décennies, le Maroc connaît des variations accrues dans les cycles pluviométriques et des sécheresses prolongées en raison des changements climatiques (Idrissi & Cherai, 2017). Ces changements plongent le Maroc dans une situation de stress hydrique parmi les plus sévères depuis les années 1980, avec des prévisions plaçant le pays parmi les plus à risque au niveau des ressources en eau à l'horizon 2040 (Lebaut et al., 2022). La principale conséquence est l'exploitation incontrôlée de la ressource, avec une pression accrue sur les nappes souterraines via des puits, des forages et des pompes (Lebaut et al., 2022). Ces nappes, dont la recharge naturelle demande des décennies, affichent désormais des niveaux alarmants et pourraient connaître un épuisement irréversible même en cas d'années exceptionnellement pluvieuses (2022).

Dans ces zones de montagnes, la variabilité des précipitations rend complexe l'évaluation de leur tendance, qu'il s'agisse d'une diminution, d'une augmentation ou d'une stagnation. La hausse des températures, phénomène visible, n'est qu'un facteur parmi d'autres influençant les changements des systèmes climatiques de montagne (Richard et al., 2010). Selon différents modèles de projection climatique, le phénomène d'aridification au Maroc va s'accroître. Selon le scénario RCP4.5 (Representative Concentration Pathway 4.5) qui représente un scénario intermédiaire de concentration de gaz à effet de serre utilisé par le GIEC avec une prévision de forçage radiatif de 4,5 W/m² à l'horizon 2100, le Maroc attendrait une augmentation de +1,5°C à l'horizon 2050 avec une diminution de 15 % au niveau des précipitations. D'autres modèles plus pessimistes prévoient une diminution plus dramatique des précipitations, à un taux avoisinant les 40 %. Selon d'autres projections faites par Vivioli et al. (2011), cette crise hydrique risque de s'intensifier, quels que soient les scénarios climatiques envisagés.

Dans le futur, la fréquence des vagues de chaleur, des sécheresses et des événements pluvieux extrêmes impactera fortement la demande et les besoins en eau, plongeant l'agriculture marocaine, principal secteur d'emploi, dans un avenir incertain (Woillez, 2019).

L'agriculture au Maroc constitue l'un des secteurs clés, avec une contribution à hauteur de 11,1 % du PIB national en 2023 (Bpifrance DIRECTION DE L'EVALUATION DES

ETUDES ET DE LA PROSPECTIVE, 2023). Ce secteur occupe à lui seul 40 % de la population active (AgriMaroc, 2023). L'agriculture, très dépendante des pluies, est un secteur particulièrement vulnérable face aux aléas climatiques. La disparition du couvert végétal et l'érosion des sols réduisent la capacité des milieux à stocker et réguler l'eau alors que la demande ne cesse de croître (Lazarev, 2005).

Les agriculteurs, conscients de ces changements, alertent sur la dégradation rapide de leurs ressources naturelles, l'irrégularité croissante des précipitations, la raréfaction de l'eau disponible pour l'irrigation, ainsi que sur certaines difficultés liées à l'enclavement géographique de leurs territoires tel que l'accessibilité, rendant difficile l'adaptation (Hadi Aziz, Kharmouch Mohamed, communication personnelle, février 2025).

1.3 Objectifs de l'étude

Cette étude porte sur l'analyse de l'impact des phénomènes climatiques extrêmes sur la végétation dans deux zones situées dans le Moyen Atlas marocain. L'approche méthodologique adoptée est synthétisée dans l'organigramme présenté ci-dessous (Figure 1). À l'aide de séries temporelles climatiques, l'indice SPI (Standardized Precipitation Index) sera mobilisé pour détecter les épisodes de stress hydrique. Ces périodes seront ensuite croisées avec des séries temporelles d'indices de végétation normalisés (NDVI) afin d'étudier la réaction de la végétation à ces chocs, ainsi que sa capacité de récupération. L'analyse tiendra également compte de la couverture du sol (Land Cover) afin d'évaluer les changements et la fragilité de certains éléments naturels du paysage.

L'objectif est de comprendre comment la végétation de ces deux zones réagit à ces phénomènes, en évaluant sa résistance (sa capacité à limiter les effets des perturbations) et sa résilience (sa capacité à retrouver un état stable après un choc climatique) à l'aide de différents indicateurs (Holling, 1973 ; Holling, 1996, cités par Runge et al., 2025). Dans cette étude, l'analyse portera à la fois sur la résistance et la résilience de la végétation, en réponse au constat de Matos et al. (2020 cité par Liang et al., 2021) selon lequel la majorité des recherches antérieures se concentraient uniquement sur la résistance. Cette double approche permet d'élargir le champ d'analyse et de répondre à une série de questionnements visant à mieux comprendre les dynamiques entre le climat et la végétation. Quelles sont les tendances climatiques actuelles observées dans ces deux zones d'étude ? La vigueur de la végétation, mesurée à travers le NDVI est-elle influencée de manière significative par les variations dans les précipitations exprimées via l'indice SPI ? Si oui, à quelle(s) période(s) de l'année cette influence est la plus marquée ? Les réponses végétatives varient-elles selon le type de couverture du sol et ces réponses sont-elles en lien avec les caractéristiques écologiques et les modes de gestion des ressources propres à chaque zone d'étude ? Quels sont les modes de gestion futurs qui pourraient palier à ces aléas climatiques et renforcer l'adaptation de ces différents territoires ruraux ?

Cette approche se distingue également d'études antérieures qui se sont concentrées sur des sécheresses ponctuelles et sur des écosystèmes complètement homogènes comme les forêts tempérées (Gazol et al., 2018, cité par Liang et al., 2021). À l'inverse,

cette étude porte sur l'analyse de deux milieux hétérogènes à forte variabilité topographique et climatique. Les deux zones d'étude présentent des caractéristiques écologiques et climatiques contrastées (relief, climat, ressources...) ce qui permettra une comparaison intéressante et pertinente de la réaction de la végétation dans deux contextes très différents.

L'ensemble des analyses sera réalisé à l'aide d'outils de télédétection, en particulier la plateforme Google Earth Engine qui donne accès à une vaste base de données satellitaires sur le long terme (Gorelick et al., 2017).

L'étude vise à caractériser la capacité de la végétation à faire face aux aléas climatiques en distinguant les zones selon leur résistance et leur résilience : forte résistance mais faible résilience, forte résilience mais faible résistance ou faible capacité dans les deux dimensions.

1.4 Méthodologie

Le cadre de cette étude est à l'origine un stage réalisé au Maroc dans les oasis de montagne du Moyen Atlas duquel ont découlé la problématique et l'objectif de cette recherche. Dès lors, la méthodologie représentée à la figure 1 démarre par la description des deux zones visitées lors du stage afin de mieux comprendre le contexte géographique, climatique et socio-économique local. Ce descriptif permet d'améliorer la compréhension des résultats par la suite. Elle se poursuit par l'analyse des conditions climatiques locales afin d'identifier les tendances actuelles et de détecter les périodes saisonnières clés pour l'analyse de la résistance et de la résilience de la végétation. Cette analyse sera effectuée à partir du croisement entre le NDVI, le SPI et le LC ainsi que sur les relations entre le NDVI et le SPI pour mieux comprendre la réponse de la végétation aux variations climatiques. Ces analyses seront décrites à la section 2.5. Pour finir, une comparaison entre les deux zones permettra d'identifier les similitudes et les différences dans le but de proposer certaines perspectives.

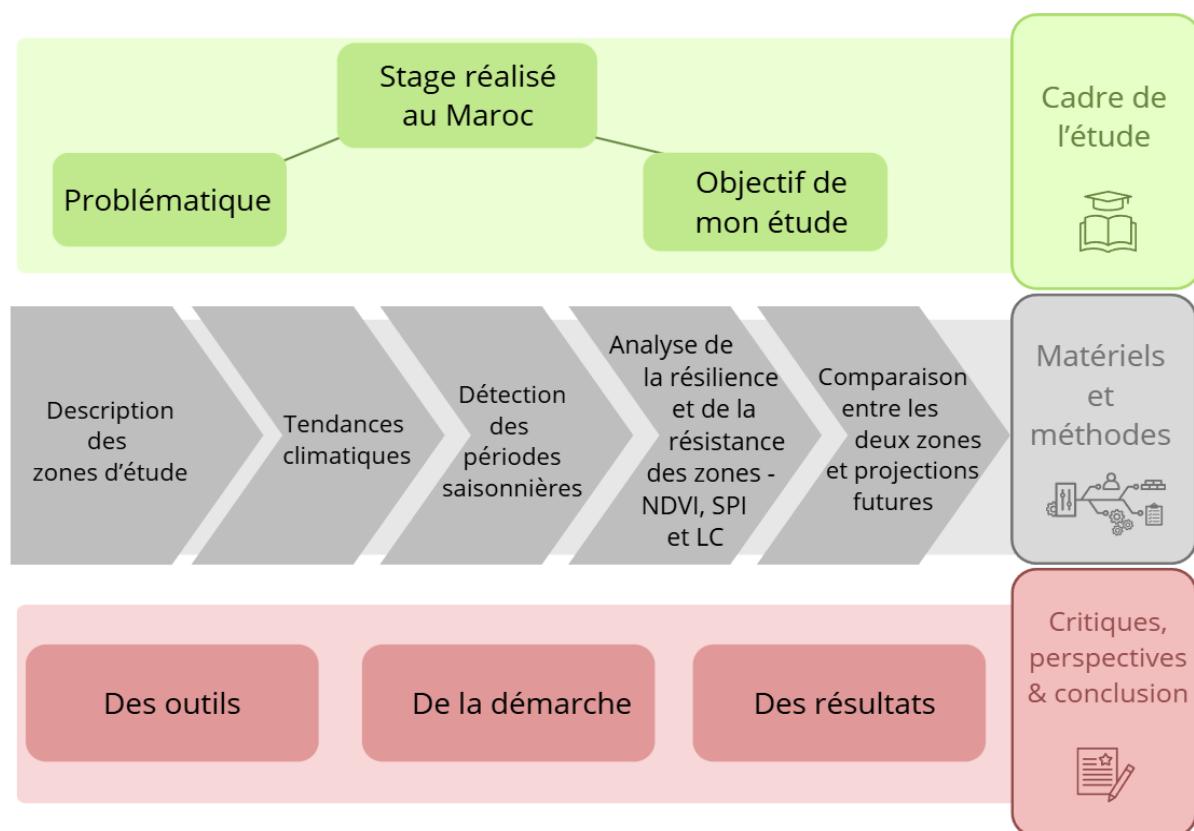


Figure 1 : Organigramme de la méthodologie

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 Présentation et contextes géographiques

2.1.1 Le Moyen Atlas

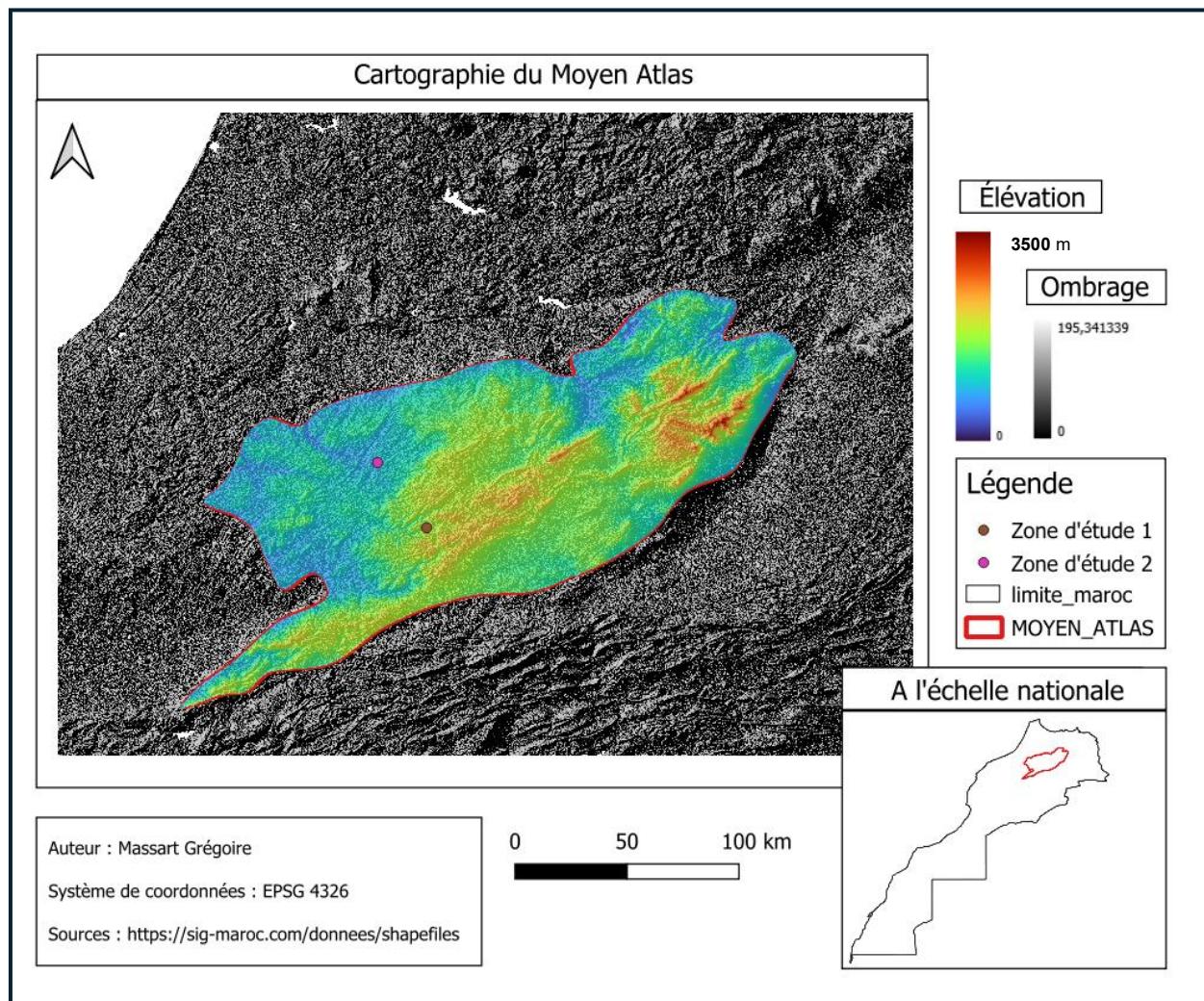


Figure 2 : Cartographie du Moyen Atlas

Le Moyen Atlas est une chaîne montagneuse centrale qui s'étend sur presque 450km et englobe 15% des montagnes marocaines. Les affleurements jurassiques, principalement calcaires, jouent un rôle essentiel dans le stockage et les apports d'eau à l'échelle nationale. Cette caractéristique majeure a donné au Moyen Atlas le surnom de « château d'eau du Maroc » (Jihad, 2016).

La région connaît des climats allant du semi-aride à l'hyper-humide en raison de son altitude élevée pouvant atteindre 3700m et de sa localisation entre l'océan Atlantique et la mer Méditerranée (Sebbar, 2013, cité par Abdelali et al., 2020). En 50 ans, la région a connu une hausse des températures de 1,5°C et une baisse des précipitations allant jusqu'à 100mm (Jihad, 2016).

Les deux zones d'étude, situées dans le Moyen Atlas marocain, sont soumises à un climat de type méditerranéen de montagne, marqué par des hivers froids et humides, des étés secs et une forte variabilité spatiale due à l'altitude et à l'exposition des versants. Les précipitations souvent concentrées en hiver sous forme de pluie ou de neige sont très irrégulières et parfois intenses, avec peu de jours de pluie. La neige joue un rôle crucial dans la recharge en eau mais tend fortement à diminuer ces dernières années (Hanchane, 2025).



Figure 3 : Photo d'un troupeau de moutons prise dans le Moyen Atlas marocain

2.1.2 Localisation des deux zones d'étude

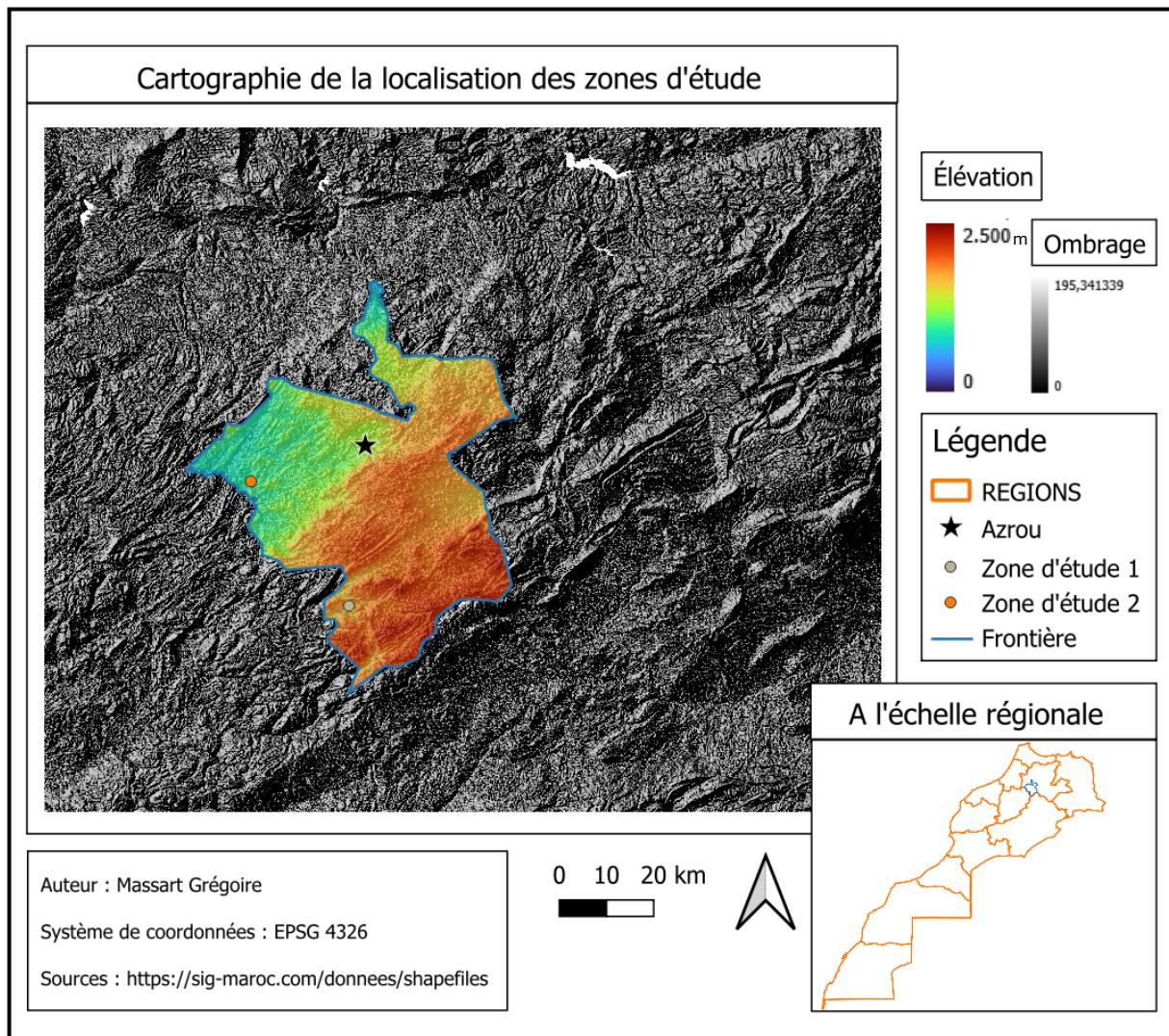


Figure 4 : Cartographie de la localisation des zones d'étude

Les deux zones d'étude choisies sont en lien avec un stage réalisé au Maroc durant les mois de février et mars 2025. En effet, ces deux lieux s'inscrivent dans le projet : OASIS-MAROC - Revitalisation des agro-écosystèmes oasiens de montagne par la revalorisation des pratiques agricoles traditionnelles et l'introduction d'innovations agro-écologiques résilientes aux changements climatiques. Nous avons eu la chance, lors de notre stage avec une autre collègue de l'Université de Liège également dans le Master en Sciences et Gestion de l'Environnement à finalité Gestion des Ressources en Eau, Caty Maillen, de passer 4 jours sur le terrain. Ces journées en immersion nous ont permis de partager le quotidien des agriculteurs, d'observer les

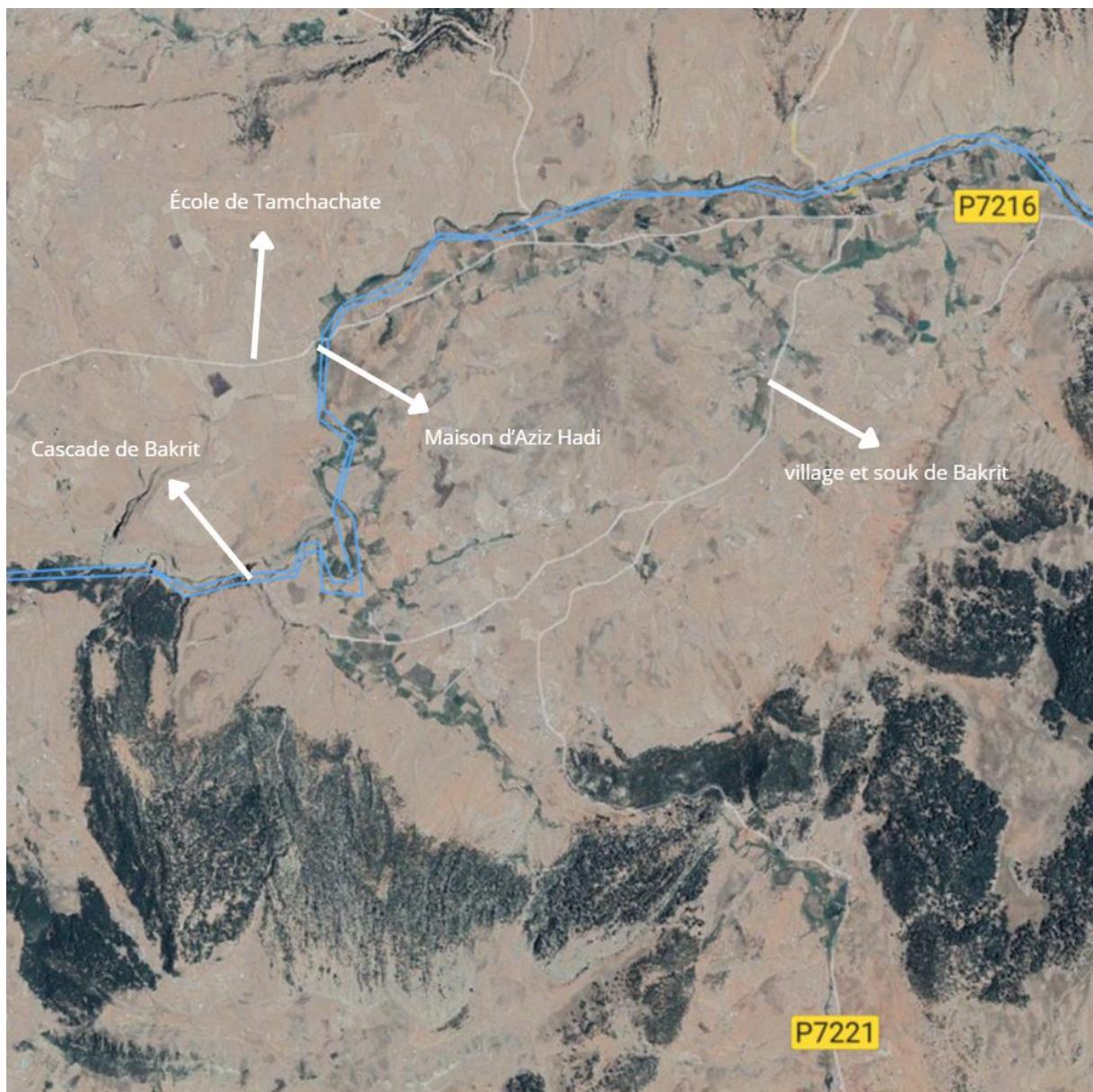
réalités du terrain, tout en mettant en évidence les défis et problématiques auxquels ils font face. Nous avons été accueillis par Aziz Hadi dans la première zone et Mohamed Karmouch dans la seconde zone. Il semblait donc pertinent de poursuivre l'analyse de ces deux zones dans le cadre de ce travail de fin d'études. Les descriptions des zones d'étude relèvent des témoignages des agriculteurs Aziz et Mohamed et les figures 3, 7, 8, 11, 12, 45, 46 sont des photos personnelles prises sur place.

La figure 4 illustre la localisation des deux zones d'étude situées dans la province d'Ifrane dont la frontière est représentée en bleu et met en évidence les différents contrastes topographiques entre les deux zones.

2.1.2.1 Première zone d'étude

Zone d'étude	Latitude Nord	Latitude Sud	Longitude Ouest	Longitude Est
Zone 1	33.1300°	33.0400°	5.3000°	5.2100°

Tableau 1 : Coordonnées géographiques de la première zone d'étude



P7216 Route principale vers Azrou et Timahdite

— Oued

Figure 5 : Image Landsat / Copernicus ; © 2025 CNES / Airbus ; © 2025 Maxar Technologies ; image du 19/8/2019 extraite via Google Earth Pro de la première zone d'étude



Figure 6 : Image Landsat / Copernicus ; © 2025 CNES / Airbus, image du 24/4/2021 extraite via Google Earth Pro de la première zone d'étude

Le site de Tamchachate se situe à proximité du village de Bakrit. Il se trouve au sud-ouest de la région de Fès-Meknès et au sud de la province d'Ifrane. La zone, qui culmine à 1850m d'altitude fait également partie du parc national d'Ifrane. On y observe une tendance à la hausse de la température et à la réduction de l'enneigement depuis 2018 (chute de 3-4m à 30-40cm) ainsi que l'assèchement progressif de certaines ressources en eau, comme la cascade de Bakrit selon Aziz.

Le territoire compte environ 380 habitants répartis en deux tribus. L'agriculture et l'élevage sont les principales activités. Les cultures sont variées : céréales, fourrages, maraîchages, arboriculture (cerisiers, pommiers, poiriers...).

La zone est composée majoritairement de petites parcelles inférieures à 5 hectares, avec des terres individuelles et collectives. Le réseau d'irrigation est principalement gravitaire, alimenté par des sources et des forages très souvent non déclarés en amont, bien que certaines parcelles voisines utilisent du goutte-à-goutte. La répartition de l'eau se fait selon un calendrier tribal de huit jours, dans un contexte de diminution progressive de la ressource.

Le territoire connaît un isolement marqué et un enclavement, avec des problèmes d'accessibilité, un exode rural notable, une absence d'infrastructures touristiques et une gouvernance communautaire fragile. Cette zone illustre les défis structurels de l'agriculture de montagne dans un contexte de changement climatique.



Figure 7 : Vue depuis la terrasse d'Aziz

La photo représente une partie de la première zone d'étude. Elle a été prise depuis la terrasse d'Aziz. Le relief est vallonné avec des parcelles en contrebas à gauche de l'image. Il y a également la présence d'un cours d'eau. Lors de notre passage, plusieurs femmes des habitations voisines faisaient leur lessive dans celui-ci.



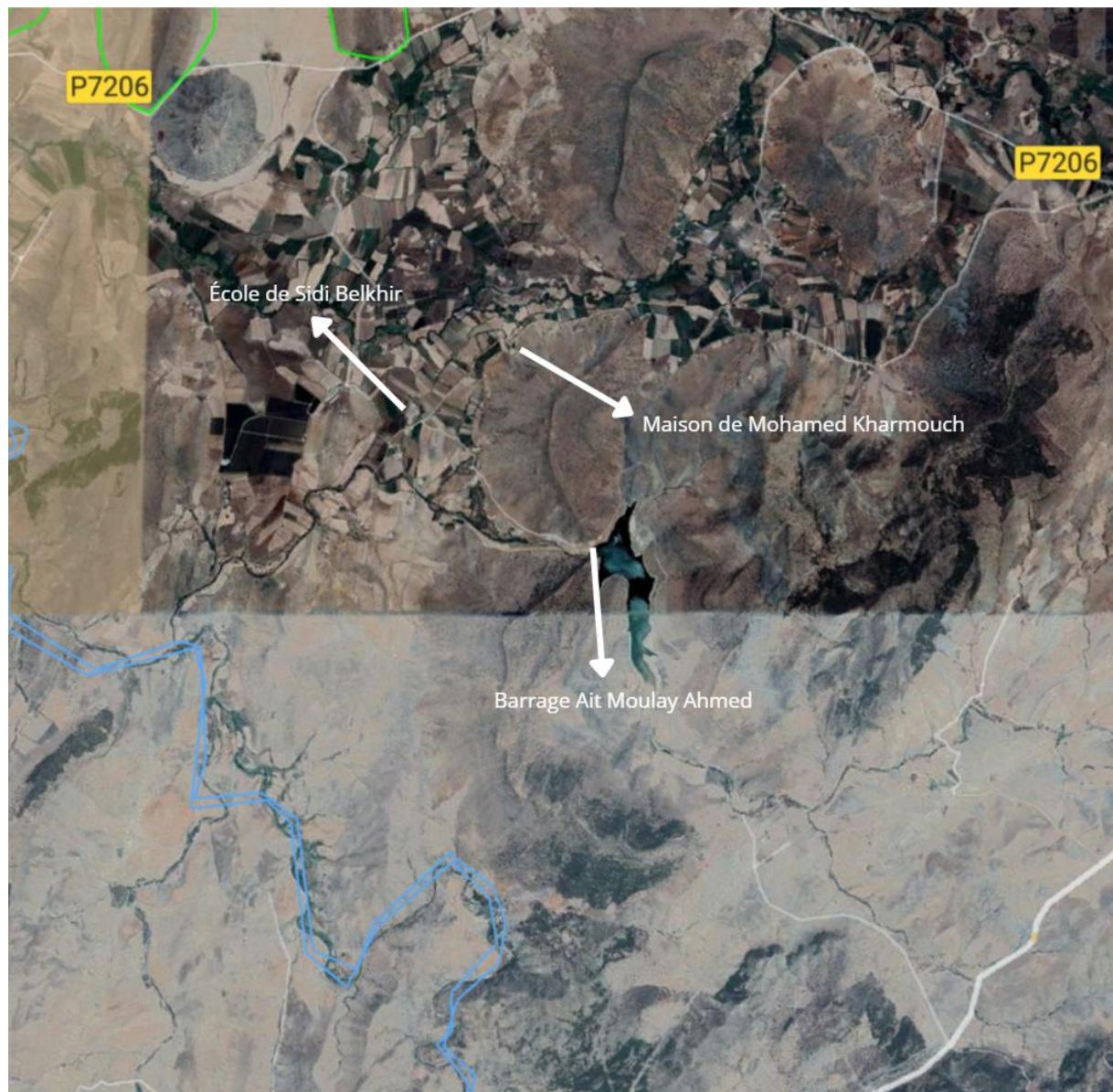
Figure 8 : Les habitations voisines et les séguias

La photo a également été prise depuis la terrasse d'Aziz. Les habitations sont celles situées à côté de chez lui au bord de la route principale de la zone. Il y a la présence d'un système de séguias avec la source qui se situe en amont.

2.1.2.2 Seconde zone d'étude

Zone d'étude	Latitude Nord	Latitude Sud	Longitude Ouest	Longitude Est
Zone 2	33.4200°	33.3300°	5.5400°	5.4500°

Tableau 2 : Coordonnées géographiques de la seconde zone d'étude



P7206 Route principale vers Azrou

— Oued

Figure 9 : Image Landsat / Copernicus ; © 2025 CNES / Airbus, image du 10/7/2020 extraite via Google Earth Pro de la seconde zone d'étude



Figure 10 : Image Landsat / Copernicus ; © 2025 CNES / Airbus ; © 2025 Maxar Technologies ; image du 11/3/2024 extraite via Google Earth Pro de la seconde zone d'étude

La zone de Sidi Belkhir se situe à l'ouest de la région de Fès-Meknès et de la province d'Ifrane, en dehors du parc national d'Ifrane, dans un secteur facilement accessible et peu enclavé notamment grâce à la construction récente de 17km de routes. Le territoire bénéficie d'un climat subhumide à tempéré avec une altitude d'environ 900m. Cette altitude plus faible entraîne des températures plus élevées, provoquant l'abandon de certaines espèces fruitières sensibles au stress thermique.

Le paysage se compose d'une plaine bordée de montagnes, dotée de plusieurs ressources hydriques : les lacs d'Amghass (alimentés par des sources naturelles), le barrage Ait Moulay Ahmed construit en 2014, doté d'une capacité de 2,5 millions de

m³, sa hauteur est de 28 mètres et sa superficie est de 115 km². La zone comprend aussi des forages souterrains et un réseau de séguias gravitaires qui sont des canaux d'irrigation traditionnels, visibles sur la figure 8. L'irrigation repose principalement sur les eaux de surface, sans restriction grâce à une disponibilité en eau jugée suffisante.

L'occupation du sol est diversifiée : cultures céréalières (blé, orge), fourragères (luzerne), légumineuses (fèves, petits pois), cultures maraîchères (ail, oignon) et oléiculture récente.

Le territoire est bien desservi en infrastructures (routes, transport scolaire) grâce à des investissements publics récents, ce qui contribue à limiter l'exode rural. Il existe également une forte dynamique locale d'entraide avec des coopératives mixtes et féminines.

Enfin, le territoire bénéficie d'un potentiel touristique important autour de ses lacs, de son barrage et de son patrimoine naturel, bien qu'il reste encore sous-exploité. Cette zone illustre les opportunités de valorisation d'un agroécosystème moins enclavé.



Figure 11 : Vue depuis la terrasse de Mohamed

La photo a été prise depuis l'habitation de Mohamed, l'agriculteur de la seconde zone d'étude. Il y a une plaine avec un paysage verdoyant dans laquelle est visible des parcelles agricoles et d'autres sortes de couvert végétal.



Figure 12 : Parcelle de Mohamed cultivée de pois

2.1.3 Carte topographique

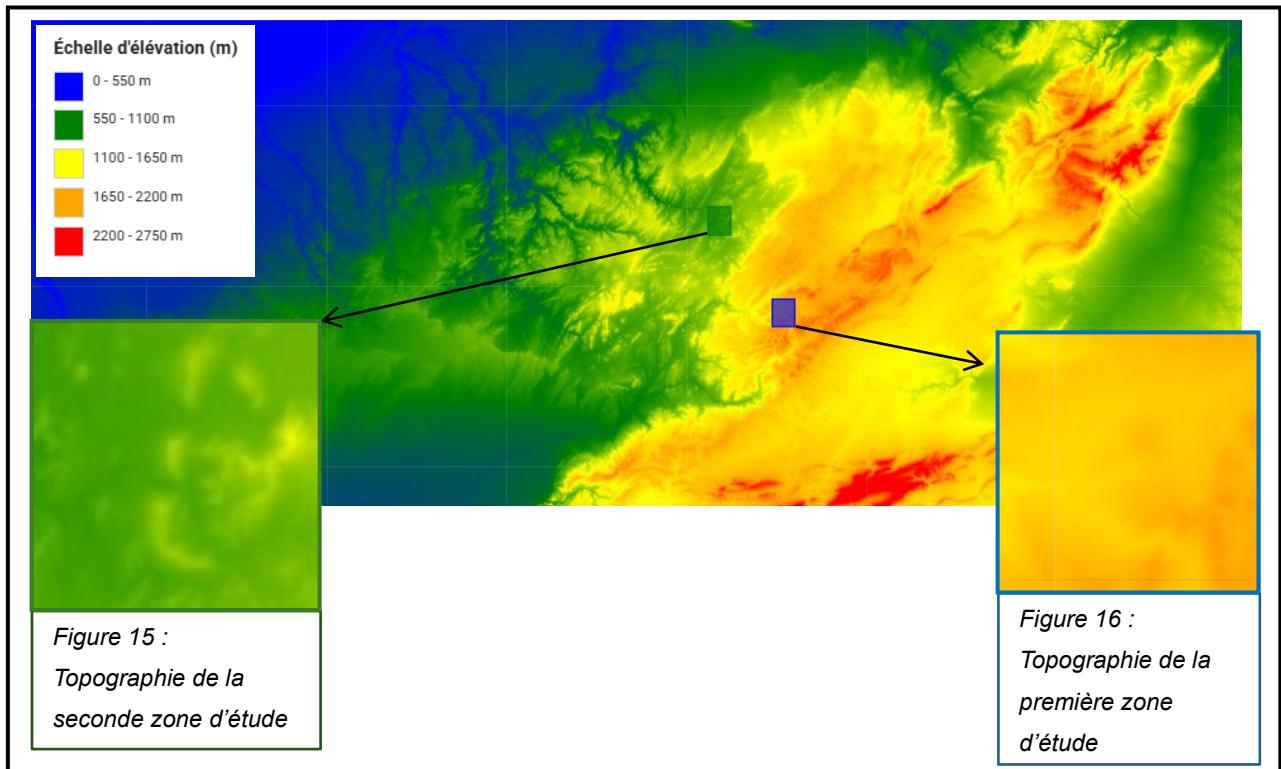


Figure 13 : Carte topographique générée à partir d'une couche Raster SRTM "USGS/SRTMGL1_003" travaillée dans le logiciel GEE

La carte topographique ci-dessus permet de se rendre compte du contraste de relief entre les deux zones. La première zone d'étude se situe aux alentours de 1800m d'altitude, tandis que la seconde zone se trouve aux alentours de 900m d'altitude.

2.2 La télédétection et Google Earth Engine

L'observation de la Terre permet de collecter des données de façon régulière sur de grandes surfaces, ce qui en fait un outil essentiel dans le suivi du changement climatique (Gorelick et al., 2017). La télédétection consiste à observer à distance les différentes caractéristiques de la surface terrestre à partir de capteurs qui enregistrent la lumière caractérisée par le rayonnement électromagnétique. Elle permet la récolte d'images dans le temps et selon différentes longueurs d'ondes (Navalgund, R. R. et al., 2007). Elle offre ainsi la possibilité d'analyser la capacité de la végétation à se remettre de sécheresses particulières, en mesurant notamment la rapidité et la durée du processus de récupération. Cette approche permet de mettre en lien la dynamique de la sécheresse avec la réponse de la végétation (Zhumanova et al., 2018, cité par Ma et al., 2023). L'avantage de la télédétection est qu'elle permet de suivre une évolution couvrant une échelle spatio-temporelle très large. Cependant, la superficie des zones d'étude (10km × 10km) rend les données parfois moins précises et plus difficiles à obtenir ou à interpréter, notamment en raison de la résolution de certains capteurs et de la variabilité locale.

Google Earth Engine (GEE), lancé par Google en 2010, est une plateforme en ligne dotée d'une puissance de calcul élevée via un cloud et qui permet de générer et traiter très rapidement une grande quantité de données géospatiales. Il est possible d'accéder à la plateforme via un éditeur de code : (<https://code.earthengine.google.com/>, consulté le 23 juin 2025). L'avantage est que la plateforme permet d'utiliser des produits directement prêts à l'usage tel que le NDVI par exemple (Kumar and Mutanga, 2018 cité Pham-Duc et al., 2023) et son libre accès est essentiel pour les utilisateurs dans les pays en voie de développement (Zhao et al., 2021 cité par Pham-Duc et al., 2023).

GEE donne accès à une grande diversité de données dont notamment des images de capteurs satellitaires et aériens (Landsat, MODIS, Sentinel...) ainsi que des données climatiques et météorologiques, des informations sur l'occupation du sol, de la topographie...(Gorelick et al., 2017). GEE propose différents outils de travail tels qu'un éditeur de code en JavaScript, un simple éditeur Explorer ou encore des possibilités de travail avec Python et R (Zhao et al. 2021, cité par Pham-Duc et al., 2023). Ces

différentes options sont représentées sur une interface intuitive et flexible en raison des nombreuses manières de codage et du large choix de données.

GEE s'est avéré au fil du temps être un outil indispensable et puissant dans le secteur de la télédétection. Ses différentes applications telles que le suivi de la végétation (Tsai et al., 2018, cité par Velastegui-Montoya et al., 2023), la gestion des risques et des catastrophes (Liu & et., 2018, cité Velastegui-Montoya et al., 2023), l'analyse des eaux de surface (Souza et al., 2018, cité par Velastegui-Montoya et al., 2023) ne sont que quelques exemples parmi d'autres qui ont permis d'approfondir et d'enrichir les recherches scientifiques (Muntaga & Kumar, 2019, cité par Velastegui-Montoya et al., 2023). La plateforme permet également l'importation des données personnelles ainsi que l'exportation des informations et des résultats afin de les traiter et de les visualiser dans des systèmes d'informations géographiques tels que QGIS (Li et al. 2019, cité par Velastegui-Montoya et al., 2023).

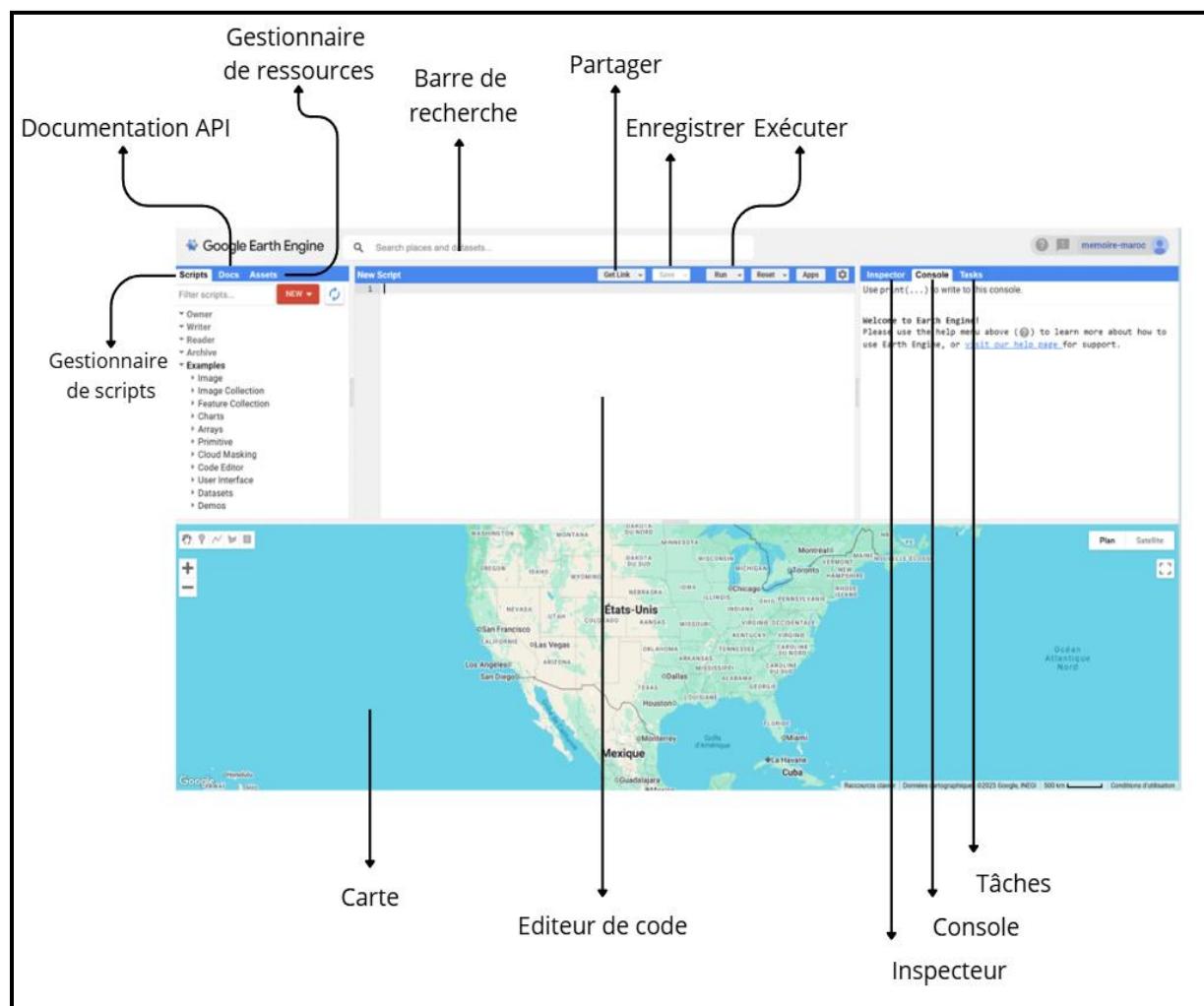


Figure 14 : Représentation de l'interface de Google Earth Engine

L'interface de GEE, présentée à la figure 14, est composée de différentes fonctions qui permettent à l'utilisateur d'en exploiter tout le potentiel. La partie centrale est l'éditeur de code. Il s'agit d'un outil orienté sur « la demande » où les utilisateurs choisissent les algorithmes à exécuter sur la base d'un code rédigé dans cette partie de l'interface (Gorelick et al., 2017). Les touches situées au-dessus permettent d'enregistrer le code ou d'obtenir un lien afin de le partager. La touche « Run » permet de lancer celui-ci.

Sur l'interface en haut à gauche, le gestionnaire des scripts va permettre de sauvegarder les différents scripts liés au compte Google. La documentation de l'API donne accès aux différentes fonctions disponibles sur GEE. Le gestionnaire des ressources permet de sauvegarder les différentes ressources géospatiales telles que les polygones, les tables de données...

Dans le coin supérieur droit, on trouve l'inspecteur, la console et les tâches. L'inspecteur permet de collecter directement sur la carte des informations telles que la valeur des pixels. Pour visualiser les résultats du code, il suffit de consulter la console. Les tâches correspondent aux fichiers exportables qui peuvent ensuite être transférés sur Google Drive avant d'être traités dans des logiciels comme QGIS.

Le dernier élément principal est la carte où les différents résultats et couches peuvent être visualisés directement.

Dans le cadre de cette étude, l'utilisation de ces outils a été complétée par des témoignages collectés sur le terrain auprès de certains agriculteurs locaux.

2.3 Résistance et résilience

Lors de l'observation de la résistance et de la résilience d'un écosystème terrestre à un choc climatique, le NDVI (développé ci-après) de la végétation lors de la période de croissance reste un indicateur essentiel pour évaluer les réponses à ces changements (Hossain & Li, 2021). Ces deux mots, résistance et résilience, sont des éléments essentiels à la stabilité des écosystèmes (Greve et al., 2014, cité par Ma et al., 2023 ; Liu et al., 2020, cité par Ma et al., 2023 ; Sinha et al., 2017, cité par Ma et al., 2023).

La résistance désigne la capacité d'un écosystème à continuer de fonctionner, comme maintenir la croissance de la végétation ou sa productivité, malgré une période de sécheresse (Isbell et al., 2015, cité par Yao et al., 2024 ; D. Liu et al., 2022, cité par Yao et al., 2024). La résilience, elle, correspond à la capacité de l'écosystème à retrouver un état normal après avoir été affecté par une sécheresse (Bottero et al., 2021, cité par Yao et al., 2024 ; Ingrisch et Bahn, 2018, cité par Yao et al., 2024).

La compréhension de ces deux termes et leurs interactions avec les perturbations liées aux phénomènes de sécheresse permettent de travailler dans le futur sur des plans de gestion de ces écosystèmes (Ma et al., 2023).

Monitoring Terrestrial Ecosystem Resilience Using Earth Observation Data: Identifying Consensus and Limitations Across Metrics

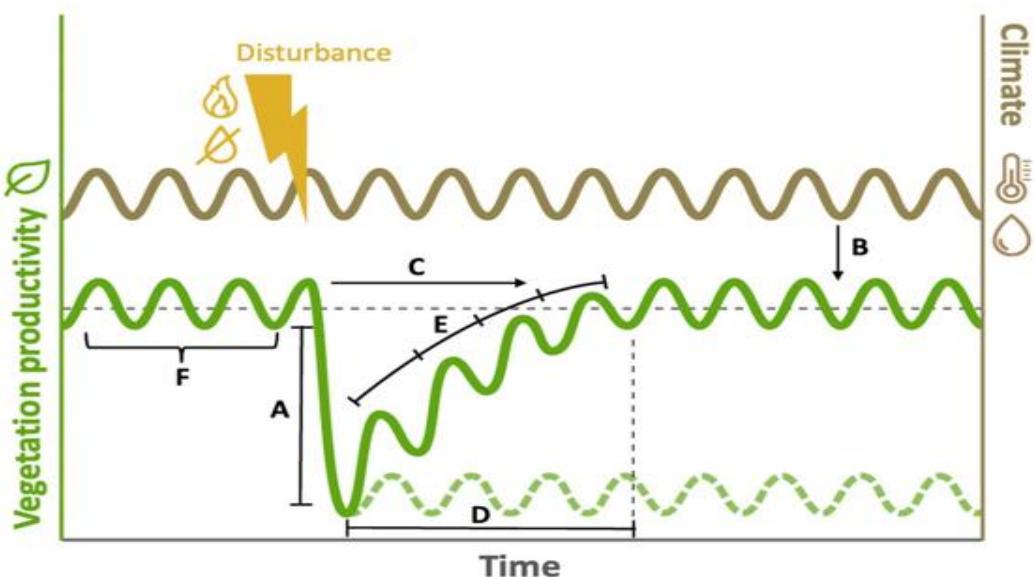


Figure 15 : Schéma illustrant les composantes de la résilience de la productivité végétale face à une perturbation climatique, (Runge et al., 2025)

Ce schéma de Runge et al., (2025) représente la manière dont est conceptualisée la résilience d'un écosystème grâce aux données d'observation terrestre. Dans ce schéma, la courbe verte représente le fonctionnement d'un système au cours du temps avec une certaine variabilité climatique représentée par la courbe brune qui l'influence. L'éclair jaune représente un phénomène climatique extrême, tel qu'une sécheresse, qui viendrait perturber l'équilibre du système. La réponse du système à cette perturbation est analysée au travers de plusieurs dimensions. La résistance correspond à l'ampleur directe de l'impact subi (A) ainsi qu'à la sensibilité du système aux fluctuations climatiques existantes (B). Ensuite, la récupération peut être mesurée selon différents paramètres tels que le temps nécessaire pour un retour à la normale (C) et le taux de récupération (D) caractérisé par le temps que le système va mettre pour revenir à un état stable. A cela s'ajoutent des indicateurs statistiques tels que la variance ou l'autocorrélation temporelle (E). La forme et l'asymétrie des courbes peuvent montrer que le système réagit de plus en plus lentement, ce qui indique qu'il s'approche d'un point critique (F). La manière dont celui-ci va réagir grâce à des indicateurs de résistance et de récupération va permettre d'évaluer sa résilience face aux perturbations climatiques. Le système pourra soit récupérer son état de stabilité initial soit basculer vers un tout nouvel état (Runge et al., 2025).

Ce modèle théorique représentant la réponse d'un écosystème à un choc climatique reste cependant une simplification. Il n'est pas rigide et il est important d'adapter son application à un contexte local.

En réalité, ce schéma n'est pas toujours facilement applicable. Dans les faits, chaque étape nécessite la prise en compte de plusieurs facteurs et une des principales difficultés réside dans la détermination de l'état initial de stabilité pour pouvoir par la suite mesurer les indicateurs d'ampleur du choc et de récupération. Les écosystèmes ne répondent également pas tous de manière linéaire aux perturbations. Plusieurs facteurs nécessitent d'être pris en compte rendant difficile l'application de ce modèle.

Cependant, celui-ci permet de bien comprendre la manière dont sont représentées de manière simplifiée la résistance et la résilience d'un écosystème face à un choc climatique. Dans le cadre de cette étude, il est utile pour observer la trajectoire de la végétation dans deux territoires distincts de partir de l'analyse de séries temporelles d'indices environnementaux tels que le SPI et le NDVI sur la dernière décennie. Cet

examen permet d'identifier les années où la résistance et la résilience ont été altérées en raison d'une diminution des pluies.

Il reste tout de même difficile, dans le cadre de cette étude, de définir précisément un état de stabilité de référence. Cela s'explique notamment par le choix d'opter simplement pour l'analyse du NDVI et par le nombre limité d'années couvertes par les données issues de SENTINEL-2. De plus, la végétation ne réagit pas toujours de manière immédiate aux perturbations climatiques, ce qui rend parfois son interprétation plus difficile.

2.4 Choix des indicateurs

Il existe de nombreux indicateurs permettant de suivre l'état de la végétation au fil du temps. Il est très important de choisir les indicateurs les plus pertinents pour cette étude et d'exploiter au maximum les informations qu'ils apportent. Certains possèdent une forte corrélation entre eux, ce qui rend l'analyse de chacun peu pertinente.

La littérature repose sur plusieurs indicateurs de sécheresse. Pour cette étude, l'objectif était d'observer les périodes de sécheresses et de fortes pluies dans les deux zones d'étude (10km^2).

2.4.1 Indicateurs climatiques et hydrologiques

Le PDSI (Palmer Drought Severity Index) :

Le PDSI repose sur un modèle de bilan hydrique complet. Il combine de nombreux éléments tels que les précipitations, l'évapotranspiration, l'humidité du sol et les besoins en eau des cours d'eau et des réservoirs. L'indice est basé sur la différence entre l'eau disponible et l'eau nécessaire pour le maintien de conditions normales. Il est particulièrement utile pour le secteur agricole car il permet de refléter l'humidité du sol sur une longue durée. Celui-ci est moins adapté pour les sécheresses brèves car il réagit assez lentement aux événements récents et est principalement utilisé aux États-Unis (Newman & Oliver, 2005).

Il possède un grand nombre de composantes parfois complexes à obtenir et est moins adapté pour des petites zones.

Le SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) :

Le SPI intègre l'évapotranspiration potentielle aux précipitations avec la formule ($P - ETP$) avant d'être standardisé sur une période donnée. Cette évapotranspiration potentielle est calculée via une base de données (« SPElbase ») mais qui possède une taille de pixel de 0,5 degré. Cette résolution est très peu précise pour des petites zones d'étude (Vicente-Serrano et al., 2010).

Le SPI (Standardized Precipitation Index) :

Il s'agit d'un indicateur qui mesure les anomalies de précipitations par rapport aux normales historiques. Il a l'avantage de se baser uniquement sur les données de précipitations. Pour le calculer, on ajuste d'abord les précipitations observées à une loi de probabilité, puis on normalise ces valeurs pour obtenir un indice centré sur zéro. Un SPI négatif indique des conditions plus sèches que la normale, et un SPI positif des conditions plus humides. Par exemple, un SPI inférieur à -1,0 correspond à une situation de sécheresse modérée. Le SPI peut être calculé sur différentes périodes de 1,3,6,12 ou 24 mois (World Meteorological Organization (WMO) & Svoboda, Mark; Hayes, Michael; Wood, Deborah A., 2012). Ces différentes échelles temporelles permettent une surveillance accrue des différents types de sécheresses (météorologique, agricole et hydrologique) (Tirivarombo et Hughes, 2011, cité par Tirivarombo et al., 2018).

Dans le but d'identifier les sécheresses, on utilise l'échelle du SPI. Une sécheresse est qualifiée de modérée lorsque le SPI est entre -1 à -1,5, de sévère entre -1,5 et d'extrême lorsqu'il est inférieur à -2. Celle-ci prend fin dès que le SPI se rapproche de zéro ou devient positif (McKee et al., 1993, cité par Tirivarombo et al., 2018).

2.0+	extremely wet
1.5 to 1.99	very wet
1.0 to 1.49	moderately wet
-.99 to .99	near normal
-1.0 to -1.49	moderately dry
-1.5 to -1.99	severely dry
-2 and less	extremely dry

Tableau 3 : Valeur de SPI (World Meteorological Organization (WMO) & Svoboda, Mark; Hayes, Michael; Wood, Deborah A., 2012)

Les deux premiers indicateurs sont fréquemment employés mais sont plus difficiles à exploiter à une échelle très locale à cause de la résolution spatiale et des multiples valeurs d'entrée. Le SPI repose sur des données de précipitations qui peuvent être plus facilement accessibles, applicables et représentatives.

Dans le cadre de cette étude, l'indice SPI-3 a été spécifiquement choisi pour évaluer la sécheresse agricole saisonnière dans les zones concernées. Il est considéré comme l'un des indicateurs les plus appropriés pour le suivi des sécheresses à l'échelle saisonnière notamment dans les contextes agricoles et semi-arides. Contrairement aux SPI-1 et SPI-2 qui capturent des anomalies des précipitations sur de courtes périodes, le SPI-3 permet d'observer d'une façon plus robuste les déficits hydriques susceptibles de venir perturber les cycles végétatifs (Bijaber & Rochdi, 2017).

Plusieurs études ont montré que le SPI-3 est l'un des meilleurs indicateurs pour exprimer la sécheresse agricole. Des études menées par Bussay et al. (1998) et Szalai & Szinell, (2000) ont établi que le SPI-2 et SPI-3 présentaient les meilleures corrélations avec l'humidité du sol et permettaient de détecter efficacement les stress hydriques affectant la disponibilité en eau des cultures. Ces résultats ont été renforcés par les travaux de Ji & Peters, (2003) et de Rossi & Niemeyer (2012) qui ont mis en évidence un lien fort entre la réponse de la végétation et les valeurs du SPI-3, confirmant la pertinence de cet indice pour surveiller les sécheresses agricoles.

Au-delà des études scientifiques, le Guide de la NOAA/NIDIS (National Integrated Drought Information System) et les recommandations de l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) soulignent également que le SPI-3 est tout particulièrement adapté pour capter les déficits hydriques saisonniers susceptibles d'impacter les cycles agricoles et les ressources en eau des sols sur le court et le moyen terme.

Dans le contexte marocain, la variabilité saisonnière des précipitations joue un rôle déterminant dans la dynamique de la végétation. Au Maroc, les sécheresses sont courantes et irrégulières et peuvent survenir de manière aléatoire au début, au milieu ou à la fin de la campagne agricole. Il a été observé que la sécheresse de fin de cycle est la plus habituelle et la plus difficile à atténuer sans l'aide de systèmes d'irrigation (Yacoubi et al., 1998 cité par Bijaber & Rochdi, 2017).

L'analyse qui suit montrera que la période la plus pluvieuse dans le Moyen Atlas s'étend d'octobre à juin. Cette période peut se diviser en trois périodes clés : octobre-décembre, janvier-mars et avril-juin. L'utilisation du SPI-3 s'avère par conséquent être un choix pertinent dans ce contexte. D'autre part, d'autres indices sont fréquemment utilisés sur GEE concernant la végétation.

2.4.2 Indicateurs climatiques et conditions de la végétation

Le VCI (Vegetation Condition Index) :

Il est calculé par la formule $VCI = 100 \times (NDVI_i - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})$

Il mesure l'état de santé de la végétation en comparant pour chaque pixel, le NDVI actuel à ses valeurs maximales et minimales historiques. Cet indicateur permet de détecter les anomalies de la croissance de la végétation en pourcentage. Une valeur avec un VCI proche de 100% indique des conditions optimales par rapport à la normale tandis qu'un VCI proche de 0 reflète un stress hydrique sévère (Bijaber & Rochdi, 2017).

Le TCI (Temperature Condition Index) :

Il est défini par $TCI = 100 \times (LST_{max} - LST_i) / (LST_{max} - LST_{min})$ où LST est la température de surface terrestre. Dans cette formule, LST_i est la température de surface actuelle du pixel analysé tandis que LST_{min} et LST_{max} sont les valeurs minimales et maximales de température observées pour ce pixel sur l'ensemble de la période d'analyse (Sandeep et al., 2021).

Il évalue le stress thermique subi par la végétation en comparant la température actuelle de brillance aux températures extrêmes enregistrées. Cet indice permet de distinguer les effets des fortes chaleurs ou de l'humidité excessive. Un TCI proche de zéro traduit des températures trop élevées, défavorables au développement végétal (Bijaber & Rochdi, 2017).

Le VHI (Vegetation Health Index) :

Il est obtenu par $VHI = 0,5 \times VCI + 0,5 \times TCI$

Il combine les deux indicateurs précédents soit le VCI et TCI pour évaluer l'impact global du stress thermique et hydrique sur la végétation. Il donne une vision plus complète des conditions de sécheresse ou d'humidité (Bijaber & Rochdi, 2017).

Le NDVI (Indice de Différence de Végétation Normalisée) :

Le NDVI est un indicateur qui permet de mesurer l'activité de la végétation à partir d'images satellites. Il se base sur la différence entre la réflectance mesurée pour la lumière rouge (absorbée par la chlorophylle) et la réflectance dans le proche infrarouge qui est fortement réfléchi par les feuilles. Celui-ci est obtenu par $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$. Les valeurs de NDVI varient de -1 à +1. Les valeurs négatives ou proches de 0 traduisent une absence de végétation tandis que les valeurs plus élevées indiquent une végétation en bonne santé. (Myneni, R.B. et al., 1995, cité par Pettorelli et al., 2005).

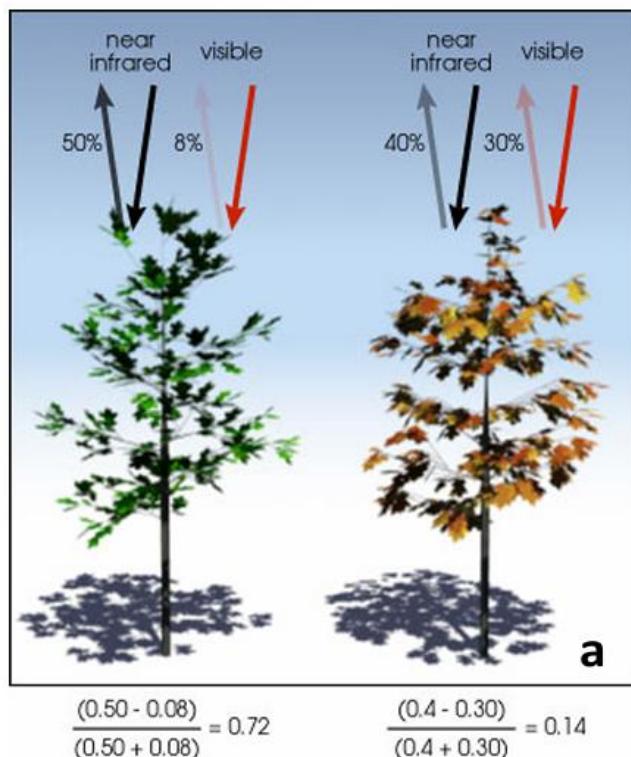


Figure 16 : L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) reflète l'activité photosynthétique, disponible sur : <http://www.geoscience-environment.com/>

Dans le cadre de cette étude, l'indice NDVI a été choisi pour analyser la dynamique de la végétation afin d'observer son interaction avec les SPI saisonniers. L'objectif de l'étude est d'observer la réponse des différentes classes d'occupation du sol face aux déficits hydriques et le NDVI seul s'avère être très adapté. En se concentrant seulement sur le NDVI, il est possible d'effectuer une analyse complète exclusivement avec des produits de SENTINEL-2. Le VCI nécessite de calculer des valeurs minimales et maximales historiques sur de longues périodes et est moins adapté pour l'analyse des différents couverts végétaux. Le NDVI permet une mesure simple, directe et fiable de la vigueur végétative.

Dans le contexte des zones d'étude du Moyen Atlas, la principale préoccupation des agriculteurs rencontrés sur le terrain concerne la disponibilité en eau directement liée aux irrégularités et à la variabilité dans les cycles de précipitations. La présente étude a pour but de se concentrer sur les précipitations grâce aux SPI saisonniers et sur la résistance et la résilience de la végétation sans prendre en compte l'intégration des températures bien que pertinente dans certaines études.

2.5 Analyses

Les différentes analyses dans le cadre de cette étude ont pour but d'évaluer la résistance et la résilience de la végétation dans deux zones face aux variations dans les cycles de précipitations. Pour ce faire, les différentes analyses seront réalisées à partir de données satellitaires obtenues sur Google Earth Engine.

Précédemment, l'objectif initial était de choisir les indicateurs qui serviront à l'étude en les comparant avec ceux disponibles afin de choisir les plus pertinents.

La première étape de l'analyse consiste à caractériser les tendances climatiques à long terme dans les deux zones d'étude. Les données CHIRPS (précipitations) et ERA-5 Land (températures) seront exploitées pour construire des séries temporelles. Cette étape vise à identifier les tendances générales (hausse ou baisse des précipitations et des températures) en lien avec les différentes études réalisées tels que celles de Idrissi & Cherai (2017) et Lebaut et al. (2022) et selon les différents témoignages des agriculteurs sur place qui alertent sur ces aléas climatiques. L'objectif est d'observer ces tendances via des statistiques simples tels que les moyennes annuelles et les anomalies en générant des graphiques grâce à la plateforme GEE. Les résultats permettront par la suite de choisir des périodes d'analyses grâce aux différentes tendances pluviométriques.

Ensuite, l'analyse portera sur les périodes végétatives dans ces deux zones du Moyen Atlas marocain. Les séries de NDVI MODIS vont permettre d'observer les périodes de croissance de la végétation.

Ces analyses de tendances permettront d'effectuer un découpage périodique comme base de l'analyse de la résistance et de la résilience de la végétation.

Sur cette base, des séries temporelles de NDVI seront extraites pour les différentes classes d'occupation du sol de type végétal. Pour chacune de celles-ci, le NDVI moyen des périodes définies sera calculé à l'aide de GEE et qui sera utilisé pour le calcul de la résistance et de la résilience. Cette analyse est décrite ci-après.

En parallèle, les indices SPI des périodes choisies seront calculés afin de caractériser les saisons plus sèches et celles plus humides que la normale dans le but de les croiser avec les données de NDVI et de Land cover.

Concernant l'analyse sur la résilience et la résistance, la première étape de la démarche consiste à identifier, pour chaque période, celles considérées comme « sèches » définies par un SPI négatif et les périodes normales/humides avec un SPI positif. Pour chaque classe d'occupation du sol et chaque période, Le NDVI moyen des périodes hors sécheresses qui fait référence à la moyenne des NDVI des périodes où le SPI est supérieur ou égal à zéro et qui correspond à une période considérée comme « normale » a été calculé.

À partir de ces différentes valeurs ont été calculés les deux indicateurs essentiels à l'aide de ces formules :

$$\text{Résistance} = \text{NDVI sécheresse} / \text{NDVI normal}$$

$$\text{Résilience} = \text{NDVI post} / \text{NDVI normal}$$

Le NDVI normal correspond à la moyenne des NDVI de la période hors sécheresse, le NDVI sécheresse correspond au NDVI pendant la sécheresse et le NDVI post correspond au NDVI après la période de sécheresse.

La résistance permet de voir dans quelle mesure la végétation est capable de maintenir son NDVI face aux sécheresses tandis que la résilience permet de vérifier si la végétation durant les périodes suivantes arrive à récupérer son niveau moyen de productivité d'avant la sécheresse. Des valeurs proches ou supérieures à 1 font référence à une bonne résilience/résistance tandis que des valeurs inférieures à 1 révèlent une résistance/résilience plus faible.

Ces différentes valeurs obtenues à partir des différentes classes d'occupation du sol seront ensuite traitées dans RStudio. L'objectif de cette étape est de produire pour chaque période et type de couverture végétale, des diagrammes en boîte et des courbes de tendances permettant de visualiser les données pour comprendre la variabilité et leurs dynamiques au cours de la dernière décennie. Ces différentes représentations, disponibles aux annexes 3 et 4, seront commentées en conclusion de chaque zone dans la section 3.3.

Enfin, une dernière analyse portera sur une relation statistique entre les périodes de SPI et celles de NDVI. L'objectif sera de vérifier dans quelle mesure la végétation réagit le plus aux variations dans les précipitations définies par le SPI.

2.6 Sources de données pour l'analyse de la résistance et de la résilience

Les différentes sources de données utilisées dans l'analyse de la résistance et de la résilience de la végétation sont détaillées ci-dessous. Les sources de données concernant l'observation et la conception des tendances sont détaillées lors de l'analyse de celles-ci aux sections 3.1 et 3.2

2.6.1 CHIRPS

Les données CHIRPS sont disponibles depuis 1981 jusqu'à nos jours. Le jeu de données est la combinaison entre des données satellitaires (infrarouge) et des stations météorologiques réparties sur une grande partie de la surface terrestre. Cette association permet la production d'estimations à très haute résolution (jusqu'à 0.05 degrés) et permet l'analyse et le suivi du climat et des sécheresses dans des zones plus enclavées et avec des topographies parfois complexes (Touma et al., 2023).

Ce jeu de données sera utilisé pour calculer l'indice SPI dans Google Earth Engine. Les différents SPI seront générés directement sur la plateforme. L'analyse commencera à partir de l'année 1981 car le calcul du SPI repose sur une période d'au moins 20-30 ans mais il est préférable d'opter pour des périodes allant de 50 à 60 ans afin de garantir une base climatique solide (World Meteorological Organization (WMO) & Svoboda, Mark; Hayes, Michael; Wood, Deborah A., 2012).

2.6.2 NDVI

Pour l'analyse du NDVI, la collection d'images de Sentinel-2 qui offre une résolution de 10 à 60m sera mobilisée pour l'analyse principale qui est propice à une analyse fine dans les deux zones. Les images sont disponibles depuis juillet 2015 et proposées par le programme Copernicus. Les deux satellites qui possèdent une fauchée de 290km et qui effectuent une revisite de l'équateur tous les 5 jours sont des outils essentiels pour le suivi des sols, de la végétation et des changements (Copernicus Programme, s. d.). Concernant la détection des périodes saisonnières, les images MODIS seront privilégiées.

Cette résolution va permettre d'effectuer un meilleur suivi de la fragmentation du territoire durant plusieurs années. L'analyse débutera à partir d'octobre 2015, début de la période végétative au Maroc en lien avec la disponibilité des données Sentinel-2. L'analyse portera sur une période d'environ 10 ans jusqu'à la période de fin de végétation entre avril et juin 2025. Ce choix de concentrer l'analyse sur une période récente rend les résultats plus pertinents pour les agriculteurs locaux dont les décisions sont très fortement influencées par les dynamiques climatiques et leur vision à court terme.

2.6.3 Land Cover

La couverte du sol provient du jeu de données « Dynamic Word V1 » qui classe l'occupation du sol à une résolution spatiale de 10m. Il est dérivé des Images Sentinel-2 L1C et est disponible depuis fin juin 2015. Il prédit 9 différentes classes d'occupation du sol allant de l'eau, à la végétation, aux zones bâties. Les images disponibles présentent une couverture nuageuse égale ou inférieure à 35% (Brown et al., 2022).

Le choix de cette collection d'images est pertinent car elle fournit des données à haute résolution spatiale pour observer clairement la fragmentation du paysage. Malgré la probabilité de l'association d'un pixel à une classe, la collection permet tout de même d'observer les tendances générales d'augmentation, de diminution et de changements dans la couverture du sol. La temporalité et la disponibilité des données permettent d'effectuer un croisement cohérent entre le SPI, le NDVI et le LC.

2.6.4 Organigramme des données

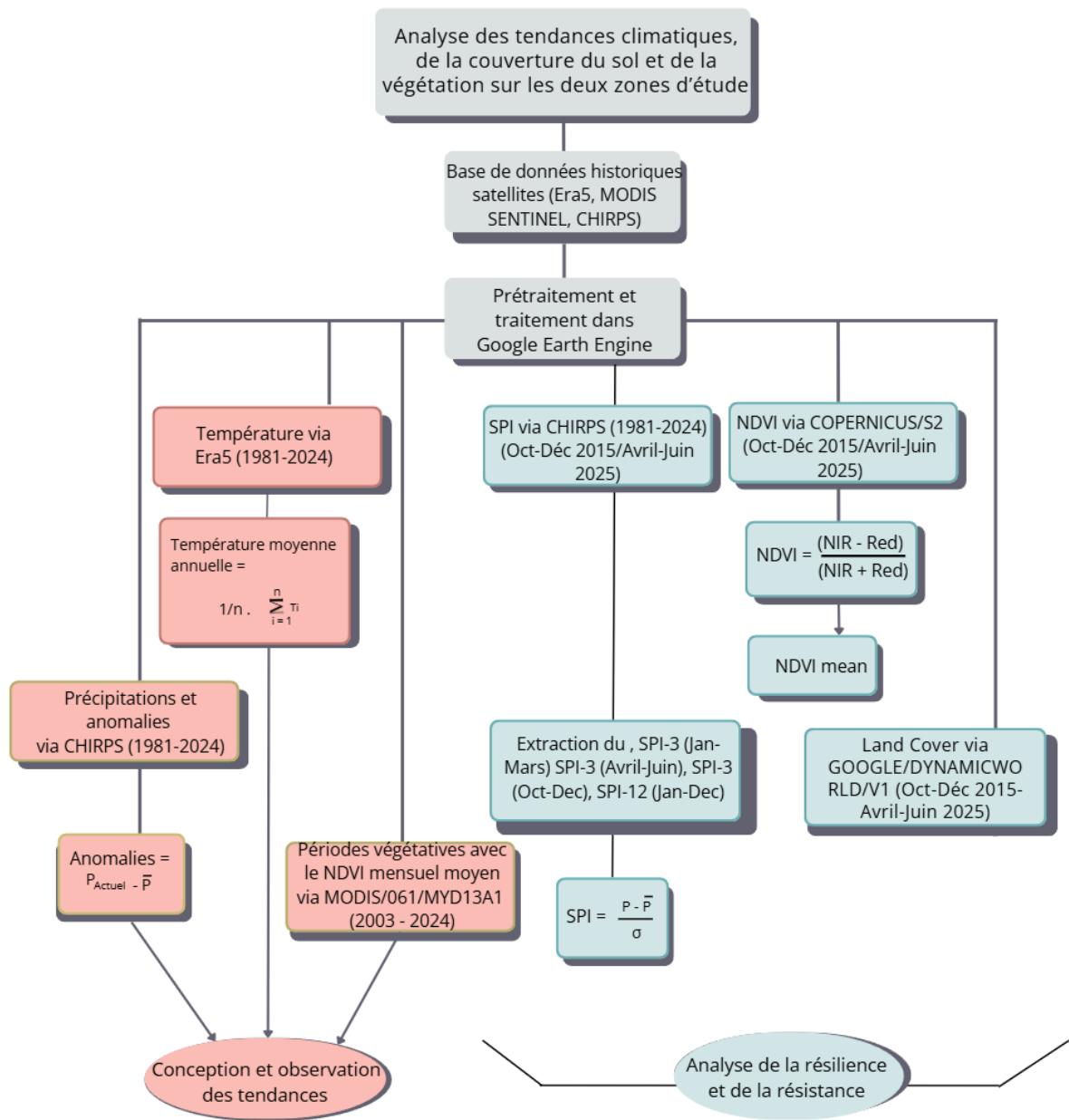


Figure 17 : Organigramme des données

3. RÉSULTATS

3.1 Tendances climatiques dans les zones d'étude

Cette première étape a simplement pour objectif d'analyser les tendances climatiques à l'aide de plusieurs paramètres tels que les précipitations, les températures et le NDVI moyen mensuel des deux zones d'étude. Ces indicateurs simples vont permettre de choisir une série temporelle sur laquelle travailler afin de comprendre les réactions de la végétation face à des années pluvieuses suivies de sécheresse prolongée.

3.1.1 Précipitations

L'analyse des précipitations depuis 1981, réalisée à l'aide de CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), permet d'approfondir la compréhension des phénomènes extrêmes liés aux précipitations, ainsi qu'à la sécheresse. En appliquant cette analyse aux deux zones étudiées, on observe des différences marquées dans les cycles de précipitations. Ces variations peuvent avoir un impact significatif sur les ressources en eau et sur la régénération des écosystèmes locaux.

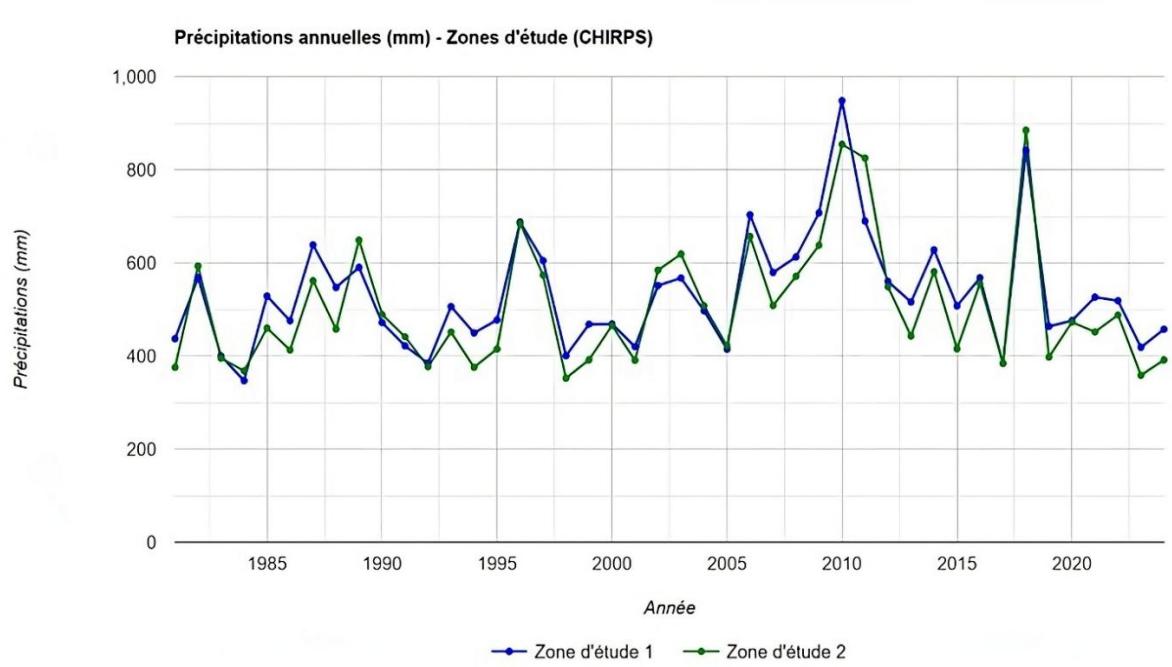


Figure 18 : Graphique des précipitations annuelles moyennes dans les deux zones d'étude

La figure 18 représente les courbes temporelles des précipitations annuelles dans les deux zones d'étude. Sur ce graphique, on observe des courbes assez similaires. En effet, la distance entre les deux zones est de 40,6 km à vol d'oiseau. Malgré cela, on observe légèrement plus de pluviosité dans la première zone. Ce qu'on remarque principalement, ce sont les fortes irrégularités dans les cycles de précipitations. Par exemple, l'année 2010 a été très pluvieuse avec un total de 948,1 mm. Depuis cette année-là, les précipitations sont à la baisse, bien qu'une exception soit observée en 2018 avec un total de 841,8 mm dans la zone d'étude 1. Aziz, l'agriculteur rencontré dans la première zone d'étude, vit à proximité de la cascade de Bakrit. Celui-ci a indiqué que celle-ci était à sec depuis cinq à six ans et qu'il y également une diminution marquée des crues des oueds (cours d'eau) confirmant bien la tendance observée. Mohamed, agriculteur dans la zone d'étude 2, observe également une irrégularité croissante des précipitations, caractérisée par de fortes pluies concentrées sur de courtes périodes, provoquant un ruissellement rapide et l'érosion des sols.



Figure 19 : Cascade de Bakrit à sec



Figure 20 : L'érosion des sols sur les parcelles agricoles

3.1.2 Températures

Les températures moyennes annuelles ont été calculées à partir des données de la base ERA5-Land fournie par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF). ERA5-Land à haute résolution spatiale (~9 km), est disponible quotidiennement à l'échelle globale. La variable utilisée est la température de l'air à 2 mètres du sol (temperature_2m) (Copernicus Climate Change Service, 2019).

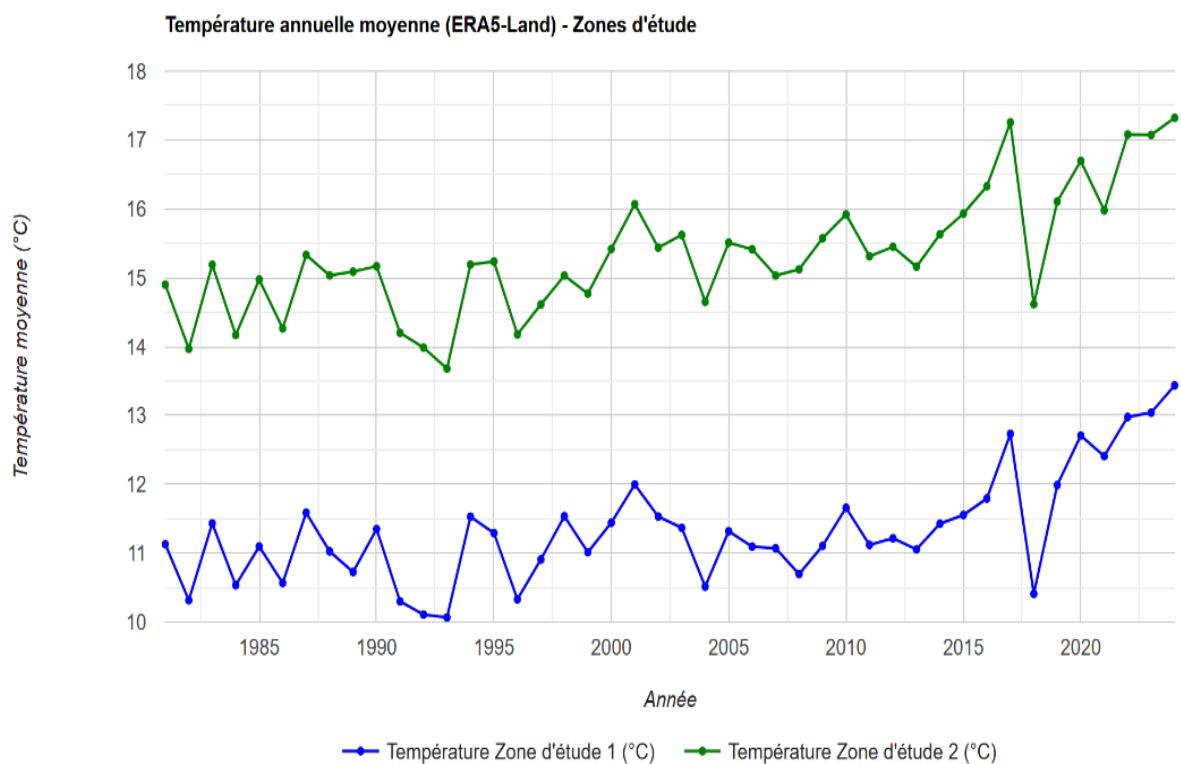


Figure 21 : Graphique des températures annuelles moyennes dans les deux zones d'étude entre 1981 et 2024

Ce graphique montre bien la différence des températures annuelles moyennes entre les deux zones d'étude. On observe également sur ce graphique une tendance à la hausse des températures moyennes, conséquence directe du changement climatique. D'après Mohamed, l'agriculteur enquêté dans la zone d'étude 2, la hausse des températures a entraîné l'abandon de certaines cultures fruitières adaptées à des conditions plus fraîches et entraîné l'apparition de certaines maladies phytopathogènes.

—●— Zone d'étude 1
—●— Zone d'étude 2

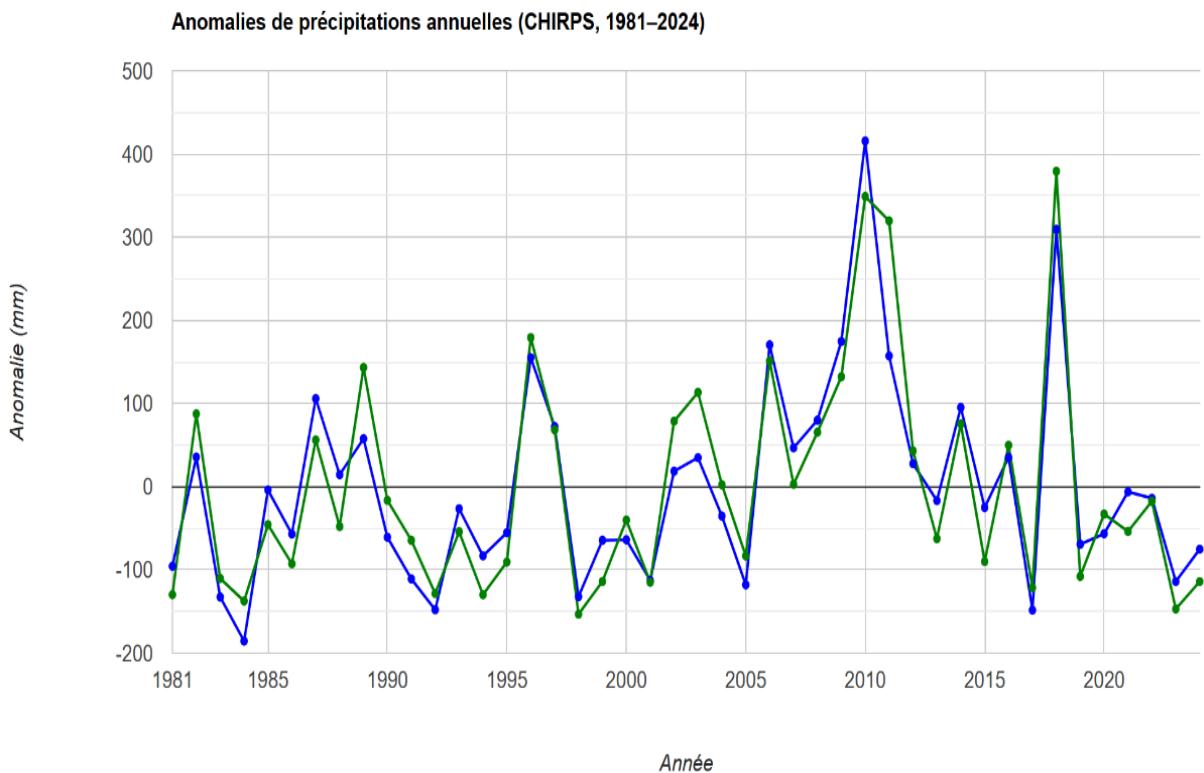


Figure 22 : Graphique des anomalies annuelles moyennes dans les deux zones d'étude entre 1981 et 2024

Le graphique ci-dessus montre la courbe des anomalies dans les précipitations de chaque année depuis 1981 basée sur la moyenne climatique locale. Le Maroc est un pays très intéressant dans l'étude des cycles de pluviométrie. On remarque que les précipitations ne suivent pas une courbe régulière. Il y a plusieurs années plus sèches que la moyenne suivies soudainement d'une année voire deux plus humides. Ces changements sont souvent brusques, avec de fortes différences entre les années.

3.2 Détection des périodes pluvieuses et végétatives dans les zones d'étude

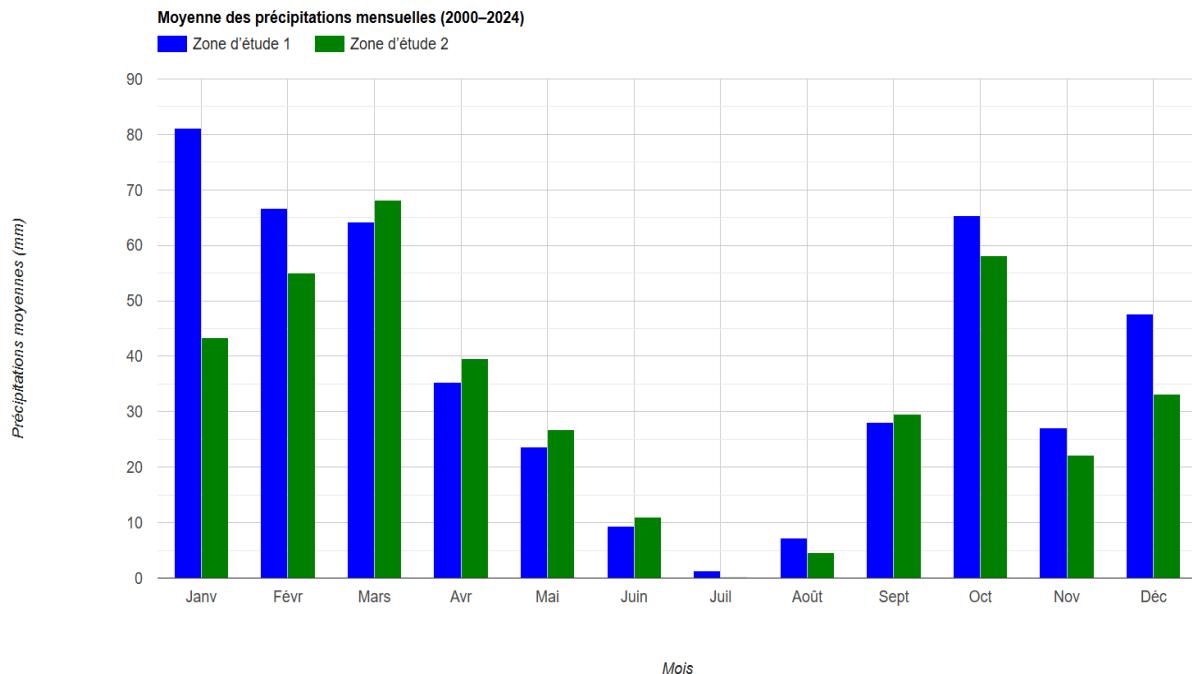


Figure 23 : Graphique des précipitations mensuelles moyennes des deux zones d'étude entre 2000 et 2024

Cette analyse, réalisée grâce à aux données CHIRPS, permet d'identifier les mois les plus pluvieux et de mieux comprendre la saisonnalité des précipitations. Pour chaque mois de l'année, les précipitations journalières ont été additionnées sur la période 2000-2024 puis une moyenne mensuelle sur les deux zones d'étude a été calculée. Ce graphique montre très clairement que la majorité des précipitations se concentrent entre le mois d'octobre et le mois de mai.

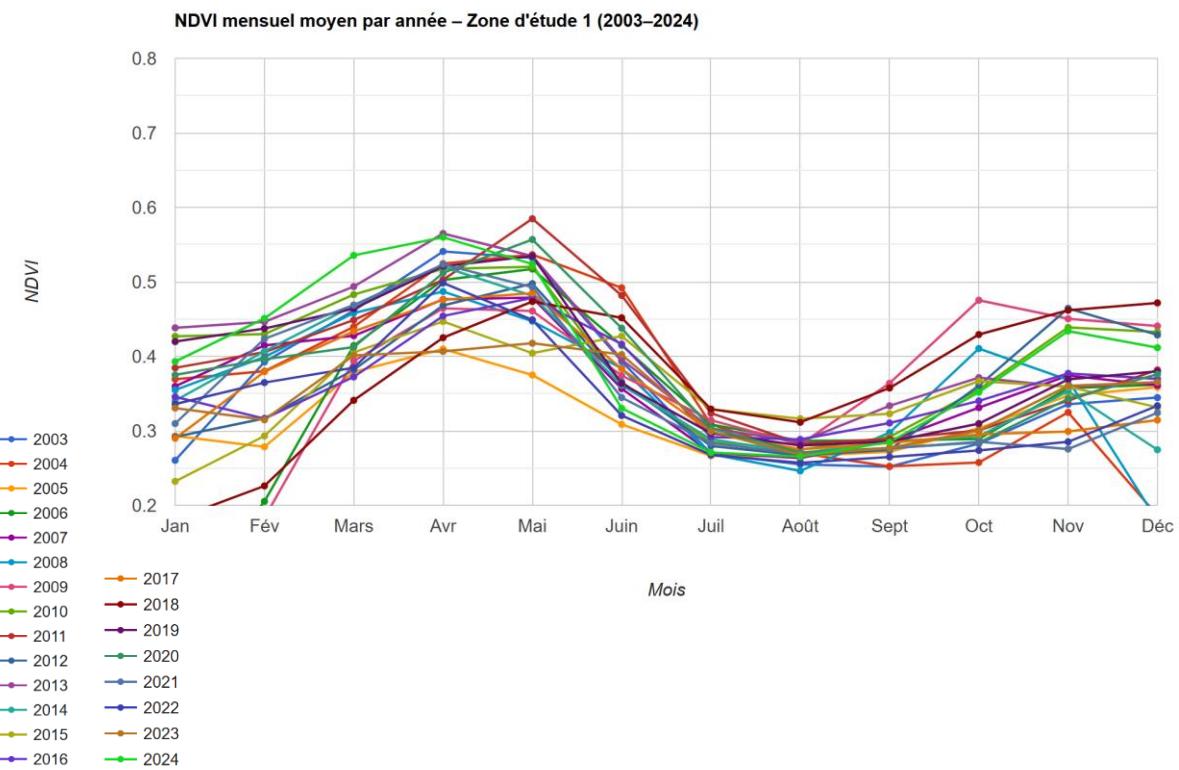


Figure 24 : Graphique du NDVI mensuel moyen dans la première zone d'étude entre 2003 et 2024

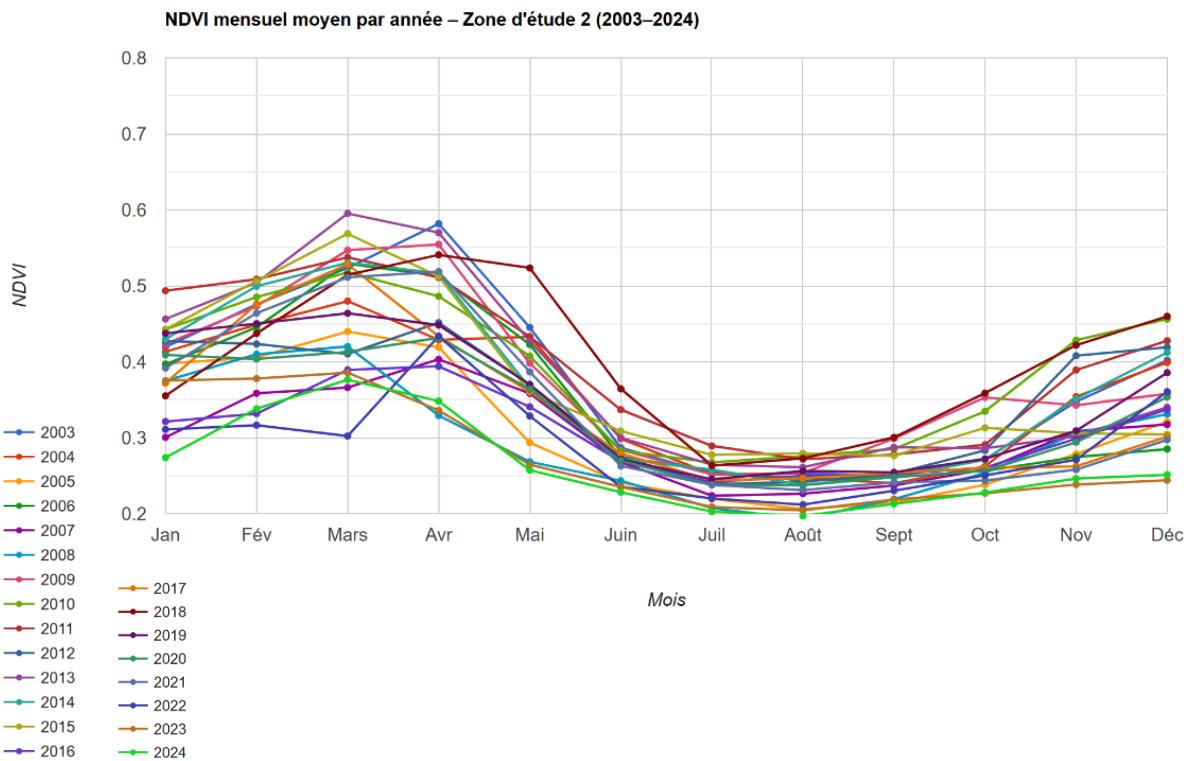


Figure 25 : Graphique du NDVI mensuel moyen dans la seconde zone d'étude entre 2003 et 2024

Afin d'identifier la période de croissance de la végétation dans les deux zones d'étude, le NDVI moyen de chaque mois de l'année entre 2003 et 2024 a été calculé à partir des données MODIS (produit MODIS/061/MYD13A1, 500m, tous les 16 jours). La courbe du NDVI mensuel moyen par année permet d'observer les dynamiques saisonnières de la végétation.

Sur les figures 24 et 25, on observe une hausse du NDVI en octobre avec une diminution à partir du mois de juin. Cependant, les deux zones d'étude présentent une différence au niveau des périodes de fin de végétation. On observe que dans la première zone d'étude, celle-ci commence à diminuer vers le mois de juin avec un pic de la végétation aux mois d'avril et mai tandis que dans la zone 2, la période de diminution se situe dès le mois de mai avec un pic lors de la période mars-avril.

Sur les deux graphiques, il y a une relation entre les pluies et la croissance de la végétation. Les pics de précipitations se situent entre novembre et janvier et le NDVI commence à augmenter fortement à partir de janvier-février. Les mois d'été montrent des conditions plus sèches avec une diminution des précipitations et du NDVI.

3.3 Analyse comparative du Land Cover, NDVI et SPI dans la première zone

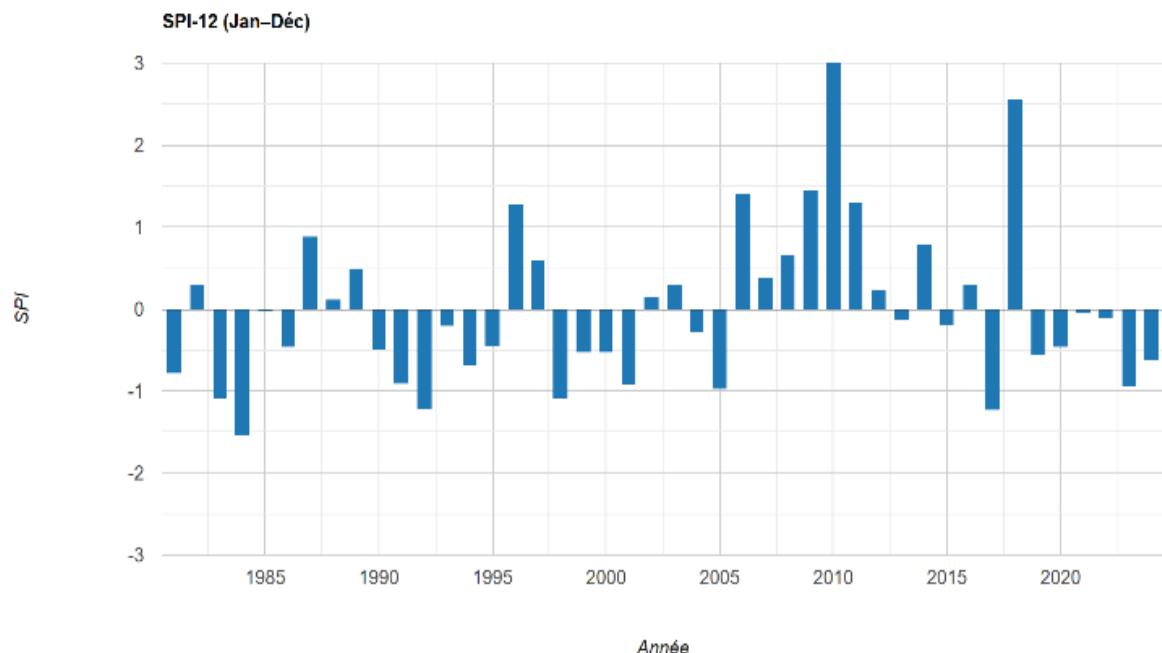


Figure 26 : Graphique du SPI-12 (janvier-décembre) dans la première zone d'étude

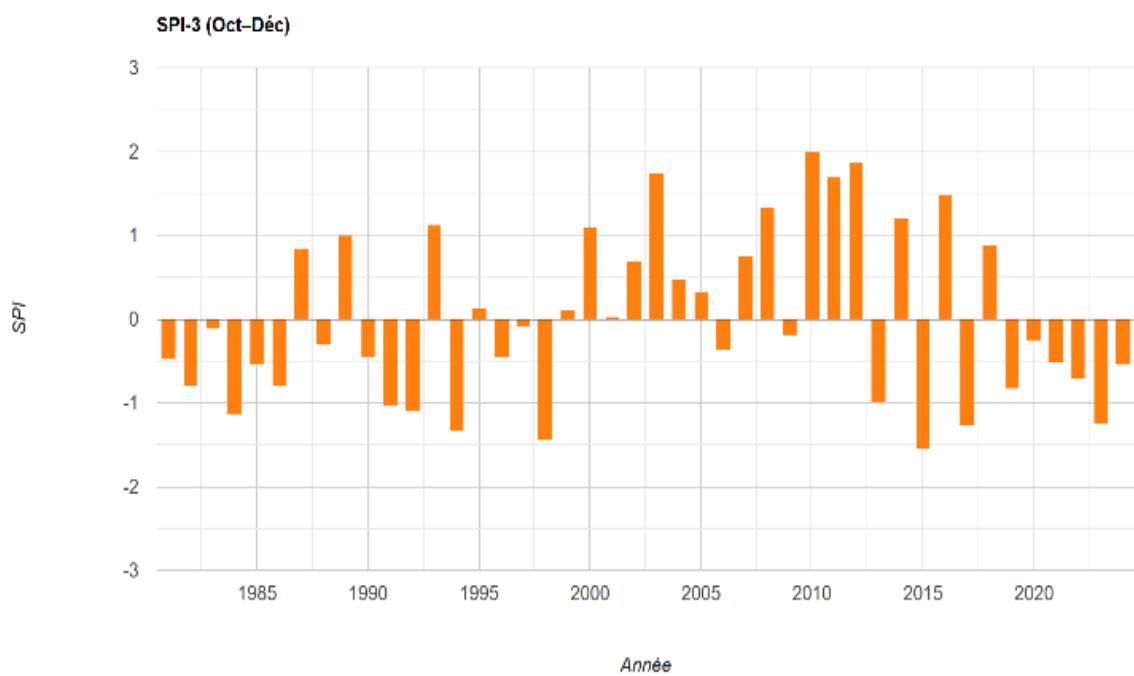


Figure 27 : Graphique du SPI-3 (octobre-décembre) dans la première zone d'étude

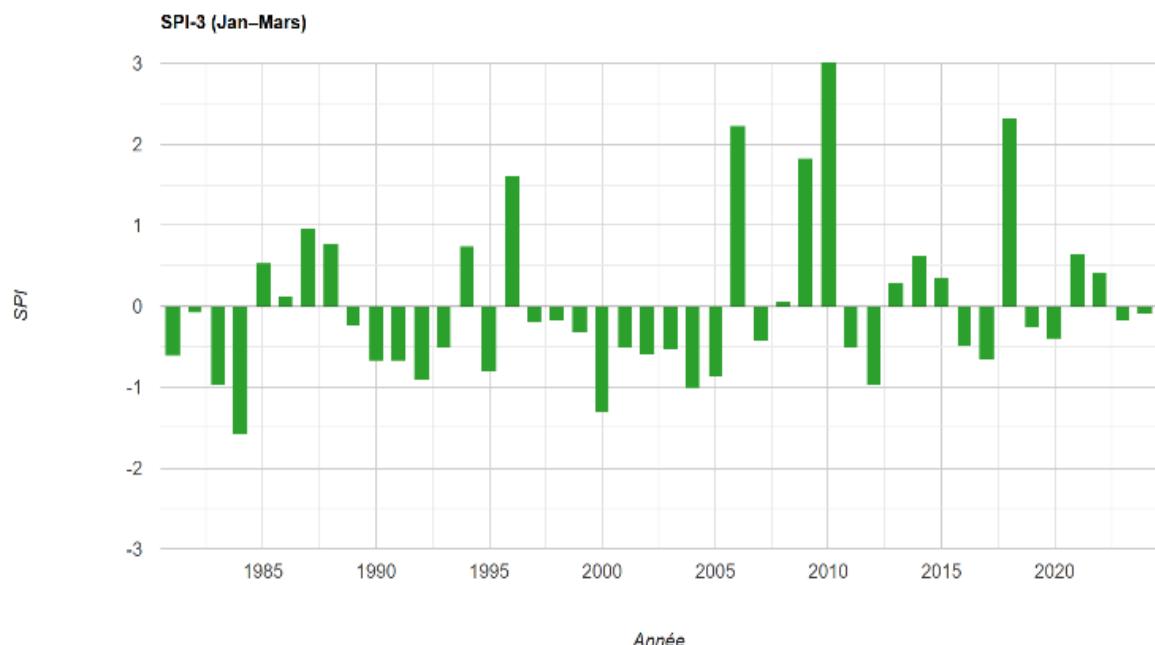


Figure 28 : Graphique du SPI-3 (janvier-mars) dans la première zone d'étude

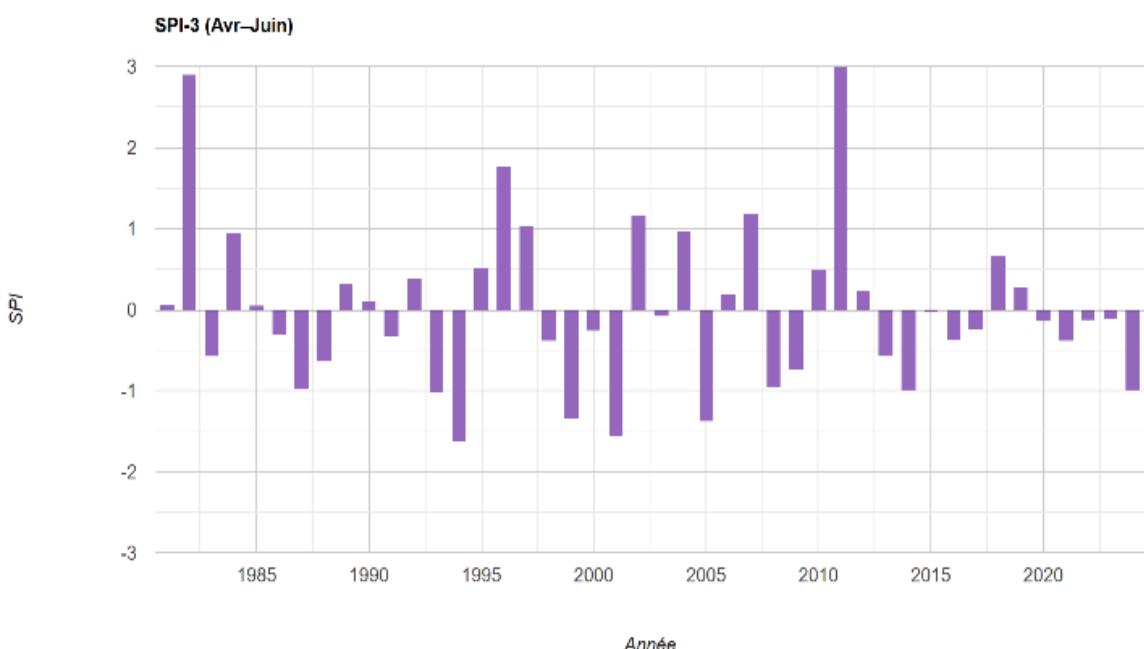


Figure 29 : Graphique du SPI-3 (avril-juin) dans la première zone d'étude

Le SPI va permettre d'identifier depuis 1981, les anomalies au niveau des cycles de précipitation à différentes échelles temporelles. Dans le contexte et selon le graphique des précipitations moyennes mensuelles, la saison des pluies s'étend d'octobre à mai

avec des pics entre octobre et mars. Ces pics vont pouvoir être analysés à l'aide du SPI-3 entre octobre et décembre, du SPI-3 entre janvier et mars et du SPI-3 entre avril et juin. Le choix des SPI dépend donc principalement des dynamiques saisonnières des pluies et de la croissance du NDVI qui s'étend sur cette même période d'octobre à juin. Ces choix sont faits en lien avec les témoignages des agriculteurs qui observent énormément d'irrégularités dans les cycles de pluviosité. Le SPI-12 va permettre de voir un aspect plus global sur le long terme et de mettre en évidence les années plus sèches et plus humides. Les SPI-3 qui sont centrés sur l'automne, l'hiver et le printemps permettent une analyse plus saisonnière. De manière générale sur les 4 graphiques précédents, les SPI traduisent bien la tendance à la baisse des précipitations depuis 2018.

Dans la première zone d'étude :

SPI-12 (janvier-décembre) : Entre 1981 et 2005, on observe très souvent plusieurs années sèches suivies de l'une ou l'autre année humide. Durant les années suivantes, c'est une succession d'années humides qui s'enchaînent jusqu'en 2016. Depuis 2016, hormis l'année 2018 qui a été beaucoup plus pluvieuse que la normale avec une valeur de SPI de 2.5, on observe une tendance à la baisse dans les précipitations.

SPI-3 (octobre-décembre) : Il s'agit de la période qui montre une tendance encore différente. Entre 1981 et 1998, la zone a connu principalement une succession d'années sèches. Entre 2000 et 2012, il y a eu beaucoup plus d'années humides et, depuis 2013, on observe principalement des années sèches surtout depuis 2018 qui montre une réelle diminution des précipitations dans la zone durant cette période qui est pourtant cruciale pour la croissance végétative de l'année suivante.

SPI-3 (janvier-mars) : Le SPI hivernal suit également la même tendance jusqu'en 2005. Depuis 2006, ce sont des cycles de 2-3 années sèches suivis de 2-3 années humides qui se succèdent. Depuis 2018, il ne s'agit pas de la période la plus touchée par la diminution des précipitations.

SPI-3 (avril-juin) : Le SPI printanier montre d'énormes irrégularités dans les cycles entre 1981 et 2010. Depuis 2010, on observe tout de même une tendance à la baisse dans les précipitations malgré un SPI très légèrement positif en 2018 et en 2019.

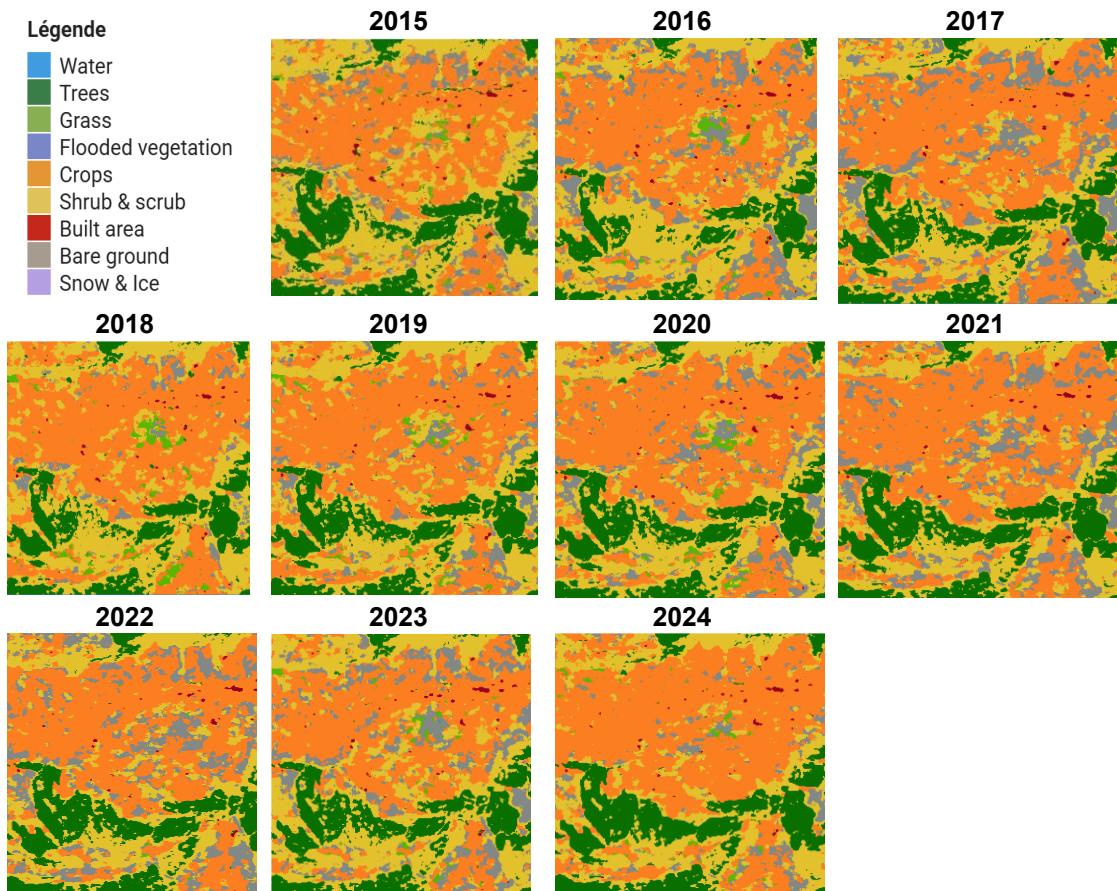


Figure 30 : Évolution de l'occupation du sol entre 2015 et 2024 dans la première zone d'étude

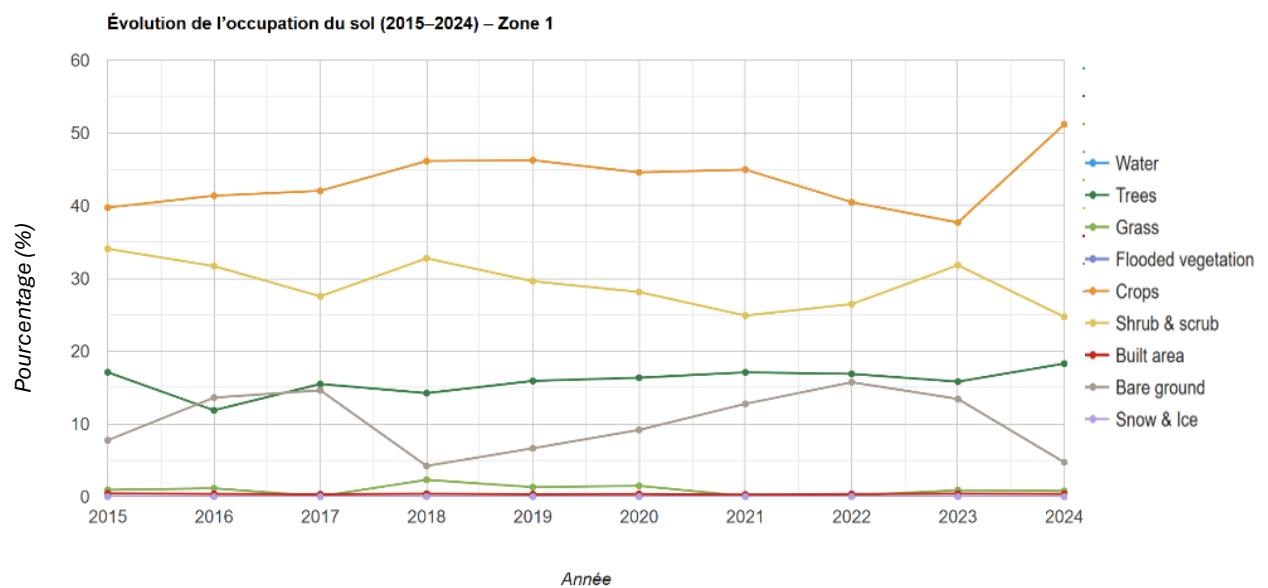


Figure 31 : Évolution de l'occupation du sol entre 2015 et 2024 dans la première zone d'étude

La première zone d'étude présente une dynamique assez stable pour toutes les classes d'occupation du sol. Entre 2015 et 2024, les cultures restent la classe dominante de la zone représentant entre 40 à 50% de la surface totale avec un pic à 52% en 2024. Ces valeurs montrent une activité agricole importante dans la zone.

Néanmoins, on observe une baisse marquée à 39% en 2023. Cette chute coïncide avec une augmentation de la classe des arbustes cette année-là. En 2024, une dynamique inverse s'observe avec une augmentation brutale des cultures et la diminution des arbustes. Cette augmentation des cultures vient contrebalancer la diminution des sols nus qui voient leur pourcentage chuter cette même année. Cela suggère une reconversion de ces sols nus en surface cultivée.

Les surfaces arborées sont également stables et parfois même en augmentation traduisant probablement une zone avec peu de déforestation.

Les différentes classes telles que « l'eau », les « surfaces bâties », « les herbacées », la « neige et glace » restent très peu présentent dans cette zone.

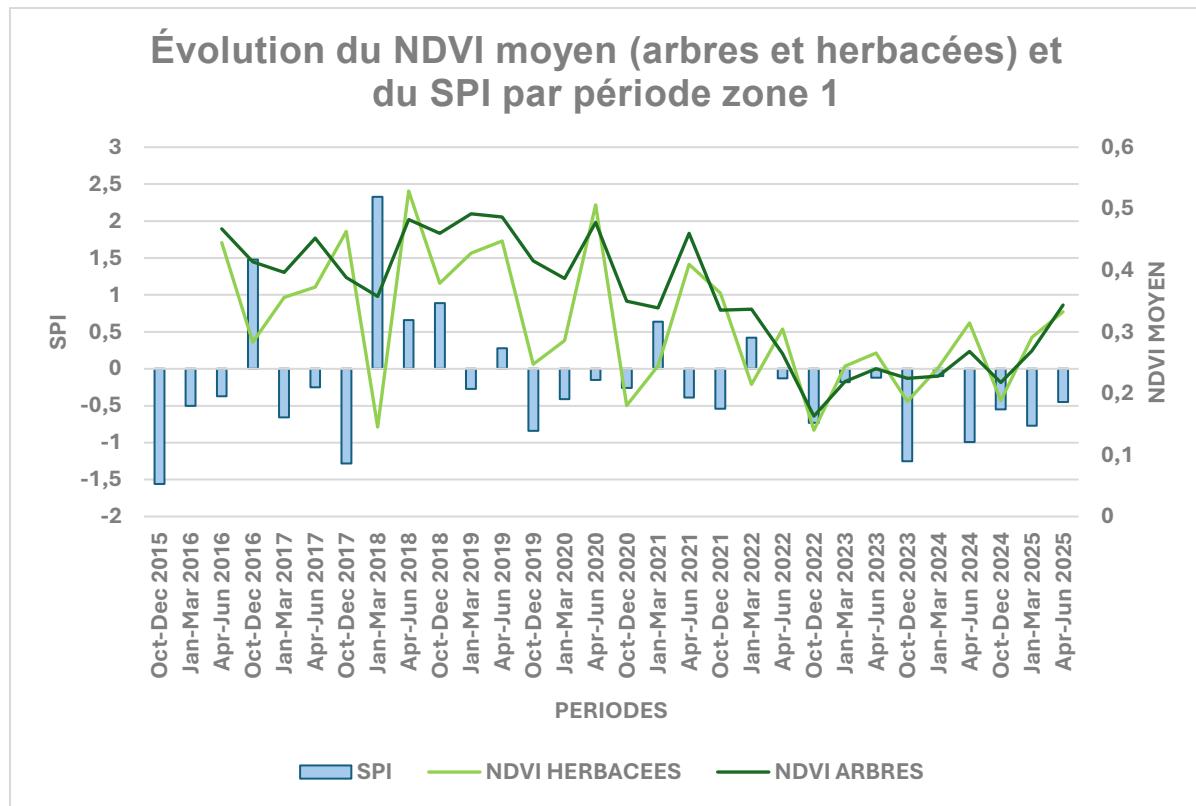


Figure 32 : Evolution conjointe du SPI et du NDVI moyen des herbacées et des arbres dans la première zone d'étude entre 2015 et 2025

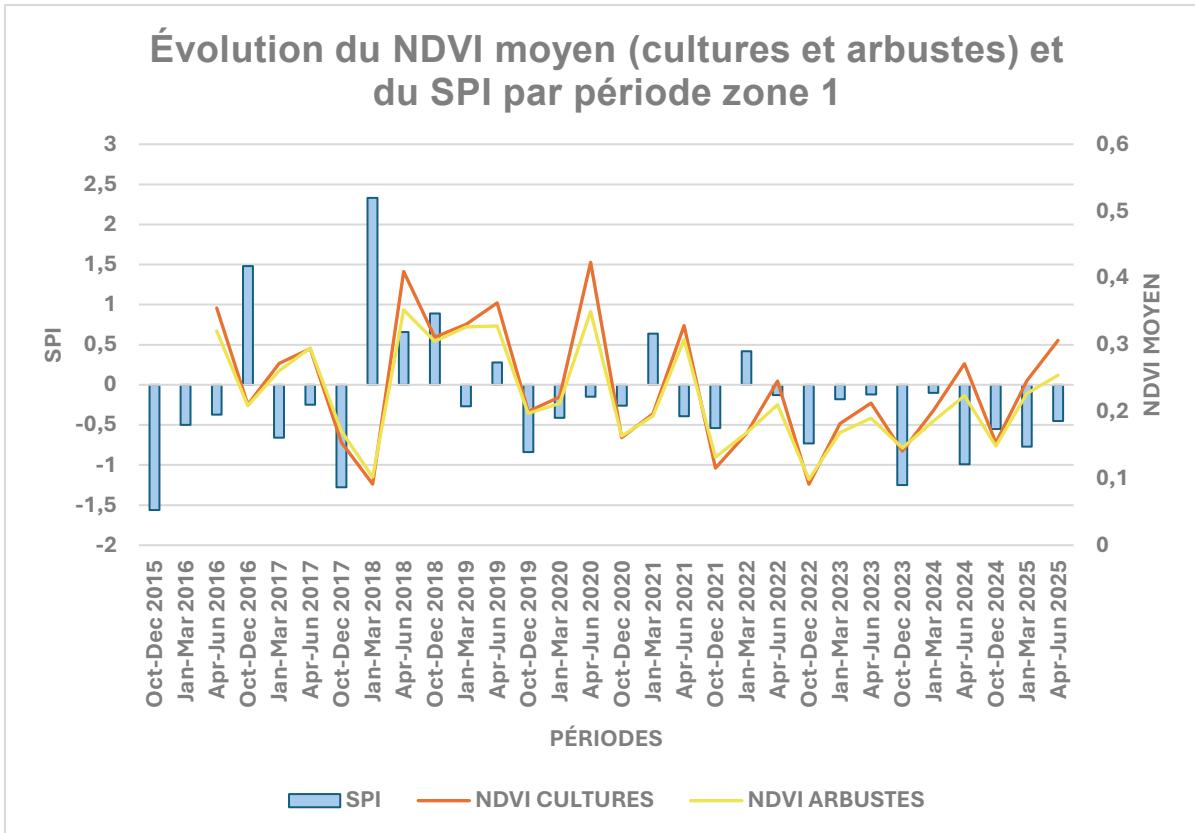


Figure 33 : Evolution conjointe du SPI et du NDVI moyen des cultures et des arbustes dans la première zone d'étude entre 2015 et 2025

La première zone d'étude montre des dynamiques assez similaires entre les différentes classes d'occupation du sol. Globalement, tous les types de couverts végétaux montrent une tendance à la baisse au niveau de la résistance entre 2015 et 2025 avec une amélioration visible sur les graphiques en annexe 3 depuis 2023 malgré des valeurs de SPI négatives visibles sur les graphiques ci-dessus. Cette tendance à la baisse marquée pour les différents types de LC traduit une vulnérabilité et une sensibilité importante dans la première zone d'étude. La période octobre-décembre apparaît comme la période la plus fragile pour toutes les classes avec de faibles valeurs de résistance. La période janvier-mars quant à elle est celle qui présente la meilleure résistance malgré un déclin au cours du temps en dépit des valeurs de pente négatives plus importantes pour les différents couverts végétaux.

Les arbres, par exemple, présentent une baisse claire de leur résistance en particulier durant la période janvier-mars. Les cultures et les arbustes suivent une tendance assez similaire avec des baisses marquées surtout en octobre-décembre et janvier-mars. Les herbacées bien que présentant une surface plus réduite, se distinguent par

une variabilité plus forte dans leur résistance et résilience traduisant une plus forte sensibilité mais également une meilleure adaptabilité par moment. Cette classe reste tout de même très négligeable au vu de la faible superficie qu'elle occupe chaque année. Pour certaines classes et périodes, les tendances observées étaient statistiquement significatives ($p>0,05$) ce qui s'explique en partie par un nombre plus élevé de valeurs.

Pour la résilience, les dynamiques sont plus stables. On observe des tendances positives pour les périodes d'octobre à décembre et de janvier à mars pour les herbacées, les cultures et les arbustes. La période d'avril à juin montre quant à elle une tendance légèrement à la baisse. A l'inverse, les arbres présentent une assez bonne résilience pour la période octobre-décembre et avril-juin et une diminution de la résilience pour la période janvier-mars. Ces différentes valeurs de résilience présentent cependant une faible variabilité. Il est toutefois important de souligner que la résilience présente peu de valeurs en raison du grand nombre de périodes peu pluvieuses caractérisées par un SPI négatif ce qui limite l'interprétation fine de ces tendances. La majorité des évolutions observées présentent des tendances non statistiquement significatives pour la résilience ($p<0,05$).

Les graphiques à la figure 32 et 33 croisant le SPI et le NDVI moyen pour cette zone confirment bien cette relation entre les conditions climatiques et la vigueur de la végétation. Les différentes phases de SPI négatif s'accompagnent généralement d'une baisse du NDVI durant la même période ou celle d'après. Ces corrélations entre les deux périodes seront analysées à la section 3.5. A l'inverse, les périodes de SPI positif, indiquant des conditions plus pluvieuses, coïncident également avec une augmentation du NDVI traduisant une réponse rapide et une dépendance à ces conditions.

3.4 Analyse comparative du Land Cover, NDVI et SPI dans la seconde zone d'étude

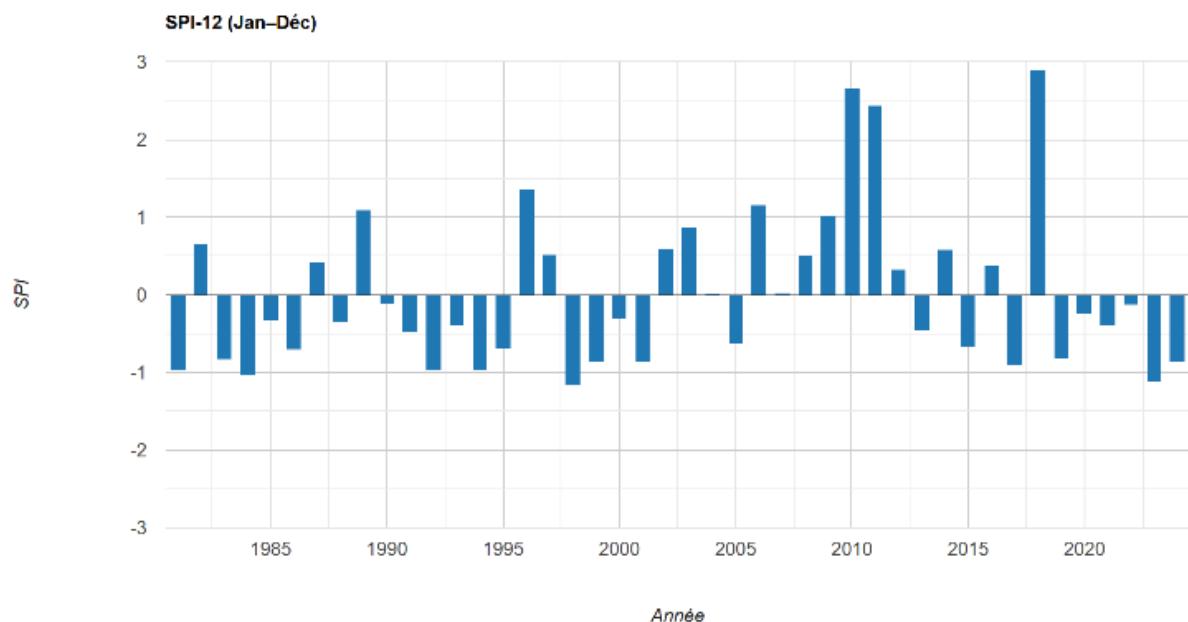


Figure 34 : Graphique du SPI-12 (janvier-décembre) dans la seconde zone d'étude

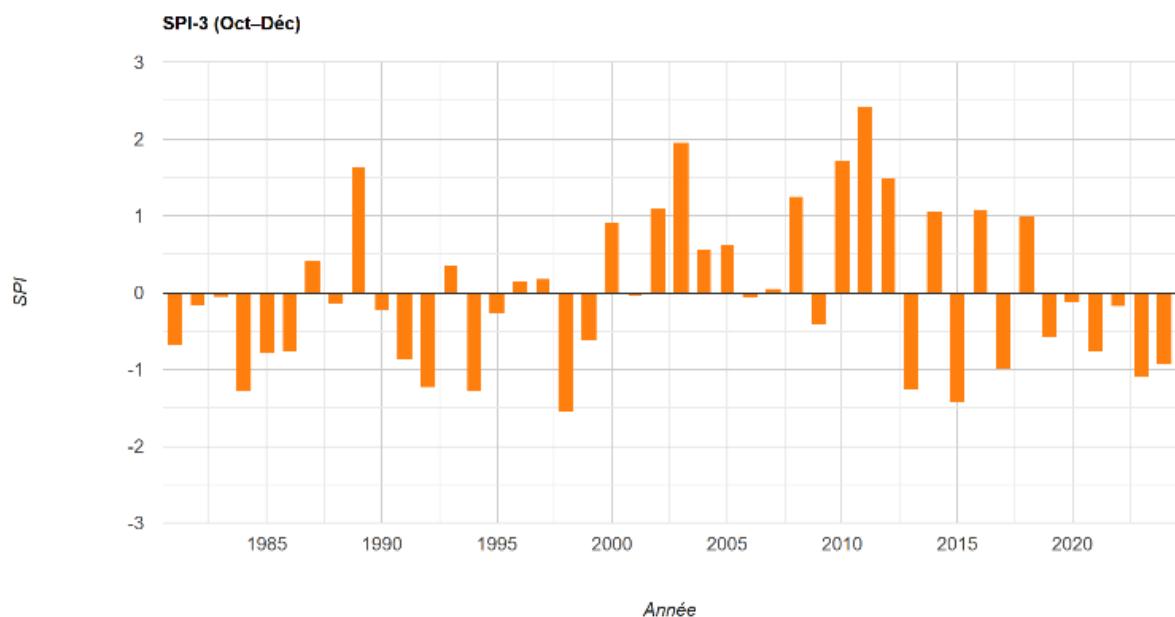


Figure 35 : Graphique du SPI-3 (octobre-décembre) dans la seconde zone d'étude

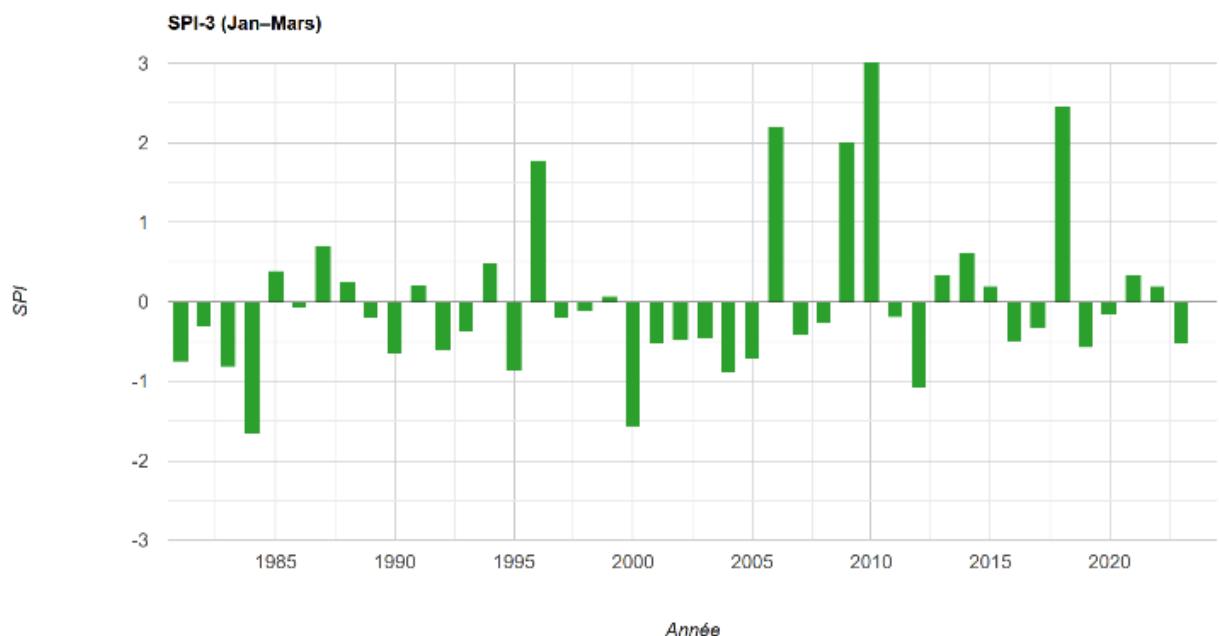


Figure 36 : Graphique du SPI-3 (janvier-mars) dans la seconde zone d'étude

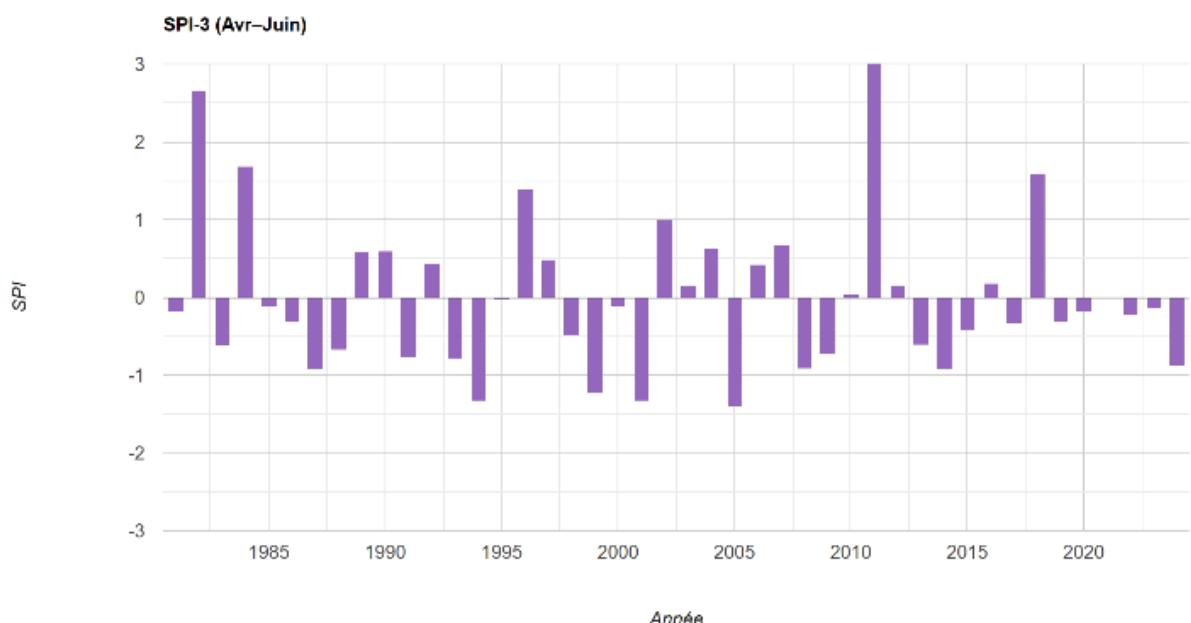


Figure 37 : Graphique du SPI-3 (avril-juin) dans la seconde zone d'étude

SPI-12 (janvier-décembre) : Le SPI-12 montre dès 1981 plusieurs années sèches suivies parfois d'une voire de deux années légèrement plus humides. Cette tendance va s'observer jusqu'en 2006 où la zone va connaître 7 années beaucoup plus humides que la normale. Depuis 2013, la zone connaît des années plus sèches avec l'année 2014, 2016 et surtout 2018 qui avaient été humides lors de ces 11 dernières années.

SPI-3 (octobre-décembre) : Le SPI-3 d'octobre à décembre qui est le début de la période pluvieuse au Maroc est fort similaire au SPI-6 d'octobre à mars. Entre 1981 et 2000, cette période était plus sèche que la normale. Entre 2000 et 2012, le Maroc a connu une période automnale plus humide avec des SPI compris entre 0 et 2.5. Entre 2012 et 2018, la zone a connu une alternance entre années humides et années sèches. Depuis 2019, les valeurs du SPI pour cette période sont négatives avec une baisse dans les précipitations par rapport à « la normale ».

SPI-3 (janvier-mars) : Le SPI-3 de janvier à mars est l'exemple même de « plusieurs années sèches suivies d'une année plus humide ». De 1981 à 1984, la zone a connu des années plus sèches avant d'avoir un SPI positif en 1985. Entre 2000 et 2005, les valeurs étaient tout comprises entre 0 et -1.5 avant d'atteindre une valeur supérieure à 2 en 2006. Durant cette période hivernale, les années 2010 et 2018 ont été beaucoup plus pluvieuses que la moyenne. C'est également la seule période qui depuis 2018 connaît des SPI positifs traduisant une plus légère diminution des pluies en début d'année par rapport aux autres années depuis 1981.

SPI-3 (avril-juin) : Le SPI d'avril à juin correspond à la fin du cycle de pluies avant la période estivale où le Maroc connaît très peu de pluies. On observe une énorme variation et des irrégularités dans les cycles. Très souvent, 2-3 années plus pluvieuses sont ensuite suivies de 2-3 années plus sèches. Ce phénomène peut s'observer entre 1981 et 2018. Depuis 2018, les tendances et les valeurs du SPI sont légèrement négatives par rapport à la normale.

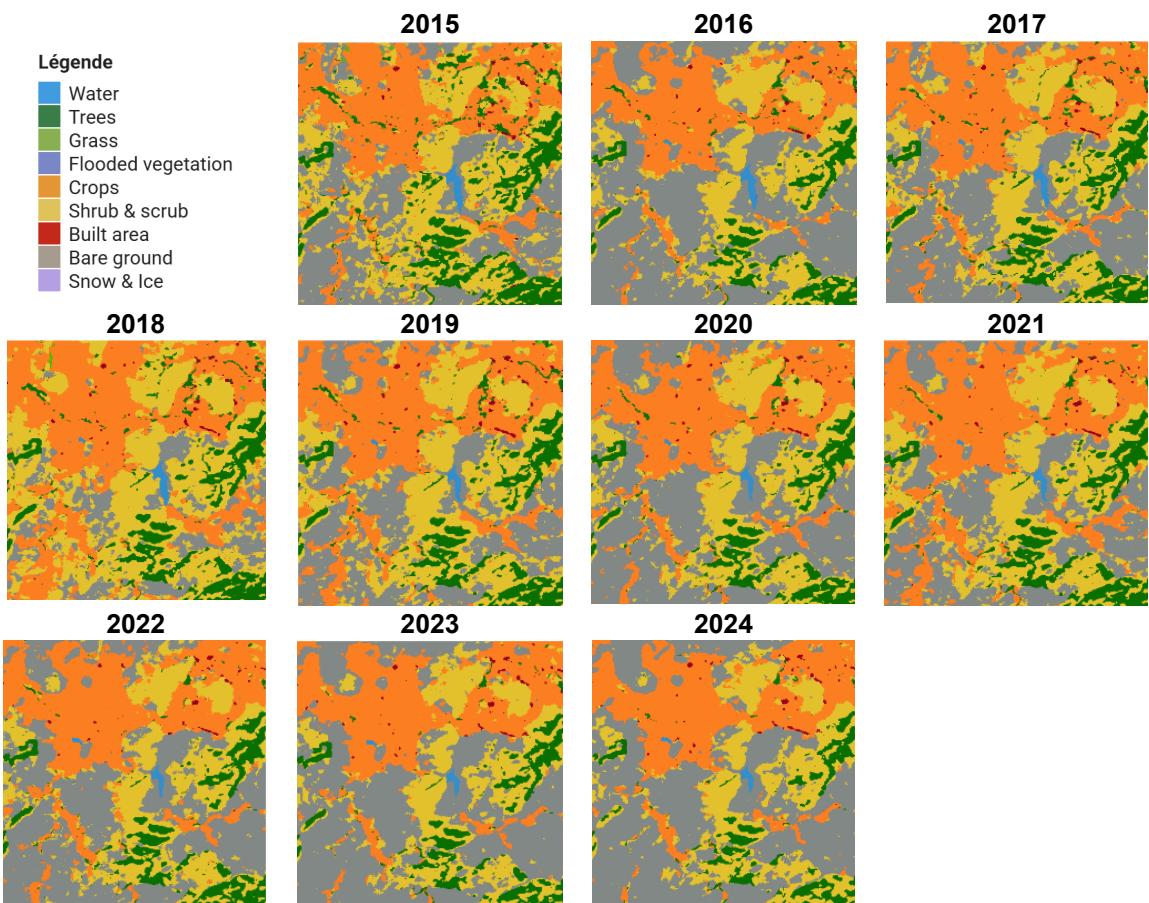


Figure 38 : Évolution du Land Cover entre 2015 et 2024 dans la seconde zone d'étude

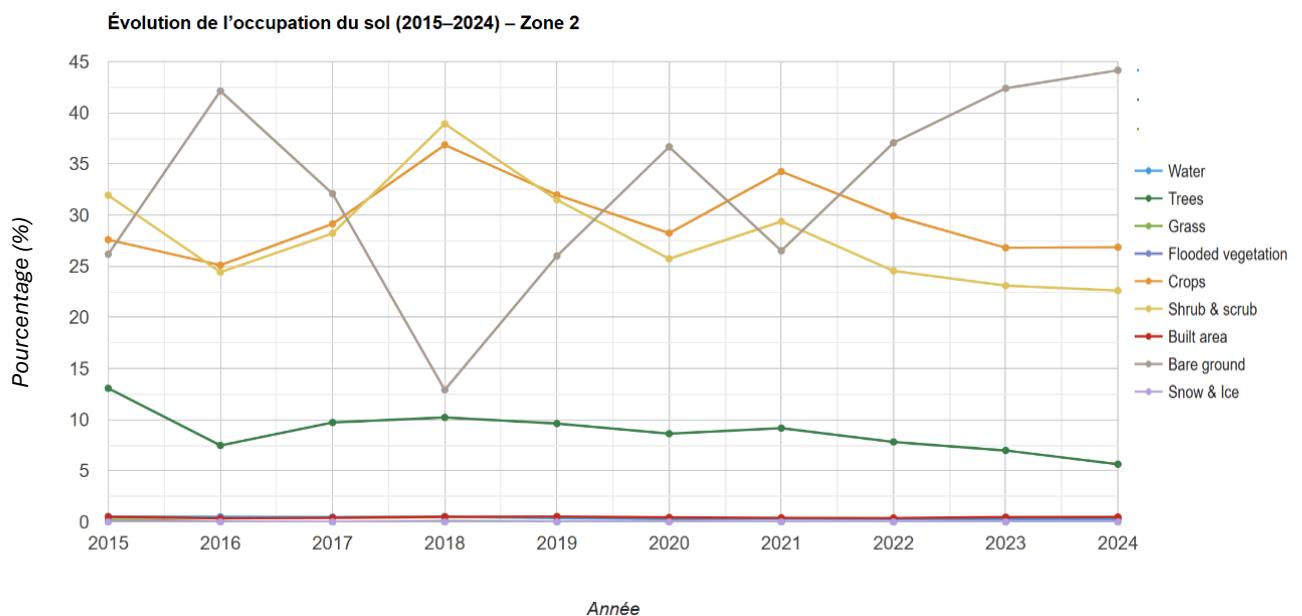


Figure 39 : Évolution de l'occupation du sol entre 2015 et 2024 dans la seconde zone d'étude

La zone 2 se caractérise par une plus forte variabilité entre les classes. Cette instabilité est plus fortement marquée au niveau des arbustes, cultures et sols nus. Les sols nus connaissent les plus grands pics lors de la dernière décennie ce qui peut traduire une dégradation ou une mise en jachère récente des sols. Lors de l'année 2018, les sols nus ont nettement diminué et les arbustes et cultures ont augmenté suggérant une belle reprise de la végétation grâce à ces pluies. Les cultures et les arbustes représentent des classes importantes mais instables. Ces deux classes suivent une dynamique très similaire et montrent une tendance inverse avec les sols nus.

A l'inverse de la première zone d'étude, la classe représentée par les arbres possède une dynamique à la baisse démontrant probablement une pression plus importante sur les ressources forestières. En 10 ans, le pourcentage est passé de 13% à seulement 6% en 2024. L'absence de couverture forestière pourrait être un déclencheur de l'augmentation de l'érosion des sols comme mentionné par Mohamed qui observe une dégradation des sols. Comme dans la première zone d'étude, les classes « eau », « surfaces bâties », « herbacées », « neige et glace » restent négligeables en termes de couverture du sol malgré la présence d'un barrage visible au centre de la zone (voir figure 57) et la présence ponctuelle de végétation inondée.

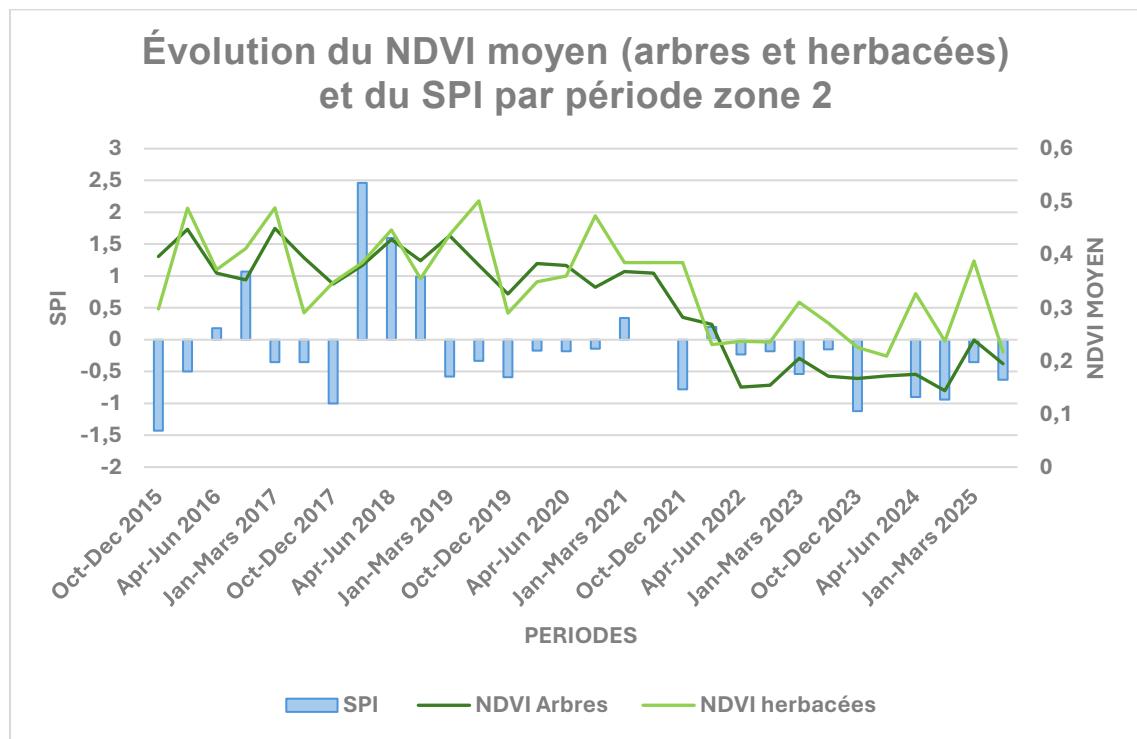


Figure 40 : Evolution conjointe du SPI et du NDVI moyen des herbacées et des arbres dans la seconde zone d'étude entre 2015 et 2025

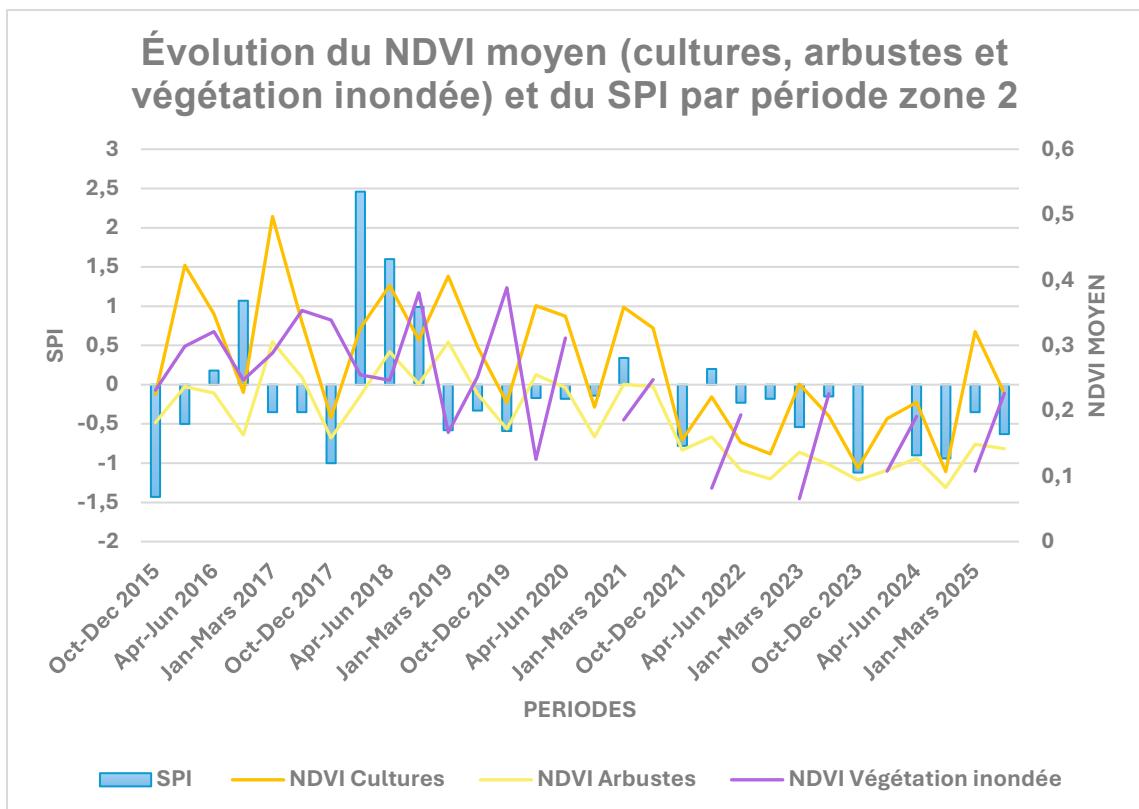


Figure 41 : Evolution conjointe du SPI et du NDVI moyen des cultures, des arbustes et de la végétation inondée dans la seconde zone d'étude entre 2015 et 2025

L'analyse de la résistance et de la résilience dans la seconde zone d'étude montre également certaines variabilités et similarités selon les différentes classes d'occupation du sol. On observe de manière générale une tendance de la résistance à la baisse pour toutes les classes d'occupation du sol avec une légère augmentation depuis 2024. Néanmoins, cette augmentation est plus contrastée selon la période et le type de couvert et est moins marquée que dans la première zone d'étude. Les périodes octobre-décembre et avril-juin montrent les plus faibles valeurs de résistance malgré une dégradation importante en janvier-mars mais avec des valeurs plus élevées. Cette dégradation est visible dans toutes les classes d'occupation du sol à l'annexe 4.

Les arbres affichent une diminution marquée de leur résistance dans les trois périodes, avec des tendances qui sont statistiquement significatives pour certaines saisons. Les cultures et les arbustes suivent des dynamiques assez similaires, montrant une perte de résistance particulièrement prononcée en octobre-décembre et en avril-juin pour les arbustes. Les herbacées, peu représentées en termes de superficie, présentent

une assez forte variabilité interannuelle, traduisant une sensibilité marquée mais également une certaine adaptabilité selon les périodes et les années. La végétation inondée, présente en plus grande quantité dans cette zone que dans la première zone, montre une résistance contrastée selon les saisons avec des baisses significatives lors de certaines périodes et plus particulièrement celle d'octobre à décembre.

Pour la résilience, les dynamiques apparaissent plus stables avec des valeurs globalement proches de 1. Ces valeurs indiquent une certaine capacité de récupération sauf pour la période janvier-mars qui, comme dans la première zone d'étude, montre une certaine vulnérabilité. Cependant, les périodes d'octobre à décembre et d'avril à juin apparaissent comme plus résilientes dans cette zone par rapport à la première. Cependant, le faible nombre de valeurs disponibles pour le calcul de la résilience limite l'analyse statistique complète des données observées.

Les graphiques présents aux figures 40 et 41 croisant le SPI avec le NDVI confirment également le lien étroit entre ces deux indicateurs malgré certaines irrégularités notamment pour les herbacées qui ne réagissent pas toujours selon la diminution ou l'augmentation des précipitations ou encore l'augmentation du NDVI pour les cultures en 2024 par exemple tandis que le SPI montre des valeurs négatives sur plusieurs périodes précédentes.

3.5 Liens entre le SPI et le NDVI

Dans cette section, l'objectif est de vérifier s'il existe une corrélation possible entre le NDVI et le SPI pour les différentes classes d'occupation du sol dans les deux zones d'étude. Cette analyse vise à déterminer si la vigueur de la végétation caractérisée par le NDVI est influencée de manière significative par les précipitations traduites par le SPI et surtout de déterminer à quelle période cette influence est la plus marquée.

Pour cette analyse, la première étape a pour but de tracer le nuage de points entre la variable explicative caractérisée par le SPI et la variable réponse qui est le NDVI. La courbe de LOESS va permettre par la suite de détecter les tendances autour de ces points. Dans les figures ci-dessous, elle permet d'observer le jeu de données et de se rendre compte d'une probable non-linéarité.

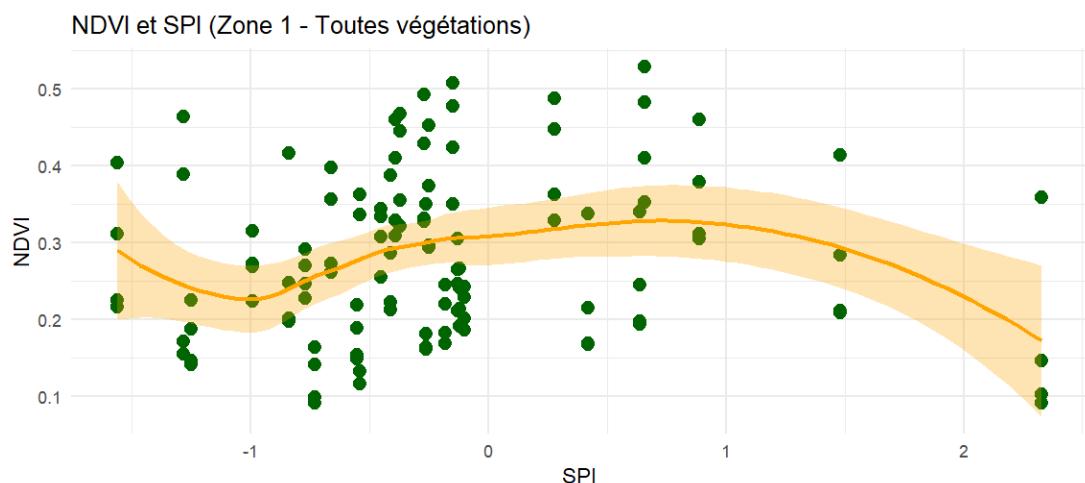


Figure 42 : Nuage de points NDVI - SPI de la même période pour toute la végétation (zone 1)

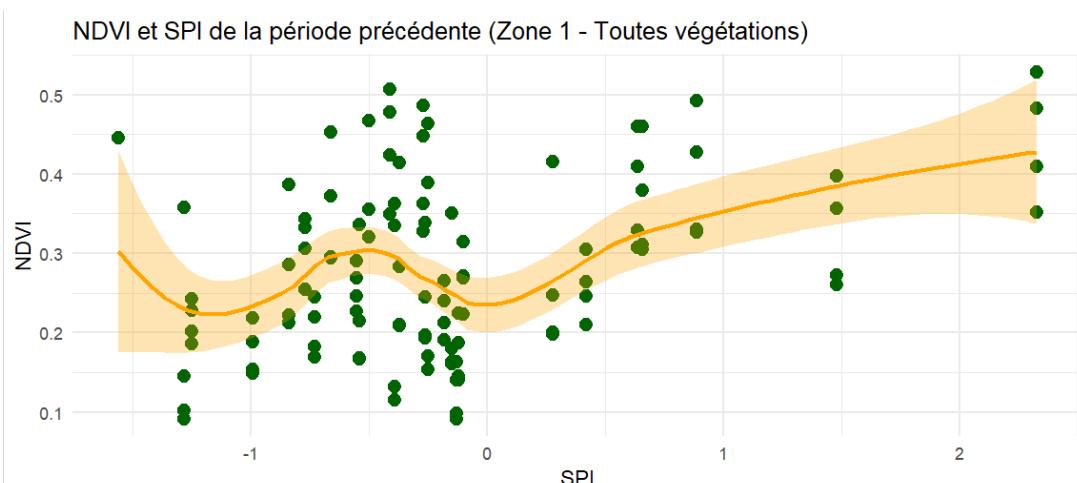


Figure 43 : Nuage de points NDVI – SPI de la période précédente pour toute la végétation (zone 1)

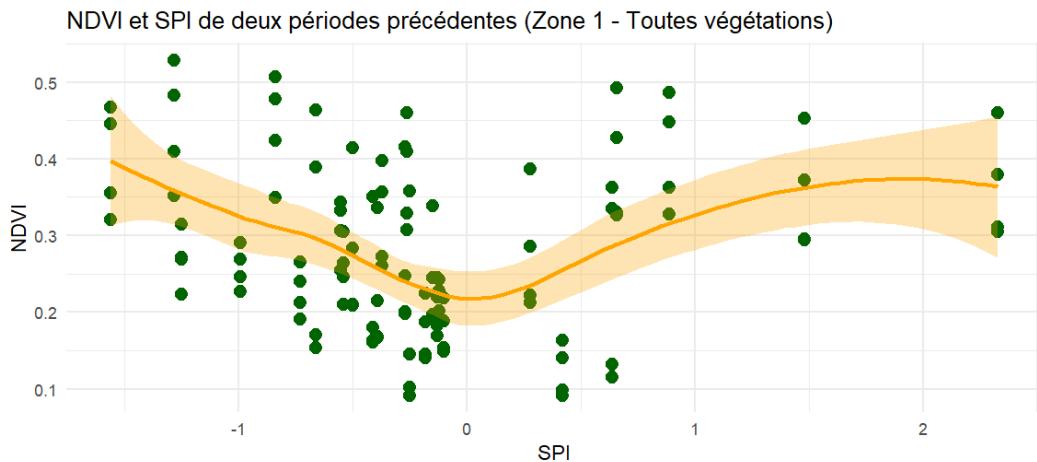


Figure 44 : Nuage de points NDVI – SPI de deux périodes précédentes pour toute la végétation (zone 1)

Afin de déterminer si le jeu de données suit une distribution normale, le test Shapiro Wilk est à privilégier en raison du petit échantillon à disposition. Ce test de normalité est essentiel car il permet de conditionner le choix de la méthode statistique utilisée. En absence de normalité, les tests non paramétriques sont souvent privilégiés tel que celui de Spearman.

Le test qui est effectué sur les deux variables séparément donne comme résultats :

Pour le SPI :

```
Shapiro-Wilk normality test

data: spi_vals
W = 0.90322, p-value = 3.161e-07
```

Pour le NDVI :

```
Shapiro-Wilk normality test

data: ndvi_vals
W = 0.97108, p-value = 0.01303
```

Dans les deux cas, la p-valeur est inférieure à 0,05 ce qui ne donne significativement pas assez de preuve pour dire qu'elles suivent une distribution normale. Dans ce cas-ci, les tests non paramétriques seront à privilégier.

Le choix s'est porté sur le coefficient de Spearman. La relation entre les précipitations et la réponse de la végétation est souvent influencée par de multiples autres facteurs tels que les températures, les pratiques agricoles, le couvert végétal et bien d'autres encore. L'avantage avec Spearman c'est qu'il évalue la force et la direction d'une relation monotone, peu importe qu'elle soit linéaire ou non (Zhang et al., 2025).

Dans cette étude, le coefficient de Spearman est calculé pour chaque combinaison entre le couvert végétal, le SPI et le NDVI moyen des périodes. Les tests portent sur trois cas différents. Tout d'abord, le NDVI moyen avec le SPI de la même période (NDVI moyen d'octobre à décembre 2015 avec le SPI d'octobre à décembre 2015). Ensuite, le NDVI moyen de la période avec le SPI de la période précédente (NDVI moyen de janvier à mars 2016 avec le SPI d'octobre à décembre 2015). Pour finir, le NDVI moyen de la période avec le SPI de deux périodes précédentes (NDVI moyen d'avril à juin 2016 avec le SPI d'octobre à décembre 2015).

Ce choix méthodologique est cohérent avec plusieurs travaux récents (Benhizia et al., 2024, Zhang et al., 2025) qui ont étudié les liens entre les indices de végétations et de précipitations.

Zone d'étude 1

Classe de végétation	Période SPI	Rho Spearman	p-value
Arbres	Même période	0,243	0,203
Arbres	Période précédente	0,322	0,095
Arbres	Deux périodes précédentes	-0,018	0,928
Herbacées	Même période	0	0,999
Herbacées	Période précédente	0,271	0,163
Herbacées	Deux périodes précédentes	-0,082	0,682
Cultures	Même période	0,194	0,312
Cultures	Période précédente	0,296	0,127
Cultures	Deux périodes précédentes	-0,222	0,255
Arbustes	Même période	0,145	0,45
Arbustes	Période précédente	0,335	0,082
Arbustes	Deux périodes précédentes	-0,193	0,324

Tableau 4 : Corrélation de Spearman entre le NDVI et le SPI selon la classe et la période (zone 1)

Zone d'étude 2

Classe de végétation	Période SPI	Rho Spearman	p-value
Arbres	Même période	0,21	0,266
Arbres	Période précédente	0,202	0,293
Arbres	Deux périodes précédentes	0,25	0,199
Herbacées	Même période	0,254	0,175
Herbacées	Période précédente	0,239	0,212
Herbacées	Deux périodes précédentes	0,108	0,584
Cultures	Même période	0,352	0,0563
Cultures	Période précédente	0,143	0,459
Cultures	Deux périodes précédentes	-0,007	0,972
Arbustes	Même période	0,353	0,0567
Arbustes	Période précédente	0,292	0,125
Arbustes	Deux périodes précédentes	0,19	0,332
Végétation inondée	Même période	0,355	0,082
Végétation inondée	Période précédente	-0,054	0,804
Végétation inondée	Deux périodes précédentes	-0,273	0,207

Tableau 5 : Corrélation de Spearman entre le NDVI et le SPI selon la classe et la période (zone 2)

Les résultats obtenus dans les deux zones montrent certaines corrélations positives entre le NDVI et le SPI. Dans la première zone d'étude, le rho de Spearman indique une réponse probablement légèrement décalée pour l'ensemble des couverts végétaux en lien avec la période précédente. Dans la zone 2, certaines valeurs sont modérément élevées pour la relation entre le NDVI et le SPI de la même période pour tous les couverts hormis les arbres pouvant suggérer une réponse peut-être plus rapide. Cependant, aucune des p-valeurs n'est inférieure à 0,05 ce qui signifie qu'aucune corrélation n'est significative à un niveau de confiance de 95% mais certaines p-valeurs sont proches de ce seuil soulignant que certaines tendances peuvent être à considérer.

Les tests non paramétriques complexifient les analyses de corrélation et de comparaison entre les périodes et les classes d'occupation du sol mais permettent néanmoins d'observer certaines tendances ainsi que la force des relations. Il ne faut également pas oublier que corrélation ne veut pas dire causalité et que d'autres indicateurs et données de terrain sont nécessaires afin d'argumenter le lien mathématique.

3.6 Gestion des ressources dans les deux zones d'étude

Dans les deux zones qui sont dynamisées par l'agriculture et l'élevage, l'eau constitue la ressource centrale mais aussi comme un élément de plus en plus vulnérable face aux enjeux futurs. La gestion des ressources dans les deux zones d'étude repose sur les témoignages des deux agriculteurs rencontrés lors des journées de terrain.

Dans la première zone d'étude, l'irrigation repose sur un système collectif de séguias alimentées par une source située en amont. L'eau est répartie de manière communautaire, avec une alternance tous les huit jours entre les deux tribus. Cette organisation assez récente témoigne de la raréfaction de la disponibilité en eau. L'irrigation se fait principalement « à l'œil » sans calendrier d'irrigation précis. Certaines installations d'irrigation sur la zone sont assez vétustes, vieillissantes et mal entretenuées entraînant du colmatage et des débris de tuyaux le long des routes et des parcelles. Il y a également la présence de certains bassins alimentés par des forages dans les nappes qui sont la plupart du temps non déclarés. L'enclavement de la zone limite également l'arrivée d'eau et les raccordements possibles aux habitations.



Figure 45 : Séguias avec la présence d'une source non visible en amont et bassin de stockage

Dans la seconde zone d'étude, l'eau est plus abondante et disponible. Celle-ci provient de plusieurs sources. Tout d'abord, il y a la présence d'un barrage qui n'est utilisé qu'en cas d'urgence. Il y a également plusieurs lacs avec des sources d'eau naturelles. Des puits, des forages et des bassins sont également présents dans le paysage. L'eau circule via des séguias de manière gravitaire sans interruption. La présence de nombreuses collectivités et entraides locales permet une bonne gestion entre les différentes ressources dans cette zone.



Figure 46 : Séguias le long d'un cours d'eau et le barrage Ait Moulay Ahmed

Dans les deux zones, la gestion de l'eau se fait de manière locale et les différentes techniques agroécologiques sont traditionnelles telles que la rotation de culture, le couplage élevage-culture, le compostage... Les pratiques sont transmises entre les générations mais les aléas du changement climatique fragilisent cette gestion. Ces différents risques viennent perturber les modes de vie traditionnels, ce qui pousse de plus en plus de jeunes à quitter les zones rurales. Face à cette situation, les agriculteurs actuels sont parfois contraints de repenser leurs activités, en envisageant par exemple une diversification vers le tourisme comme l'ont évoqué Aziz et Mohamed.

	Zone 1 : Tamchachate	Zone 2 : Sidi Belkhir
Altitude 	1850 m	900 m
Critères géographiques 	Enclavée et isolée ce qui rend la gestion et l'adaptation plus difficiles	Moins isolée des villes, routes proches
Accessibilité des ressources en eaux 	Faible accessibilité et disponibilité, répartition horaire tous les huit jours entre les deux tribus	Assez bonne accessibilité et disponibilité due à la présence de lacs, barrages et sources.
Conséquences du changement climatique 	<ul style="list-style-type: none"> - Stress hydrique - Forte baisse des chutes de neige - Assèchement de la cascade - Disparition des crues de l'oued 	<ul style="list-style-type: none"> - Propagation de maladies - Erosion accrue due aux pluies intenses - Forte variabilité dans les cycles de précipitations - Abandon de cultures fruitières
Perspectives et volontés pour le futur 	Projets de diversification vers le tourisme	Réelle volonté de faire connaître et valoriser le territoire

Tableau 6 : Comparaisons et enjeux principaux entre les deux zones

3.7 Comparaisons et apprentissages sur les deux zones

Les deux zones d'étude présentent des caractéristiques climatiques, topographiques et écologiques différentes. La première zone, située à environ 1800m d'altitude, enregistre des températures moyennes annuelles autour de 11°C depuis 1981, avec une hausse notable depuis 2020 atteignant parfois 12°C à 13°C. Le pic de la période végétative se situe entre avril et mai. Sa couverture est dominée par les cultures (~40%) suivies par les arbustes (~30%). La seconde zone, quant à elle, se trouve à 900m d'altitude. Elle connaît des températures plus élevées, autour des 15°C en moyenne, pouvant grimper jusqu'à 16-17°C depuis 2020. Le pic de végétation dans cette zone est moins tardif et se situe entre mars et avril. La couverture terrestre est assez similaire mais plus variable avec légèrement moins de culture et plus de sols nus visibles sur la dernière décennie.

Les deux territoires présentent de nombreuses irrégularités dans les cycles de précipitation mais les deux zones sont fort comparables. Toutefois, les dynamiques hydriques dans les deux zones se différencient grâce à la télédétection et aux observations sur le terrain. La première zone d'étude, quasiment dépourvue de végétation inondée confirme bien l'aridité de la zone observée lors des journées de terrain. A l'inverse, la seconde zone possède des zones humides avec une végétation inondée présente assez régulièrement durant les trois périodes avec également de nombreux lacs, barrage et sources naturelles.

L'analyse de la résistance et de la résilience végétative montre certaines trajectoires différentes mais avec un constat qui est commun aux deux zones. Il s'agit de la dégradation de la productivité végétale au cours de la dernière décennie. Cette baisse de NDVI est également marquée par des SPI négatifs montrant que la baisse des précipitations est un facteur important dans cette baisse végétative.

Il est néanmoins important de souligner dans cette comparaison entre les deux zones d'étude que statistiquement celle-ci n'est pas évidente et peut s'avérer limitée. Plusieurs facteurs autres que le SPI et le NDVI entrent en jeu et les différents échantillons utilisées pour calculer la résistance et la résilience peuvent être petits et à de périodes temporelles différentes. Malgré une meilleure disponibilité en eau dans la seconde zone d'étude, celle-ci ne présente pas de meilleure performance en termes

de résistance et résilience et possède une variabilité plus forte d'un couvert à un autre. Cela permet de démontrer que, dans ces régions, la disponibilité en eau n'est qu'un des nombreux facteurs existants pouvant fragiliser la vigueur de la végétation.

L'étude comparative révèle également des dynamiques qui sont propres à chaque zone. Dans la première zone, plus enclavée géographiquement et plus en altitude, la raréfaction de la neige et la diminution des réserves en eau peuvent être un facteur déclencheur de la diminution de la productivité végétale. Dans la seconde zone qui possède une meilleure accessibilité et disponibilité en eau, d'autres facteurs comme les maladies et la hausse des températures mentionnées par Mohamed ou encore une augmentation de la déforestation et/ou d'une pression foncière peuvent être les causes de cette tendance à la baisse.

Les tendances observées indiquent que la période octobre-décembre constitue une saison particulièrement critique pour la plupart des couverts végétaux. Malheureusement, cette période qui est fort touchée est essentielle pour les agriculteurs pour le redémarrage de la végétation après un été sec. Dans les deux zones, les arbres qui possèdent habituellement le NDVI le plus élevé en raison de la densité foliaire comme l'ont montré Pettorelli et al., 2005. Les arbres ont connu une dégradation fort marquée avec une chute encore plus prononcée dans la zone 2.

Les herbacées présentes en quantité négligeable dans les deux zones montrent une forte variabilité selon les années. Les cultures, classe dominante dans le paysage montrent une dégradation marquée et plus nette dans la seconde zone d'étude. Les arbustes montrent une relation fort similaire avec les cultures dans les deux zones et pour les différentes périodes.

Depuis 2023, une amélioration du NDVI est visible dans les deux zones pour les différents types de couvert et périodes malgré les faibles précipitations caractérisées par le SPI négatif. Cette augmentation récente est cependant plus visible dans la première zone d'étude.

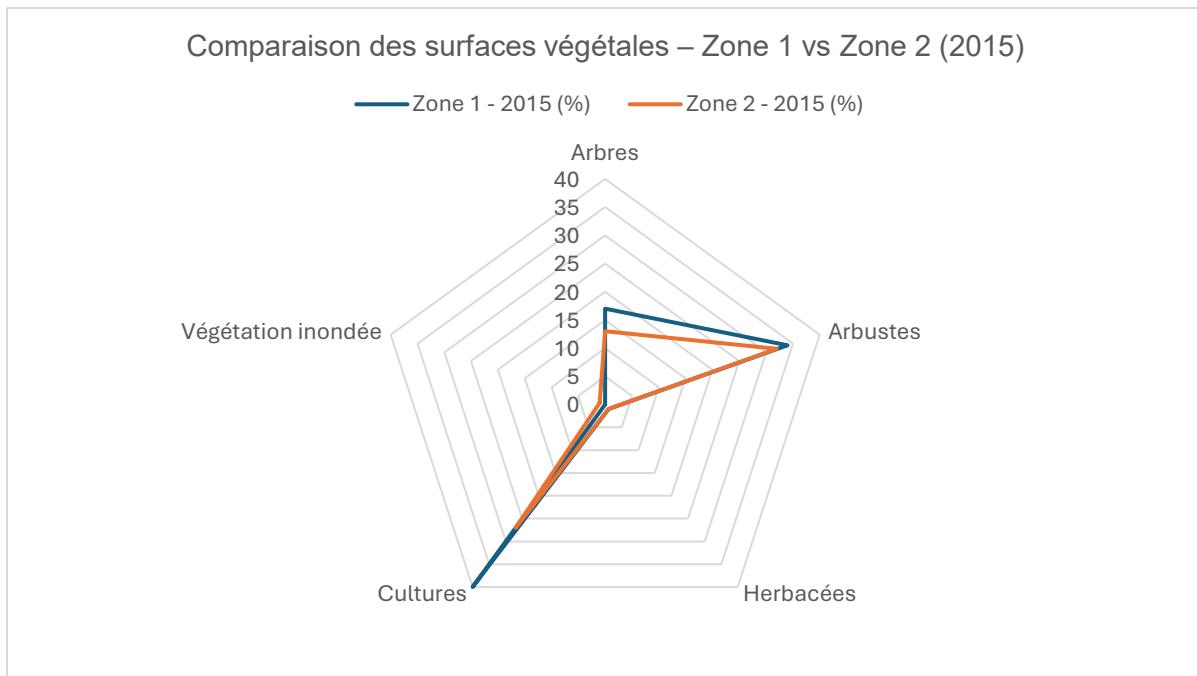


Figure 47 : Radar chart - Comparaison des surfaces végétales entre les deux zones d'étude en 2015

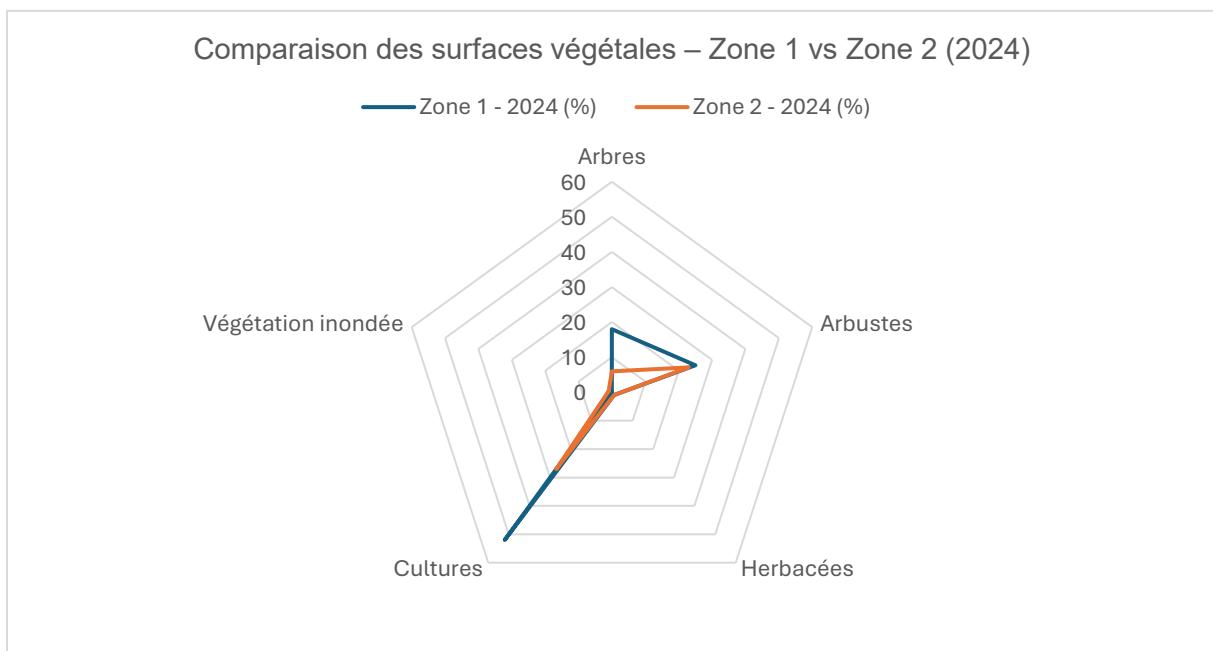


Figure 48 : Radar chart - Comparaison des surfaces végétales entre les deux zones d'étude en 2024

La zone 1 voit sa structure rester relativement stable en 10 ans avec un pic des cultures en 2024. Les arbres et les herbacées restent quasiment constants traduisant peu de modification dans le paysage. Cette hausse des cultures montre l'importance dans le paysage du système agricole avec peu de terre laissée vide.

La zone 2 qui possède une variabilité plus importante dans le paysage avec une stabilité dans les cultures bien que moins présente dans cette zone et il y a également

une diminution importante des arbres à noter. Les arbustes diminuent également au cours du temps. La diminution de ces surfaces au profit de sols nus, visibles sur la figure 39 traduit une fragmentation importante dans le paysage de la zone 2, peut-être lié à une pression foncière plus importante ou d'autres aléas locaux.

3.7.1 Période octobre-décembre

Dans la première zone d'étude, il s'agit de la période la plus critique. Les arbres qui présentaient une assez bonne résistance chutent drastiquement en 2022. Les herbacées présentent une résistance assez variable dans le temps avec également une chute durant cette même année. Les arbustes et les cultures sont les classes présentant la moins bonne résistance avec une dégradation constante dans le temps.

La résilience des différentes classes d'occupation du sol est modérée en 2016 avec des valeurs légèrement inférieures à 1 et une bonne résilience en 2018 avec des valeurs supérieures à 1, probablement en raison des fortes pluies qui ont touché la zone durant cette année-là.

Dans la seconde zone d'étude, les arbres suivent également une tendance similaire par rapport à la première zone d'étude avec une chute importante en 2022. Les herbacées, malgré une forte variabilité de résistance selon les années, présentent une résistance très similaire à la première zone d'étude. La courbe concernant la résistance des cultures présente également une tendance encore plus à la baisse que dans la première zone d'étude. Les arbustes qui présentent une courbe assez similaire, voient leur résistance légèrement se redresser à partir de 2023 dans la première zone d'étude tandis qu'aucune amélioration n'est visible dans la seconde zone. La végétation inondée, seulement présente dans cette zone, voit sa résistance décliner au fil des années.

La résilience de la végétation dans cette zone est variable. Les arbres présentent une résilience assez constante avec une meilleure résilience en 2018 pour les deux zones. Les herbacées possèdent une bonne résilience en 2016 et une diminution de celle-ci en 2018 dans la seconde zone d'étude. À l'inverse, les cultures et les arbustes sont assez similaires avec une meilleure résilience en 2018 qu'en 2016.

Evolution et comparaison du NDVI moyen pour la période oct-déc (2015 vs 2024)

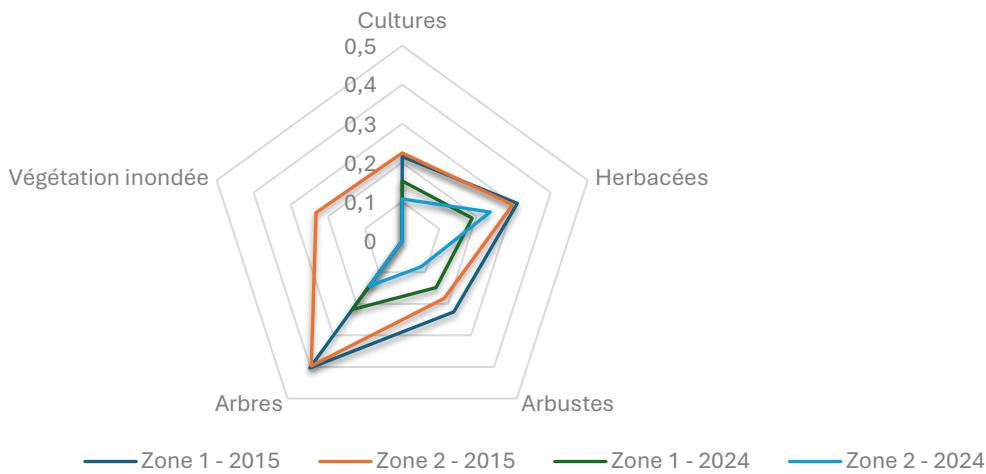


Figure 49 : Radar chart – Evolution et comparaison du NDVI moyen des surfaces végétales entre les deux zones d'étude entre 2015 et 2024 pour la période octobre-décembre

3.7.2 Période janvier-mars

Dans la première zone d'étude, la période de janvier à mars est celle qui présente la meilleure résistance pour toutes les classes d'occupation du sol mais avec une dégradation plus importante au cours du temps. Les herbacées, les cultures et les arbustes présentent des tendances très similaires avec des valeurs de résistance supérieure à 1 traduisant une assez bonne résistance dans cette zone d'étude. Malgré une plus faible résistance en 2023, l'année dernière et cette année ont montré une augmentation de la résistance pour les 4 types d'occupation du sol.

La résilience des arbres reste globalement bonne en 2018 mais diminue légèrement en 2021 et 2022 tout en restant à des seuils proches de 1. Comme pour la résistance, les herbacées, cultures et arbustes présentent des tendances similaires avec une assez mauvaise résilience en 2018 avec des valeurs proches de 0.7 tandis que les années 2021 et 2022 ont montré une bien meilleure résilience traduite par des valeurs positives pour les 3 différentes classes.

Dans la seconde zone d'étude, les arbres ont montré des valeurs de résistance très élevées avant de s'effondrer en 2023. Les arbres, les arbustes et les cultures sont les classes d'occupation qui ont été les plus vulnérables à partir de 2023 avec des valeurs négatives. Avant cela, celles-ci présentaient des valeurs de résistance très élevées

pour cette période de janvier à mars. Les autres classes, malgré une décroissance dans la résistance restent plus stables avec des valeurs positives.

La résilience est assez similaire pour les classes d'occupation de cette zone. Celle-ci est en déclin constant depuis 2018 avec des valeurs qui ont diminué de moitié par rapport à cette même année. Seule la végétation inondée, malgré une décroissance reste proche 1.

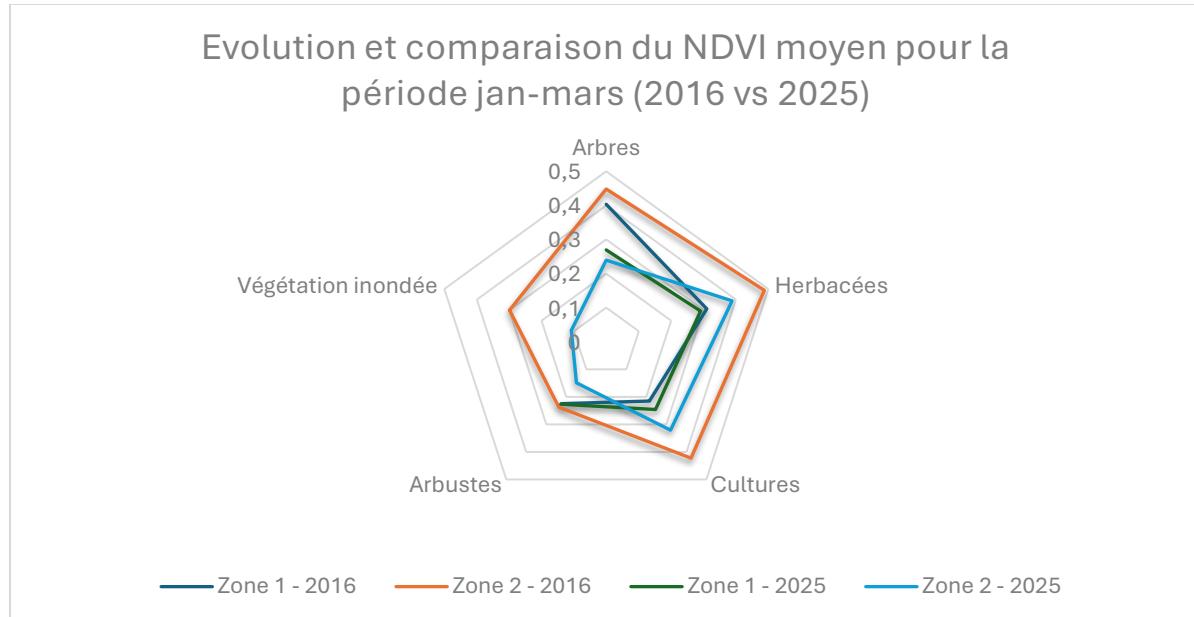


Figure 50 : Radar chart – Evolution et comparaison du NDVI moyen des surfaces végétales entre les deux zones d'étude entre 2016 et 2025 pour la période janvier-mars

3.7.3 Période avril-juin

Dans la première zone d'étude, les arbres présentent une résistance assez bonne avant de chuter complètement en 2022 avec une très légère reprise en 2024 et 2025. Les herbacées, cultures et arbustes suivent une tendance similaire avec une résistance modérée en décroissance malgré une légère augmentation de la résistance en 2024 et 2025.

Les arbres présentent une assez bonne résilience en 2018 et 2019 avec des valeurs positives. Néanmoins les autres couverts végétaux sont assez résilients en 2018 mais négatifs en 2019.

Dans la seconde zone d'étude, les arbres ont une tendance similaire que dans la première zone d'étude au niveau de la résistance. La résistance des herbacées est

plus variable avec une tendance à la baisse et une chute en 2025. Concernant les cultures, leur capacité à maintenir un niveau de productivité élevé est également plus faible que dans la première zone d'étude. Les arbustes quant à eux présentent une très mauvaise résistance et sont fortement vulnérables depuis 2022. La végétation inondée, bien que présente de manière négligeable durant cette période a eu une assez bonne résistance en 2018 et 2019.

La résilience est très similaire pour toutes les classes d'occupation du sol avec une très faible décroissance mais qui reste globalement très correcte avec des valeurs aux alentours de 1. La végétation inondée a une faible résilience en 2016 mais très bonne en 2018 probablement en raison des fortes pluies de janvier à mars 2018.

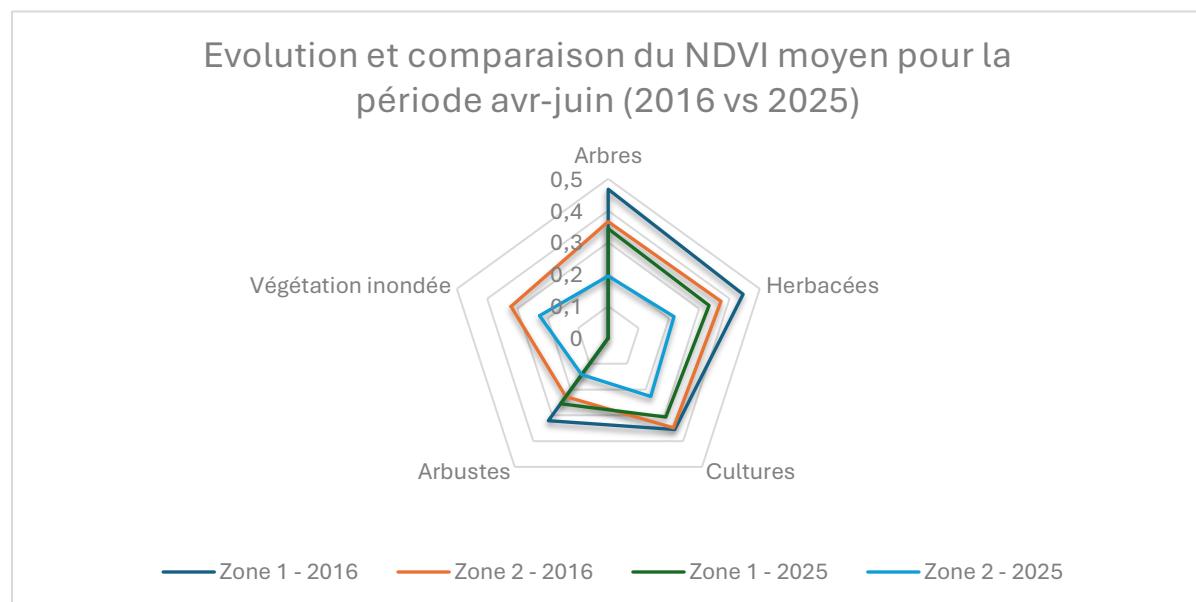


Figure 51 : Radar chart – Evolution et comparaison du NDVI moyen des surfaces végétales entre les deux zones d'étude entre 2016 et 2025 pour la période avril-juin

4. DISCUSSION

4.1 Des outils

Les deux outils principalement utilisés sont : le logiciel QGIS et la plateforme Google Earth Engine. Les avantages de ces deux outils sont leur libre accès et leur complémentarité. Les images extraites via GEE ont été analysées dans QGIS pour une meilleure visualisation spatiale. La plateforme GEE permet d'effectuer certains calculs et de générer des graphiques comme ceux du SPI dans cette étude.

L'apprentissage de GEE, basée sur l'utilisation de langage JavaScript, a représenté un défi au départ. La moindre erreur entraînait des blocages et il a fallu un certain temps d'adaptation et de compréhension. Malgré cela, la plateforme s'est révélée être assez intuitive avec des performances en termes d'accès aux données très utiles.

Il y a également les différentes sources de données géospatiales. Celles-ci comprennent MODIS, SENTINEL, ERA5, CHIRPS, DYNAMIC WORLD V1 pour l'analyse du NDVI, SPI, LC et des tendances climatiques dans les zones d'étude. Pour les tendances, ERA5 et CHIRPS, qui possèdent respectivement des jeux de données disponibles depuis 1950 et 1981, étaient idéales pour observer les tendances à long terme et voir les variations. Le SPI a également été calculé à l'aide des données CHIRPS. Afin d'avoir des valeurs de SPI fiables, il est conseillé de le calculer sur une période de 50 à 60 ans. Les données CHIRPS disponibles à partir de 1981 permettent d'avoir cette fiabilité.

Les données MODIS utilisées pour voir les tendances du NDVI sont celles du produit MODIS/061/MYD13A1 avec une résolution de 500m tous les 16 jours. Ces données sont disponibles depuis le début des années 2000 et étaient donc pertinentes pour l'observation des tendances dans la croissance de la végétation sur plusieurs années.

Dans cette analyse, le choix des images SENTINEL pour le NDVI et le LC était le plus judicieux. En effet, ces collections d'images sont beaucoup plus récentes, disponibles à partir de fin 2015 et offrent une très haute résolution spatiale (10 à 60m). Cette haute résolution spatiale était idéale dans les deux zones d'étude de 10km² chacune pour voir la fragmentation de la couverture du sol et le NDVI saisonnier pour chaque classe d'occupation.

Le produit Dynamic World V1 produit pour chaque pixel d'une image Sentinel-2 une distribution de probabilité parmi neuf classes d'occupation du sol vu précédemment. Les paysages mixtes ou très fragmentés avec plusieurs classes qui obtiennent les mêmes probabilités peuvent compliquer l'interprétation. Le masquage des nuages peut également impacter la couverture réelle (Brown et al., 2022).

4.2 La démarche

La méthodologie de l'étude repose sur l'analyse conjointe entre le SPI, le NDVI et le LC. Ce choix résulte de plusieurs lectures bibliographiques concernant la pertinence de ces trois indicateurs mais également sur des données d'entrée fiables à la représentativité de la résistance et de la résilience de la végétation sur des petites zones d'étude. Ce mémoire, qui repose sur la visite de ces zones lors de journées de terrain réalisées en février 2025, nécessitait une analyse possible complètement à distance.

Le SPI, indicateur qui ne prend en compte que les précipitations, ne reflète donc pas toute la complexité des sécheresses qui dépendent de données telles que l'évapotranspiration, l'humidité, la température, les bilans hydriques etc. La taille réduite des zones d'étude rendait cette analyse peu pertinente et peu robuste avec l'intégration de ces indicateurs. Il ne faut donc pas négliger tous ces aspects qui peuvent varier localement et ne pas oublier que la définition de la « sécheresse » du SPI repose sur de la littérature qui n'est pas toujours adaptée à l'ensemble des conditions climatiques locales.

L'analyse du NDVI, indicateur principal de la dynamique végétale, présente également certaines limites. Le NDVI mesure principalement la « verdure » sans distinguer la structure de la végétation. Par exemple, comme le montrent Runge et al. (2025) et Hossain & Li (2021), lorsque de la végétation forestière est remplacée par un couvert herbacé, les analyses peuvent révéler un NDVI plus élevé alors que ce changement peut refléter une réalité écologique plus complexe avec des pertes de stockage de carbone. De plus, il ne faut également pas oublier que deux écosystèmes peuvent avoir des valeurs de NDVI similaires tout en ayant une structure écologique complètement différente (De Keersmaecker et al., 2014).

Il était important de commencer par décrire les zones d'étude puis d'analyser les tendances climatiques. Celles-ci confirment les études antérieures selon lesquelles ces territoires connaissent une hausse des températures et une augmentation des irrégularités dans les cycles de précipitations. Il fallait ensuite finir avec l'analyse de la résistance et de la résilience grâce aux SPI, NDVI et LC.

Chaque temporalité et chaque choix des sources de données ont été pris selon leurs disponibilités, les périodes phénologiques et la pertinence pour les agriculteurs de faire une analyse récente des dynamiques de la végétation.

La démarche sur l'analyse de la résilience et de la résistance reste assez fort dépendante des données d'entrée également. Les données du couvert végétal dans un pixel ne sont pas toujours complètement homogènes et il peut donc s'avérer nécessaire de compléter la démarche avec des mesures de terrain.

La dépendance entre SPI et NDVI suppose une réponse immédiate de la végétation aux précipitations, ce qui n'est pas toujours le cas. Un décalage temporel existe souvent entre ces deux variables. Cela rend la corrélation entre SPI et NDVI parfois difficile à interpréter. Cette relation peut varier selon la saison, le type de végétation et le contexte écologique (Dutta et al., 2013). Bien que des corrélations entre ces indicateurs puissent être observées, elles ne traduisent pas nécessairement un lien de cause à effet. D'autres facteurs peuvent influencer l'état de la végétation : pratiques agricoles, maladies, élevage... Cette analyse nécessite par conséquent d'être complétée par des données de terrain.

Lors des différents calculs de résilience et de résistance, le NDVI moyen des années considérées comme « non sèches », c'est-à-dire celle où le SPI était positif a été utilisé. Cependant, la moyenne calculée repose uniquement sur ces périodes qui sont minoritaires. Dans cette étude, il s'agissait de 2 à 4 périodes par zone, ce qui peut limiter la fiabilité statistique.

Pour finir, la démarche reste également basée sur de l'interprétation au détriment de tests et de corrélations statistiques complets pouvant peut-être altérer la fiabilité des résultats.

4.3 Des résultats

Les résultats de cette étude représentent une approche assez simple de la dynamique de la végétation face aux sécheresses et aux épisodes climatiques extrêmes dans les deux zones d'étude. Ceux-ci montrent une variabilité importante dans la résilience et dans la résistance de la végétation selon la couverture du sol et les différentes périodes.

Les résultats concernant les tendances climatiques des deux zones sont cohérents avec les observations de terrain lors du stage réalisé sur place. Ils coïncident également avec les propos de Idrissi & Cherai, (2017) sur les variations dans les cycles pluviométriques et l'augmentation des sécheresses prolongées. L'agriculteur Aziz a pu observer une nette diminution des pluies depuis 5 à 6 ans avec un assèchement de la cascade dans la première zone d'étude. Son témoignage coïncide avec la diminution nette des pluies observées depuis 2018.

Cependant, comme décrit précédemment dans la démarche, l'analyse du NDVI comme indicateur principal reste un indicateur simplifié qui ne prend pas en compte toutes les dynamiques de l'écosystème qui sont bien plus complexes.

L'absence d'opportunité de vérification des résultats sur le terrain limite également la possibilité de relier les résultats à des observations sur la dégradation du couvert végétal. Les résultats des analyses des deux zones d'étude qui englobent une petite superficie ne prennent en compte que celles-ci. Les réalités de ces zones sont peut-être différentes des réalités des zones voisines.

Les résultats de cette étude reposent uniquement sur deux indicateurs, ce qui donne l'impression que la résistance et la résilience de la végétation dépendent uniquement du lien entre les précipitations et le NDVI. Néanmoins, d'autres facteurs peuvent influencer la végétation, et il ne faut pas oublier qu'une corrélation ne signifie pas toujours qu'il y a un lien de cause à effet.

Dans la réalisation des graphiques concernant la résilience et la résistance du système entre 2015 et 2025, il est difficile de déterminer quelle était la stabilité du système et si celui-ci tend vraiment vers un nouvel équilibre ou bien seulement vers une dégradation prolongée. Il existe des études comme celle de Wu & Liang, (2020) qui définissent un

état normal comme la moyenne du LAI (Leaf Area Index) mensuel sur une période de 34 ans...

Les résultats ont également montré une amélioration du NDVI à partir de 2023 pour les différentes classes d'occupation du sol. Il serait intéressant d'approfondir ceux-ci pour comprendre à quoi est due cette tendance. Une analyse future permettrait également de déterminer si cette amélioration est temporaire ou s'inscrit dans une dynamique positive sur le long terme.

On observe également dans les résultats que la période janvier-mars présente souvent des valeurs de résistance élevées parfois supérieures à 1. Ces résultats s'expliquent par le fait que les valeurs de référence hors périodes de sécheresse sont souvent faibles pour cette période. Le calcul de la résistance basé sur une moyenne qui est assez réduite se retrouve « faussement » amplifié.

4.4 Perspectives

Face aux aléas climatiques actuels et à venir, auxquels ces zones seront particulièrement exposées, l'adaptation représente un enjeu clé pour les agriculteurs locaux. Malgré le peu de temps passé sur place lors du stage, offrant une vision limitée de toutes les dynamiques et enjeux socio-économiques et environnementaux, plusieurs idées, projets de gestion et pistes d'études futures pourraient être envisagés.

Un premier volet concerne la communication autour des pratiques agricoles et la sensibilisation aux enjeux environnementaux. Durant le stage, le terme agroécologie souvent associé à des pratiques traditionnelles durables a été cité plusieurs fois. Les agriculteurs rencontrés sur place ont évoqué certaines techniques qu'ils utilisent comme le compostage, la rotation des cultures et bien d'autres transmises entre générations. Cependant, sont-ils au courant de toutes les techniques qui existent et seraient-ils prêts à abandonner certaines pratiques au profit d'autres plus modernes ? Dans cette perspective de communication, aller à la rencontre des agriculteurs constitue une étape essentielle pour développer une connaissance fine du territoire, de ses dynamiques et de son fonctionnement. Ce contact permet non seulement de comprendre les réalités historiques, sociales et spatiales qui façonnent l'aménagement local mais aussi de comprendre les trajectoires individuelles et les différentes typologies présentes sur le territoire. Cette approche offre la possibilité d'identifier les habitudes, les modes de production ou de consommation, ainsi que les méthodes d'adaptation de chacun. Ces éléments sont indispensables pour concevoir et mettre en œuvre des outils de gestion et des stratégies d'adaptation réellement adaptés aux besoins et aux contraintes du territoire.

Comme souligné par les deux agriculteurs rencontrés, la diversification des activités pourrait devenir une nécessité face aux aléas climatiques. Le pôle du tourisme est revenu lors des discussions mais certains freins existent comme la difficulté d'accès dans la première zone, la faible connaissance du territoire, la barrière linguistique, le raccordement à l'eau pour la plupart des habitations etc.

La gestion de l'eau est également centrale dans les perspectives. Dans la première zone, un plan de gestion est difficile à mettre en place en raison de la faible disponibilité de la ressource. Cependant la mise en place d'un calendrier d'irrigation plus précis que la technique actuelle utilisée dite « à l'œil » pourrait être pertinent. Le manque de

données quantitatives sur les ressources au Maroc, signalé par une personne rencontrée sur place lors du stage peut freiner la planification. Des subventions existent au Maroc pour le goutte à goutte, dans le cas où celui-ci est applicable. Un calendrier d'irrigation efficace aurait toute son importance surtout dans la première zone d'étude.

Dans les deux zones, la présence de forages non déclarée peut poser la question d'une gestion équitable quant à l'utilisation de la ressource. L'augmentation du nombre de stockages pluviaux alimentés directement par les précipitations plutôt que par pompage souterrain pourrait également renforcer la résilience face aux sécheresses. Selon Aziz, la construction d'un bassin de stockage lui permettrait d'augmenter sa résilience face aux aléas climatiques.

Le manque de disponibilité et d'accessibilité en eau est un problème qui ne fera que s'aggraver dans le futur. Une stratégie pertinente consisterait à remplacer les espèces fortement consommatrices d'eau par d'autres cultures plus résilientes et résistantes à la sécheresse. Le ministère marocain a recommandé des cultures telles que l'olivier, le caroubier, l'amandier, le pistachier, le palmier dattier et bien d'autres (AgriMaroc.ma, 2024). Ces plantes, moins consommatrices d'eau permettraient de maintenir une certaine productivité agricole tout en diminuant les besoins en eau. Une étude de faisabilité concernant l'introduction de ces espèces reste également nécessaire.

Dans la seconde zone, la diminution progressive du couvert arboré peut être liée à l'augmentation de l'érosion des sols qui est un problème mentionné par Mohamed. Cette diminution du couvert arboré accentue l'aridification, réduit le captage de CO₂, fragilise les sols et modifie l'albédo. Pour comprendre ces changements dans le territoire, il est essentiel de voir les plans de gestion forestière et foncière locaux qui existent. Pour pallier à ces problèmes de gestion de l'eau et de l'érosion dans les deux zones d'étude, des solutions existent déjà dans les montagnes marocaines telles que les gabions. Il s'agit de structures en treillis métalliques remplies de pierres et qui apportent une solution simple et peu onéreuse en limitant l'érosion, stabilisant les sols et en améliorant la rétention d'eau. Ils sont généralement placés près des cours d'eau ou près des parcelles agricoles. Ils ralentissent le ruissellement et favorisent l'infiltration.

L'agriculteur rencontré dans la seconde zone d'étude Mohamed nous a également fait part de ses craintes par rapport à la propagation de maladies phytopathogènes. La plupart des agriculteurs sont conscients de l'importance de la rotation des cultures pour pallier aux problèmes de maladies et de fertilité des sols mais l'association des cultures est également importante afin de limiter la propagation des agents pathogènes et d'améliorer la santé des sols et d'attirer des insectes bénéfiques à l'éradication des ravageurs. Par exemple, les cultures de tomates avec celles de basilic permettent de repousser une variété de mouche. Certaines espèces de plantes servent également à éradiquer des vers parasites. Le fenouil, couramment cultivé au Maroc, attire des syrphes qui sont des mouches pollinisateur et des guêpes, utiles contre les pucerons. D'autres associations telles que l'oignon, la carotte et la laitue ou encore le maïs, le haricot et la courge ont montré une réelle complémentarité en termes de limitation de maladies, fertilisation naturelle et protection du sol (Kristian Angelov, 2025). Il existe évidemment une multitude d'autres combinaisons avec des valeurs ajoutées différentes qui pourraient être d'une réelle aide face aux craintes de Mohamed concernant l'apparition de nouvelles maladies.

Les phénomènes climatiques actuels ont également un impact direct sur le pastoralisme en réduisant les zones de pâturages et en accentuant la pression sur les mêmes espaces qui ont du mal à se régénérer. Les communautés locales appelées les Jmaâ pourraient également jouer un rôle essentiel dans la fixation de règles collectives concernant le surpâturage et la gestion des ressources. Une meilleure compréhension de ces structures de gouvernance locales pourrait permettre d'identifier des leviers et des pistes d'actions concrètes pour la gestion de ces ressources. L'objectif dans ces territoires ruraux est de cibler et accompagner les « leaders de changements » dans la transition et l'adaptation.

Dans le but de mieux comprendre ces territoires, plusieurs pistes d'étude pourraient être développées. Il serait utile d'évaluer l'efficacité réelle des aménagements hydrauliques et des pratiques agroécologiques sur des parcelles témoins ou encore de réaliser des cartes d'érosion à l'aide de modèles afin de cibler les zones à risques.

Dans les résultats de l'analyse, la période d'octobre à décembre montre de faibles valeurs de résistance avec un NDVI moyen qui chute pour toutes les classes. Cette période est pourtant déterminante car celle-ci est marquée par le début de pluies après les étés souvent très secs. Il est essentiel pour la croissance de la végétation et

notamment des cultures de pouvoir profiter pleinement des premières pluies. Les semis précoces ont pour objectif d'optimiser l'implantation des céréales, d'obtenir une couverture rapide du sol et de réduire l'évaporation. Si celles-ci sont associées aux résidus des cultures, cela favorise la conservation de l'humidité et limite l'érosion. La rotation des cultures renforce également la fertilité du sol (Mrabet et al., 2012). Ces différentes solutions permettent le bon démarrage végétatif de la période automnale.

L'analyse des corrélations SPI-NDVI met en évidence des tendances différentes entre les deux zones bien que les valeurs de p restent au-dessus du seuil de 0,05 mais très légèrement par moment. La zone 1 semble réagir davantage aux précipitations de la période précédente peut-être en raison d'une meilleure rétention des sols et des températures plus basses qui permettent une meilleure conservation de l'humidité. La zone 2 montre une tendance à réagir aux pluies actuelles. Pour la zone 1, cette observation pourrait montrer une nécessité du captage et du stockage de l'eau et pour la zone 2 l'utilisation de cultures à cycle court et d'une accessibilité et disponibilité directe à l'eau.

La présente étude pourrait également être affinée grâce à des indicateurs plus précis comme le PDSI ou en intégrant la température et l'évapotranspiration par exemple. Le calcul de la résistance et de la résilience sur un jeu de données plus large incluant un plus grand nombre de périodes hors sécheresses permettrait également d'approfondir la recherche.

L'analyse ouvre également d'autres pistes d'étude. La fragmentation plus importante dans le paysage de la seconde zone d'étude est-elle récente ou résulte-t-elle de dynamiques anciennes ? Pourquoi observe-t-on une hausse du NDVI depuis 2023-2024 alors que les précipitations restent faibles ? Malgré une ressource plus abondante dans la zone 2, comment expliquer que le NDVI y soit plus faible ? La capacité de rétention en eau des sols explique-t-elle cette différence NDVI-SPI ? La température et l'altitude jouent-elles un rôle majeur dans cette différence ? Il pourrait être intéressant de tester l'humidité du sol dans ces zones.

Dans ce contexte, la télédétection apparaît également comme un outil essentiel pour approfondir la compréhension des phénomènes climatiques extrêmes et de la fragmentation du paysage. Celle-ci permettrait de suivre l'impact des différents aménagements et décisions dans le temps.

5. CONCLUSION

Dans un contexte où les agriculteurs du Moyen Atlas marocain font face à un climat de plus en plus variable et à un avenir incertain, la compréhension des dynamiques autour de la végétation telles que sa résistance et sa résilience devient essentiel. Cette étude a permis d'évaluer dans deux zones rurales du Moyen Atlas, l'effet des années sèches et pluvieuses sur différents couverts végétaux à l'aide d'indicateurs tels que le NDVI et le SPI. Les résultats montrent une baisse générale de la résistance sur la dernière décennie avec une fragilité assez marquée pour la période octobre-décembre, période clé pour le début de la croissance végétative. La résilience, plus variable selon les années tend également à diminuer surtout pour la période de janvier à mars. Contrairement à l'idée que la seconde zone d'étude, bénéficiant d'une meilleure disponibilité et accessibilité en ressources hydriques, présenterait de meilleurs résultats, les analyses ne montre aucune supériorité nette. Cela souligne que d'autres facteurs, qu'ils soient climatiques ou liés à des contraintes ou des modes de gestion locales peuvent également influencer la vigueur de la végétation.

Ces différents constats montrent que la disponibilité en eau, bien qu'essentielle pour la végétation, n'est pas la seule composante à son bon développement. Ces résultats montrent l'importance pour les agriculteurs de ces zones, de renforcer les pratiques agroécologiques telles que la diversification et la rotation des cultures, l'introduction de cultures à cycle court et l'importance d'un calendrier de semis adapté pour sécuriser la production en début de période. L'utilisation de variétés résistantes à la sécheresse combinée à une optimisation de l'irrigation et à une préservation de l'humidité du sol grâce à des gabions, à un calendrier efficace et des bassins de stockage pluviaux peuvent également devenir des solutions durables pour ces agriculteurs.

Ce travail apporte une meilleure compréhension des dynamiques locales et des différences qui peuvent exister entre deux zones proches géographiquement mais aux caractéristiques très hétérogènes. Il met en évidence l'importance d'identifier les différentes typologies présentes au sein du territoire afin d'avoir une vision globale et de cibler les leviers d'adaptation possibles face aux enjeux climatiques. L'importance de préserver ces lieux souvent considérés comme « château d'eau » du Maroc est devenu un enjeu majeur pour la vie et les activités agricoles locales.

6. BIBLIOGRAPHIE

Abdelali, S., Mohammed, H., Hassan, F., Saloui, A., & Badri, W. (2020). *IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA REGION MONTAGNEUSE DU MOYEN ATLAS AU MAROC.*

AgriMaroc. (2023). *Bilan de l'agriculture marocaine en 2023.*

<https://www.agrimaroc.ma/agriculture-marocaine-en-2023/>

AgriMaroc.ma. (2024, janvier 16). Privilégier les cultures plus résilientes à la sécheresse est une nécessité. AgriMaroc. <https://www.agrimaroc.ma/privilegier-les-cultures-plus-resilientes-a-la-secheresse-est-une-necessite/>

Bijaber, N., & Rochdi, A. (2017). Télédétection spatiale pour l'évaluation du risque de sécheresse au Maroc. *Revue Internationale de Géomatique*, 27(2), 203-221.
<https://doi.org/10.3166/rig.2017.00026>

Bpifrance DIRECTION DE L'EVALUATION DES ETUDES ET DE LA PROSPECTIVE. (2023).
MAROC : *FICHE PAYS – JUIN 2023.* <https://www.bpifrance.fr/download/media-file/74492>

Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S. B., Mazzariello, J., Czerwinski, W., Pasquarella, V. J., Haertel, R., Ilyushchenko, S., Schwehr, K., Weisse, M., Stolle, F., Hanson, C., Guinan, O., Moore, R., & Tait, A. M. (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9(1), 251. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4>

Copernicus Climate Change Service. (2019). *ERA5-Land hourly data from 1950 to present* [Jeu de données]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/CDS.E2161BAC>

Copernicus Programme. (s. d.). *Sentinel-2—Copernicus Data Space Ecosystem*.

Consulté 23 mai 2025, à l'adresse <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2>

De Keersmaecker, W., Lhermitte, S., Tits, L., Honnay, O., Somers, B., & Coppin, P. (2014).

Linking NDVI and climate-based ecosystem stability with land cover in Europe.
2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 3938-3940.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947346>

Dutta, D., Kundu, A., & Patel, N. R. (2013). Predicting agricultural drought in eastern Rajasthan of India using NDVI and standardized precipitation index. *Geocarto International*, 28(3), 192-209. <https://doi.org/10.1080/10106049.2012.679975>

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine : Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Hadi Aziz, Kharmouch Mohamed. (2025, février). *Entretien avec Aziz Hadi et Mohamed Kharmouch* [Communication personnelle].

Hanchane, M. (2025, janvier 16). Le Maroc, une mosaïque de climats. *Encyclopédie de l'Environnement*. <https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/climat-maroc/>

Hossain, M. L., & Li, J. (2021). NDVI-based vegetation dynamics and its resistance and resilience to different intensities of climatic events. *Global Ecology and Conservation*, 30, e01768. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01768>

Idrissi, B., & Cherai, B. (2017). *LA VARIABILITE CLIMATIQUE ET SON INFLUENCE SUR LES RESSOURCES EN EAU DANS LA PARTIE SEPTENTRIONALE DU MOYEN ATLAS MAROCAIN: CAS DES CAUSSES DE SEFROU ET DE L'ANOCEUR*. 32.

Institut Royal des Etudes Stratégiques. (2022). *QUEL AVENIR DE L'EAU AU MAROC ?*

https://wwwiresma/sites/default/files/docs_publications/Avenir_de_leau_au_Maroc-Rapport_de_synthese.pdf

Ji, L., & Peters, A. J. (2003). Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 85-98. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00174-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00174-3)

Jihad, M.-D. E. (2016). Changement climatique et développement rural dans les montagnes du Moyen-Atlas et leurs bordures (Maroc). *Revue de géographie alpine*, 104-4. <https://doi.org/10.4000/rga.3373>

Kristian Angelov. (2025, mai). The Science Behind Companion Planting – How Plant Partnerships Boost Growth. *Garden Insider.*
<https://gardeninsider.org/gardening/food-production/companion-planting-science/>

Lazarev, G. (2005). La gestion participative des terroirs de montagne au Maroc, condition d'une maîtrise de la "production d'eau". *Critique économique*, No 15 (2005).
<https://doi.org/10.48409/IMIST.PRSM/CE-N15.2739>

Lebaut, S., El-Bouhali, A., & Orfi, T. E. (2022). *Les changements d'occupation des sols dans le Moyen Atlas et ses bordures (Maroc), et leurs implications pour la protection de la ressource en eau.*

Liang, M., Cao, R., Di, K., Han, D., & Hu, Z. (2021). Vegetation resistance and resilience to a decade-long dry period in the temperate grasslands in China. *Ecology and Evolution*, 11(15), 10582-10589. <https://doi.org/10.1002/ece3.7866>

Ma, J., Zhang, C., Li, S., Yang, C., Chen, C., & Yun, W. (2023). Changes in Vegetation Resistance and Resilience under Different Drought Disturbances Based on NDVI

and SPEI Time Series Data in Jilin Province, China. *Remote Sensing*, 15(13), 3280.

<https://doi.org/10.3390/rs15133280>

Mrabet, R., Moussadek, R., Fadlaoui, A., & Van Ranst, E. (2012). Conservation agriculture in dry areas of Morocco. *Field Crops Research*, 132, 84-94.

<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.11.017>

Navalgund, R. R., Jayaraman, V., & Roy, P. S. (2007). Remote sensing applications : An overview. *Current Science*, 1747-1766.

Newman, J. E., & Oliver, J. E. (2005). Palmer Index/Palmer Drought Severity Index. In J. E. Oliver (Éd.), *Encyclopedia of World Climatology* (p. 571-573). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-3266-8_159

Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. Chr. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503-510.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>

Pham-Duc, B., Nguyen, H., Phan, H., & Tran-Anh, Q. (2023). Trends and applications of google earth engine in remote sensing and earth science research : A bibliometric analysis using scopus database. *Earth Science Informatics*, 16(3), 2355-2371.
<https://doi.org/10.1007/s12145-023-01035-2>

Richard, D., George-Marcelpoil, E., & Boudières, V. (2010). Changement climatique et développement des territoires de montagne : Quelles connaissances pour quelles pistes d'action ? *Revue de géographie alpine*, 98-4.
<https://doi.org/10.4000/rga.1322>

Runge, K., Tucker, M., Crowther, T. W., Fournier De Laurière, C., Guirado, E., Bialic-Murphy, L., & Berdugo, M. (2025). Monitoring Terrestrial Ecosystem Resilience Using Earth

Observation Data : Identifying Consensus and Limitations Across Metrics. *Global Change Biology*, 31(3), e70115. <https://doi.org/10.1111/gcb.70115>

Sandeep, P., Obi Reddy, G. P., Jegankumar, R., & Arun Kumar, K. C. (2021). Monitoring of agricultural drought in semi-arid ecosystem of Peninsular India through indices derived from time-series CHIRPS and MODIS datasets. *Ecological Indicators*, 121, 107033. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107033>

Szalai, S., & Szinell, Cs. (2000). Comparison of Two Drought Indices for Drought Monitoring in Hungary—A Case Study. In J. V. Vogt & F. Somma (Éds.), *Drought and Drought Mitigation in Europe* (Vol. 14, p. 161-166). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9472-1_12

Tirivarombo, S., Osupile, D., & Eliasson, P. (2018). Drought monitoring and analysis : Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardised Precipitation Index (SPI). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 106, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.07.001>

Velastegui-Montoya, A., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P., Rivera-Torres, H., Sadeck, L., & Adami, M. (2023). Google Earth Engine : A Global Analysis and Future Trends. *Remote Sensing*, 15(14), 3675. <https://doi.org/10.3390/rs15143675>

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Viviroli, D., Archer, D. R., Buytaert, W., Fowler, H. J., Greenwood, G. B., Hamlet, A. F., Huang, Y., Koboltschnig, G., Litaor, M. I., López-Moreno, J. I., Lorentz, S., Schädler, B., Schreier, H., Schwaiger, K., Vuille, M., & Woods, R. (2011). Climate change and

mountain water resources: Overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 471-504.
<https://doi.org/10.5194/hess-15-471-2011>

Woillez, M.-N. (2019). Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc : Observations, projections et impacts: In *Revue de littérature sur le changement climatique au Maroc : Observations, projections et impacts* (p. 1-33). Agence française de développement. <https://doi.org/10.3917/afd.woill.2019.01.0001>

World Meteorological Organization (WMO) & Svoboda, Mark; Hayes, Michael; Wood, Deborah A. (2012). *Standardized Precipitation Index User Guide* (p. 24).

Wu, J., & Liang, S. (2020). Assessing Terrestrial Ecosystem Resilience using Satellite Leaf Area Index. *Remote Sensing*, 12(4), 595. <https://doi.org/10.3390/rs12040595>

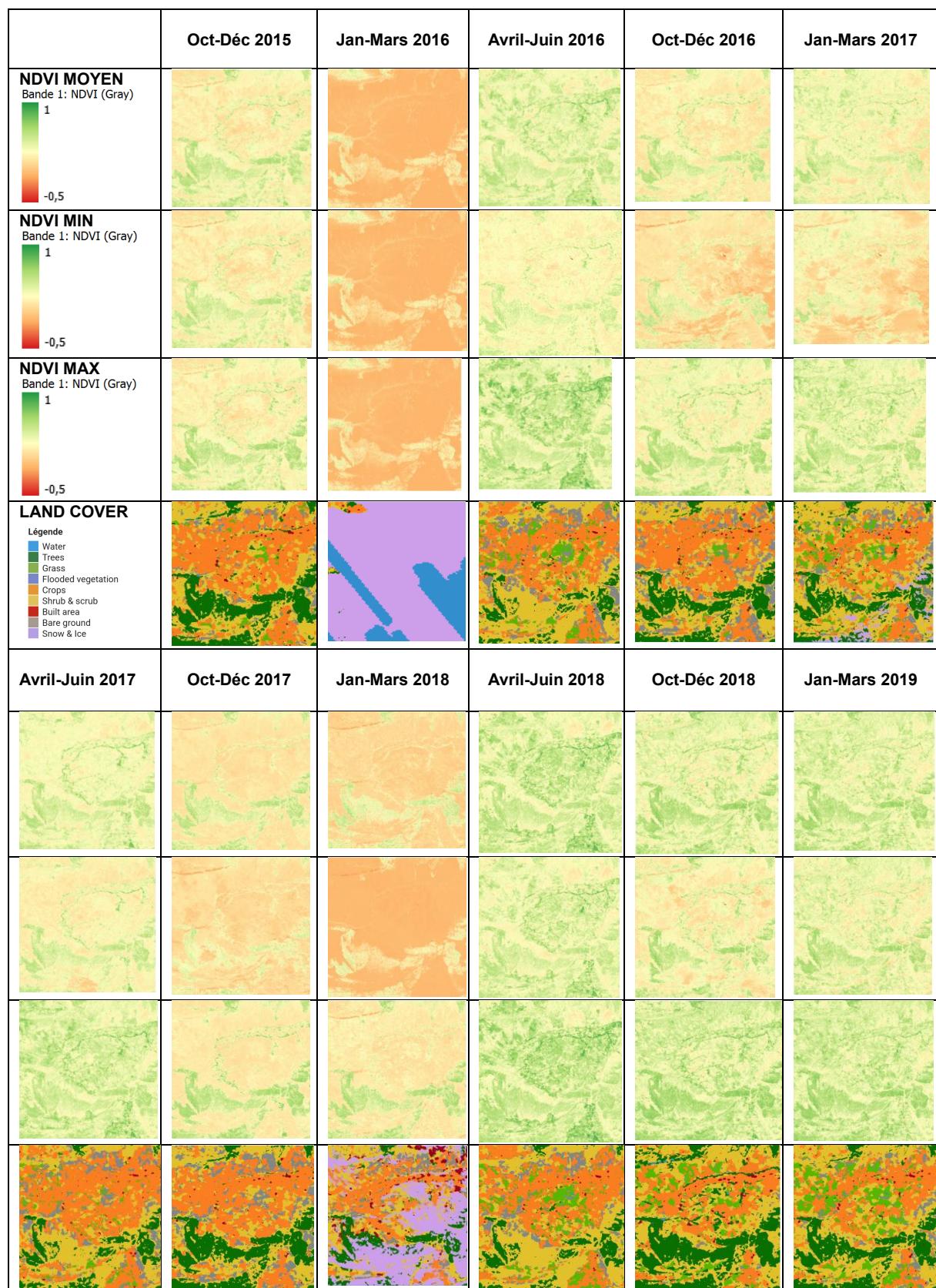
Yao, Y., Liu, Y., Song, J., Tao, S., Li, Y., Wu, T., Wang, Y., Wang, S., & Fu, B. (2024). Declining Tradeoff Between Resistance and Resilience of Ecosystems to Drought. *Earth's Future*, 12(5), e2024EF004665. <https://doi.org/10.1029/2024EF004665>

7. ANNEXES

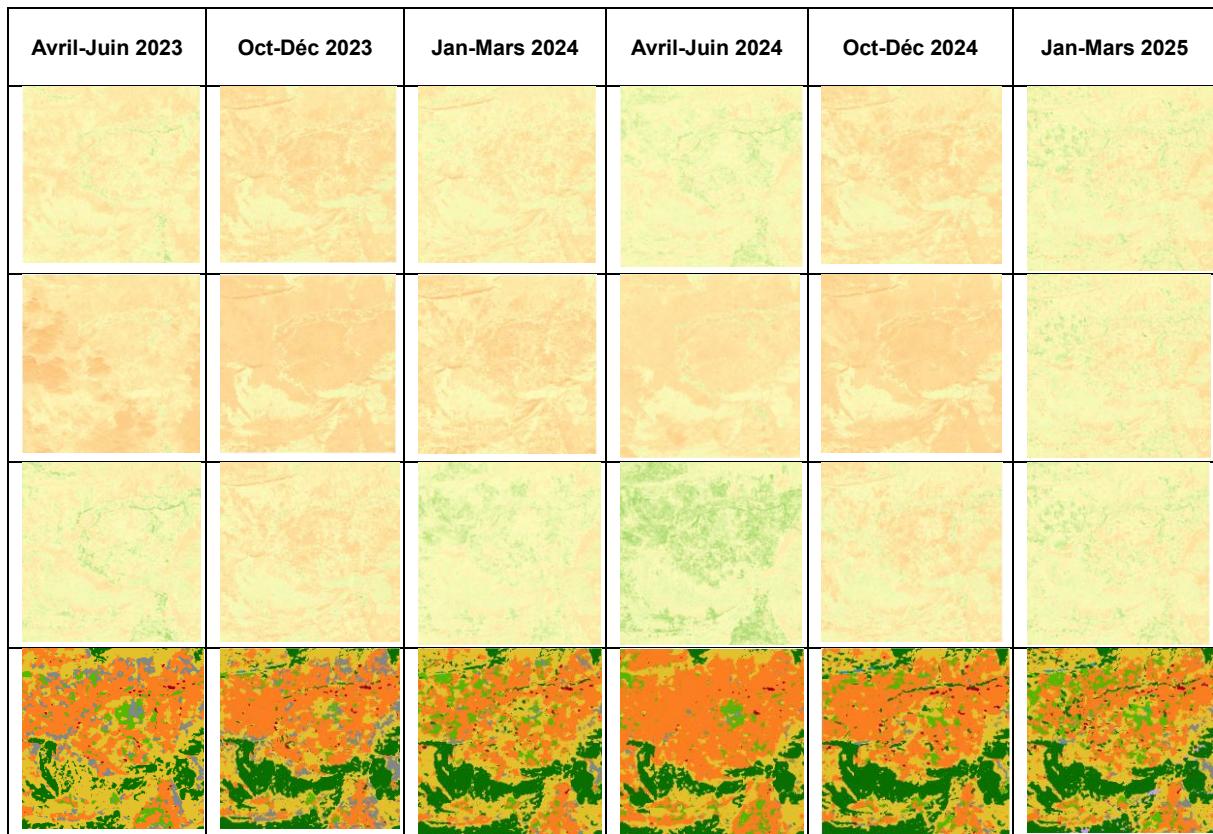
TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Evolution du NDVI moyen, NDVI min, NDVI max et Land Cover période par période dans la première zone d'étude.....	91
Annexe 2 : Evolution du NDVI moyen, NDVI min, NDVI max et Land Cover période par période dans la seconde zone d'étude.....	98
Annexe 3 : Tableau de la résistance et de la résilience des différentes couvertures végétales du sol dans la première zone d'étude.....	105
Annexe 4 : Tableau de la résistance et de la résilience des différentes couvertures végétales du sol dans la seconde zone d'étude.....	117
Annexe 5 : Carte des acteurs du territoire.....	132

Annexe 1 : Evolution du NDVI moyen, NDVI min, NDVI max et Land Cover période par période dans la première zone d'étude







Période Oct-Déc 2015	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.11	0.0524	-0.1695	0.4426
Trees	21.15	0.4034	-0.1488	0.7698
Grass	2.33	0.3102	-0.2030	0.7677
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	38.48	0.2158	-0.0848	0.8289
Shrub & scrub	32.64	0.2250	-0.1399	0.7228
Built area	0.58	0.2463	-0.0844	0.7126
Bare ground	4.7	0.1859	-0.2403	0.4367
Snow & Ice	<0.01	0.1004	0.0599	0.2357

Période Jan-Mars 2016	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	/	/	/	/
Trees	/	/	/	/
Grass	/	/	/	/
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	/	/	/	/
Shrub & scrub	/	/	/	/
Built area	/	/	/	/
Bare ground	/	/	/	/
Snow & Ice	/	/	/	/

Période avril-juin 2016	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.02	0.1203	-0.3655	0.5191
Trees	7.91	0.4673	-0.0342	0.8483
Grass	8.05	0.4450	-0.2310	0.8737
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	33.49	0.3548	-0.1903	0.8666
Shrub & scrub	38.43	0.3202	-0.0960	0.8280
Built area	0.38	0.3362	-0.2136	0.7968
Bare ground	11.71	0.2502	-0.1442	0.7023
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2016	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	<0.01	0.2556	0.0678	0.5054
Trees	17.76	0.4136	-0.2907	0.8160
Grass	1.53	0.2833	-0.4681	0.7902
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	36	0.2102	-0.4723	0.8124
Shrub & scrub	31.51	0.2089	-0.4119	0.7622
Built area	0.5	0.2433	-0.2460	0.7435
Bare ground	12.69	0.1590	-0.4636	0.6174
Snow & Ice	/	/	/	/

Période jan-mars 2017	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.06	0.1173	-0.3932	0.5885
Trees	15.14	0.3969	-0.1195	0.8329
Grass	6.87	0.3562	-0.0840	0.8016
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	25.33	0.2719	-0.1424	0.8325
Shrub & scrub	39.52	0.2609	-0.1967	0.7932
Built area	0.55	0.2406	-0.1591	0.6869
Bare ground	8.78	0.2101	-0.1003	0.6513
Snow & Ice	3.76	0.1954	-0.1384	0.6717

Période avril-juin 2017	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	<0.01	0.2238	-0.0052	0.5122
Trees	9.8	0.4521	-0.3337	0.7741
Grass	3.87	0.3727	-0.3490	0.8137
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	43.1	0.2939	-0.0171	0.8294
Shrub & scrub	32.49	0.2952	-0.3861	0.7865
Built area	0.48	0.3095	-0.0085	0.7576
Bare ground	10.24	0.2323	-0.0960	0.7343
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2017	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.09	0.0522	-0.1736	0.4551
Trees	19.56	0.3885	-0.1853	0.8234
Grass	0.05	0.4631	0.0151	0.7857
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	37.04	0.1541	-0.1714	0.8176
Shrub & scrub	29.55	0.1708	-0.1862	0.7513
Built area	0.44	0.1936	-0.2009	0.8226
Bare ground	13.27	0.1351	-0.1343	0.5852
Snow & Ice	<0.01	0.1309	0.0415	0.2282

Période jan-mars 2018	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	1.83	0.0531	-0.1919	0.5947
Trees	9.7	0.3577	-0.1566	0.7108
Grass	0.36	0.1455	-0.0969	0.6607
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	20.77	0.0913	-0.1368	0.7081
Shrub & scrub	22.32	0.1021	-0.1860	0.6776
Built area	3.81	0.1180	-0.1615	0.6648
Bare ground	7.06	0.0796	-0.1677	0.4254
Snow & Ice	35.96	0.1114	-0.2960	0.7254

Période avril-juin 2018	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.02	0.1604	-0.1723	0.5784
Trees	9.19	0.4825	0.1339	0.8270
Grass	9.26	0.5287	0.0244	0.8567
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	34.75	0.4096	-0.2880	0.8574
Shrub & scrub	37.72	0.3523	-0.0502	0.8044
Built area	0.35	0.3743	0.0114	0.7934
Bare ground	8.71	0.2709	-0.0840	0.6414
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2018	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.24	0.1618	-0.3909	0.6525
Trees	27.63	0.4601	-0.1801	0.8334
Grass	7.76	0.3788	-0.0216	0.8456
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	25.09	0.3113	-0.2272	0.8317
Shrub & scrub	37.1	0.3050	-0.0968	0.8130
Built area	0.89	0.3599	-0.1519	0.8056
Bare ground	1.29	0.2051	-0.1069	0.5148
Snow & Ice	/	/	/	/

Période jan-mars 2019	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	<0.01	0.1055	-0.3791	0.5547
Trees	18.09	0.4918	-0.0937	0.7992
Grass	12.87	0.4278	-0.1168	0.8194
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	25.65	0.3303	-0.1639	0.8303
Shrub & scrub	36.79	0.3268	-0.0908	0.8169
Built area	0.63	0.3594	-0.1398	0.7986
Bare ground	5.94	0.2656	-0.1485	0.6003
Snow & Ice	0.2	0.1349	-0.0269	0.3107

Période avril-juin 2019	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	<0.01	0.2228	-0.0676	0.4489
Trees	10.96	0.4868	0.1442	0.8241
Grass	10.93	0.4476	0.0612	0.8736
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	41.27	0.3625	0.0093	0.8736
Shrub & scrub	33.67	0.3281	-0.0222	0.8333
Built area	0.3	0.3739	0.0431	0.8505
Bare ground	2.86	0.2544	-0.0459	0.7368
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2019	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.20	0.0880	-0.3913	0.4059
Trees	21.63	0.4156	-0.1584	0.7812
Grass	3.58	0.2473	-0.0267	0.7865
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	34.85	0.2004	-0.4423	0.8066
Shrub & scrub	34.07	0.1975	-0.1567	0.7173
Built area	0.57	0.2295	-0.0889	0.7202
Bare ground	5.08	0.1545	-0.1283	0.6012
Snow & Ice	0.21	0.1727	-0.1264	0.4858

Période jan-mars 2020	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.05	0.0650	-0.3075	0.5127
Trees	18.98	0.3870	-0.1229	0.7888
Grass	6.9	0.2860	-0.0678	0.8091
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	35.63	0.2218	-0.0812	0.8041
Shrub & scrub	32.00	0.2121	-0.1318	0.7532
Built area	0.91	0.2325	-0.0987	0.7083
Bare ground	5.20	0.1634	-0.0911	0.5272
Snow & Ice	0.34	0.1258	-0.1601	0.5900

Période avril-juin 2020	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.01	0.2489	0.0807	0.5417
Trees	9.92	0.4776	0.1244	0.8209
Grass	19.19	0.5064	0.1205	0.8700
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	29.82	0.4232	-0.006	0.8660
Shrub & scrub	37.13	0.3495	0.0467	0.8355
Built area	0.37	0.4068	0.0244	0.8236
Bare ground	3.57	0.2625	0.0166	0.6485
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2020	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.12	0.0553	-0.1065	0.3866
Trees	20.72	0.3501	-0.1147	0.8304
Grass	1.9	0.1804	-0.0515	0.7342
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	37.92	0.1611	-0.1016	0.8258
Shrub & scrub	30.95	0.1633	-0.1193	0.8020
Built area	0.48	0.1967	-0.1399	0.67
Bare ground	7.92	0.1331	-0.0625	0.4614
Snow & Ice	/	/	/	/

Période jan-mars 2021	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.07	0.0879	-0.4255	0.4953
Trees	19.77	0.3391	-0.2248	0.7983
Grass	9.05	0.2446	-0.1779	0.74
Flooded vegetation	0.01	0.1047	-0.0549	0.2788
Crops	28.67	0.1966	-0.1803	0.7439
Shrub & scrub	33.05	0.1935	-0.2719	0.7401
Built area	1.44	0.2042	-0.1222	0.6814
Bare ground	2.75	0.1514	-0.2180	0.4590
Snow & Ice	5.17	0.1717	-0.2047	0.6659

Période avril-juin 2021	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.01	0.2771	0.0716	0.4387
Trees	13.03	0.46	-0.3349	0.7886
Grass	7.14	0.4099	-0.1684	0.8661
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	47.55	0.3287	-0.3170	0.8668
Shrub & scrub	29.1	0.3078	-0.3970	0.8218
Built area	0.35	0.3144	-0.1503	0.8074
Bare ground	2.83	0.2496	-0.2993	0.7853
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2021	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.06	0.0547	-0.2105	0.3630
Trees	20.09	0.3353	-0.1908	0.7856
Grass	0.01	0.3626	-0.0048	0.7026
Flooded vegetation	<0.01	0.1127	0.0765	0.1624
Crops	38.48	0.1152	-0.1199	0.7962
Shrub & scrub	26.59	0.1315	-0.2311	0.6861
Built area	0.36	0.1353	-0.0787	0.6799
Bare ground	14.38	0.0987	-0.2288	0.3979
Snow & Ice	<0.01	0.0827	-0.0837	0.1954

Période jan-mars 2022	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.09	0.0167	-0.1560	0.4656
Tree	20.31	0.3367	-0.1471	0.7327
Grass	4.41	0.2148	0.0362	0.6499
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	39.93	0.1669	-0.0746	0.7949
Shrub & scrub	30.47	0.1682	-0.1901	0.7323
Built area	0.62	0.1819	-0.0888	0.5454
Bare ground	4.16	0.1352	-0.1133	0.4572
Snow & Ice	<0.01	0.0843	0.0096	0.2328

Période avril-juin 2022	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	/	/	/	/
Trees	12.63	0.2646	0.0038	0.5093
Grass	7.78	0.3044	0.0373	0.6039
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	45.37	0.2456	0.0045	0.61
Shrub & scrub	28.91	0.2102	-0.0301	0.5704
Built area	0.28	0.4428	0.0422	0.5212
Bare ground	5.04	0.1776	0.0385	0.4428
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2022	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.24	0.0221	-0.2498	0.2326
Trees	19.69	0.1631	-0.1680	0.6196
Grass	0.08	0.1402	-0.0981	0.4408
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	29.35	0.0912	-0.2607	0.5994
Shrub & scrub	32.61	0.0986	-0.1843	0.5285
Built area	0.5	0.1	-0.1086	0.5155
Bare ground	17.53	0.0811	-0.2056	0.3287
Snow & Ice	0.01	0.0586	-0.0105	0.1479

Période jan-mars 2023	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.18	0.0917	-0.2324	0.2985
Trees	19.48	0.2191	-0.0365	0.5841
Grass	2.65	0.2445	0.0207	0.5574
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	26.32	0.1820	-0.1105	0.5956
Shrub & scrub	40.23	0.1687	-0.0381	0.6178
Built area	0.58	0.1846	-0.0755	0.5776
Bare ground	10.55	0.1436	-0.0330	0.5293
Snow & Ice	0.01	0.0564	0.0033	0.1662

Période avril-juin 2023	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.02	0.1623	-0.0079	0.2704
Trees	10.93	0.2403	-0.2229	0.6280
Grass	5.66	0.2658	-0.1582	0.6452
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	35.29	0.2127	-0.3111	0.6494
Shrub & scrub	38.55	0.1903	-0.3530	0.6088
Built area	0.48	0.2164	-0.0682	0.5736
Bare ground	9.08	0.1570	-0.2968	0.4865
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2023	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.13	0.0325	-0.0259	0.2347
Trees	20.58	0.2244	-0.0315	0.6381
Grass	2.03	0.1871	0.0229	0.4325
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	36.45	0.1409	-0.0340	0.6190
Shrub & scrub	31.32	0.1457	-0.0293	0.5627
Built area	0.56	0.1553	-0.2092	0.5753
Bare ground	8.93	0.1230	-0.0264	0.4852
Snow & Ice	0.01	0.0597	0.0196	0.1334

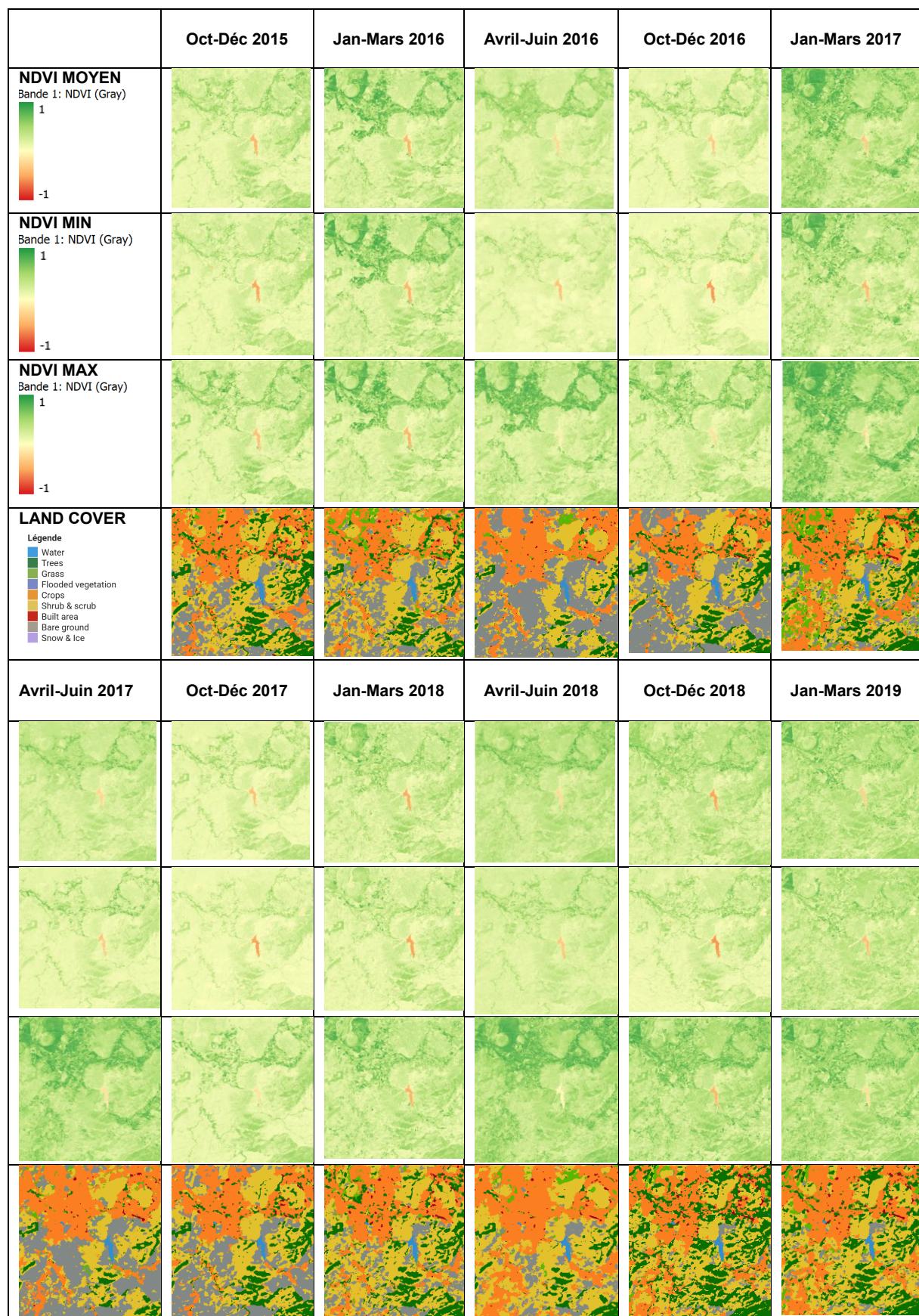
Période jan-mars 2024	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.03	0.0670	-0.0303	0.2714
Tree	21.35	0.2282	-0.0296	0.5858
Grass	7.15	0.2422	0.0031	0.5765
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	29.97	0.2014	-0.0569	0.5996
Shrub & scrub	37.96	0.1859	-0.0678	0.6021
Built area	0.58	0.2063	-0.1	0.5764
Bare ground	2.96	0.1495	-0.0286	0.4222
Snow & Ice	/	/	/	/

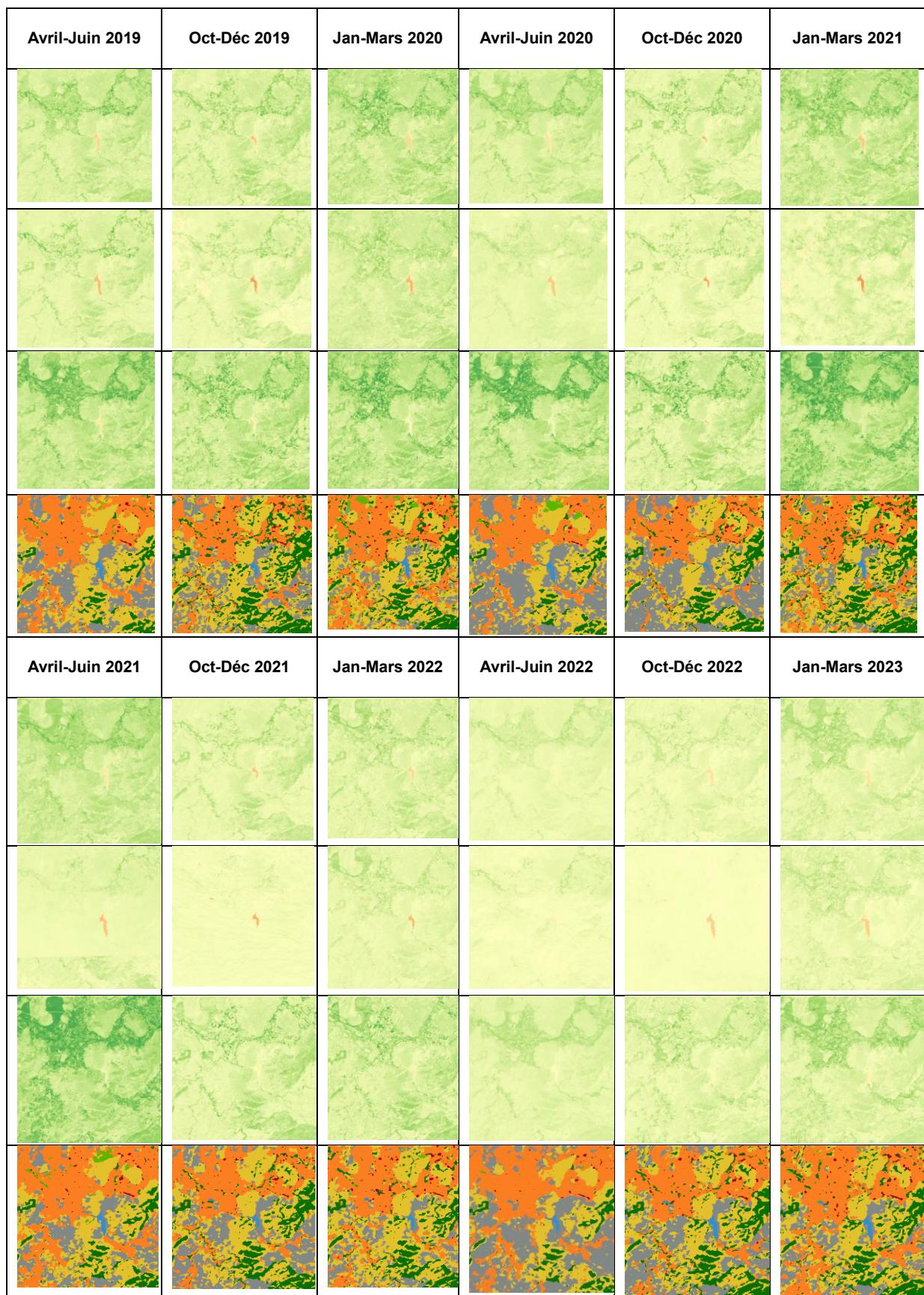
Période avril-juin 2024	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.01	0.1048	-0.1068	0.2547
Trees	15	0.2683	-0.0263	0.5912
Grass	5.43	0.3143	-0.0197	0.6602
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	54.32	0.2715	-0.1	0.6745
Shrub & scrub	23.82	0.2235	0.0041	0.6671
Built area	0.29	0.2559	0.0261	0.6377
Bare ground	1.14	0.2003	0.0037	0.6279
Snow & Ice	/	/	/	/

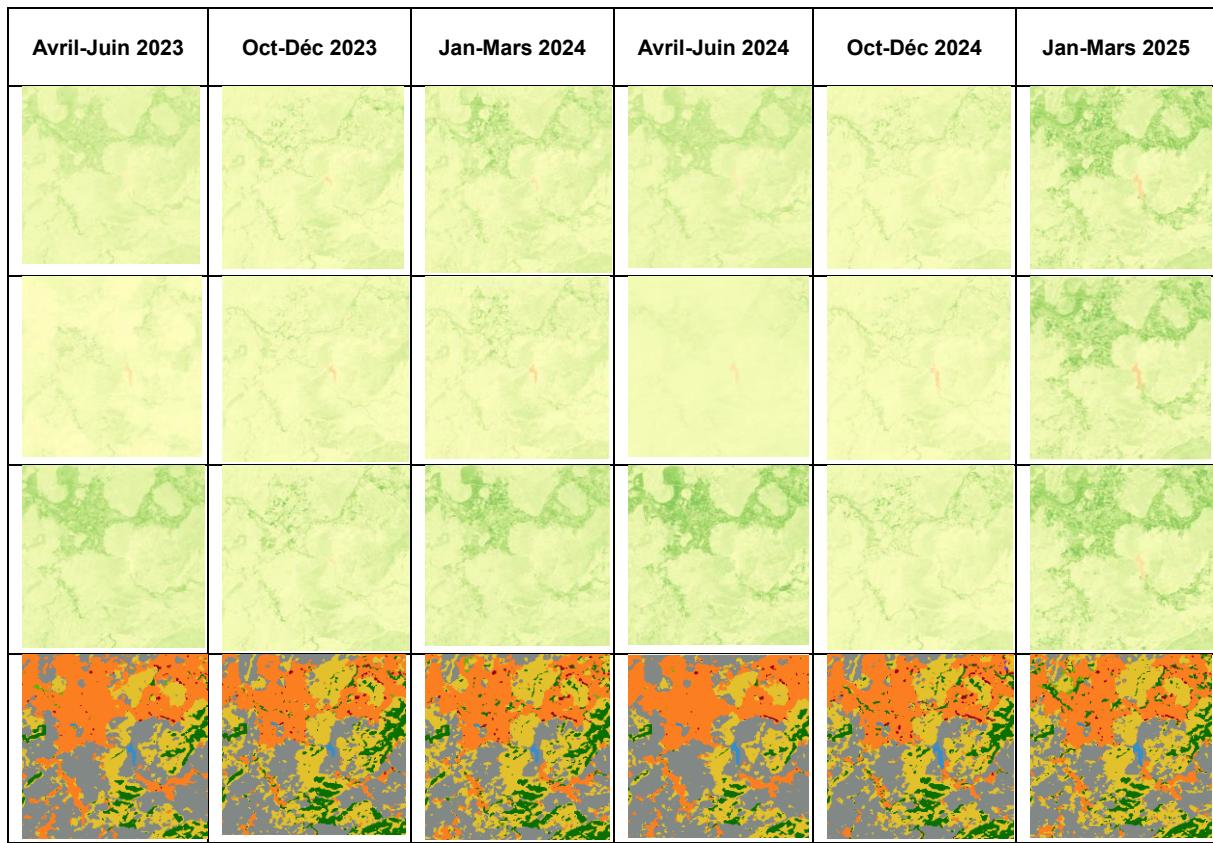
Période oct-déc 2024	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.24	0.0824	-0.0169	0.2979
Trees	24.57	0.2180	-0.0175	0.5919
Grass	5.24	0.1887	0.0293	0.5353
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	38.18	0.1532	-0.0533	0.5784
Shrub & scrub	29.59	0.1486	-0.0216	0.5457
Built area	0.75	0.1701	-0.0995	0.5285
Bare ground	1.42	0.1068	-0.0127	0.3636
Snow & Ice	/	/	/	/

Période jan-mars 2025	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.24	0.1667	-0.1816	0.3672
Trees	21.7	0.2694	-0.0247	0.6094
Grass	9.2	0.2911	0.0046	0.6444
Flooded vegetation	<0.01	0.1777	0.1143	0.2460
Crops	28.25	0.2461	-0.0891	0.6321
Shrub & scrub	36.64	0.2272	-0.0667	0.6305
Built area	0.67	0.2447	-0.0232	0.6095
Bare ground	2.55	0.1647	-0.0437	0.4527
Snow & Ice	0.76	0.1834	-0.0444	0.3642

Annexe 2 : Evolution du NDVI moyen, NDVI min, NDVI max et Land Cover période par période dans la seconde zone d'étude







Période oct-déc 2015	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.58	-0.2303	-0.5322	0.7661
Trees	17.12	0.3965	-0.2028	0.8228
Grass	0.81	0.2981	0.0658	0.7871
Flooded vegetation	0.03	0.2317	-0.0041	0.7612
Crops	27.21	0.2251	-0.0902	0.8471
Shrub & scrub	36.94	0.1824	-0.1755	0.7384
Built area	0.71	0.2607	-0.0956	0.7902
Bare ground	16.61	0.0944	-0.1778	0.5310
Snow & Ice	/	/	/	/

Période jan-mars 2016	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.61	-0.2075	-0.4775	0.7672
Trees	12.55	0.4481	-0.0732	0.8438
Grass	4.38	0.4880	-0.0091	0.8641
Flooded vegetation	0.02	0.3211	0.0871	0.5732
Crops	23.65	0.4227	-0.1184	0.8704
Shrub & scrub	38	0.2370	-0.1609	0.7628
Built area	0.56	0.3126	-0.0460	0.7883
Bare ground	20.23	0.1455	-0.1554	0.5658
Snow & Ice	<0.01	0.0653	-0.0183	0.2434

Période avril-juin 2016	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.51	-0.0996	-0.3833	0.7643
Trees	5.27	0.3655	-0.1835	0.8360
Grass	1.57	0.3721	-0.0258	0.8458
Flooded vegetation	<0.01	0.2473	0.0331	0.4128
Crops	27.69	0.3483	-0.2856	0.8563
Shrub & scrub	26.39	0.2271	-0.2089	0.8048
Built area	0.44	0.2903	-0.0049	0.8242
Bare ground	38.12	0.1515	-0.1804	0.7599
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2016	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.52	-0.1571	-0.5819	0.7214
Trees	13.12	0.3525	-0.2244	0.8257
Grass	0.02	0.4116	-0.0566	0.6830
Flooded vegetation	0.02	0.2987	-0.4077	0.8315
Crops	19.91	0.2282	-0.1929	0.8485
Shrub & scrub	31.61	0.1631	-0.2337	0.8136
Built area	0.37	0.2395	-0.0896	0.8096
Bare ground	34.43	0.0919	-0.4499	0.7947
Snow & Ice	/	/	/	/

Période jan-mars 2017	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.6	-0.0848	-0.4444	0.7751
Trees	17	0.4498	-0.0946	0.8652
Grass	9.7	0.4886	0.0331	0.8837
Flooded vegetation	0.03	0.3537	-0.1681	0.7598
Crops	32.42	0.4972	-0.0968	0.8829
Shrub & scrub	32.56	0.3055	-0.0726	0.8540
Built area	0.73	0.4044	-0.0597	0.8507
Bare ground	6.96	0.1901	-0.0803	0.6829
Snow & Ice	/	/	/	/

Période avril-juin 2017	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.5	-0.1111	-0.3975	0.6913
Trees	6.06	0.3942	0.0381	0.8100
Grass	2.21	0.2907	0.0378	0.8261
Flooded vegetation	<0.01	0.3387	0.2783	0.4277
Crops	30.57	0.3356	-0.2117	0.8486
Shrub & scrub	27.98	0.2511	-0.0523	0.8259
Built area	0.56	0.3068	-0.0382	0.8093
Bare ground	32.11	0.1776	-0.1274	0.8148
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2017	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.46	-0.2173	-0.5589	0.4972
Trees	13.56	0.3446	-0.1973	0.8239
Grass	0.01	0.3477	0.0574	0.7113
Flooded vegetation	<0.01	0.2882	0.0637	0.6179
Crops	24.3	0.1899	-0.3223	0.8404
Shrub & scrub	33.59	0.1589	-0.2542	0.7492
Built area	0.45	0.2234	-0.0874	0.7579
Bare ground	27.63	0.0847	-0.5003	0.5816
Snow & Ice	/	/	/	/

Période jan-mars 2018	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.6	-0.2540	-0.5564	0.7368
Trees	17.3	0.3800	-0.2319	0.8271
Grass	2.04	0.3853	-0.0852	0.8407
Flooded vegetation	0.03	0.2467	-0.2096	0.5517
Crops	25.67	0.3261	-0.2312	0.8429
Shrub & scrub	40.63	0.2227	-0.1978	0.7935
Built area	0.85	0.2786	-0.0673	0.7824
Bare ground	12.88	0.1244	-0.2348	0.7051
Snow & Ice	/	/	/	/

Période avril-juin 2018	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.53	-0.0670	-0.4373	0.6971
Trees	8.15	0.4286	-0.0297	0.8410
Grass	2.69	0.4467	0.0777	0.8501
Flooded vegetation	<0.01	0.3805	0.1929	0.5387
Crops	36.77	0.3917	-0.1053	0.8478
Shrub & scrub	40.91	0.2903	-0.0831	0.8088
Built area	0.62	0.3497	0.0128	0.8209
Bare ground	10.33	0.1888	-0.0249	0.6256
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2018	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.59	-0.2413	-0.5911	0.7206
Trees	30.53	0.3892	-0.2134	0.8521
Grass	1.81	0.3553	-0.0830	0.8531
Flooded vegetation	<0.01	0.2551	-0.1095	0.6426
Crops	25.95	0.3083	-0.1682	0.8553
Shrub & scrub	36.04	0.2407	-0.2041	0.8490
Built area	0.88	0.3624	-0.0783	0.8128
Bare ground	4.2	0.1335	-0.1399	0.8375
Snow & Ice	/	/	/	/

Période jan-mars 2019	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.55	-0.0894	-0.4435	0.7399
Trees	20.91	0.4360	-0.1589	0.8457
Grass	3.47	0.4378	-0.1011	0.8475
Flooded vegetation	<0.01	0.2515	-0.1307	0.5899
Crops	31.95	0.4060	-0.1308	0.8486
Shrub & scrub	37.79	0.3052	-0.1402	0.8116
Built area	1.02	0.3939	-0.0830	0.8323
Bare ground	4.3	0.1836	-0.0957	0.7691
Snow & Ice	/	/	/	/

Période avril-juin 2019	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.41	-0.1395	-0.4374	0.6917
Trees	6.41	0.3803	0.0387	0.8374
Grass	0.51	0.5015	0.0936	0.8481
Flooded vegetation	<0.01	0.3883	0.1253	0.6434
Crops	35.12	0.2982	-0.2398	0.8531
Shrub & scrub	33.81	0.2261	-0.0482	0.8384
Built area	0.5	0.3047	-0.0131	0.8
Bare ground	23.23	0.1493	-0.4659	0.7114
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2019	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.3	-0.1329	-0.5624	0.5237
Trees	18.99	0.3259	-0.1575	0.8271
Grass	0.18	0.2898	0.0189	0.8217
Flooded vegetation	0.03	0.1671	0.0329	0.5275
Crops	26.07	0.2124	-0.3076	0.8427
Shrub & scrub	37.32	0.1723	-0.1349	0.8163
Built area	0.65	0.2390	-0.0495	0.8041
Bare ground	14.47	0.1130	-0.4262	0.7747
Snow & Ice	/	/	/	/

Période jan-mars 2020	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.48	-0.0813	-0.3466	0.6735
Trees	16.42	0.3832	-0.1499	0.8738
Grass	2.43	0.3494	-0.1623	0.8492
Flooded vegetation	0.01	0.3113	0.1709	0.4332
Crops	34.26	0.3606	-0.1193	0.8799
Shrub & scrub	37.78	0.2550	-0.1098	0.8243
Built area	0.94	0.3408	-0.0558	0.8177
Bare ground	7.69	0.1652	-0.2064	0.7547
Snow & Ice	/	/	/	/

Période avril-juin 2020	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.48	-0.0777	-0.4021	0.7732
Trees	6.02	0.3798	0.0690	0.8192
Grass	1.5	0.3597	0.0816	0.8587
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	30.52	0.3447	-0.2486	0.8748
Shrub & scrub	29.07	0.2353	-0.0067	0.8166
Built area	0.43	0.3090	-0.0080	0.8412
Bare ground	31.99	0.1602	-0.1258	0.7733
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2020	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.14	-0.2174	-0.5318	0.5330
Trees	12.69	0.3388	-0.1616	0.8330
Grass	0.01	0.4732	0.1884	0.7250
Flooded vegetation	0.01	0.1261	0.0092	0.5155
Crops	23.86	0.2057	-0.3134	0.8589
Shrub & scrub	31.58	0.1603	-0.2253	0.7625
Built area	0.57	0.2183	-0.0646	0.7684
Bare ground	31.14	0.0862	-0.4082	0.7229
Snow & Ice	/	/	/	/

Période jan-mars 2021	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.43	-0.1371	-0.5880	0.6731
Trees	19.91	0.3683	-0.1829	0.8555
Grass	1.5	0.3855	-0.0086	0.8552
Flooded vegetation	0.01	0.2478	-0.1157	0.5111
Crops	31.25	0.3586	-0.2246	0.8615
Shrub & scrub	36.05	0.2405	-0.1994	0.7955
Built area	0.94	0.3325	-0.0816	0.8385
Bare ground	9.9	0.1532	-0.2808	0.6520
Snow & Ice	/	/	/	/

Période avril-juin 2021	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.48	-0.0581	-0.3815	0.7331
Trees	7.13	0.3653	-0.1739	0.8293
Grass	1.68	0.3855	0.0069	0.8616
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	39.67	0.3266	-0.3490	0.8651
Shrub & scrub	31.39	0.2370	-0.31	0.8532
Built area	0.6	0.3130	-0.0391	0.8368
Bare ground	19.05	0.1661	-0.4465	0.7923
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2021	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.26	-0.1904	-0.4875	0.5024
Trees	13.23	0.2820	-0.2491	0.7964
Grass	0.01	0.3850	0.0346	0.6427
Flooded vegetation	0.01	0.1862	-0.0993	0.5505
Crops	28.57	0.1557	-0.4186	0.8412
Shrub & scrub	35.04	0.1399	-0.2335	0.7246
Built area	0.44	0.1841	-0.0671	0.7367
Bare ground	22.44	0.0843	-0.3955	0.6180
Snow & Ice	/	/	/	/

Période jan-mars 2022	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.31	-0.1266	-0.4819	0.4310
Trees	14.22	0.2688	-0.2325	0.8214
Grass	0.38	0.2311	0.0268	0.8089
Flooded vegetation	0.01	0.1937	0.0527	0.3782
Crops	30.13	0.2211	-0.2412	0.8479
Shrub & scrub	40.3	0.1603	-0.2	0.7620
Built area	0.97	0.2067	-0.0824	0.8011
Bare ground	13.68	0.1021	-0.2	0.4864
Snow & Ice	/	/	/	/

Période avril-juin 2022	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.32	-0.0154	-0.1473	0.2554
Trees	5.71	0.1504	-0.1229	0.5487
Grass	0.17	0.2370	0.0023	0.5378
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	36.64	0.1516	-0.1463	0.5712
Shrub & scrub	24.81	0.1090	-0.1136	0.5029
Built area	0.35	0.1618	-0.0365	0.4827
Bare ground	31.99	0.0752	-0.1137	0.4450
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2022	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.52	-0.0850	-0.2722	0.4124
Trees	15.32	0.1543	-0.0836	0.6208
Grass	0.03	0.2359	-0.0001	0.6097
Flooded vegetation	<0.01	0.0817	0.0036	0.1813
Crops	28	0.1344	-0.1910	0.6374
Shrub & scrub	33.95	0.0962	-0.2048	0.5720
Built area	0.7	0.1325	-0.0602	0.5988
Bare ground	21.48	0.0604	-0.2397	0.5251
Snow & Ice	/	/	/	/

Période jan-mars 2023	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.55	-0.0502	-0.3006	0.5654
Trees	14.95	0.2049	-0.0878	0.6494
Grass	0.52	0.3107	-0.0147	0.6395
Flooded vegetation	0.01	0.2260	0.0037	0.5427
Crops	36	0.2410	-0.1465	0.666
Shrub & scrub	33.46	0.1365	-0.1407	0.6025
Built area	0.97	0.2087	-0.0297	0.6236
Bare ground	13.54	0.0867	-0.2293	0.4855
Snow & Ice	/	/	/	/

Période avril-juin 2023	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.32	-0.0353	-0.1955	0.3501
Trees	5.88	0.1714	-0.0934	0.6085
Grass	0.24	0.2715	-0.1221	0.5805
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	32.73	0.1918	-0.1392	0.6440
Shrub & scrub	22.8	0.1178	-0.1417	0.5267
Built area	0.52	0.1641	-0.0676	0.5534
Bare ground	37.51	0.0780	-0.1626	0.4625
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2023	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.23	-0.0726	-0.2264	0.2822
Trees	10.72	0.1668	-0.0578	0.6145
Grass	0.04	0.2255	0.0474	0.6032
Flooded vegetation	<0.01	0.0657	0.0128	0.2171
Crops	20.71	0.1125	-0.0877	0.6424
Shrub & scrub	30.79	0.0939	-0.0714	0.5904
Built area	0.63	0.1309	-0.0386	0.5417
Bare ground	32.88	0.0512	-0.1905	0.4074
Snow & Ice	/	/	/	/

Période jan-mars 2024	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.29	-0.0630	-0.2506	0.3208
Trees	11.16	0.1716	-0.0497	0.6275
Grass	0.19	0.2092	0.0281	0.6147
Flooded vegetation	<0.01	0.1915	-0.0402	0.3549
Crops	26.72	0.1881	-0.0765	0.6444
Shrub & scrub	33.1	0.1094	-0.1102	0.5461
Built area	0.78	0.1587	-0.0786	0.5827
Bare ground	27.75	0.0627	-0.2345	0.4886
Snow & Ice	/	/	/	/

Période avril-juin 2024	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.33	-0.0433	-0.1592	0.3834
Trees	4.47	0.1746	-0.0046	0.5958
Grass	0.07	0.3268	0.0551	0.6581
Flooded vegetation	/	/	/	/
Crops	31.15	0.2132	-0.0605	0.6664
Shrub & scrub	22.11	0.1271	-0.0033	0.5837
Built area	0.44	0.1792	-0.0112	0.6195
Bare ground	41.44	0.0827	-0.1265	0.5935
Snow & Ice	/	/	/	/

Période oct-déc 2024	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.43	-0.0242	-0.2482	0.2507
Trees	10.3	0.1439	-0.0459	0.5738
Grass	0.04	0.2373	0.0356	0.5453
Flooded vegetation	0.09	0.1079	0.0125	0.3822
Crops	25.75	0.1071	-0.1108	0.6036
Shrub & scrub	30.06	0.0828	-0.1024	0.5382
Built area	1.06	0.1217	-0.0484	0.4878
Bare ground	32.27	0.0437	-0.2044	0.5034
Snow & Ice	/	/	/	/

Période jan-mars 2025	Surface %	NDVI MEAN	NDVI MIN	NDVI MAX
Water	0.44	-0.125	-0.2693	0.5073
Trees	9.56	0.2392	-0.2426	0.6462
Grass	0.71	0.3885	0.0097	0.6592
Flooded vegetation	<0.01	0.2268	0.1124	0.3725
Crops	26.42	0.3211	-0.2536	0.6605
Shrub & scrub	33.19	0.1491	-0.1379	0.6434
Built area	0.61	0.2550	0.0040	0.6431
Bare ground	29.07	0.0927	-0.2350	0.6157
Snow & Ice	/	/	/	/

Annexe 3 : Tableau de la résistance et de la résilience des différentes couvertures végétales du sol dans la première zone d'étude

Les arbres

Période	Année	NDVI	SPI	Secheresse	Resilience	NDVI min	Saison	Resistance	jan-mars
Oct-Dec 2015	2015	0,4034	-1,56	Secheresse		-0,1488	Oct-Dec	0,923429	0,3445
Jan-Mar 2016	2016		-0,5	Secheresse			Jan-Mar		
Apr-Jun 2016	2016	0,4673	-0,37	Secheresse		-0,0342	Apr-Jun	0,964201	
Oct-Dec 2016	2016	0,4136	1,48	Non	0,946778	-0,2907	Oct-Dec		oct-dec
Jan-Mar 2017	2017	0,3969	-0,66	Secheresse		-0,1195	Jan-Mar	1,152104	0,43685
Apr-Jun 2017	2017	0,4521	-0,25	Secheresse		-0,3337	Apr-Jun	0,932838	
Oct-Dec 2017	2017	0,3885	-1,28	Secheresse		-0,1853	Oct-Dec	0,889321	
Jan-Mar 2018	2018	0,3577	2,33	Non	1,038316	-0,1566	Jan-Mar		apr juin
Apr-Jun 2018	2018	0,4825	0,66	Non	0,995564	0,1339	Apr-Jun		0,48465
Oct-Dec 2018	2018	0,4601	0,89	Non	1,053222	-0,1801	Oct-Dec		
Jan-Mar 2019	2019	0,4918	-0,27	Secheresse		-0,0937	Jan-Mar	1,427576	
Apr-Jun 2019	2019	0,4868	0,28	Non	1,004436	0,1442	Apr-Jun		
Oct-Dec 2019	2019	0,4156	-0,84	Secheresse		-0,1584	Oct-Dec	0,951356	
Jan-Mar 2020	2020	0,387	-0,41	Secheresse		-0,1229	Jan-Mar	1,123367	
Apr-Jun 2020	2020	0,4776	-0,15	Secheresse		0,1244	Apr-Jun	0,985453	
Oct-Dec 2020	2020	0,3501	-0,26	Secheresse		-0,1147	Oct-Dec	0,801419	
Jan-Mar 2021	2021	0,3391	0,64	Non	0,984325	-0,2248	Jan-Mar		
Apr-Jun 2021	2021	0,46	-0,39	Secheresse		-0,3349	Apr-Jun	0,949139	
Oct-Dec 2021	2021	0,3353	-0,54	Secheresse		-0,1908	Oct-Dec	0,76754	
Jan-Mar 2022	2022	0,3367	0,42	Non	0,977358	-0,1471	Jan-Mar		
Apr-Jun 2022	2022	0,2646	-0,13	Secheresse		0,0038	Apr-Jun	0,545961	
Oct-Dec 2022	2022	0,1631	-0,73	Secheresse		-0,168	Oct-Dec	0,373355	
Jan-Mar 2023	2023	0,2191	-0,18	Secheresse		-0,0365	Jan-Mar	0,635994	
Apr-Jun 2023	2023	0,2403	-0,12	Secheresse		-0,2229	Apr-Jun	0,495822	
Oct-Dec 2023	2023	0,2244	-1,25	Secheresse		-0,0315	Oct-Dec	0,513677	
Jan-Mar 2024	2024	0,2282	-0,1	Secheresse		-0,0296	Jan-Mar	0,662409	
Apr-Jun 2024	2024	0,2683	-0,99	Secheresse		-0,0263	Apr-Jun	0,553595	
Oct-Dec 2024	2024	0,218	-0,55	Secheresse		-0,0175	Oct-Dec	0,499027	
Jan-Mar 2025	2025	0,2694	-0,77	Secheresse		-0,0247	Jan-Mar	0,782003	
Apr-Jun 2025	2025	0,3435	-0,45	Secheresse		-0,1978	Apr-Jun	0,708759	

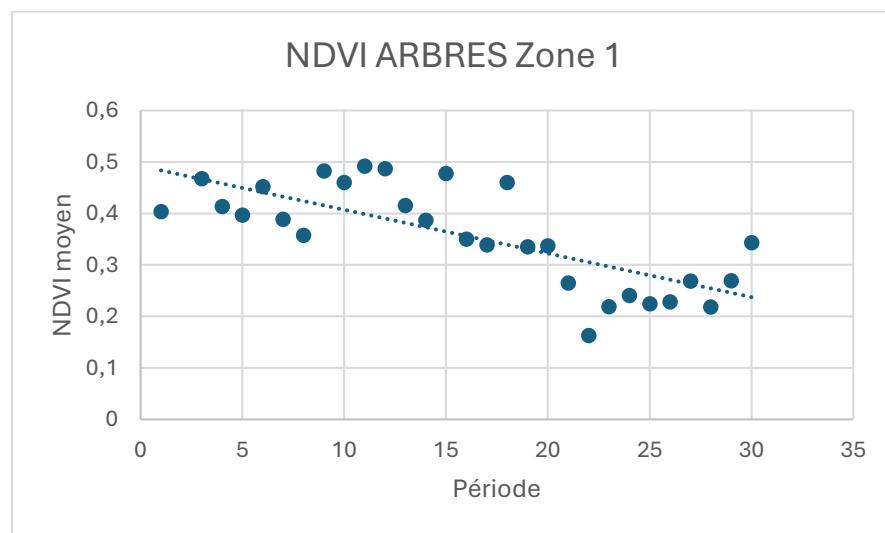
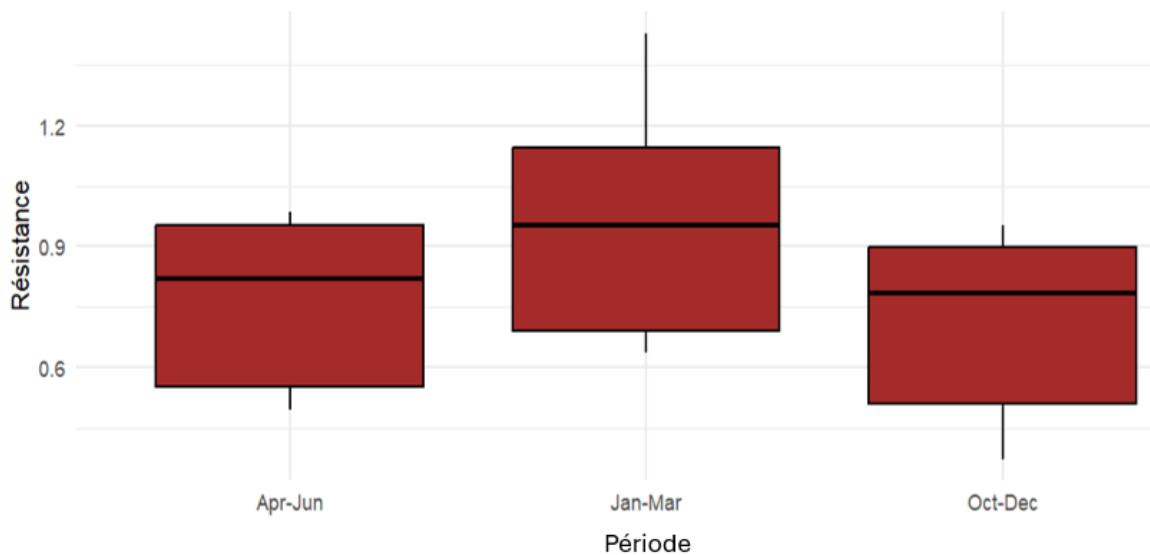
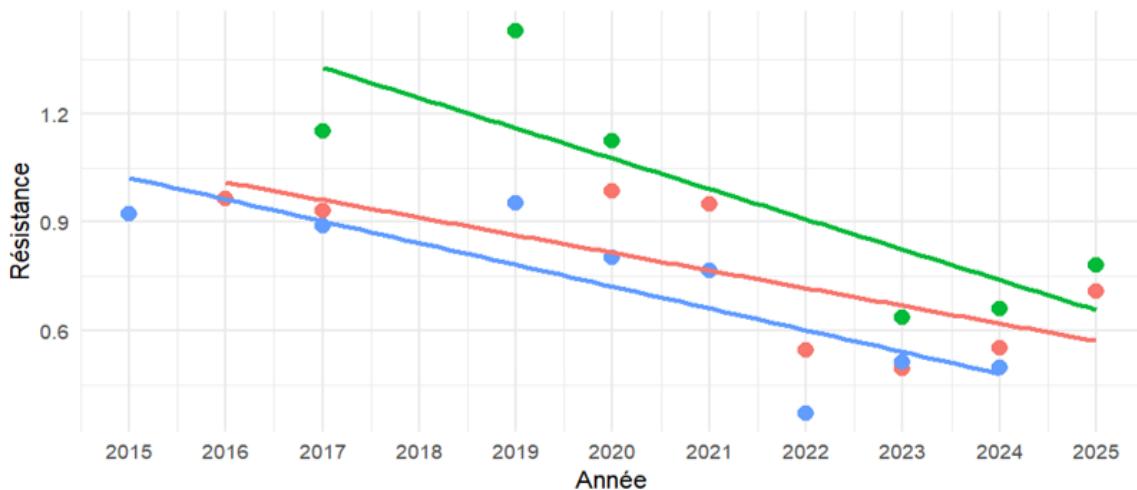


Diagramme en boîte de la résistance des arbres par période

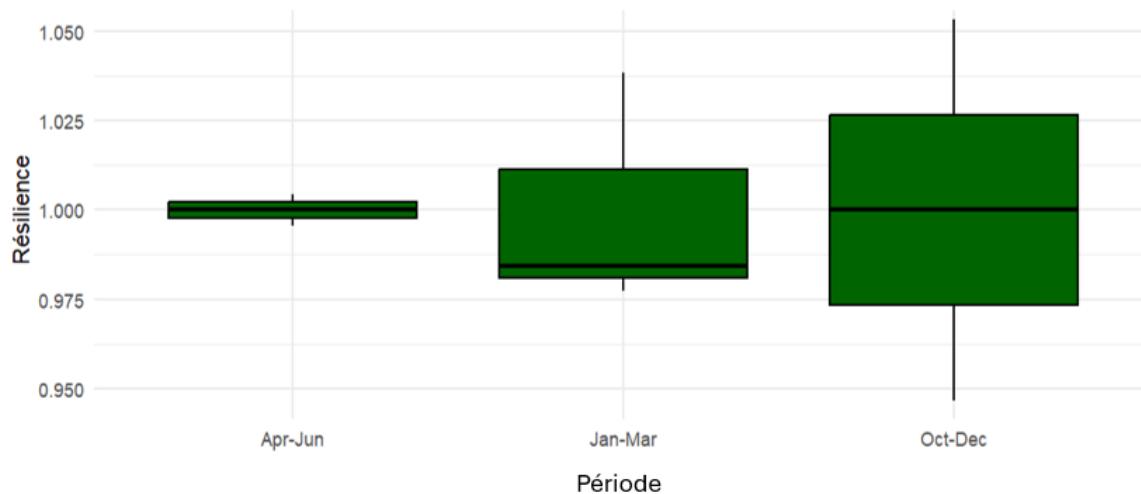


Evolution de la résistance des arbres par période

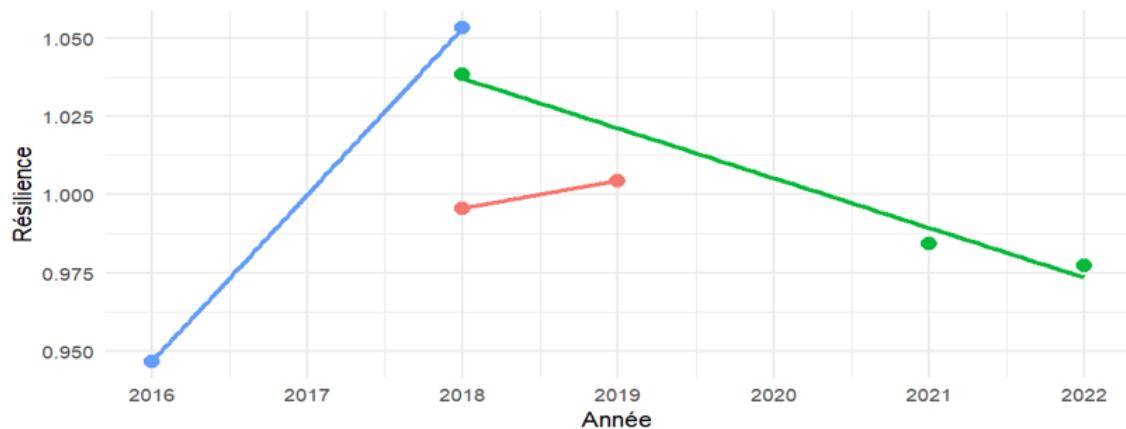


Saison	Pente	p_value	IC_inf	IC_sup	R2	
1 Apr-Jun	-0.0487	0.0391	-0.0940	-0.00337	0.535	Apr-Jun
2 Jan-Mar	-0.0837	0.0432	-0.163	-0.00411	0.681	Jan-Mar
3 Oct-Dec	-0.0601	0.0116	-0.101	-0.0191	0.682	Oct-Dec

Diagramme en boîte de la résilience des arbres par période



Evolution de la résilience des arbres par période



Saison	Pente	p_value	IC_inf	IC_sup	R2	
1 Apr-Jun	0.00887	NaN	NaN	NaN	1	Apr-Jun
2 Jan-Mar	-0.0159	0.0878	-0.0439	0.0121	0.981	Jan-Mar
3 Oct-Dec	0.0532	NaN	NaN	NaN	1	Oct-Dec

Les herbacées

Période	Année	NDVI mear	SPI	Saison	Secheresse	Resilience	Resistance	NDVI oct	NDVI jan	NDVI avr
Oct-Dec 2015	2015	0,3102	-1,56	Oct-Dec	Secheresse		0,937019	0,33105	0,201633	0,48815
Apr-Jun 2016	2016	0,445	-0,37	Apr-Jun	Secheresse		0,911605			
Oct-Dec 2016	2016	0,2833	1,48	Oct-Dec	Non	0,855762				
Jan-Mar 2017	2017	0,3562	-0,66	Jan-Mar	Secheresse		1,766573			
Apr-Jun 2017	2017	0,3727	-0,25	Apr-Jun	Secheresse		0,763495			
Oct-Dec 2017	2017	0,4631	-1,28	Oct-Dec	Secheresse		1,398882			
Jan-Mar 2018	2018	0,1455	2,33	Jan-Mar	Non	0,721607				
Apr-Jun 2018	2018	0,5287	0,66	Apr-Jun	Non	1,083069				
Oct-Dec 2018	2018	0,3788	0,89	Oct-Dec	Non	1,144238				
Jan-Mar 2019	2019	0,4278	-0,27	Jan-Mar	Secheresse		2,121673			
Apr-Jun 2019	2019	0,4476	0,28	Apr-Jun	Non	0,916931				
Oct-Dec 2019	2019	0,2473	-0,84	Oct-Dec	Secheresse		0,747017			
Jan-Mar 2020	2020	0,286	-0,41	Jan-Mar	Secheresse		1,418416			
Apr-Jun 2020	2020	0,5064	-0,15	Apr-Jun	Secheresse		1,037386			
Oct-Dec 2020	2020	0,1804	-0,26	Oct-Dec	Secheresse		0,544933			
Jan-Mar 2021	2021	0,2446	0,64	Jan-Mar	Non	1,213093				
Apr-Jun 2021	2021	0,4099	-0,39	Apr-Jun	Secheresse		0,839701			
Oct-Dec 2021	2021	0,3626	-0,54	Oct-Dec	Secheresse		1,095303			
Jan-Mar 2022	2022	0,2148	0,42	Jan-Mar	Non	1,0653				
Apr-Jun 2022	2022	0,3044	-0,13	Apr-Jun	Secheresse		0,623579			
Oct-Dec 2022	2022	0,1402	-0,73	Oct-Dec	Secheresse		0,423501			
Jan-Mar 2023	2023	0,2445	-0,18	Jan-Mar	Secheresse		1,212597			
Apr-Jun 2023	2023	0,2658	-0,12	Apr-Jun	Secheresse		0,544505			
Oct-Dec 2023	2023	0,1871	-1,25	Oct-Dec	Secheresse		0,565171			
Jan-Mar 2024	2024	0,2422	-0,1	Jan-Mar	Secheresse		1,20119			
Apr-Jun 2024	2024	0,3143	-0,99	Apr-Jun	Secheresse		0,643859			
Oct-Dec 2024	2024	0,1887	-0,55	Oct-Dec	Secheresse		0,570005			
Jan-Mar 2025	2025	0,2911	-0,77	Jan-Mar	Secheresse		1,44371			
Apr-Jun 2025	2025	0,3327	-0,45	Apr-Jun	Secheresse		0,681553			

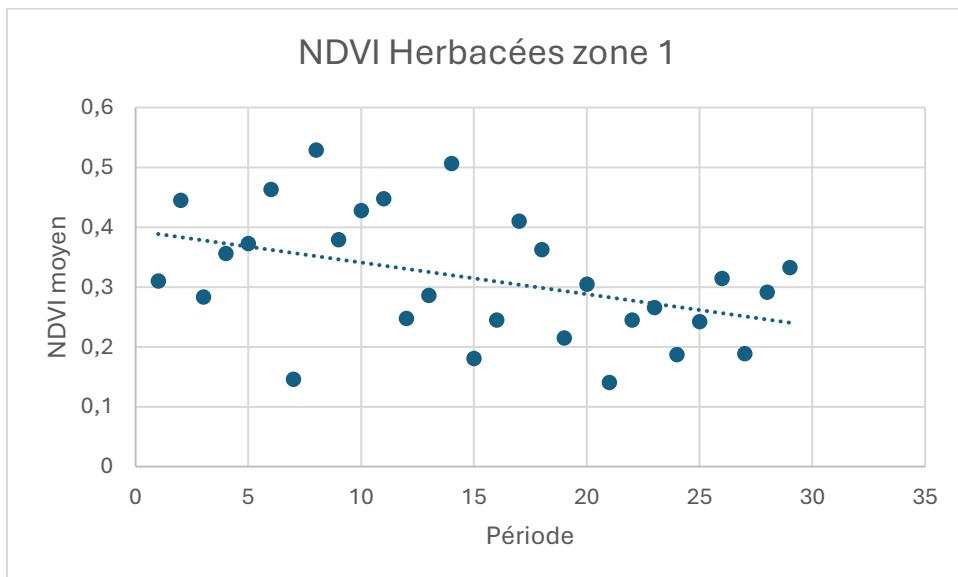
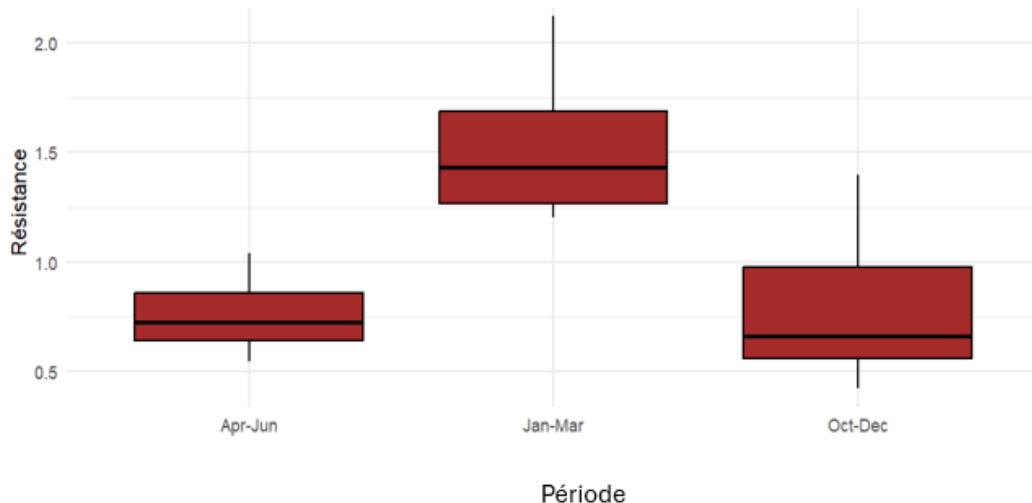


Diagramme en boîte de la résistance des herbacées par période



Evolution de la résistance des herbacées par période

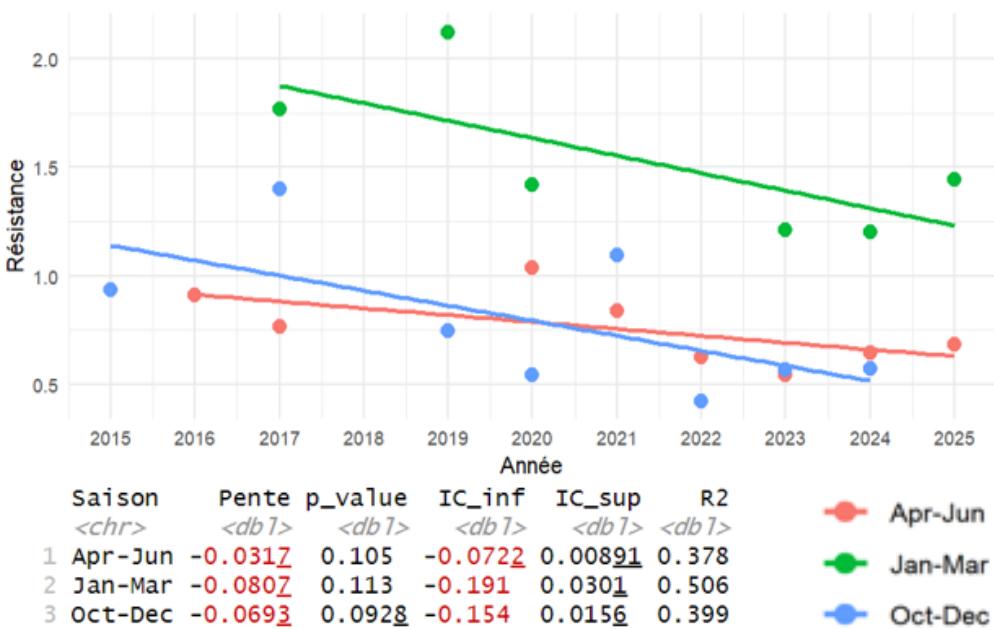
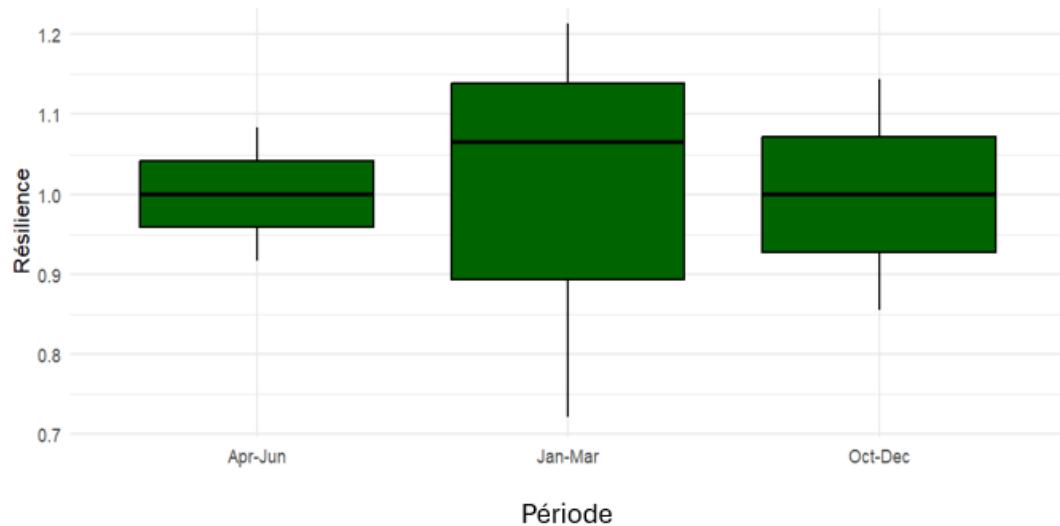


Diagramme en boîte de la résilience des herbacées par période



Evolution de la résilience des herbacées par période



Saison	Pente	p_value	IC_inf	IC_sup	R2
1 Apr-Jun	-0.166	NaN	NaN	NaN	1
2 Jan-Mar	0.104	0.344	-0.687	0.895	0.736
3 Oct-Dec	0.144	NaN	NaN	NaN	1

Les cultures

Période	Année	NDVI moyen	SPI	Sécheresse	Saison	Résilience	Resistance	Oct	Jan	Apr
Oct-Dec 2015	2015	0,2158	-1,56	Sécheresse	Oct-Dec		0,827613	0,26075	0,1516	0,38605
Jan-Mar 2016	2016		-0,5	Sécheresse	Jan-Mar					
Apr-Jun 2016	2016	0,3548	-0,37	Sécheresse	Apr-Jun		0,919052			
Oct-Dec 2016	2016	0,2102	1,48	Non	Oct-Dec	0,806136				
Jan-Mar 2017	2017	0,2719	-0,66	Sécheresse	Jan-Mar		1,793536			
Apr-Jun 2017	2017	0,2939	-0,25	Sécheresse	Apr-Jun		0,7613			
Oct-Dec 2017	2017	0,1541	-1,28	Sécheresse	Oct-Dec		0,590988			
Jan-Mar 2018	2018	0,0913	2,33	Non	Jan-Mar	0,602243				
Apr-Jun 2018	2018	0,4096	0,66	Non	Apr-Jun	1,061002				
Oct-Dec 2018	2018	0,3113	0,89	Non	Oct-Dec	1,193864				
Jan-Mar 2019	2019	0,3303	-0,27	Sécheresse	Jan-Mar		2,17876			
Apr-Jun 2019	2019	0,3625	0,28	Non	Apr-Jun	0,938998				
Oct-Dec 2019	2019	0,2004	-0,84	Sécheresse	Oct-Dec		0,768552			
Jan-Mar 2020	2020	0,2218	-0,41	Sécheresse	Jan-Mar		1,463061			
Apr-Jun 2020	2020	0,4232	-0,15	Sécheresse	Apr-Jun		1,096231			
Oct-Dec 2020	2020	0,1611	-0,26	Sécheresse	Oct-Dec		0,617833			
Jan-Mar 2021	2021	0,1966	0,64	Non	Jan-Mar	1,296834				
Apr-Jun 2021	2021	0,3287	-0,39	Sécheresse	Apr-Jun		0,851444			
Oct-Dec 2021	2021	0,1152	-0,54	Sécheresse	Oct-Dec		0,441802			
Jan-Mar 2022	2022	0,1669	0,42	Non	Jan-Mar	1,100923				
Apr-Jun 2022	2022	0,2456	-0,13	Sécheresse	Apr-Jun		0,636187			
Oct-Dec 2022	2022	0,0912	-0,73	Sécheresse	Oct-Dec		0,34976			
Jan-Mar 2023	2023	0,182	-0,18	Sécheresse	Jan-Mar		1,200528			
Apr-Jun 2023	2023	0,2127	-0,12	Sécheresse	Apr-Jun		0,550965			
Oct-Dec 2023	2023	0,1409	-1,25	Sécheresse	Oct-Dec		0,540364			
Jan-Mar 2024	2024	0,2014	-0,1	Sécheresse	Jan-Mar		1,328496			
Apr-Jun 2024	2024	0,2715	-0,99	Sécheresse	Apr-Jun		0,703277			
Oct-Dec 2024	2024	0,1532	-0,55	Sécheresse	Oct-Dec		0,587536			
Jan-Mar 2025	2025	0,2461	-0,77	Sécheresse	Jan-Mar		1,623351			
Apr-Jun 2025	2025	0,3066	-0,45	Sécheresse	Apr-Jun		0,794198			

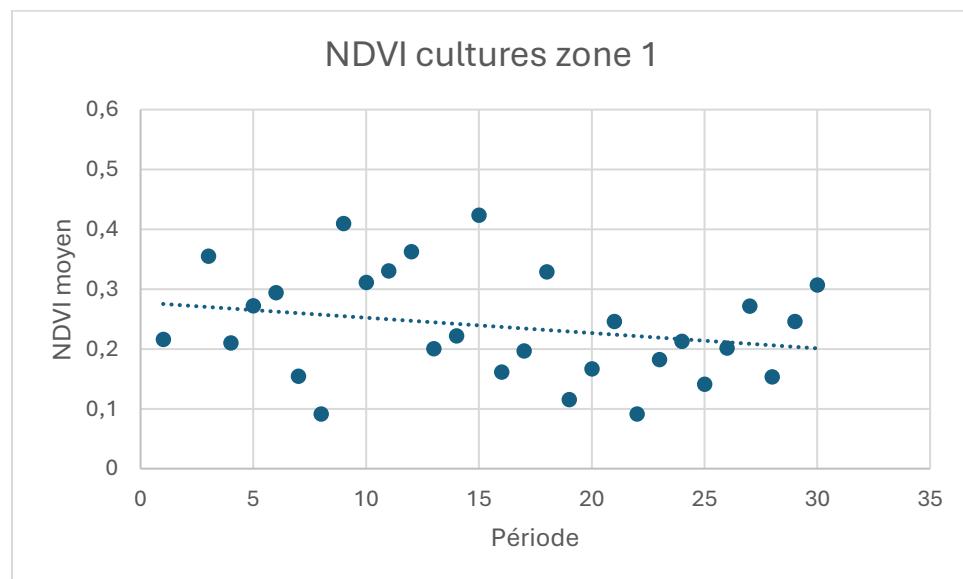
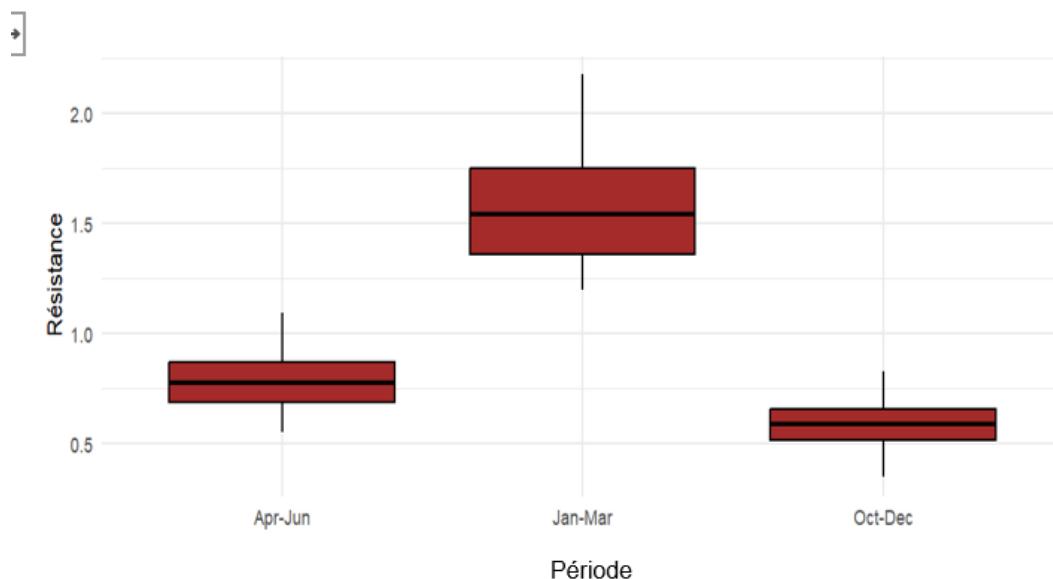


Diagramme en boîte de la résistance des cultures par période



Evolution de la résistance des cultures par période

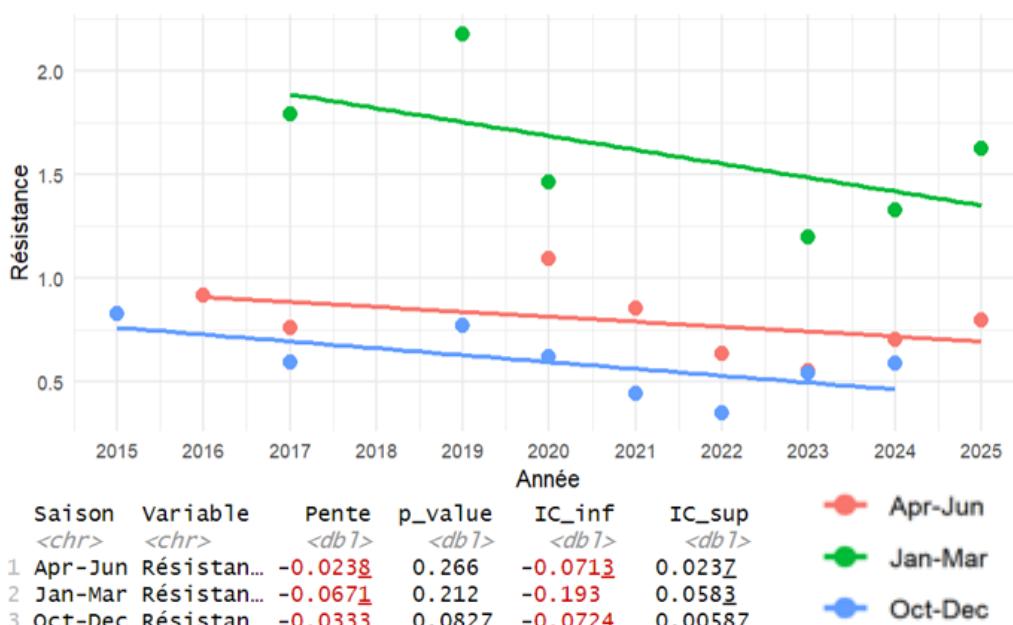
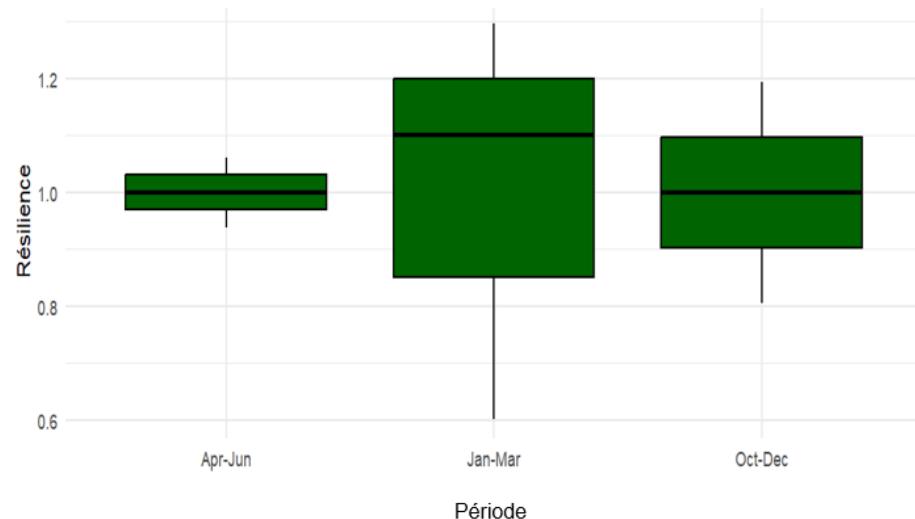
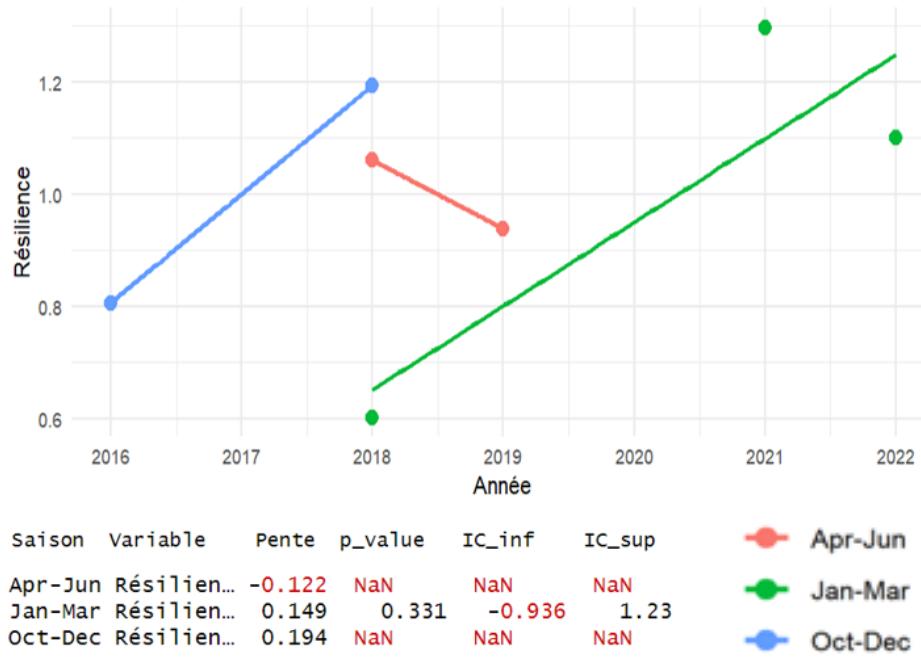


Diagramme en boîte de la résilience des cultures par période



Evolution de la résilience des cultures par période



Les arbustes

Période	Année	NDVI moyen	SPI	Sécheresse	Saison	Resilience	Resistance	OCT	JAN	APR
Oct-Dec 2015	2015	0,225	-1,56	Sécheresse Oct-Dec			0,875657	0,25695	0,1546	0,3402
Jan-Mar 2016	2016		-0,5	Sécheresse Jan-Mar						
Apr-Jun 2016	2016	0,3202	-0,37	Sécheresse Apr-Jun			0,941211			
Oct-Dec 2016	2016	0,2089	1,48	Non	Oct-Dec	0,812999				
Jan-Mar 2017	2017	0,2609	-0,66	Sécheresse Jan-Mar			1,687581			
Apr-Jun 2017	2017	0,2952	-0,25	Sécheresse Apr-Jun			0,867725			
Oct-Dec 2017	2017	0,1708	-1,28	Sécheresse Oct-Dec			0,664721			
Jan-Mar 2018	2018	0,1021	2,33	Non	Jan-Mar	0,660414				
Apr-Jun 2018	2018	0,3523	0,66	Non	Apr-Jun	1,035567				
Oct-Dec 2018	2018	0,305	0,89	Non	Oct-Dec	1,187001				
Jan-Mar 2019	2019	0,3268	-0,27	Sécheresse Jan-Mar			2,113842			
Apr-Jun 2019	2019	0,3281	0,28	Non	Apr-Jun	0,964433				
Oct-Dec 2019	2019	0,1975	-0,84	Sécheresse Oct-Dec			0,768632			
Jan-Mar 2020	2020	0,2121	-0,41	Sécheresse Jan-Mar			1,371928			
Apr-Jun 2020	2020	0,3495	-0,15	Sécheresse Apr-Jun			1,027337			
Oct-Dec 2020	2020	0,1633	-0,26	Sécheresse Oct-Dec			0,635532			
Jan-Mar 2021	2021	0,1935	0,64	Non	Jan-Mar	1,251617				
Apr-Jun 2021	2021	0,3078	-0,39	Sécheresse Apr-Jun			0,904762			
Oct-Dec 2021	2021	0,1315	-0,54	Sécheresse Oct-Dec			0,511773			
Jan-Mar 2022	2022	0,1682	0,42	Non	Jan-Mar	1,087969				
Apr-Jun 2022	2022	0,2102	-0,13	Sécheresse Apr-Jun			0,617872			
Oct-Dec 2022	2022	0,0986	-0,73	Sécheresse Oct-Dec			0,383732			
Jan-Mar 2023	2023	0,1687	-0,18	Sécheresse Jan-Mar			1,091203			
Apr-Jun 2023	2023	0,1903	-0,12	Sécheresse Apr-Jun			0,559377			
Oct-Dec 2023	2023	0,1457	-1,25	Sécheresse Oct-Dec			0,567036			
Jan-Mar 2024	2024	0,1859	-0,1	Sécheresse Jan-Mar			1,202458			
Apr-Jun 2024	2024	0,2235	-0,99	Sécheresse Apr-Jun			0,656966			
Oct-Dec 2024	2024	0,1486	-0,55	Sécheresse Oct-Dec			0,578323			
Jan-Mar 2025	2025	0,2272	-0,77	Sécheresse Jan-Mar			1,469599			
Apr-Jun 2025	2025	0,2543	-0,45	Sécheresse Apr-Jun			0,747501			

NDVI arbustes zone 1

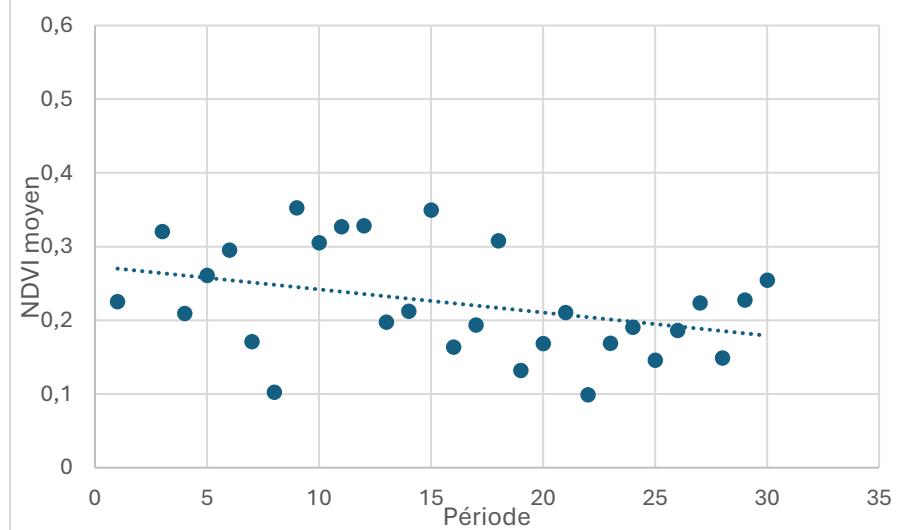
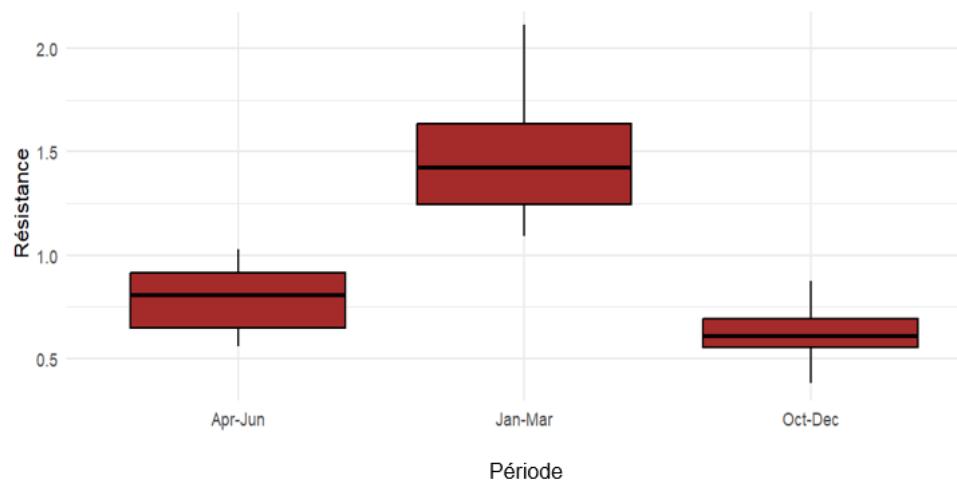
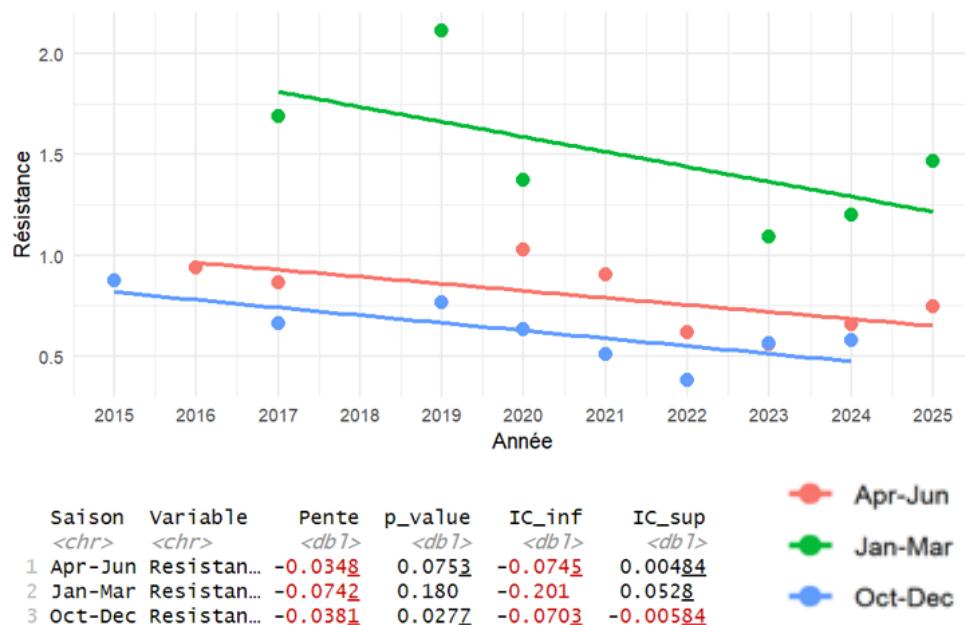


Diagramme en boîte de la résistance des arbustes par période

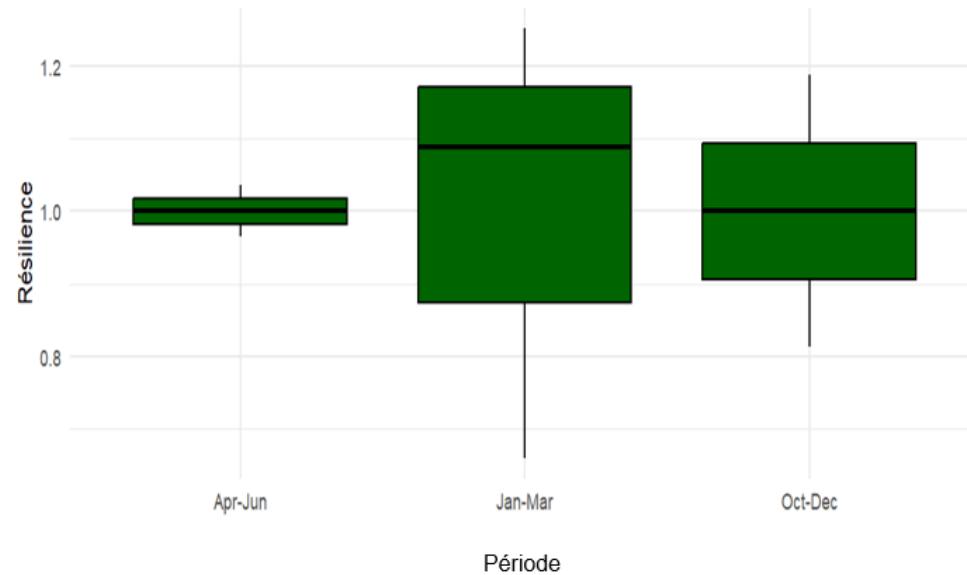


Evolution de la résistance des arbustes par période

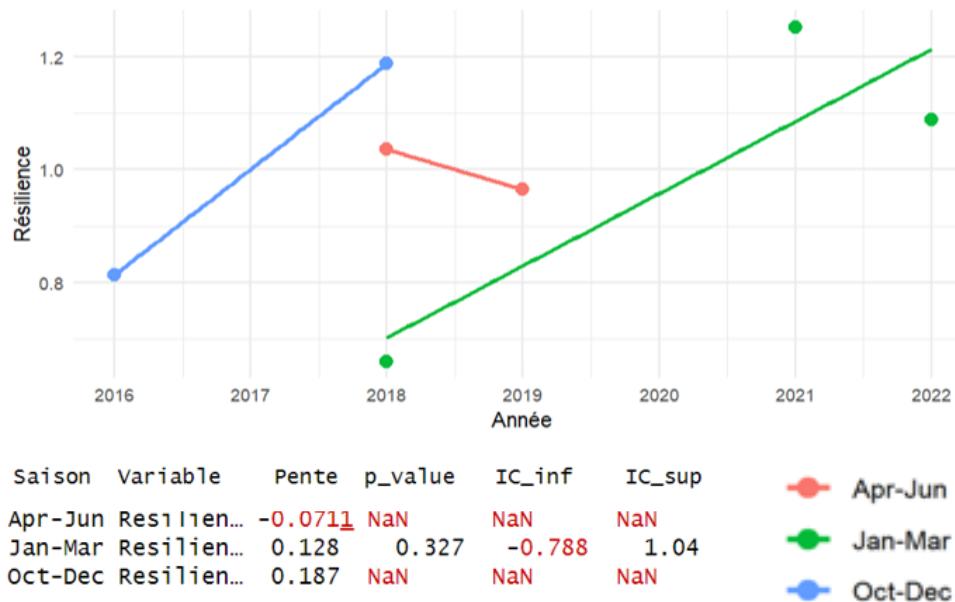


Saison	Variable	Pente	p_value	IC_inf	IC_sup
1	Apr-Jun Resistan...	-0.0348	0.0753	-0.0745	0.00484
2	Jan-Mar Resistan...	-0.0742	0.180	-0.201	0.0528
3	Oct-Dec Resistan...	-0.0381	0.0272	-0.0703	-0.00584

Diagramme en boîte de la résilience des arbustes par période



Evolution de la résilience des arbustes par période



Annexe 4 : Tableau de la résistance et de la résilience des différentes couvertures végétales du sol dans la seconde zone d'étude

Les arbres

1	Période	Année	NDVI moyen	SPI	Sécheresse	Saison	Resistance	Resilience	OCT	JAN	APR
2	Oct-Dec 2015	2015	0,3965	-1,43	Oui	Oct-Dec	1,069165		0,37085	0,297175	0,386467
3	Jan-Mars 2016	2016	0,4481	-0,5	Oui	Jan-Mars	1,507866				
4	Apr-Jun 2016	2016	0,3655	0,18	Non	Apr-Jun		0,945748			
5	Oct-Dec 2016	2016	0,3525	1,07	Non	Oct-Dec		0,950519		1,507866	
6	Jan-Mars 2017	2017	0,4498	-0,35	Oui	Jan-Mars	1,513586				
7	Apr-Jun 2017	2017	0,3942	-0,35	Oui	Apr-Jun	1,02001			49,97414	
8	Oct-Dec 2017	2017	0,3446	-1	Oui	Oct-Dec	0,929217				
9	Jan-Mars 2018	2018	0,38	2,46	Non	Jan-Mars		1,278708			
10	Apr-Jun 2018	2018	0,4286	1,6	Non	Apr-Jun		1,109022			
11	Oct-Dec 2018	2018	0,3892	0,99	Non	Oct-Dec		1,049481			
12	Jan-Mars 2019	2019	0,436	-0,58	Oui	Jan-Mars	1,467149				
13	Apr-Jun 2019	2019	0,3803	-0,33	Oui	Apr-Jun	0,984043				
14	Oct-Dec 2019	2019	0,3259	-0,59	Oui	Oct-Dec	0,878792				
15	Jan-Mars 2020	2020	0,3832	-0,17	Oui	Jan-Mars	1,289476				
16	Apr-Jun 2020	2020	0,3798	-0,18	Oui	Apr-Jun	0,98275				
17	Oct-Dec 2020	2020	0,3388	-0,14	Oui	Oct-Dec	0,913577				
18	Jan-Mars 2021	2021	0,3683	0,34	Non	Jan-Mars		1,239337			
19	Apr-Jun 2021	2021	0,3653	0	Non	Apr-Jun		0,94523			
20	Oct-Dec 2021	2021	0,282	-0,78	Oui	Oct-Dec	0,760415				
21	Jan-Mars 2022	2022	0,2688	0,2	Non	Jan-Mars		0,904518			
22	Apr-Jun 2022	2022	0,1504	-0,23	Oui	Apr-Jun	0,389167				
23	Oct-Dec 2022	2022	0,1543	-0,18	Oui	Oct-Dec	0,416071				
24	Jan-Mars 2023	2023	0,2049	-0,54	Oui	Jan-Mars	0,689493				
25	Apr-Jun 2023	2023	0,1714	-0,15	Oui	Apr-Jun	0,443505				
26	Oct-Dec 2023	2023	0,1668	-1,12	Oui	Oct-Dec	0,449778				
27	Jan-Mars 2024	2024	0,1716	0	Non	Jan-Mars		0,577438			
28	Apr-Jun 2024	2024	0,1746	-0,9	Oui	Apr-Jun	0,451785				
29	Oct-Dec 2024	2024	0,1439	-0,94	Oui	Oct-Dec	0,388028				
30	Jan-Mars 2025	2025	0,2392	-0,35	Oui	Jan-Mars	0,804913				
31	Apr-Jun 2025	2025	0,1948	-0,63	Oui	Apr-Jun	0,504054				

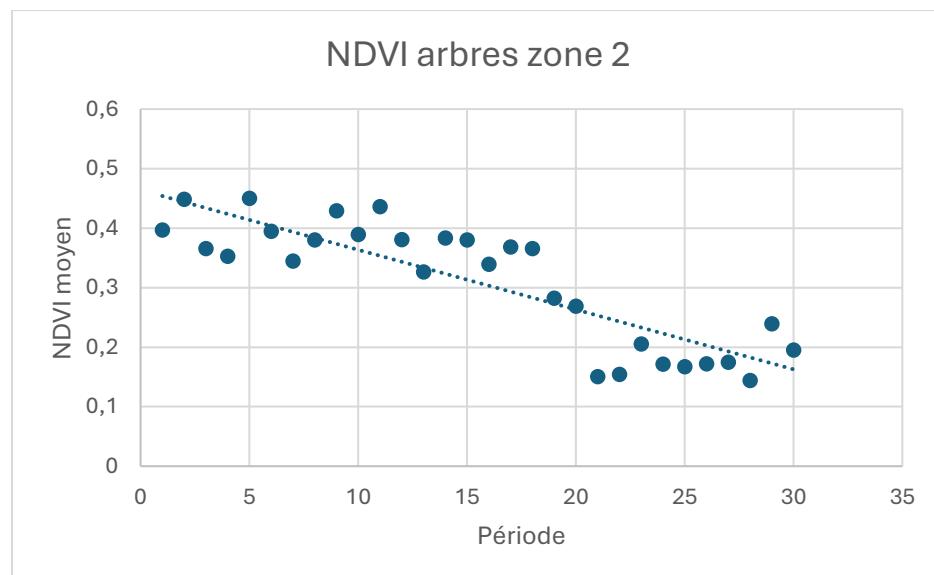
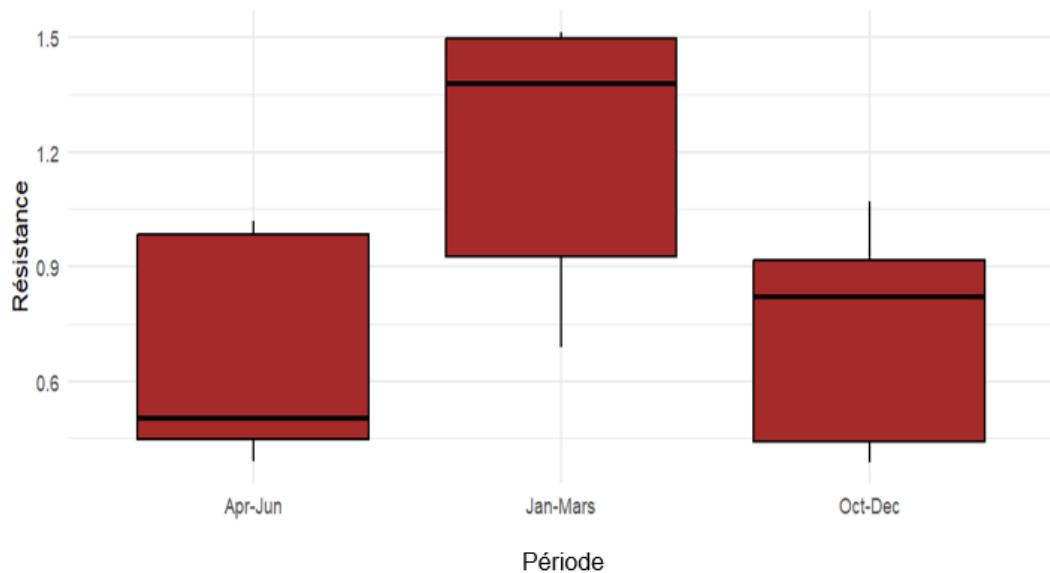
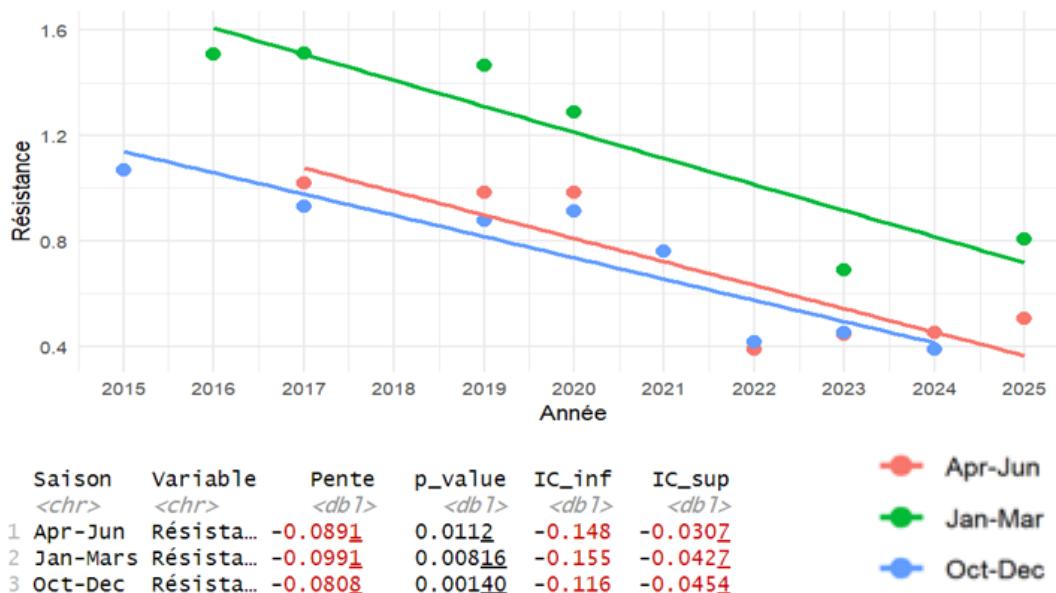


Diagramme en boîte de la résistance des arbres par période

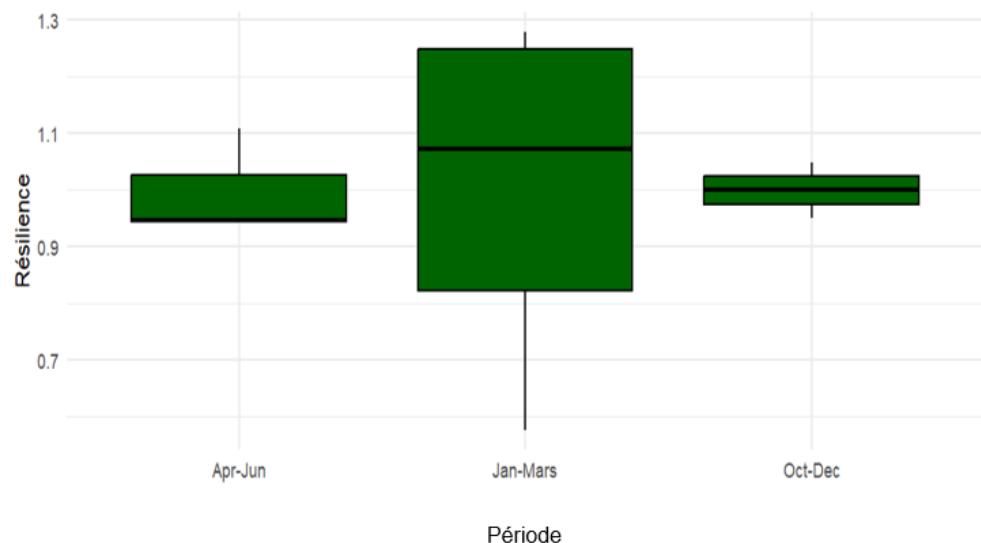


Evolution de la résistance des arbres par période

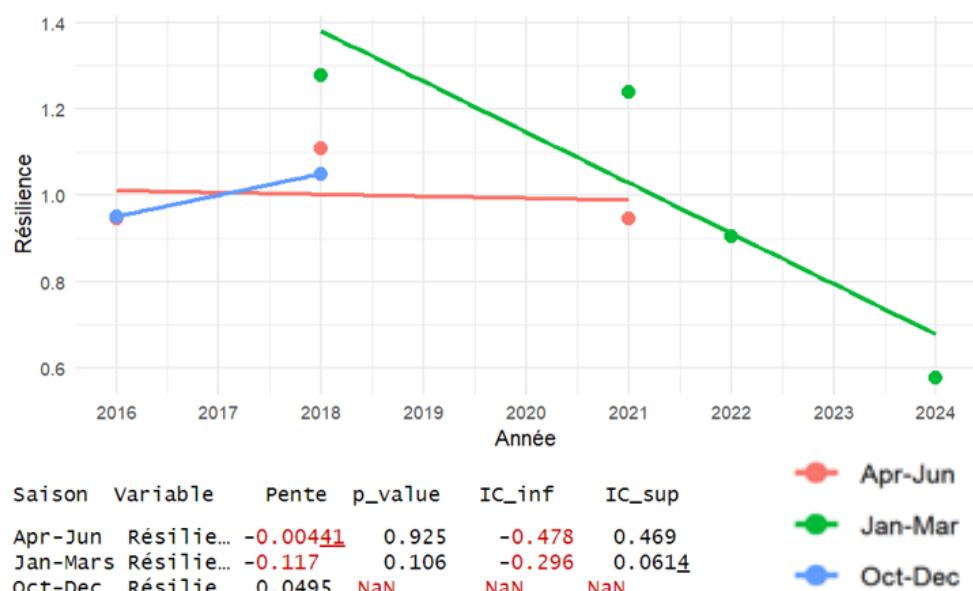


Saison	Variable	Pente	p_value	IC_inf	IC_sup	
1 Apr-Jun	Résista...	-0.0891	0.0112	-0.148	-0.0307	Apr-Jun
2 Jan-Mars	Résista...	-0.0991	0.00816	-0.155	-0.0427	Jan-Mar
3 Oct-Dec	Résista...	-0.0808	0.00140	-0.116	-0.0454	Oct-Dec

Diagramme en boîte de la résilience des arbres par période



Evolution de la résilience des arbres par période



Saison	Variable	Pente	p_value	IC_inf	IC_sup
Apr-Jun	Résilie...	-0.00441	0.925	-0.478	0.469
Jan-Mars	Résilie...	-0.117	0.106	-0.296	0.0614
Oct-Dec	Résilie...	0.0495	NaN	NaN	NaN

Les herbacées

Période	Année	NDVI_Mean	SPI	Secheresse	Saison	Resilience	Resistance	oct	jan	apr
Oct-Dec 2015	2015	0,2981	-1,43	Oui	Oct-Dec		0,777416	0,38345	0,302775	0,401433
Jan-Mar 2016	2016	0,488	-0,5	Oui	Jan-Mar		1,611758			
Apr-Jun 2016	2016	0,3721	0,18	Non	Apr-Jun	0,926929				
Oct-Dec 2016	2016	0,4116	1,07	Non	Oct-Dec	1,073412				
Jan-Mar 2017	2017	0,4886	-0,35	Oui	Jan-Mar		1,61374			
Apr-Jun 2017	2017	0,2907	-0,35	Oui	Apr-Jun		0,724155			
Oct-Dec 2017	2017	0,3477	-1	Oui	Oct-Dec		0,906768			
Jan-Mar 2018	2018	0,3853	2,46	Non	Jan-Mar	1,272562				
Apr-Jun 2018	2018	0,4467	1,6	Non	Apr-Jun	1,112763				
Oct-Dec 2018	2018	0,3553	0,99	Non	Oct-Dec	0,926588				
Jan-Mar 2019	2019	0,4378	-0,58	Oui	Jan-Mar		1,445958			
Apr-Jun 2019	2019	0,5015	-0,33	Oui	Apr-Jun		1,249273			
Oct-Dec 2019	2019	0,2898	-0,59	Oui	Oct-Dec		0,75577			
Jan-Mar 2020	2020	0,3494	-0,17	Oui	Jan-Mar		1,153992			
Apr-Jun 2020	2020	0,3597	-0,18	Oui	Apr-Jun		0,896039			
Oct-Dec 2020	2020	0,4732	-0,14	Oui	Oct-Dec		1,234059			
Jan-Mar 2021	2021	0,3855	0	Non	Jan-Mar	1,273223				
Apr-Jun 2021	2021	0,3855	0	Non	Apr-Jun	0,960309				
Oct-Dec 2021	2021	0,385	-0,78	Oui	Oct-Dec		1,004042			
Jan-Mar 2022	2022	0,2311	0,2	Non	Jan-Mar	0,763273				
Apr-Jun 2022	2022	0,237	-0,23	Oui	Apr-Jun		0,590384			
Oct-Dec 2022	2022	0,2359	-0,18	Oui	Oct-Dec		0,615204			
Jan-Mar 2023	2023	0,3107	-0,54	Oui	Jan-Mar		1,026175			
Apr-Jun 2023	2023	0,2715	-0,15	Oui	Apr-Jun		0,676326			
Oct-Dec 2023	2023	0,2255	-1,12	Oui	Oct-Dec		0,588082			
Jan-Mar 2024	2024	0,2092	0	Non	Jan-Mar	0,690942				
Apr-Jun 2024	2024	0,3268	-0,9	Oui	Apr-Jun		0,814083			
Oct-Dec 2024	2024	0,2373	-0,94	Oui	Oct-Dec		0,618855			
Jan-Mar 2025	2025	0,3885	-0,35	Oui	Jan-Mar		1,283131			
Apr-Jun 2025	2025	0,2169	-0,63	Oui	Apr-Jun		0,540314			

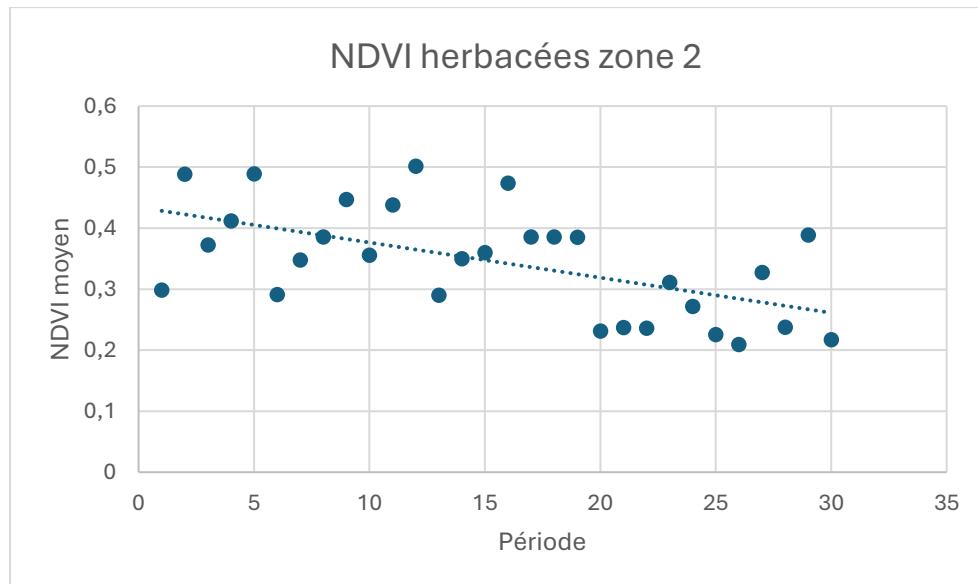
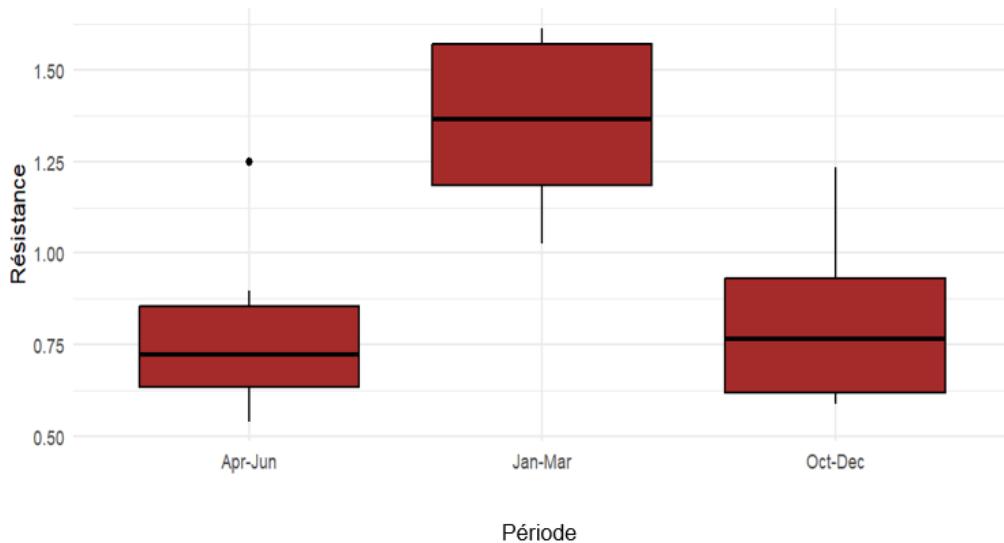
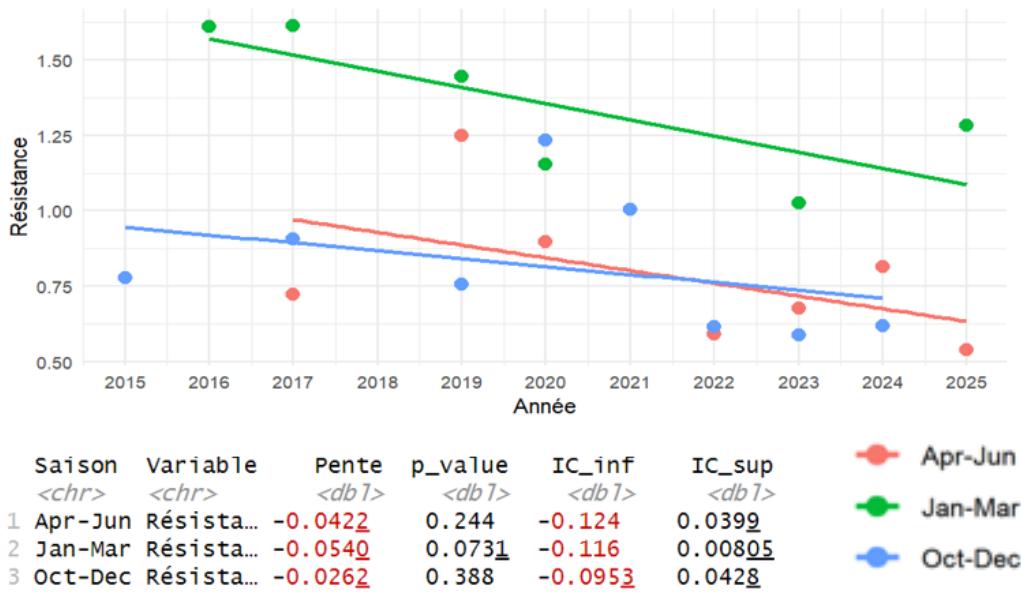


Diagramme en boîte de la résistance des herbacées par période

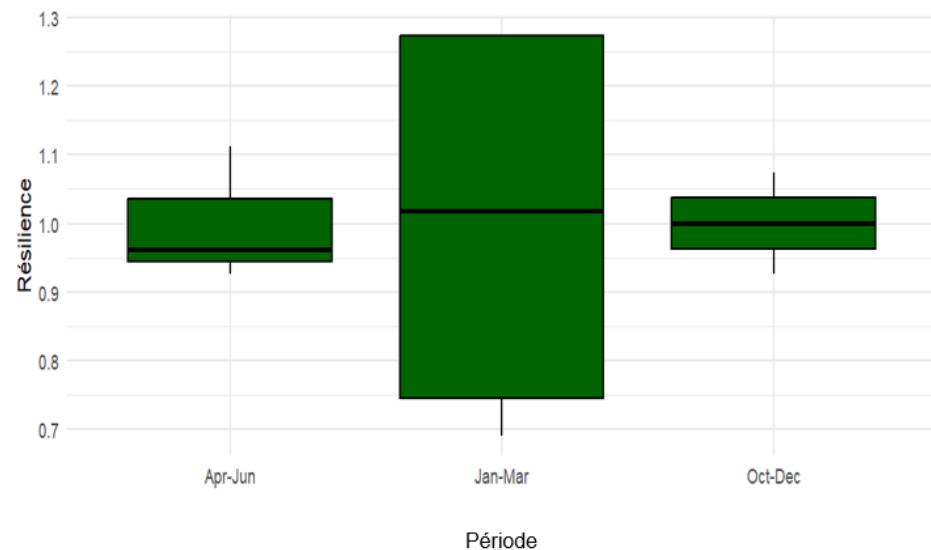


Evolution de la résistance des herbacées par période

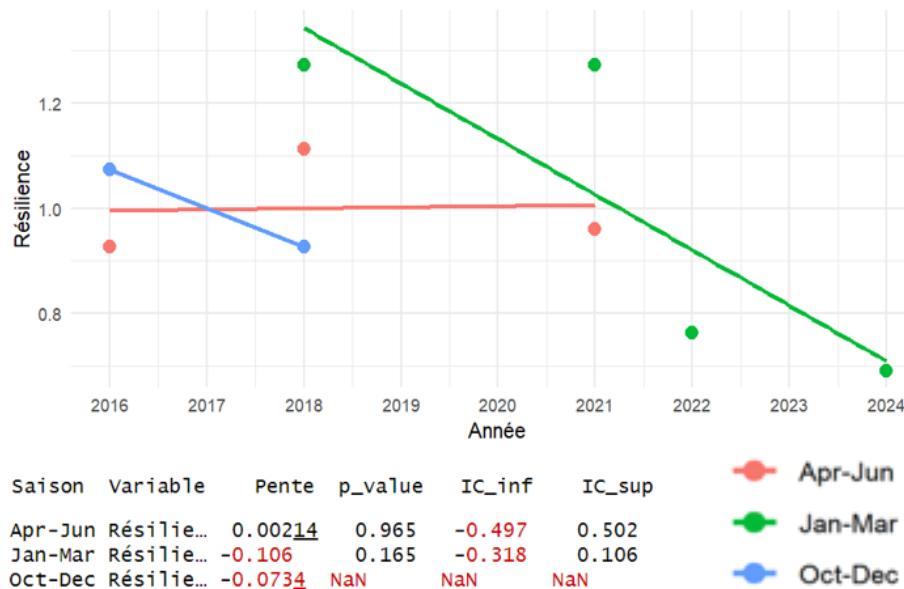


Saison	Variable	Pente	p_value	IC_inf	IC_sup	
		<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	
1	Apr-Jun Résista...	-0.0422	0.244	-0.124	0.0399	Apr-Jun
2	Jan-Mar Résista...	-0.0540	0.0731	-0.116	0.00805	Jan-Mar
3	Oct-Dec Résista...	-0.0262	0.388	-0.0953	0.0428	Oct-Dec

Diagramme en boîte de la résilience des herbacées par période



Evolution de la résilience des herbacées par période



Les cultures

Période	Année	NDVI moyen	SPI	Saison	Sécheresse	Resilience	Resistance	OCT	jan	APR
Oct-Dec 2015	2015	0,2251	-1,43	Oct-Dec	Oui		0,839143	0,26825	0,273475	0,355533
Jan-Mar 2016	2016	0,4227	-0,5	Jan-Mar	Oui		1,545662			
Apr-Jun 2016	2016	0,3483	0,18	Apr-Jun	Non	0,979655				
Oct-Dec 2016	2016	0,2282	1,07	Oct-Dec	Non	0,850699				
Jan-Mar 2017	2017	0,4972	-0,35	Jan-Mar	Oui		1,818082			
Apr-Jun 2017	2017	0,3356	-0,35	Apr-Jun	Oui		0,943934			
Oct-Dec 2017	2017	0,1899	-1	Oct-Dec	Oui		0,707922			
Jan-Mar 2018	2018	0,3261	2,46	Jan-Mar	Non	1,192431				
Apr-Jun 2018	2018	0,3917	1,6	Apr-Jun	Non	1,101725				
Oct-Dec 2018	2018	0,3083	0,99	Oct-Dec	Non	1,149301				
Jan-Mar 2019	2019	0,406	-0,58	Jan-Mar	Oui		1,484596			
Apr-Jun 2019	2019	0,2982	-0,33	Apr-Jun	Oui		0,83874			
Oct-Dec 2019	2019	0,2124	-0,59	Oct-Dec	Oui		0,791799			
Jan-Mar 2020	2020	0,3606	-0,17	Jan-Mar	Oui		1,318585			
Apr-Jun 2020	2020	0,3447	-0,18	Apr-Jun	Oui		0,969529			
Oct-Dec 2020	2020	0,2057	-0,14	Oct-Dec	Oui		0,766822			
Jan-Mar 2021	2021	0,3586	0,34	Jan-Mar	Non	1,311272				
Apr-Jun 2021	2021	0,3266	0	Apr-Jun	Non	0,91862				
Oct-Dec 2021	2021	0,1557	-0,78	Oct-Dec	Oui		0,580429			
Jan-Mar 2022	2022	0,2211	0,2	Jan-Mar	Non	0,808483				
Apr-Jun 2022	2022	0,1516	-0,23	Apr-Jun	Oui		0,426402			
Oct-Dec 2022	2022	0,1344	-0,18	Oct-Dec	Oui		0,501025			
Jan-Mar 2023	2023	0,241	-0,54	Jan-Mar	Oui		0,881251			
Apr-Jun 2023	2023	0,1918	-0,15	Apr-Jun	Oui		0,539471			
Oct-Dec 2023	2023	0,1125	-1,12	Oct-Dec	Oui		0,419385			
Jan-Mar 2024	2024	0,1881	0	Jan-Mar	Non	0,687814				
Apr-Jun 2024	2024	0,2132	-0,9	Apr-Jun	Oui		0,599662			
Oct-Dec 2024	2024	0,1071	-0,94	Oct-Dec	Oui		0,399254			
Jan-Mar 2025	2025	0,3211	-0,35	Jan-Mar	Oui		1,174148			
Apr-Jun 2025	2025	0,2266	-0,63	Apr-Jun	Oui		0,637352			

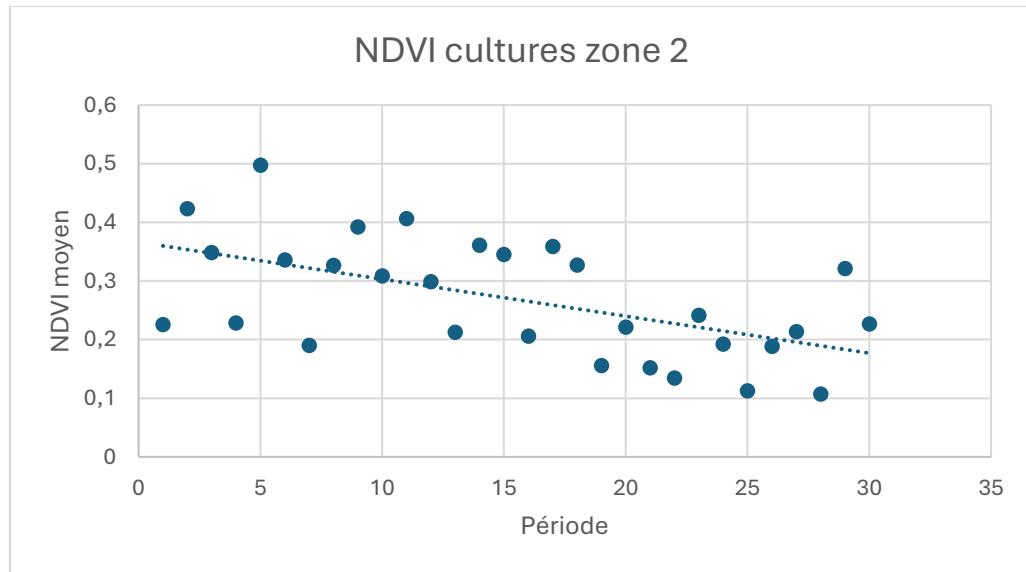
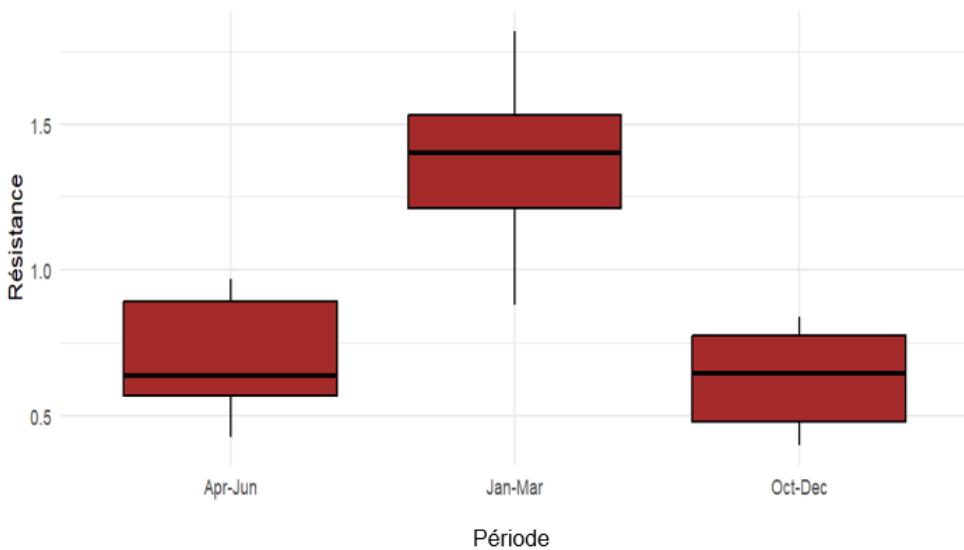
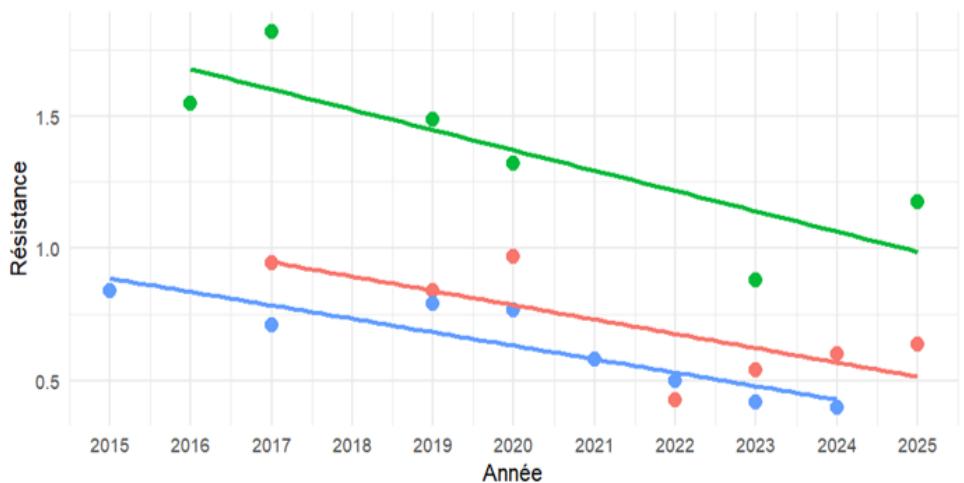


Diagramme en boîte de la résistance des cultures par période

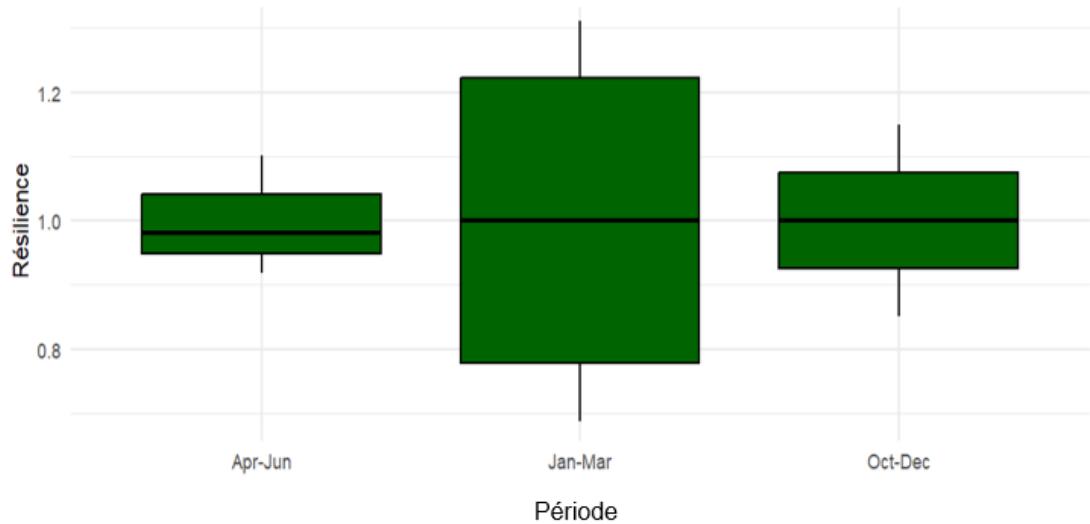


Evolution de la résistance des cultures par période

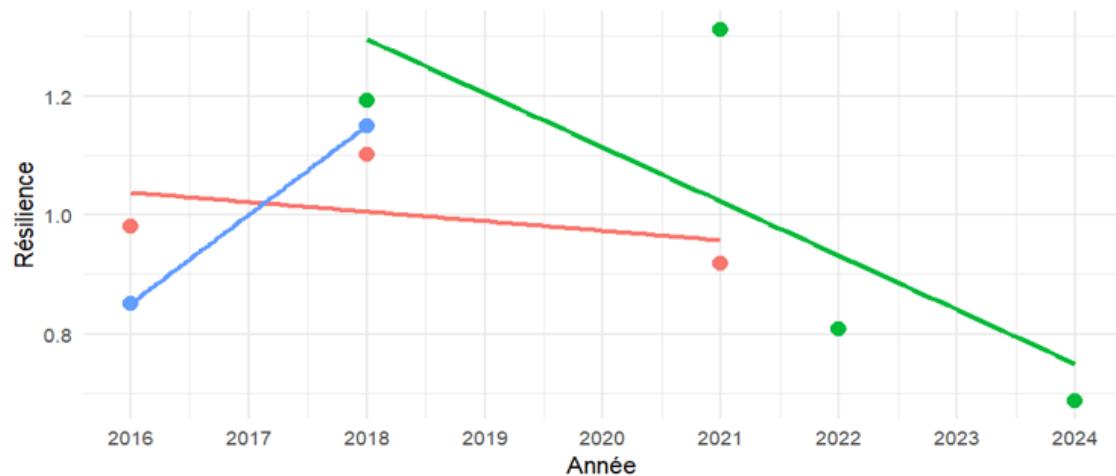


Saison	Variable	Pente	p_value	IC_inf	IC_sup	
1 Apr-Jun	Résista...	<u>-0.0542</u>	0.0567	<u>-0.111</u>	0.00226	Apr-Jun
2 Jan-Mar	Résista...	<u>-0.0768</u>	0.0451	<u>-0.151</u>	<u>-0.00269</u>	Jan-Mar
3 Oct-Dec	Résista...	<u>-0.0509</u>	0.00296	<u>-0.0762</u>	<u>-0.0250</u>	Oct-Dec

Diagramme en boîte de la résilience des cultures par période



Evolution de la résilience des cultures par période



Saison	Variable	Pente	p_value	IC_inf	IC_sup	
Apr-Jun	Résilie...	-0.0161	0.715	-0.440	0.408	Apr-Jun
Jan-Mar	Résilie...	-0.0910	0.239	-0.327	0.145	Jan-Mar
Oct-Dec	Résilie...	0.149	NaN	NaN	NaN	Oct-Dec

Les arbustes

Période	Année	NDVI moyen	SPI	Saison	Sécheresse	Resilience	Resistance	Oct	Jan	Apr
Oct-Dec 2015	2015	0,1824	-1,43	Oct-Dec	Oui		0,903418	0,2019	0,183225	0,251467
Jan-Mar 2016	2016	0,237	-0,5	Jan-Mar	Oui		1,293492			
Apr-Jun 2016	2016	0,2271	0,18	Apr-Jun	Non	0,903102				
Oct-Dec 2016	2016	0,1631	1,07	Oct-Dec	Non	0,807826				
Jan-Mar 2017	2017	0,3055	-0,35	Jan-Mar	Oui		1,667349			
Apr-Jun 2017	2017	0,2511	-0,35	Apr-Jun	Oui		0,998542			
Oct-Dec 2017	2017	0,1589	-1	Oct-Dec	Oui		0,787023			
Jan-Mar 2018	2018	0,2227	2,46	Jan-Mar	Non	1,215445				
Apr-Jun 2018	2018	0,2903	1,6	Apr-Jun	Non	1,154427				
Oct-Dec 2018	2018	0,2407	0,99	Oct-Dec	Non	1,192174				
Jan-Mar 2019	2019	0,3052	-0,58	Jan-Mar	Oui		1,665712			
Apr-Jun 2019	2019	0,2261	-0,33	Apr-Jun	Oui		0,899125			
Oct-Dec 2019	2019	0,1723	-0,59	Oct-Dec	Oui		0,853393			
Jan-Mar 2020	2020	0,255	-0,17	Jan-Mar	Oui		1,391731			
Apr-Jun 2020	2020	0,2353	-0,18	Apr-Jun	Oui		0,93571			
Oct-Dec 2020	2020	0,1603	-0,14	Oct-Dec	Oui		0,793957			
Jan-Mar 2021	2021	0,2405	0,34	Jan-Mar	Non	1,312594				
Apr-Jun 2021	2021	0,237	0	Apr-Jun	Non	0,942471				
Oct-Dec 2021	2021	0,1399	-0,78	Oct-Dec	Oui		0,692917			
Jan-Mar 2022	2022	0,1603	0,2	Jan-Mar	Non	0,874881				
Apr-Jun 2022	2022	0,109	-0,23	Apr-Jun	Oui		0,433457			
Oct-Dec 2022	2022	0,0962	-0,18	Oct-Dec	Oui		0,476474			
Jan-Mar 2023	2023	0,1365	-0,54	Jan-Mar	Oui		0,744986			
Apr-Jun 2023	2023	0,1178	-0,15	Apr-Jun	Oui		0,468452			
Oct-Dec 2023	2023	0,0939	-1,12	Oct-Dec	Oui		0,465082			
Jan-Mar 2024	2024	0,1094	0	Jan-Mar	Non	0,59708				
Apr-Jun 2024	2024	0,1271	-0,9	Apr-Jun	Oui		0,505435			
Oct-Dec 2024	2024	0,0828	-0,94	Oct-Dec	Oui		0,410104			
Jan-Mar 2025	2025	0,1491	-0,35	Jan-Mar	Oui		0,813754			
Apr-Jun 2025	2025	0,142	-0,63	Apr-Jun	Oui		0,564687			

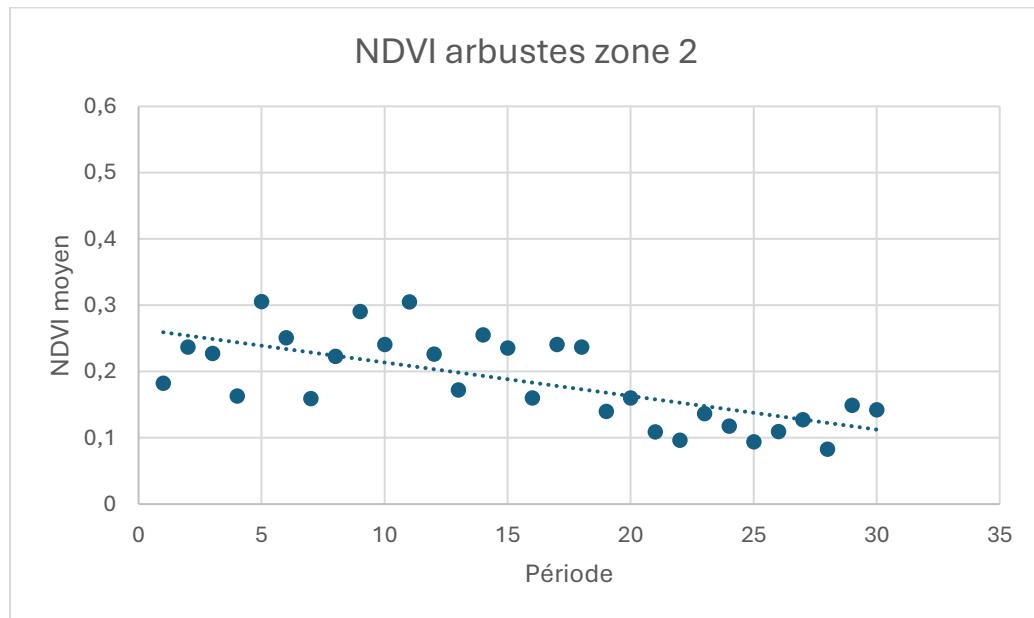
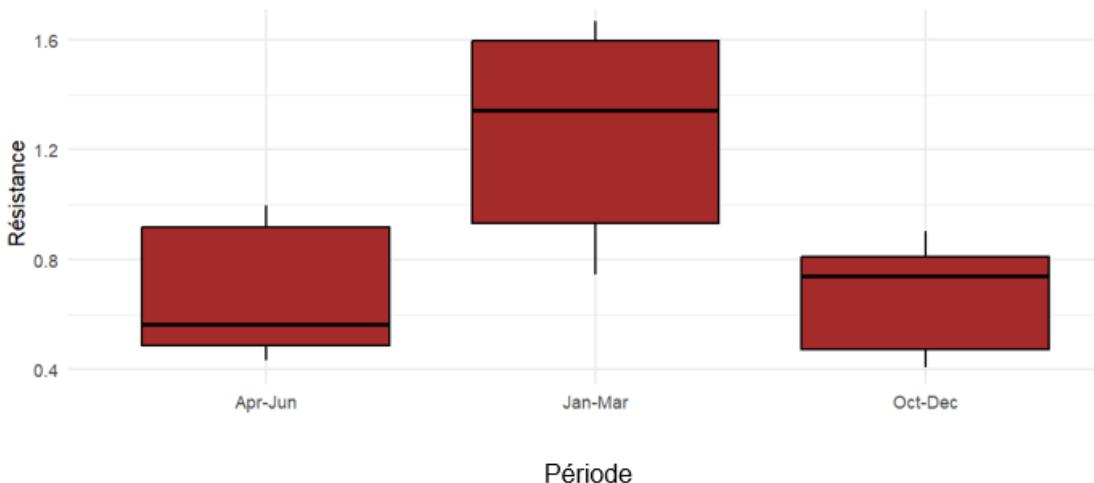
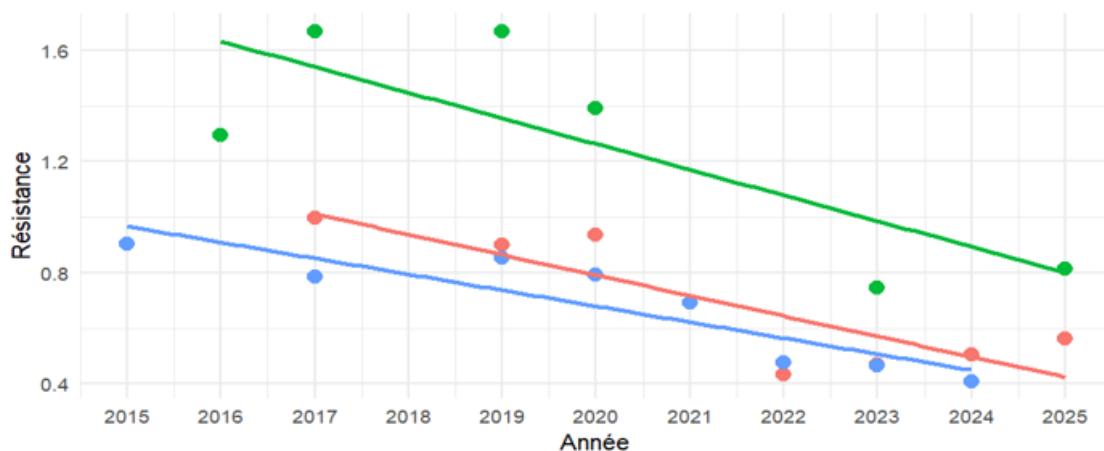


Diagramme en boîte de la résistance des arbustes par période

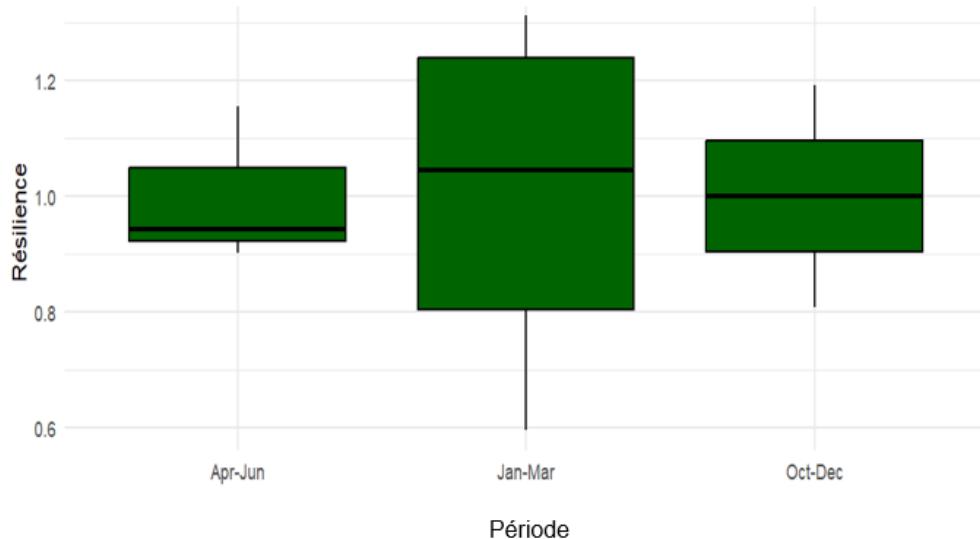


Evolution de la résistance des arbustes par période

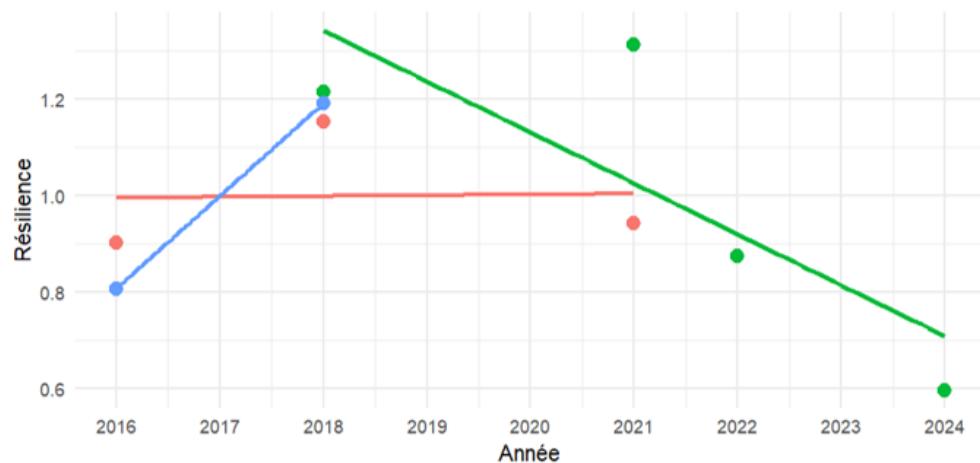


Variable	Saison	Pente	p_value	IC_inf	IC_sup	
Résista...	Apr-J...	-0.0733	0.0139	-0.124	-0.0225	
Résista...	Jan-M...	-0.0923	0.0600	-0.191	0.00622	
Résista...	Oct-D...	-0.0574	0.00242	-0.0854	-0.0294	

Diagramme en boîte de la résilience des arbustes par période



Evolution de la résilience des arbustes par période



Saison	Variable	Pente	p_value	IC_inf	IC_sup	
Résilie...	Apr-J...	0.00167	0.980	-0.681	0.684	● Apr-Jun
Résilie...	Jan-M...	-0.106	0.194	-0.342	0.131	● Jan-Mar
Résilie...	Oct-D...	0.192	NaN	NaN	NaN	● Oct-Dec

La végétation inondée

Période	Année	Saison	NDVI mean	SPI	Sécheresse	Resilience	OCT	JAN	APR	Resistance
Oct-Dec 2015	2015	Oct-Dec	0,2317	-1,43	Oui		0,2769	0,219925	0,3139	0,836764
Oct-Dec 2016	2016	Oct-Dec	0,2987	1,07	Non	1,078729				
Jan-Mar 2016	2016	Jan-Mar	0,3211	-0,5	Oui					1,460043
Apr-Jun 2016	2016	Apr-Jun	0,2473	0,18	Non	0,787831				
Oct-Dec 2017	2017	Oct-Dec	0,2882	-1	Oui					1,040809
Jan-Mar 2017	2017	Jan-Mar	0,3537	-0,35	Oui					1,608276
Apr-Jun 2017	2017	Apr-Jun	0,3387	-0,35	Oui					1,079006
Oct-Dec 2018	2018	Oct-Dec	0,2551	0,99	Non	0,921271				
Jan-Mar 2018	2018	Jan-Mar	0,2467	2,46	Non	1,121746				
Apr-Jun 2018	2018	Apr-Jun	0,3805	1,6	Non	1,212169				
Oct-Dec 2019	2019	Oct-Dec	0,1671	-0,59	Oui					0,603467
Jan-Mar 2019	2019	Jan-Mar	0,2515	-0,58	Oui					1,143572
Apr-Jun 2019	2019	Apr-Jun	0,3883	-0,33	Oui					1,237018
Oct-Dec 2020	2020	Oct-Dec	0,1261	-0,14	Oui					0,455399
Jan-Mar 2020	2020	Jan-Mar	0,3113	-0,17	Oui					1,415483
Apr-Jun 2020	2020	Apr-Jun		-0,18	Oui					
Oct-Dec 2021	2021	Oct-Dec	0,1862	-0,78	Oui					0,672445
Jan-Mar 2021	2021	Jan-Mar	0,2478	0,34	Non	1,126748				
Apr-Jun 2021	2021	Apr-Jun		0	Non					
Oct-Dec 2022	2022	Oct-Dec	0,0817	-0,18	Oui					0,295052
Jan-Mar 2022	2022	Jan-Mar	0,1937	0,2	Non	0,880755				
Apr-Jun 2022	2022	Apr-Jun		-0,23	Oui					
Oct-Dec 2023	2023	Oct-Dec	0,0657	-1,12	Oui					0,23727
Jan-Mar 2023	2023	Jan-Mar	0,226	-0,54	Oui					1,027623
Apr-Jun 2023	2023	Apr-Jun		-0,15	Oui					
Oct-Dec 2024	2024	Oct-Dec	0,1079	-0,94	Oui					0,389671
Jan-Mar 2024	2024	Jan-Mar	0,1915	0	Non	0,870751				
Apr-Jun 2024	2024	Apr-Jun		-0,9	Oui					
Oct-Dec 2024	2024	Oct-Dec	0,1079	-0,94	Oui					0,389671
Jan-Mar 2025	2025	Jan-Mar	0,2268	-0,35	Oui					1,031261
Apr-Jun 2025	2025	Apr-Jun		-0,63	Oui					

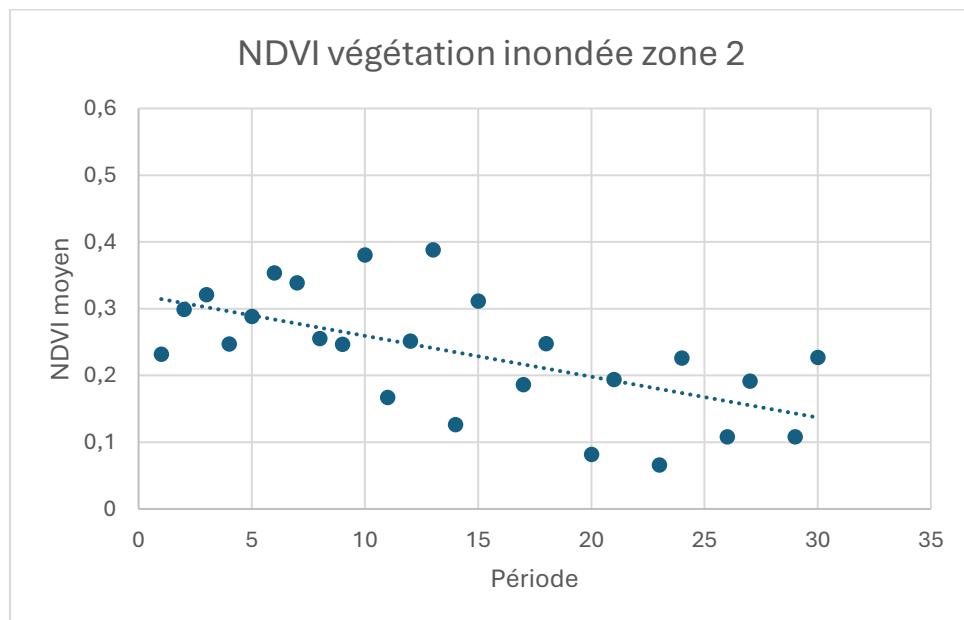
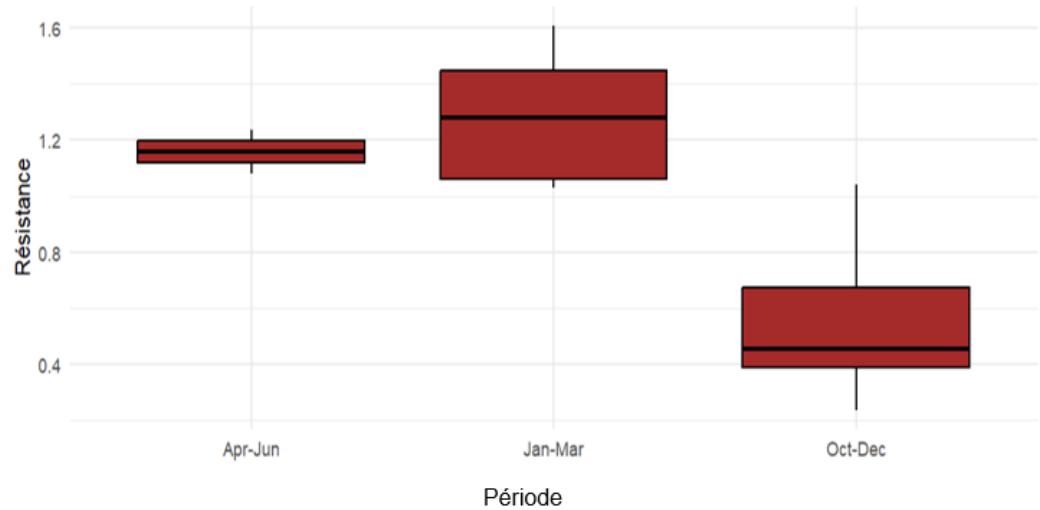
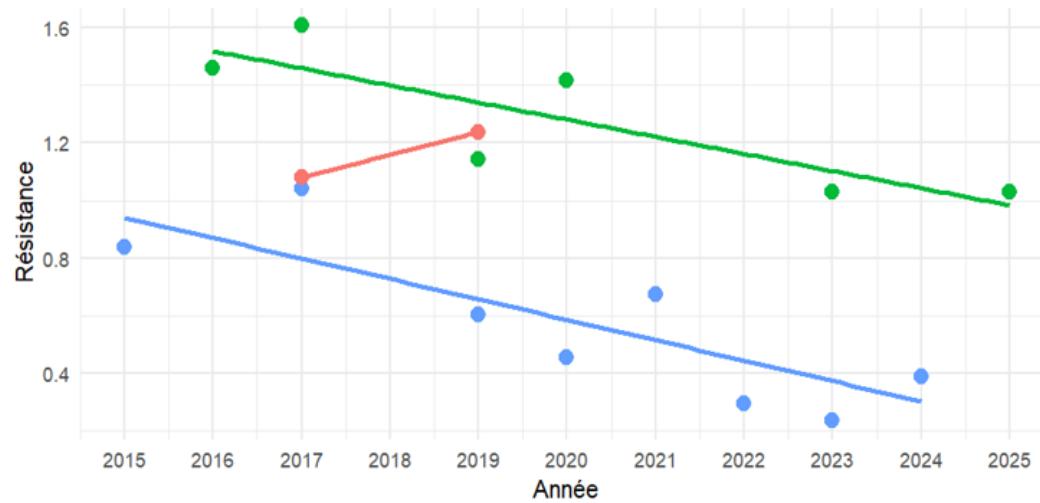


Diagramme en boîte de la résistance de la végétation inondée par période

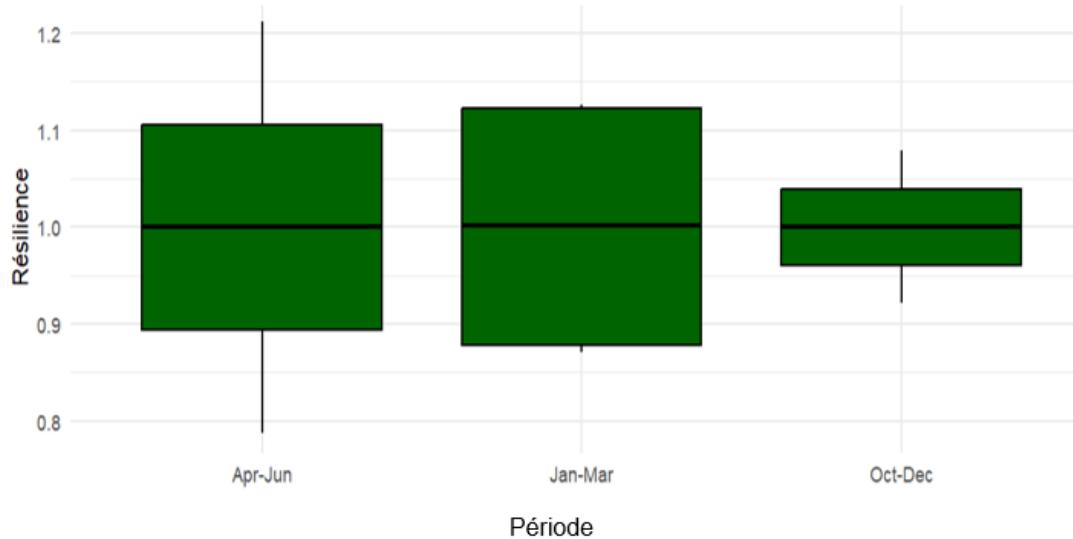


Evolution de la résistance de la végétation inondée par période

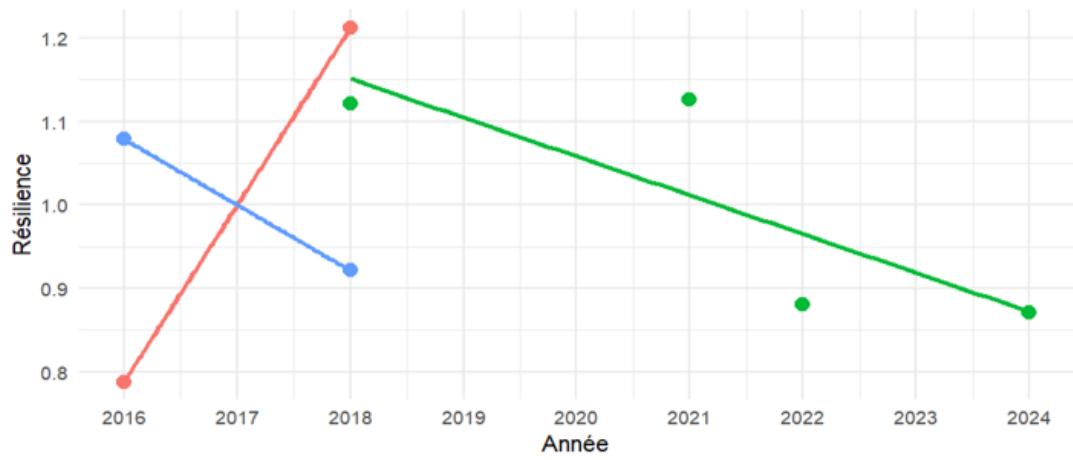


Variable	Saison	Pente	p_value	IC_inf	IC_sup	
1 Résistance	Apr-J...	0.0790	NaN	NaN	NaN	Apr-Jun
2 Résistance	Jan-M...	-0.0595	0.0374	-0.113	-0.00562	Jan-Mar
3 Résistance	Oct-D...	-0.0710	0.00501	-0.113	-0.0293	Oct-Dec

Diagramme en boîte de la résilience de la végétation inondée par période



Evolution de la résilience de la végétation inondée par période



Saison	Variable	Pente	p_value	IC_inf	IC_sup	
Résilience	Apr-J...	0.212	Nan	Nan	Nan	Apr-Jun
Résilience	Jan-M...	-0.0465	0.190	-0.149	0.0559	Jan-Mar
Résilience	Oct-D...	-0.0787	Nan	Nan	Nan	Oct-Dec

Annexe 5 : Carte des acteurs du territoire

