

Université de Toulouse

MASTER 1 GÉOMATIQUE

« Sciences Géomatiques en environnement et Aménagement » (**SIGMA**)

<http://sigma.univ-toulouse.fr>

RAPPORT DE MASTER 1

Productivité végétale et dégradation forestière :
Étude à Paragominas dans le cadre du projet TerrAmaz

LIMA Lucas Pereira das Neves Souza

Centre de coopération Internationale en Recherche
Agronomique pour le Développement (CIRAD)



Maîtres de stage : Lilian BLANC et Julie BETBEDER
Enseignante-référente : Yousra HAMROUNI

Résumé

Cette étude vise à définir et évaluer un indicateur de surveillance de la productivité forestière dans les territoires amazoniens, dans le cadre du projet TerrAmaz. Ce projet cherche à combiner des alternatives socio-économiques et techniques pour améliorer la gouvernance territoriale et atténuer la déforestation et la dégradation des forêts. En utilisant l'indice de végétation *Enhanced Vegetation Index* (EVI) fourni par le capteur MODIS sur une période de 20 ans (2000-2020), une analyse statistique des Moindres Carrés Ordinaires a été employée pour évaluer les tendances de la productivité forestière. L'analyse a été réalisée sur des fenêtres temporelles glissantes de cinq ans, recalculées tous les trois ans, en ne considérant que les données avec un coefficient de confiance de 99,9 % ($p\text{-value} < 0,001$). Pour vérifier la fiabilité, les résultats de la tendance de l'EVI ont été comparés aux données de dégradation forestière fournies par le *Joint Research Centre* de la Commission Européenne. L'étude a révélé que les événements significatifs de dégradation forestière ont été effectivement capturés par l'analyse statistique. Cependant, aucune corrélation claire n'a été trouvée entre les tendances de l'EVI et les dégradations plus subtiles ou dans les zones sans dégradation. L'étude souligne la fragilité des données MODIS pour surveiller la végétation à l'échelle des territoires amazoniens, où la couverture nuageuse introduit du bruit dans les images et provoque des lacunes dans la série temporelle.

Mots clefs : Productivité forestière, dégradation forestière, EVI, MODIS, TerrAmaz

Abstract

This study aims to define and evaluate an indicator to monitor forest productivity in Amazonian territories. The research is part of the TerrAmaz project, which seeks to combine socio-economic and technical alternatives to improve territorial governance and mitigate deforestation and forest degradation. Using Enhanced Vegetation Index (EVI) data from the MODIS sensor over 20 years (2000-2020), an Ordinary Least Squares statistical analysis was employed to assess forest productivity trends. The analysis was performed on five-year rolling windows every three years, considering only data with a 99.9% confidence coefficient ($p\text{-value} < 0.001$). To verify the reliability of the statistical method, the EVI trend results were compared with forest degradation data provided by the Joint Research Centre of the European Commission. The study revealed that significant forest degradation events were effectively captured by the statistical analysis. However, no clear correlation was found between EVI trends and more subtle degradations or in areas without degradation. The study highlights the fragility of MODIS data for monitoring vegetation at the scale of Amazonian territories, where cloud cover introduces noise in the images and causes gaps in the time series.

Keywords: Forest productivity, forest degradation, EVI, MODIS, TerrAmaz

Remerciements

Une mémoire se fait toujours à plusieurs mains et à travers de nombreux échanges, c'est pourquoi je tiens à exprimer ici mes remerciements.

Tout d'abord, un grand merci à mes maîtres de stage Julie Betbeder et Lilian Blanc pour l'opportunité. Votre encadrement m'a aidé à grandir scientifiquement et à améliorer mes connaissances sur la forêt et sur la géomatique.

À toute l'équipe du CIRAD pour leur accueil, en particulier à Marie-Jo Darcq qui m'a aidé à contourner les contraintes administratives d'un titre de séjour qui n'a jamais été délivré à temps.

À mon enseignante-référente Yousra Hamrouni, qui a accepté de suivre mon travail avec beaucoup d'attention et des commentaires toujours pertinents pour la mémoire.

À toute l'équipe pédagogique et administrative du master SIGMA.

À ma famille, ma mère Márcia et mon père Francisco pour tout leur soutien.

À Victoria, mon amour et ma compagne. Merci pour tout, sans toi, rien de tout cela n'aurait été possible.

Table de matières

1.	Présentation du contexte du stage.....	7
1.1.	L'organisme d'accueil.....	7
1.2.	Le projet TerrAmaz.....	7
1.3.	Le déroulement du stage	8
2.	Introduction	10
2.1.	Problématique	10
2.1.1.	Objectif général.....	11
2.1.2.	Objectifs spécifiques	11
2.1.3.	Hypothèses de départ	12
2.2.	Zone d'étude : Paragominas.....	12
3.	L'état de l'art	15
3.1.	Les indices de végétation et la productivité forestière	15
3.2.	La dégradation forestière	17
3.3.	Surveiller la dégradation	19
4.	Matériel et méthodes	22
4.1.	Les données TMF du JRC.....	22
4.1.1.	Traitements des données TMF	23
4.2.	Les données MODIS VI Terra	26
4.2.1.	Prétraitement des données MODIS EVI	26
4.3.	Analyse des relations entre les données MODIS et la dégradation dérivée des données TMF	28
4.4.	Les outils utilisés.....	31
5.	Résultats	32
5.1.	Cartographie des tendances de l'EVI.....	32
5.2.	Cartographie de la dégradation	34
5.3.	Les valeurs de dégradation selon les tendances de l'EVI	36
5.4.	Application <i>Shiny</i> pour appuyer l'interprétation des données	37
6.	Discussion	41
6.1.	Perspectives.....	43
7.	Conclusion	45
8.	Références bibliographiques.....	46
8.1.	Sites utilisés.....	50
9.	Annexes.....	51
9.1.	Tableau avec les codes binaires dans le MODIS QA et leurs descriptions	51
9.2.	Résultats de Cotriguaçu	52
9.3.	Résultats de Guaviare.....	56
9.4.	Résultats de Madre de Dios	60
9.5.	Histogrammes de la dégradation accumulée.....	64

Liste des figures

Fig. 1 : Carte de localisation des quatre territoires étudiés dans le cadre du projet TerrAmaz lors du stage.....	8
Fig. 2 : Diagramme de GANTT du déroulement du stage.....	9
Fig. 3 : Carte de Paragominas avec l'usage des sols en 2022 et les zones d'intérêt.....	14
Fig. 4 : Signature spectrale de la végétation, du sol nu et de l'eau.....	15
Fig. 5 : Schéma montrant les causes et les impacts de la dégradation.....	18
Fig. 6 : Deux images Landsat d'une zone dégradée à Paragominas avant et après l'incendie.....	19
Fig. 7 : Trois images Landsat d'une zone dégradée par l'extraction sélective de bois près de Paragominas.....	20
Fig. 8 : Infographie montrant comment le pourcentage de dégradation a été calculé pour chaque pixel MODIS EVI pour une année donnée	24
Fig. 9 : Chaîne de traitements pour calculer la dégradation à partir des données de perturbation forestière du JRC.....	25
Fig. 10 : Masque pour retenir les pixels fiables (a) et la couverture forestière en 2020 (b).	27
Fig. 11 : Graphique des moyennes de l'EVI avant et après le lissage par le filtre Savitzky-Golay ...	28
Fig. 12 : Chaîne de prétraitement des données MODIS EVI pour les préparer au calcul de la productivité	28
Fig. 13 : Schéma de l'approche méthodologique générale utilisée et des résultats générés.	30
Fig. 14 : Cartes de tendance de l'EVI pour les six périodes analysées.....	32
Fig. 15 : Graphique à barres empilées montrant la surface de chaque classe de tendance de l'EVI pour chaque période.	33
Fig. 16 : Cartes du pourcentage de dégradation accumulé dans le pixel MODIS.	34
Fig. 17 : Surface des pixels présentant une certaine dégradation de manière cumulative.....	35
Fig. 18 : Surface des pixels présentant une certaine dégradation par période	35
Fig. 19 : Boîte à moustaches avec les valeurs de dégradation selon les tendances de l'EVI	36
Fig. 20 : Surface des tendances de l'EVI et de la dégradation accumulée et par période.	37
Fig. 21 : Capture d'écran de l'application <i>Shiny</i> affichant les informations d'un pixel déterminé	38
Fig. 22 : Capture d'écran de la région touchée pour le feux en 2015 et 2016 et analysée avec l'application <i>Shiny</i>	39
Fig. 23 : Capture d'écran de la région de la ferme Capim explorée par la société CIKEL et analysée avec l'application <i>Shiny</i>	40
Fig. 24 : Carte des zones impactées par les incendies de forêt de 2015 et 2016 dans la municipalité de Paragominas.	41

Liste des tableaux

Tableau 1 : Jeux de données sur les perturbations forestières tropicales fournis par le JRC.....	22
Tableau 2 : Fenêtres temporelles utilisées pour calculer le pourcentage de dégradation accumulée.24	24
Tableau 3 : Fenêtres temporelles utilisées pour calculer le pourcentage de dégradation par période24	24
Tableau 4 : Fenêtres temporelles utilisées pour calculer la tendance de l'EVI	29
Tableau 5 : Packages utilisées dans le langage R	31

Liste d'acronymes

AFD	Agence française de développement
AVSF	Agronomes & Vétérinaires Sans Frontières
AppEEARS	Application for Extraction and Exploring Analysis Ready Samples
CIRAD	Centre de Recherche Agronomique pour le Développement
DHP	Diamètre à Hauteur de Poitrine
EVI	Enhanced Vegetation Index
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EPIC	Établissement Public à caractère Industriel et Commercial
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FSC	Forest Stewardship Council
GFC	Global Forest Change
GLAD	Global Land Analysis and Discovery
JRC	Joint Research Centre
MIR	Mid-InfraRed
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MCO	Moindres Carrés Ordinaires
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIR	Near-InfraRed
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
ONFi	Office National de Forêts (International)
OSM	OpenStreetMap
ONG	Organisations Non Gouvernementales
PPB	Productivité Primaire Brut
RAISG	Rede Amazônica de Informação Socioambiental Georreferenciada
RESTREND	RESidual TREND Analysis
SAVI	Soil-Adjusted Vegetation Index
TI	Terre Indigène
TMF	Tropical Moist Forest
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification
VI	Vegetation Index

1. Présentation du contexte du stage

1.1. L'organisme d'accueil

Le CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), créé en 1984, est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) sous la tutelle des ministères de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, et de l'Europe et des Affaires étrangères. Sa mission principale est de produire et transmettre des connaissances pour soutenir l'innovation et le développement agricoles dans les pays tropicaux et méditerranéens. Le CIRAD est structurée en trois départements scientifiques :

- 1. Systèmes biologiques (BIOS)** : axé sur l'étude des systèmes vivants.
- 2. Performance des systèmes de production et de transformation tropicaux (Persyst)** : centré sur la production agricole en milieu tropical.
- 3. Environnement et sociétés (ES)** : explore les interactions entre agriculture, environnement et sociétés humaines.

Le stage a été réalisé à l'Unité de Recherche Forêts et Sociétés (UR Forêts et Sociétés) du département Environnement et Sociétés. Son objectif principal est de conserver, valoriser et restaurer les forêts tropicales par des pratiques de gestion durable. L'approche de cette unité est interdisciplinaire et collaborative, avec un projet scientifique structuré autour de trois axes principaux : i) services écosystémiques, ii) territoires et paysages, iii) politiques, marchés et filières. (ur-forests-societes.cirad.fr)

1.2. Le projet TerrAmaz

Le stage s'est développé dans le cadre du projet TerrAmaz, une initiative visant le développement durable et inclusif en Amazonie. Financé par l'Agence Française de Développement (AFD), le projet est une collaboration entre le CIRAD, Agronomes & Vétérinaire sans Frontières (AVSF) et l'Office National des Forêts international (ONFi). Le projet a pour objectif principal de lutter contre la déforestation et la dégradation des forêts amazoniennes impliquant la coordination et l'engagement des acteurs locaux. Cela inclut la transition vers des pratiques agricoles durables, la conservation et la restauration des ressources forestières, ainsi que la promotion de l'inclusion sociale. (terramaz.org)

Les partenaires, ainsi que des réseaux locaux, travaillent dans cinq territoires pilotes en Colombie, au Brésil, au Pérou et en Équateur, chacun avec des objectifs spécifiques. TerrAmaz est structuré en trois composantes principales :

1. le développement d'outils et de méthodologies d'ingénierie territoriale ;
2. le soutien à la mise en œuvre d'actions concertées auprès des fermes, des communautés et des institutions locales dans 5 territoires amazoniens ;

3. l'animation scientifique et la capitalisation autour et de dispositifs d'aménagement du territoire.

Le stage s'inscrit dans la troisième composante du projet, mise en œuvre exclusivement sur les sites au Brésil, en Colombie et au Pérou (Figure 1). Son objectif est de promouvoir la territorialisation des politiques publiques par l'expansion des outils de gestion territoriale. Ses activités sont divisées en trois sous-composantes : i) gouvernance, politiques publiques et certification, ii) développement de référentiels techniques et économiques pour les systèmes de production durables, et iii) création d'indicateurs et de référentiels techniques pour surveiller et planifier la transition des territoires, cette dernière étant le principal objectif de ce travail.

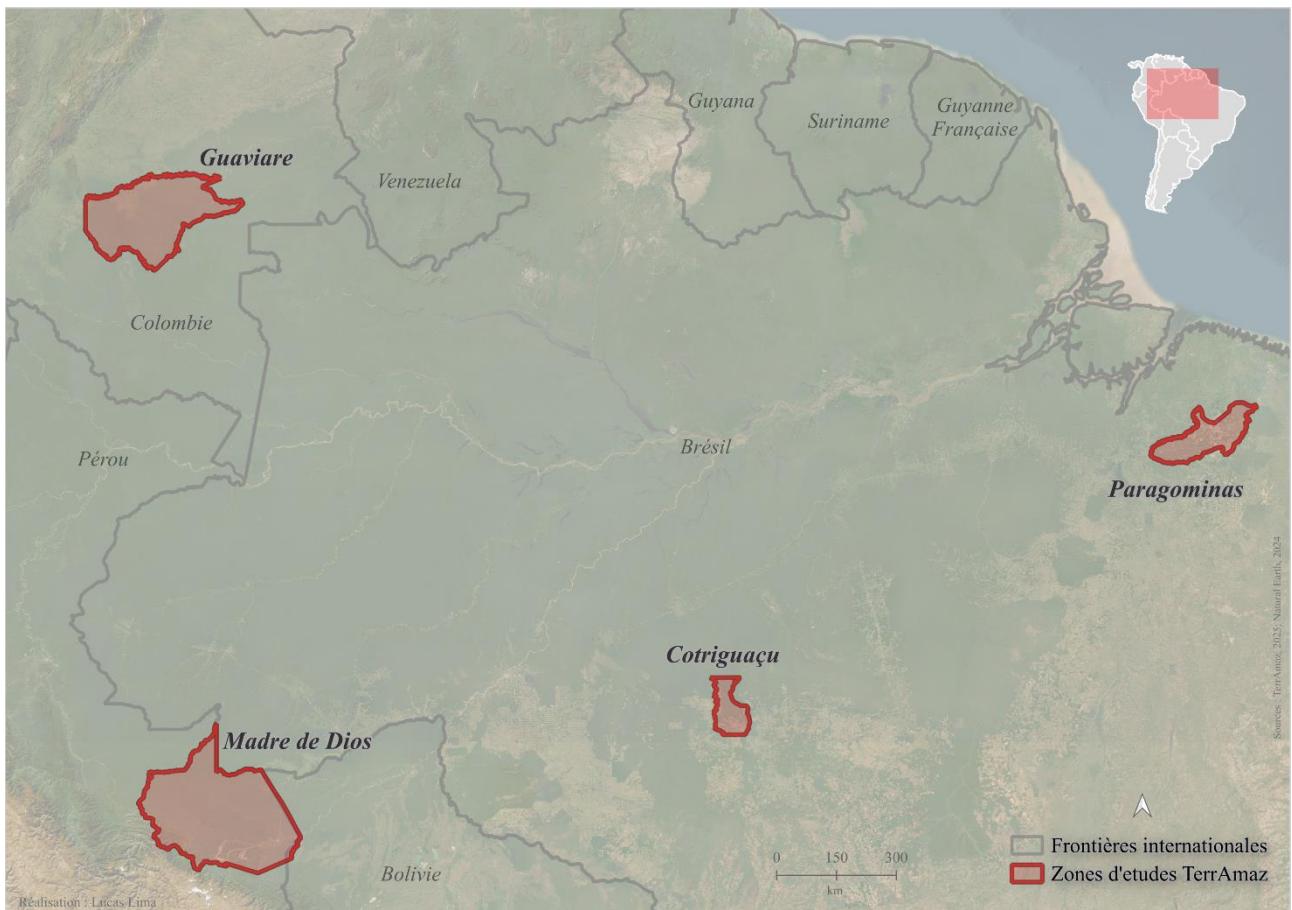


Fig. 1 : Carte de localisation des quatre territoires étudiés dans le cadre du projet TerrAmaz lors du stage.

Les scripts et analyses réalisés dans le cadre du stage ont été conçus pour les quatre territoires concernés par la troisième composante. Cependant, par souci d'espace et aux vues des résultats obtenus, ce rapport se concentrera uniquement sur la région de Paragominas.

1.3. Le déroulement du stage

Le stage s'est déroulé sur le campus de Baillarguet du CIRAD du 18 mars au 30 août 2024. Dans un premier temps, une recherche bibliographique sur le projet TerrAmaz a été effectuée et le

sujet à traiter a été défini avec les maîtres de stage. Il a été convenu qu'une évaluation de la productivité forestière serait réalisée, s'appuyant sur l'étude effectuée au Mozambique par Montfort et al. (2020). Par la suite, le travail s'est concentré sur le téléchargement des images satellite du *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) de la *National Aeronautics and Space Administration NASA* et des données de dégradation fournies par le *Joint Research Centre* (JRC) de la Commission Européenne. L'étude a été ajustée au contexte amazonien, notamment en utilisant l'indice de végétation *Enhanced Vegetation Index* (EVI) à la place du *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), ainsi que d'autres adaptations¹ et exigences spécifiques au projet TerrAmaz, telles que l'analyse des séries temporelles en différentes périodes.

Les premiers résultats ont mis en évidence la nécessité d'adapter la méthodologie, en commençant par un prétraitement des données plus robuste et une analyse statistique différente de celle trouvée dans la bibliographie existante. L'adaptation a amélioré les résultats, mais pas comme attendu. Outre les résultats et la discussion, ce rapport aborde également les choix méthodologiques et les difficultés rencontrées.

Étant donné que le stage fait partie d'une recherche, il est compliqué d'élaborer un organigramme préalable avec des tâches déterminées. Il a été nécessaire de faire plusieurs allers-retours, y compris des retours à la bibliographie, et d'adapter les activités au fur et à mesure que les résultats apparaissaient. Ci-dessous, un diagramme de Gantt exposant les principales activités de ce processus ainsi que le temps consacré à chacune d'elles.

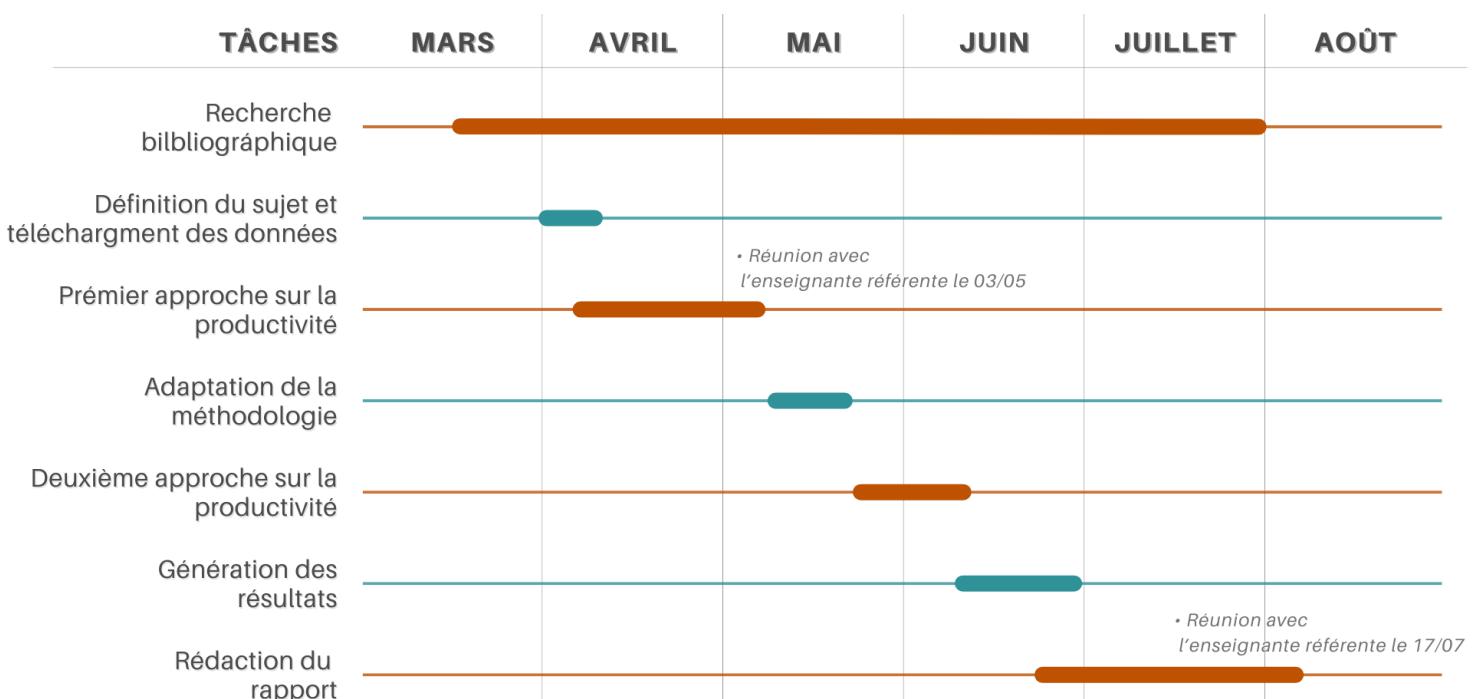


Fig. 2 : Diagramme de GANTT du déroulement du stage

1 L'approche générale et les choix méthodologiques seront expliqués dans la section Matériel et Méthodes.

2. Introduction

2.1. Problématique

L'Amazonie est la plus grande et la mieux préservée des forêts tropicales du monde. Partagée par neuf pays sud-américains, elle abrite 10 % de la biodiversité terrestre. Son principal système fluvial, constitué par le fleuve Amazone et ses affluents, est responsable de 16 % de l'eau douce qui s'écoule vers les océans (Müller, 2020). Selon la RAISG² (2022), 8,7% de la forêt Amazonienne a été déforesté. Depuis le milieu des années 1970, seule la partie brésilienne, qui correspond aux deux tiers de l'Amazonie, a perdu 20 % de sa surface originelle (Da Cruz et al., 2021) lorsque l'ère moderne de la déforestation a été inaugurée avec les projets de développement national mis en œuvre par le gouvernement militaire au Brésil (Fearnside, 2005).

Les perturbations de la couverture forestière sont l'une des principales causes d'émissions de carbone dans les pays amazoniens (Song et al., 2015) et ont d'autres conséquences graves, telles que la diminution de la biodiversité, l'érosion des sols et l'augmentation de la susceptibilité aux incendies de forêt (FAO et UNEP, 2020). Les impacts vont au-delà de la région et entraînent des modifications du climat régional et mondial, avec une augmentation des températures et une diminution des précipitations dans la partie sud du continent américain (Marengo et al., 2022).

Les perturbations de la forêt amazonienne et les enjeux nocifs qu'elles déclenchent cristallisent les préoccupations de la coopération internationale. Celle-ci cherche à freiner ces dynamiques en mettant en œuvre des initiatives assurant des modèles de développement économique conciliant une meilleure protection de la forêt. Le projet TerrAmaz est l'une de ces initiatives, visant à allier des alternatives socio-économiques et techniques pour améliorer la gouvernance des territoires. Ce programme a pour objectif de mitiger l'impact sur la forêt par le biais de politiques publiques qui encouragent, au niveau infranational, la transition d'un modèle d'utilisation prédateur des ressources naturelles vers une économie à faible émission de carbone, la conservation des écosystèmes et le bien-être social (Blanc et al., 2022).

La réduction de la déforestation est généralement l'objectif principal de cette transition, étant souvent utilisée de manière isolée comme indicateur de la performance environnementale d'un territoire donné. Cependant, cet indicateur ne reflète que partiellement la réalité, négligeant une vision plus globale du fonctionnement de la forêt. D'autres processus positifs, comme la régénération des forêts secondaires, ou négatifs, comme la dégradation³, ne sont pas évalués. En se concentrant

La RAISG (Réseau Amazonien d'Information Socio-environnementale Géoréférencée) est un réseau d'organisations de la société civile qui travaillent en Amazonie pour produire, systématiser et diffuser des informations socio-environnementales géoréférencées²

³ Les différentes acceptations de la dégradation forestière, ainsi que ses diverses causes seront mieux abordées dans la section 3.2 de l'État de l'art.

uniquement sur la déforestation, d'autres éléments importants tels que la structure et la fonction de la forêt ainsi que les services écosystémiques qu'elle fournit sont négligés. (Blanc et al., 2022).

Ainsi, cette étude s'inscrit dans la démarche de produire de nouveaux indicateurs prenant en compte ces autres processus et afin d'aider à suivre les initiatives territoriales du projet dans leur effort de transition économique. Ces indicateurs doivent être capables d'aller au-delà de la déforestation, mais aussi de mesurer et d'évaluer la dégradation et la régénération forestières. Ils doivent être produits régulièrement et avoir du sens pour les acteurs locaux, les aidant à administrer le territoire

L'indicateur qui sera abordé ici est la productivité forestière, qui peut être définie comme la Productivité Primaire Brute des forêts (PPB). Cet indicateur mesure la capacité de la végétation à capturer le carbone de l'atmosphère par la photosynthèse. Il sera mesuré dans ce travail par une analyse statistique des valeurs d'un indice de végétation, l'EVI, qui est sensible à l'activité chlorophyllienne et à la densité du couvert forestier. Les données utilisées proviendront d'une série temporelle de l'EVI captée par le capteur MODIS sur une période de 20 ans.

La variation des valeurs de l'EVI au fil du temps peut signaler des modifications de l'activité végétale et des flux de carbone stockés par la végétation et, par conséquent, de la productivité forestière. (Higginbottom et Symeonakis, 2014). Une baisse significative de la productivité sur une période indique des perturbations forestières. À l'inverse, une augmentation de la productivité signale une absence de perturbation et une accumulation de carbone. C'est pourquoi l'analyse des tendances de ces indices est considérée par certains auteurs comme un indicateur potentiel des processus de dégradation et de régénération (Bai et al., 2008 ; Eckert et al., 2015 ; Higginbottom et Symeonakis, 2014).

Comme données de référence, les informations de perturbation forestière provenant du JRC seront utilisées. Le JRC a développé un ensemble de produits sur les changements de couverture forestière dans les forêts tropicales humides (dégradation, déforestation et régénération). Ces données sur la dégradation seront mises en relation avec les résultats des calculs de l'analyse statistique des valeurs de l'EVI afin de déterminer s'il est possible, à partir des observations du capteur MODIS, de générer un indicateur de suivi de la productivité fiable et robuste pour les gestionnaires et les acteurs publics des territoires amazoniens.

2.1.1. Objectif général

Définir et évaluer un indicateur de la productivité forestière à l'échelle d'un territoire amazonien.

2.1.2. Objectifs spécifiques

- Établir un indicateur de productivité forestière à partir des données l'EVI fournies par le capteur MODIS sur une période de 20 ans dans quatre territoires amazoniens ;
- Évaluer la relation entre la productivité forestière calculée avec la série temporelle MODIS et la dégradation forestière issue des données *Tropical Moist Forest* fournies

par le JRC, afin de déterminer si cette productivité peut générer un indicateur fiable pour surveiller la couverture forestière à l'échelle d'un territoire en Amazonie.

2.1.3. Hypothèses de départ

- Il existe une relation entre la productivité forestière calculée avec les données MODIS EVI et les informations sur la dégradation fournies par le JRC
- En utilisant la série temporelle MODIS, il est possible de détecter la dégradation ou la récupération de la forêt après des perturbations forestières extrêmes (par exemple un incendie de forêt).

2.2. Zone d'étude : Paragominas

Pour ce rapport, les résultats de Paragominas ont été privilégiés en raison de la connaissance approfondie des maîtres de stage sur les paysages et l'histoire de la municipalité. Cette expertise a été essentielle pour créer un référentiel d'analyse capable d'évaluer l'efficacité de l'indicateur de productivité forestière sans avoir à se rendre sur le terrain.

Paragominas est une municipalité brésilienne située au nord-est de l'État du Pará. Elle couvre une superficie de 19 342 km² et compte une population de 105 550 habitants (IBGE, 2022). L'histoire de sa colonisation et les cycles économiques qui ont façonné son paysage à chaque *boom* sont des exemples idéaux des projets d'intégration et de développement réalisés dans la seconde moitié du XXe siècle, qui ont inauguré l'ère moderne de la déforestation en Amazonie brésilienne.

La municipalité a été fondée en 1965 le long de la BR-010 qui relie Brasília à Belém et, au début, sa colonisation a été marquée par une forte déforestation pour l'élevage. La conversion de forêts pour l'élevage extensif était également motivée par l'appropriation des terres par les nouveaux occupants, qui cherchaient d'abord à marquer et valoriser leur territoire avant de le développer. Dans les années 1980, la municipalité a connu un essor de l'exploitation massive de ses forêts, devenant le premier producteur de bois du Brésil et, de 1983 au début des années 2000, un important producteur de bétail et de charbon de bois (Laurent et al., 2017).

Le début des années 2000 est marqué par l'expansion de l'agro-industrie avec la monoculture de soja et de maïs, faisant de Paragominas l'une des municipalités les plus déforestées de l'Amazonie. En 2007, elle est placée sur la « liste noire » du gouvernement fédéral parmi les plus grands déforestateurs de l'Amazonie, faisant face à une forte pression des agences fédérales. Parmi les actions marquantes, les opérations « Arco de Fogo » et « Pista Negra »⁴ ont été mises en œuvre, entraînant la fermeture de huit scieries et de 120 fours à charbon de bois, tous illégaux (Pikkety et al., 2015). En

⁴ En traduction libre en français, les noms des opérations seraient respectivement Arc de Feu et Piste Noire.

plus de ces actions directes dans la municipalité, deux autres mesures mises en place par le gouvernement fédéral pour toute l'Amazonie ont eu un impact important sur la réduction de la déforestation à Paragominas : le Moratoire de Soja en 2006 et le Moratoire du Bœuf en 2009.⁵

En réponse à la pression gouvernementale, Paragominas a lancé en 2008 l'initiative pionnière « Município Verde »⁶, visant à éliminer la déforestation illégale, atteindre la zéro déforestation d'ici 2014 et promouvoir des systèmes de production alternatifs et la reforestation. La gestion territoriale a été améliorée grâce au Cadastro Ambiental Rural⁷ (CAR), qui vise la régularisation environnementale des propriétés rurales. Ce programme a marqué un tournant dans la lutte contre la déforestation, impliquant des actions coordonnées entre producteurs ruraux, ONG environnementales et gouvernement municipal, aboutissant à une mise en œuvre rapide du CAR sur plus de 80 % du territoire et au retrait de Paragominas de la « liste noire » en 2010 (Pikkety et al., 2015).

Actuellement, la municipalité présente une mosaïque paysagère hétérogène, allant des forêts préservées aux forêts fortement dégradées, associées à différents usages des terres, principalement des pâturages et des cultures agricoles, y compris le soja et le maïs. La partie orientale de la municipalité inclut la Terre Indigène⁸ (TI) Alto Rio Guamá, une aire protégée délimitée en 1983. La partie ouest est occupée par la ferme Rio Capim, où la société privée CIKEL Brasil Verde Madeiras Ltda pratique l'exploitation forestière sélective et durable (Figure 2). L'agriculture de subsistance de manioc est la principale activité des petits agriculteurs, accompagnée de la production de poivre, de l'extraction de l'açaï et de l'élevage de bétail à petite échelle (Bourgoin et al., 2021).

Même avec la réduction de la déforestation, Paragominas continue de faire face à des défis tels que la dégradation forestière causée par des pratiques d'exploitation du bois de façon illégale et les incendies de forêt. Cependant, les acteurs locaux sont mobilisés pour chercher des alternatives moins impactantes pour l'environnement en structurant des chaînes de production responsables et innovantes. La conservation et la restauration de l'environnement restent des priorités, avec des projets d'agroécologie et des systèmes agroforestiers gagnant en importance. (Bendahan et al., 2013)

5 La première est un engagement volontaire signé par des entreprises et le gouvernement visant à empêcher la commercialisation du soja cultivé dans les zones déforestées après juillet 2006. La seconde est un engagement entre les abattoirs, les ONG environnementales et le Ministère Public Fédéral visant à tracer la production de bétail et à éradiquer la déforestation illégale associée. Les deux moratoires ont fortement impacté ces filières en limitant l'accès au crédit et aux marchés pour les produits qui ne respectent pas ces engagements.

6 Municipalité verte.

7 Le CAR est un registre électronique où les propriétaires déclarent les zones environnementales de leur propriété et leur conformité aux réglementations. L'objectif est de fournir une radiographie des propriétés rurales du pays pour en favoriser le contrôle, le suivi de leur régularisation et évaluer la dette environnementale des propriétaires.

8 Au Brésil, une Terre Indigène (TI) est une zone officiellement reconnue et délimitée par le gouvernement fédéral, destinée à l'usage et à la possession permanente des peuples indigènes.

Paragominas

usage des sols en 2022

Sources : IBGE, 2023; Mapbiomas, 2022; RAISG, 2023

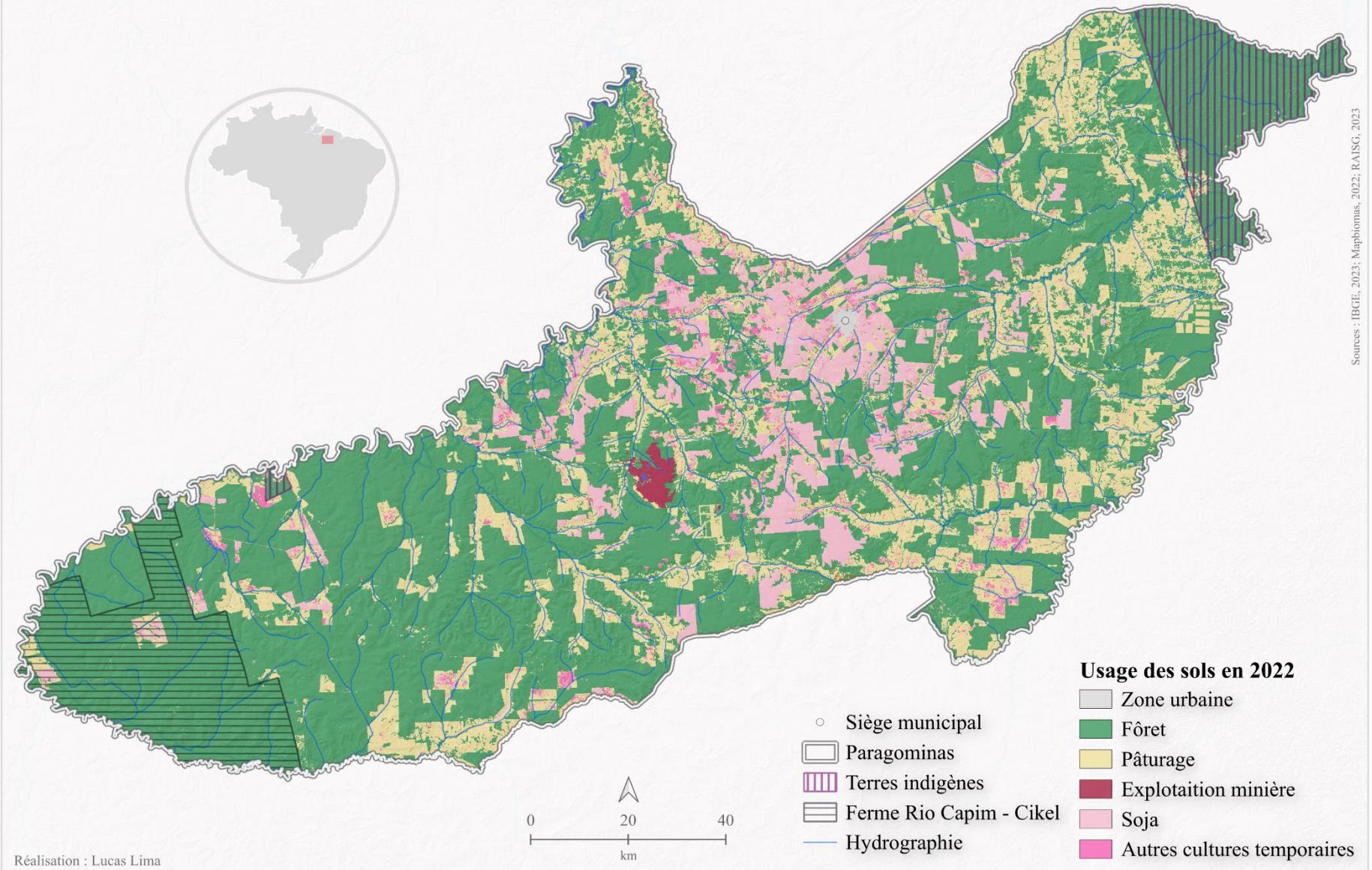


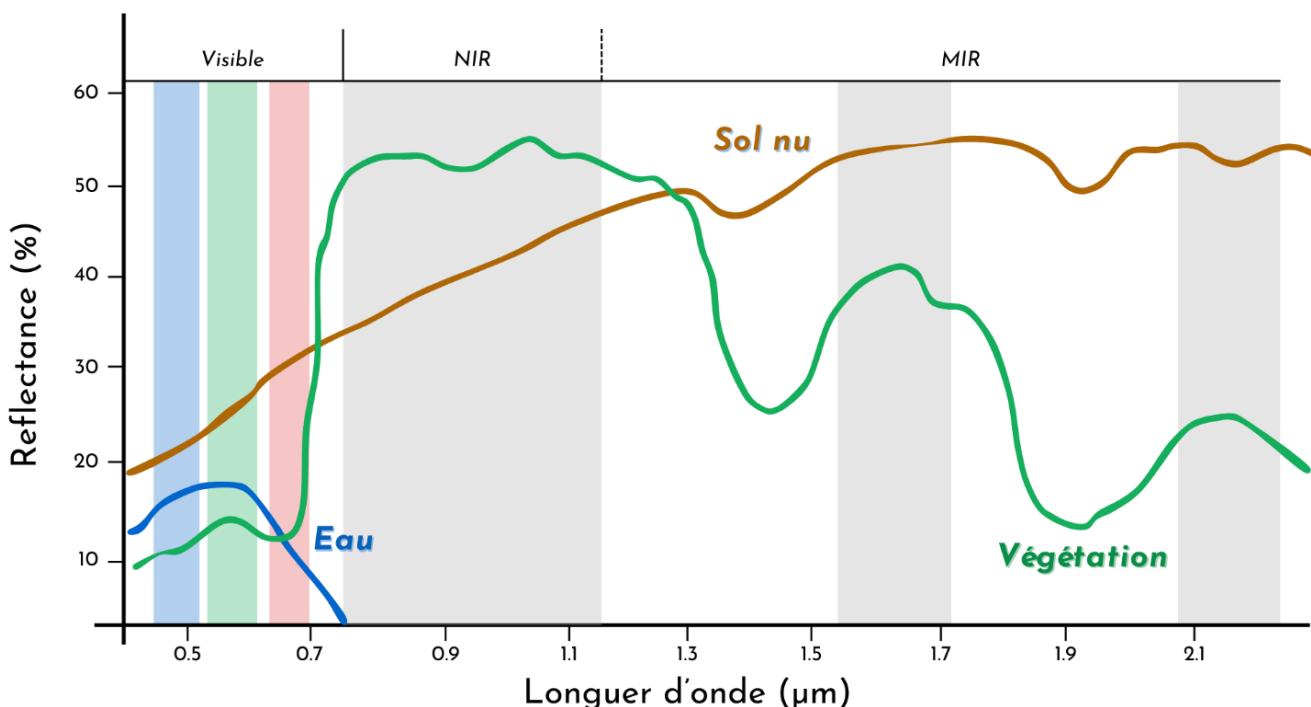
Fig. 3 : Carte de Paragominas avec l'usage des sols en 2022 et les zones d'intérêt.

3. L'état de l'art

3.1. Les indices de végétation et la productivité forestière

La télédétection par satellite est un outil crucial pour le développement et l'amélioration des systèmes d'observation et de surveillance de la Terre. En utilisant des bandes du spectre électromagnétique, elle permet l'étude des phénomènes atmosphériques, océaniques et terrestres (Lillesand et al., 2015). L'un des principaux objectifs de cette technologie est l'étude de la végétation, y compris sa distribution, ses propriétés biophysiques et structurelles. Son potentiel réside dans sa capacité à surveiller la couverture terrestre de manière relativement facile, gratuite et à grande échelle spatio-temporelle.

Une approche de la télédétection pour étudier la végétation est l'utilisation des indices de végétation (IV), qui mesurent l'activité végétative et mettent en évidence le signal réfléchi par les plantes. Ces indices sont calculés en combinant deux ou plusieurs bandes de longueur d'onde, généralement dans les régions du rouge (0,4-0,7 µm) et de l'infrarouge proche (*near-infrared* - NIR) (0,7-1,1 µm). Comme illustré dans la Figure 3, l'analyse des signatures spectrales typiques des feuilles révèle que l'énergie réfléchie dans le visible est faible en raison de la forte absorption par les pigments photosynthétiques, tandis que presque toute la radiation dans la longueur d'onde du NIR est réfléchie en raison des propriétés structurelles de la canopée.



Adapté de Portegen (2017)

Fig. 4 : Signature spectrale de la végétation, du sol nu et de l'eau.

La combinaison des réponses dans le rouge et le proche infrarouge (NIR) est une mesure sensible de l'activité chlorophyllienne. La chlorophylle absorbe fortement la lumière rouge pour la photosynthèse, tandis que le NIR est réfléchi par la structure interne des feuilles. Ainsi, une végétation

saine et active photosynthétiquement présente une forte absorption dans le rouge et une forte réflexion dans le NIR. Cette différence de réponse spectrale est utilisée pour évaluer l'état de santé et la vigueur des plantes, permettant de détecter des changements subtils dans la productivité et la biomasse végétale (Didan et Munoz, 2019). Parmi les indices de végétation, le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) se distingue. Proposé par Rouse et al. (1974), cet indice est une transformation normalisée de la relation entre la réflectance du NIR et du rouge, conçue pour standardiser les valeurs entre -1 et 1 avec la formule suivante :

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Le sol nu présente généralement des valeurs de NDVI négatives ou inférieures à 0,1. La végétation clairsemée, comme les arbustes, les pâturages ou les cultures sénescentes, peut entraîner des valeurs modérées de NDVI entre 0,2 et 0,5. Des valeurs élevées de NDVI entre 0,6 et 0,9 correspondent à une végétation dense, comme celle que l'on trouve dans les forêts tempérées et tropicales ou les cultures à leur pic de croissance. En transformant les données brutes des satellites en valeurs de NDVI, les chercheurs peuvent créer des images et d'autres produits qui fournissent une mesure approximative du type, de la quantité et de l'état de la végétation sur les surfaces terrestres dans le monde entier (Justice et al., 1985 ; Ya'acob et al., 2014).

Une des principales limitations du NDVI est sa sensibilité à l'influence du sol, particulièrement dans les régions à faible couverture végétale. De plus, l'indice tend à saturer dans les zones de haute biomasse, telles que les forêts denses, limitant ainsi sa capacité à différencier les niveaux élevés de densité végétale. Le NDVI est également sensible aux conditions atmosphériques, comme la présence de nuages et d'aérosols, qui peuvent altérer la réflectance enregistrée par les capteurs (Huete et al., 2002). Pour surmonter ces faiblesses, diverses variations du NDVI ont été développées, telles que le *Soil-Adjusted Vegetation Index* (SAVI) (Huete et al., 1988), le *Green Normalized Difference Vegetation Index* (GNDVI) (Gitelson et al., 1996), le *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (Gao, 1996) et l'*Enhanced Vegetation Index* (EVI) (Liu et Huete, 1995).

L'EVI a été proposé pour améliorer la précision de la mesure de la végétation en réduisant simultanément le bruit de fond atmosphérique et la saturation des canopées denses, notamment en conditions de forte végétation. Il est défini comme suit :

$$EVI = G \frac{NIR - Red}{NIR + C1Red - C2Blue + L}$$

où NIR, Rouge et Bleu sont les réflectances de surface corrigées partiellement des effets atmosphériques; L est un facteur d'ajustement du sol, $C1$ et $C2$ sont des coefficients utilisés pour corriger la diffusion des aérosols dans la bande rouge, par l'utilisation de la bande bleue, et G est un facteur de gain ou de mise à l'échelle. Les coefficients adoptés pour l'algorithme EVI sont : $L=1$, $C1=6$, $C2=7,5$ et $G=2,5$. Ainsi, dans les régions amazoniennes présentant une haute biomasse et une quantité importante de vapeur d'eau dans l'atmosphère, le NDVI a tendance à saturer tandis que l'EVI reste sensible aux variations structurales du canopée y compris l'indice de surface foliaire (LAI), le

type de canopée, la physionomie de la plante et l'architecture de la canopée (Huete et al., 2002). Par conséquent, l'EVI sera privilégié dans cette étude.

Étant donné que ces indices sont capables de mesurer l'activité chlorophyllienne, plusieurs études les ont corrélos à la Productivité Primaire Brute des forêts (PPB), c'est-à-dire la capacité de la végétation à capter le carbone de l'atmosphère par la photosynthèse. Le NDVI a été utilisé pour estimer les stocks de carbone et une forte corrélation avec les mesures du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et la hauteur des arbres a été démontrée (Malik et al., 2023). Grâce à une régression log-log, des relations spécifiques entre l'EVI et les estimations du GPP dans différents biomes ont été identifiées (Shi et al., 2017). La variation de ces indices au fil du temps peut signaler des changements dans l'activité des plantes et la quantité de biomasse aérienne (Xiao et al., 2004). Par conséquent, l'analyse des tendances de ces indices a été largement utilisée comme indicateur de la productivité forestière (Higginbottom et Symeonakis, 2014).

3.2. La dégradation forestière

En 2019, les Nations Unies ont désigné la période de 2021 à 2030 comme la « Décennie de la Restauration des Écosystèmes », reconnaissant la dégradation des terres comme l'une des préoccupations environnementales mondiales les plus urgentes (UNCCD, 2022). Actuellement, la dégradation des terres causée par les activités humaines impacte négativement le bien-être d'au moins 3,2 milliards de personnes et entraîne une perte de biodiversité et de services écosystémiques, représentant plus de 10% du produit brut mondial annuel. Il s'agit d'un problème répandu et systémique qui touche toutes les régions du monde et englobe divers processus tels que la désertification, la salinisation, l'érosion, la perte de fertilité des sols, l'envahissement par des espèces invasives et la dégradation des forêts (IPBES, 2018).

Ce rapport se concentrera uniquement sur la dégradation des forêts, qui, comme la dégradation des terres, a une définition complexe. Il est difficile de mesurer avec précision l'ampleur du problème, car la dégradation des forêts a de multiples causes, se manifeste de différentes manières et présente des niveaux d'intensité variables. Une première approximation peut être faite en la différenciant de la déforestation. La déforestation entraîne un changement de la couverture du sol par une réduction drastique ou la suppression complète du couvert forestier. Elle implique souvent une modification de l'utilisation des terres, par exemple, la transformation de forêts en domaine agricoles ou en pâturages. En revanche, dans le cas de la dégradation, la couverture du sol ne change pas complètement. Cette définition implique qu'une forêt dégradée demeure une forêt, même si les altérations de la structure du couvert forestier sont sévères (FAO, 2011). De plus, contrairement à la déforestation, les événements de dégradation peuvent se reproduire à des fréquences variées au même endroit, parfois plusieurs années plus tard, et avoir de multiples causes qui se chevauchent spatialement. (Matricardi et al., 2020).

La dégradation peut être résumée comme la réduction de la capacité d'une forêt à fournir des biens et des services (FAO, 2002). Elle est généralement caractérisée par un déclin progressif de la structure, de la composition et des fonctions de la forêt en raison des activités humaines, entraînant

une perte de vigueur et de résilience de l'écosystème (Ghazoul et al., 2015). Parmi les indicateurs utilisés pour évaluer la dégradation figurent les changements dans la structure diamétrale des arbres, la réduction du stock de biomasse et la perte d'espèces (Vásquez-Grandón et al., 2018).

Parmi les quatre principales causes de la dégradation forestière, deux sont directement liées à la déforestation : la fragmentation forestière et les effets de lisière. Les deux autres sont les incendies de forêt et l'exploitation sélective du bois sans gestion durable (Silva Junior et al., 2020). Lapola et al. (2023) ajoutent une autre cause dans le contexte des changements climatiques : les sécheresses sévères qui affectent de plus en plus l'Amazonie. La dynamique de la dégradation forestière est complexe et implique souvent diverses causes interconnectées et synergiques. Par exemple, des sécheresses plus sévères entraînent une augmentation des incendies de forêt, ou les clairières et les routes ouvertes pour l'exploitation sélective du bois fournissent du combustible et augmentent la surface sèche, ce qui peut aggraver le risque et l'intensité des incendies.

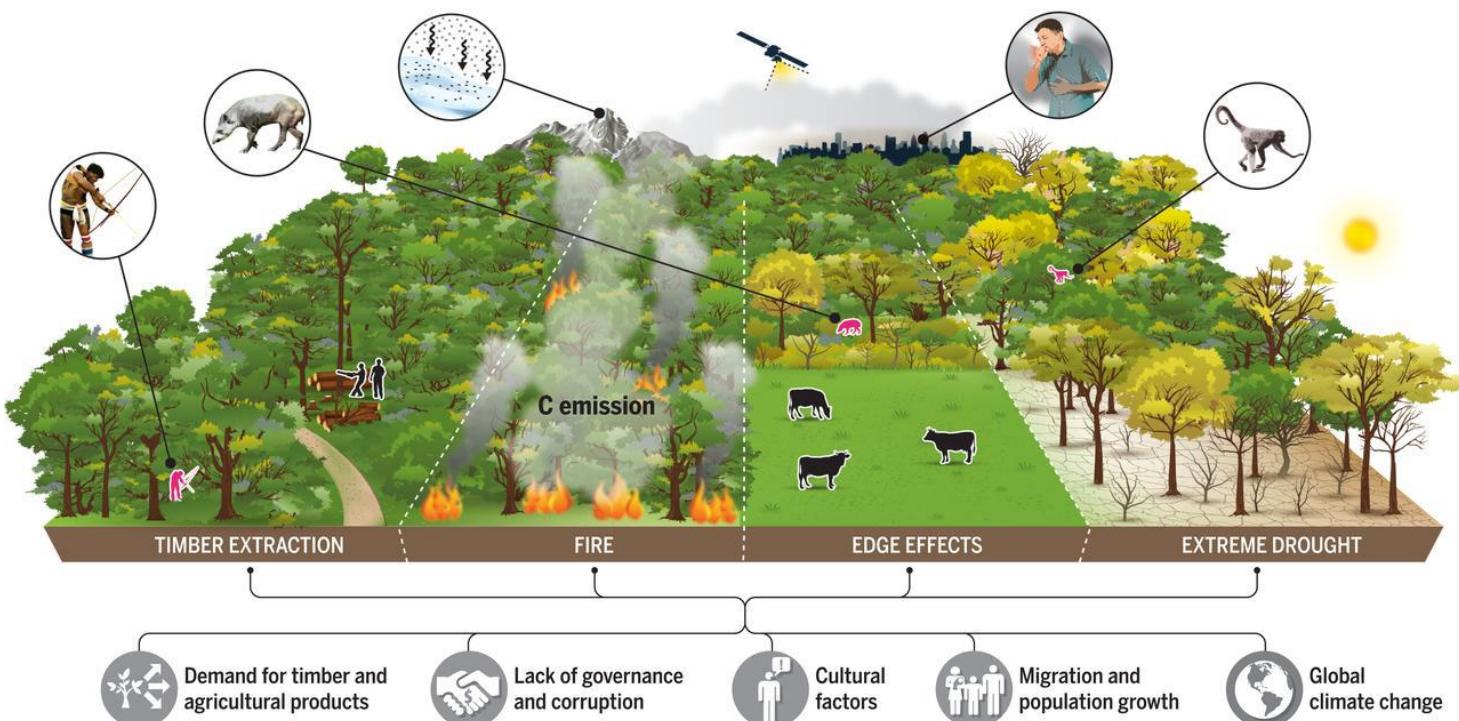


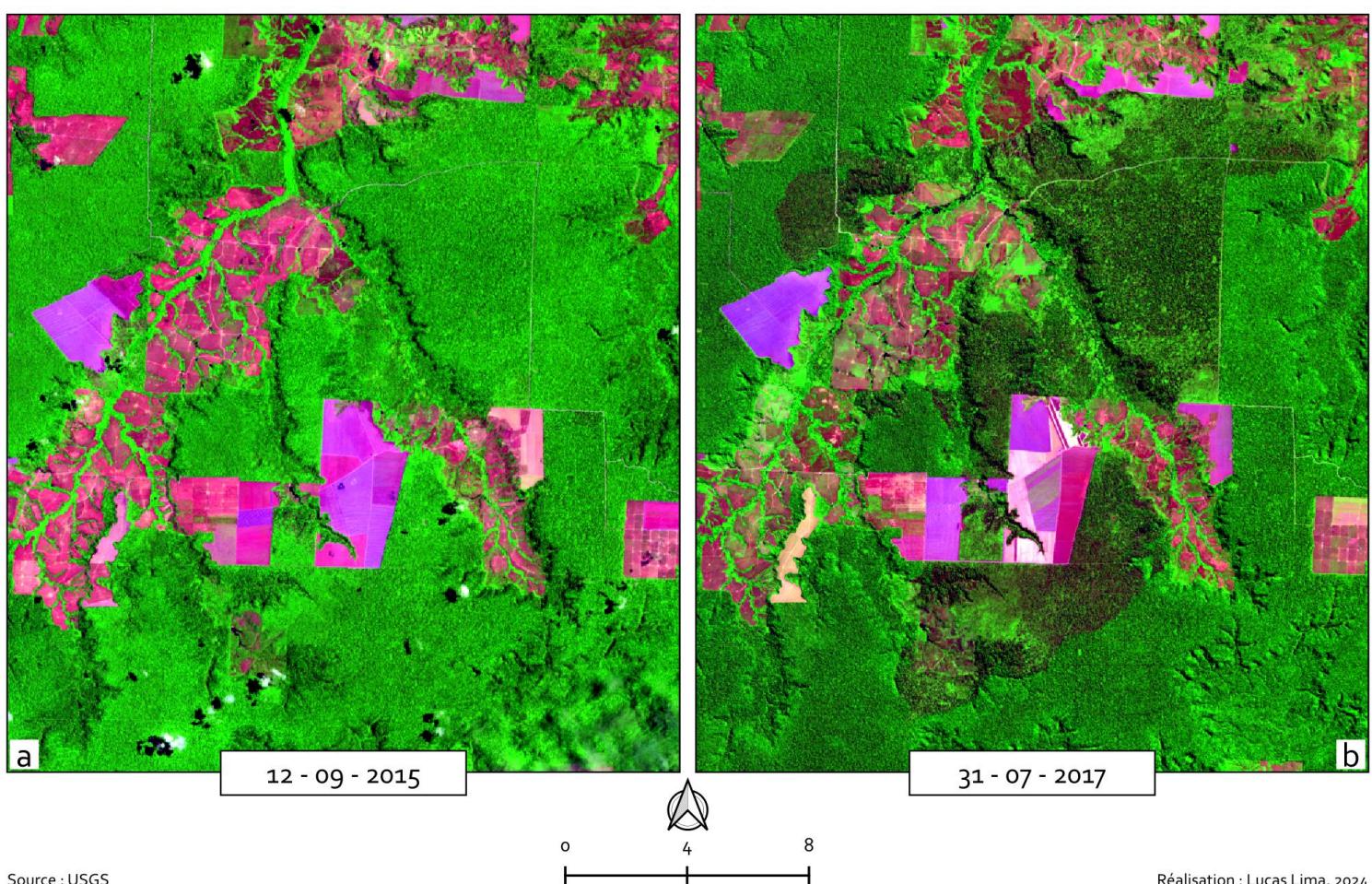
Fig. 5 : Schéma montrant les causes et les impacts de la dégradation.

L'image ci-dessus offre une vue d'ensemble de la dégradation des forêts tropicales en Amazonie. Les **causes sous-jacents** responsables des perturbations forestières (en gris) incluent la demande économique pour les produits forestiers et alimentaires, l'absence de gouvernance, les facteurs culturels, la migration et la croissance démographique, ainsi que les changements climatiques. Elles sont à l'origine des quatre principales **causes directes** qui modifient la couverture forestière : l'exploitation forestière, les incendies, les effets de lisière et de fragmentation, et les sécheresses extrêmes. En haut de l'image, un satellite représente les efforts pour estimer l'étendue spatiale de cette dégradation, ainsi que les pertes de carbone associées. Les impacts (en rouge et

entourés) peuvent être locaux, tels que la perte de biodiversité ou l'impact sur les moyens de subsistance des populations forestières, ou plus éloignés, comme les fumées affectant la santé des citadins ou la fonte des glaciers andins due au dépôt de carbone noir.

3.3. Surveiller la dégradation

L'impact de la dégradation peut être observée dans les compositions en fausses couleurs (6, 5, 4) des deux images Landsat suivantes. Les images montrent la situation avant (a) et après (b) l'incendie de 2016 qui a brûlé une grande partie de la municipalité de Paragominas. Dans l'image de 2017, on peut remarquer la tache sombre au centre de l'image, vestige du feu qui a brûlé la forêt.



Source : USGS

Réalisation : Lucas Lima, 2024

Fig. 6 : Deux images Landsat d'une zone dégradée à Paragominas avant et après l'incendie.

Le fait que la dégradation se produise à l'intérieur des forêts, laissant un stock permanent de biomasse et ne modifiant pas complètement la couverture du sol, rend sa détection par des systèmes d'observation et de surveillance de la Terre particulièrement complexe par rapport à celle de la déforestation, dont le retrait complet de la couverture végétale est plus facilement capté. Ainsi, la dégradation reste en grande partie non détectée ou sous-estimée dont l'estimation de l'impact présente encore de nombreuses lacunes. (Dalagnol et al., 2023).

Un phénomène de dégradation particulièrement difficile à capter est l'extraction sélective de bois. Contrairement à l'incendie qui cause des impacts sur de grandes surfaces et modifie brusquement le signal capté par le satellite, l'extraction sélective provoque des modifications subtiles dans la structure de la forêt. Ces changements ne sont pas aussi évidents dans les images satellitaires en raison de la présence d'une couverture végétale significative, qui peut masquer la suppression des arbres. De plus, la régénération rapide de la végétation peut camoufler encore davantage les signes de l'exploitation forestière sélective.

Cette difficulté peut être observée dans les trois images Landsat en fausses couleurs (6, 5, 4) de la Figure 7. À gauche (a) une image de 2013 où l'on peut noter une petite route pour l'extraction de bois et quelques petites taches de dégradation. Sur l'image de 2015 (b), la dégradation progresse significativement le long de la route. Sur l'image de 2018 (c), l'ancienne dégradation est difficilement observable après la repousse de la forêt environnante.

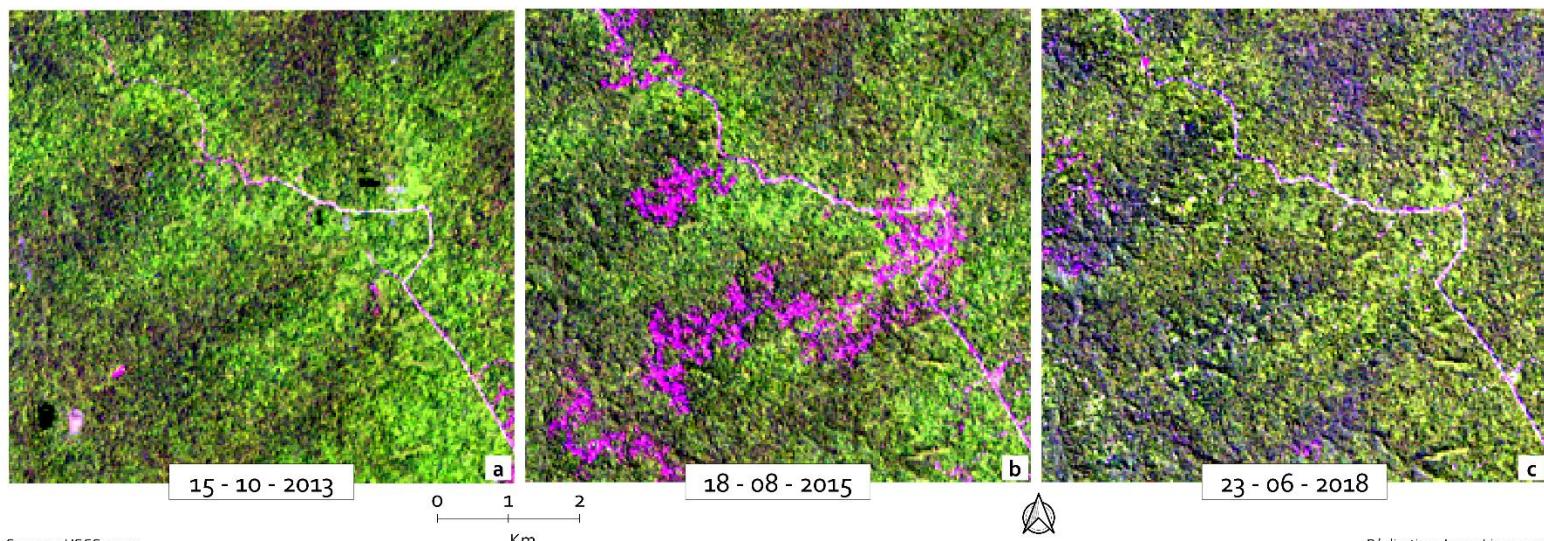


Fig. 7 : Trois images Landsat d'une zone dégradée par l'extraction sélective de bois près de Paragominas.

En raison de l'importance mondiale du problème et de son lien avec les chaînes de production alimentaire et les changements climatiques, les efforts de la communauté scientifique pour surmonter les défis du suivi de la dégradation se sont intensifiés. Au cours de la dernière décennie, son étendue a été mieux mesurée par télédétection grâce à la disponibilité accrue des séries temporelles satellitaires. Pour les études couvrant de vastes régions, les satellites à basse résolution spatiale (250 mètres à 5 kilomètres) tels que Terra et Aqua, équipés du capteur MODIS, ont été privilégiés. Certaines études ont utilisé la tendance des indices de végétation et leur relation avec la productivité forestière pour diagnostiquer la dégradation (Eckert et al., 2015 ; Montfort et al., 2020). D'autres

études mesurent les modifications de la biomasse aérienne à l'aide de données de réflectance combinées avec des données LiDAR⁹ de la NASA (Walker et al., 2020).

Pour les études à l'échelle régionale, les données du satellite Landsat à moyenne résolution (30 mètres) ont été favorisées. Ces dernières initiatives utilisent souvent le démixage spectral pour dériver des fractions de sol nu par pixel, améliorant ainsi le contraste entre les forêts intactes et les forêts dégradées. De plus, une approche semi-automatique pour l'analyse des images, incluant leur interprétation pour inférer les causes des perturbations forestières, est couramment réalisée (Bullock et al., 2020 ; Matricardi et al., 2020 ; Souza et al., 2005 ; Shimabukuro et al., 2019).

Par ailleurs, certains travaux ont fusionné les données de Landsat avec celles acquises par le capteur Sentinel-2 (10 mètres) pour produire des informations de dégradation à échelle fine (Bourgoin et al., 2018 ; Zhang et al., 2021). D'autres ont utilisé l'apprentissage profond sur des données à haute résolution (4,77 mètres), telles que les images de la constellation Planet, pour détecter la dégradation et en identifier les causes (Dalagnol et al., 2023).

À l'échelle mondiale, les initiatives les plus notables se basent sur les données du satellite Landsat et utilisent des méthodes d'apprentissage automatique pour analyser les séries temporelles. Parmi les plus importantes figurent le *Global Forest Change* (GFC) (Hansen et al., 2013) et le *Tropical Moist Forest* (TMF) (Vancutsem et al., 2021). Le produit fourni par le GFC concerne principalement la déforestation, mais peut également capturer des dégradations forestières si elles sont très intenses et modifient fortement la canopée. En revanche, le TMF fournit des données distinctes pour la dégradation et la déforestation, sans distinction quant à leurs causes. Dans cette étude, les données TMF ont été privilégiées en raison de leur mise à jour régulière et de la rareté des données GFC en dehors du masque de déforestation utilisé.

⁹ Light detection and ranging

4. Matériel et méthodes

4.1. Les données TMF du JRC

Le JRC a développé un ensemble de données sur les changements de couverture forestière dans les forêts tropicales humides (TMF) en utilisant 41 ans de séries temporelles Landsat. Les cartes à moyenne résolution (30 m) décrivent l'étendue des TMF et fournissent une vision des changements de la couverture forestière dans les tropiques humides entre 1990 et 2022 (Vancutsem et al., 2021).

Les principales données disponibles, avec leur description, leurs classes et/ou valeurs, ainsi que la manière de les télécharger, peuvent être consultées dans le tableau suivant :

Nom de la donnée	Description	Valeurs et/ou classes	Accès
Annual Change Collection	Cartes annuelles montrant l'étendue et le statut de la forêt humide tropicale entre 1990 et 2022.	Classes : 1. Forêt tropicale humide intacte, 2. Forêt tropicale humide dégradée, 3. Terre déboisée, 4. Régénération de la forêt, 5. Eau permanente et saisonnière, 6. Autres couvertures terrestres	Site/GEE
Degradation Year	Année où la couverture forestière a été dégradée pour la première fois.	Date de dégradation avec des valeurs allant de 1982 à 2022	Site/GEE
Deforestation Year	Année où la couverture forestière a été déboisée pour la première fois.	Date de déforestation avec des valeurs allant de 1982 à 2022	Site/GEE
Deforestation After Degradation Year	Année où la couverture forestière précédemment dégradée a été déboisée.	Date de la déforestation après dégradation avec des valeurs allant de 1982 à 2022	GEE
Areas of Deforestation After Degradation	Pixels qui ont été d'abord dégradés puis déforesté.	-	GEE
Areas of Deforestation After Regrowth	Pixels de régénération forestière d'au moins 10 ans qui ont été déforesté par la suite.	-	GEE
Undisturbed and Degraded TMF	Carte simplifiée montrant la distribution des forêts humides tropicales intactes et dégradées en 2022.	Classes : 1. Forêt tropicale humide intacte, 2. Forêt tropicale humide dégradée, 3. Autres couvertures terrestres	Site/GEE
Number of Annual Disruption Observations	Nombre d'observations de perturbations annuelles.	Nombre annuel d'observations de perturbations.	GEE
Transition Map - Main Classes	Carte de transition montrant la distribution spatiale de la forêt humide tropicale à la fin de 2022.	Classes : 10. Forêt tropicale humide intacte, 20. Forêt tropicale humide dégradée, 30. Régénération de la forêt, 41-43. Terre déboisée, 50. Déforestation/dégradation en cours, 60. Eau permanente et saisonnière, 70. Autres couvertures terrestres	Site/GEE

Systématisé à partir de *TMF – User Guide* (v. 1.0)

Tableau 1 : Jeux de données sur les perturbations forestières tropicales fournis par le JRC.

Le jeu de données TMF définit la dégradation comme des perturbations temporaires se produisant sur une période allant jusqu'à 2,5 ans, tandis qu'il définit la déforestation comme des perturbations à long terme où les disruptions du couvert arboré sont visibles pendant plus de 2,5 ans et aucune repousse d'arbre n'est détectée au cours des trois dernières années. Comme l'objectif de cette étude était d'analyser la productivité forestière et sa relation avec la dégradation à différentes périodes, deux ensembles de données TMF¹⁰ ont été utilisés : *l'Annual Change Collection* pour construire le masque forestier en 2020 et le *Number of Annual Disruption Observations* pour les données de dégradation.

Les données *Degradation Year* n'ont pas été utilisées car elles contiennent uniquement l'année de la première dégradation observée. Cela signifie que si un pixel a subi une récupération forestière et qu'une nouvelle dégradation a été observée au cours des 30 ans de la série temporelle, elle ne sera pas prise en compte. Ainsi, le nombre annuel de perturbations est plus approprié car, si le pixel est en dehors de notre masque de déforestation, alors l'observation concerne une dégradation et doit être comptabilisée pour chaque période.

4.1.1. Traitement des données TMF

Le Number of Annual Disruption Observations a été téléchargé depuis Google Earth Engine (GEE) sous forme de raster comportant 41 couches correspondant aux années de 1982 à 2022. Une observation de perturbation est définie comme l'absence de couverture de feuillage d'arbre dans un pixel pour une observation spécifique de l'image Landsat au cours d'une année. Le nombre de perturbation constitue un indicateur de l'intensité de la perturbation (Vancutsem et al., 2021). Les valeurs des pixels peuvent varier de 0, lorsqu'il n'y a eu aucune observation de perturbation valide pour l'année en cours, jusqu'au nombre maximum d'observations possibles que Landsat peut effectuer sur un même pixel.

La première étape du processus a consisté à binariser les valeurs, en attribuant 0 lorsqu'aucune dégradation n'a été observée et 1 lorsqu'une dégradation forestière a été détectée. La deuxième étape a consisté à trouver la proportion entre les deux résolutions en divisant la résolution MODIS par la résolution TMF et en arrondissant au nombre entier supérieur. Cette proportion arrondie révèle que le nombre maximum de pixels TMF dans un pixel MODIS est de 64.

Ensuite, une fonction d'agrégation entre les rasters est appliquée pour sommer le nombre de pixels TMF dont la valeur est 1, donnant ainsi la quantité de pixels dégradés dans chaque pixel

10 Pour plus de commodité, le terme données TMF sera désormais utilisé dans ce rapport comme synonyme de données de dégradation.

MODIS. Puis, un rééchantillonnage est effectué selon la méthode du « plus proche voisin » afin que les données aient la même résolution et soient comparables.

Le pourcentage de dégradation dans chaque pixel MODIS est ensuite calculé en divisant le nombre de pixels dégradés trouvés par la fonction d'agrégation par le nombre total de pixels possibles (64) et en multipliant par 100 (Figure 10). Les données finales auront une valeur allant de 0 (lorsqu'aucun pixel de dégradation TMF n'est présent dans un pixel MODIS) à 100 (lorsque tous les 64 pixels TMF à l'intérieur d'un pixel MODIS sont dégradés).

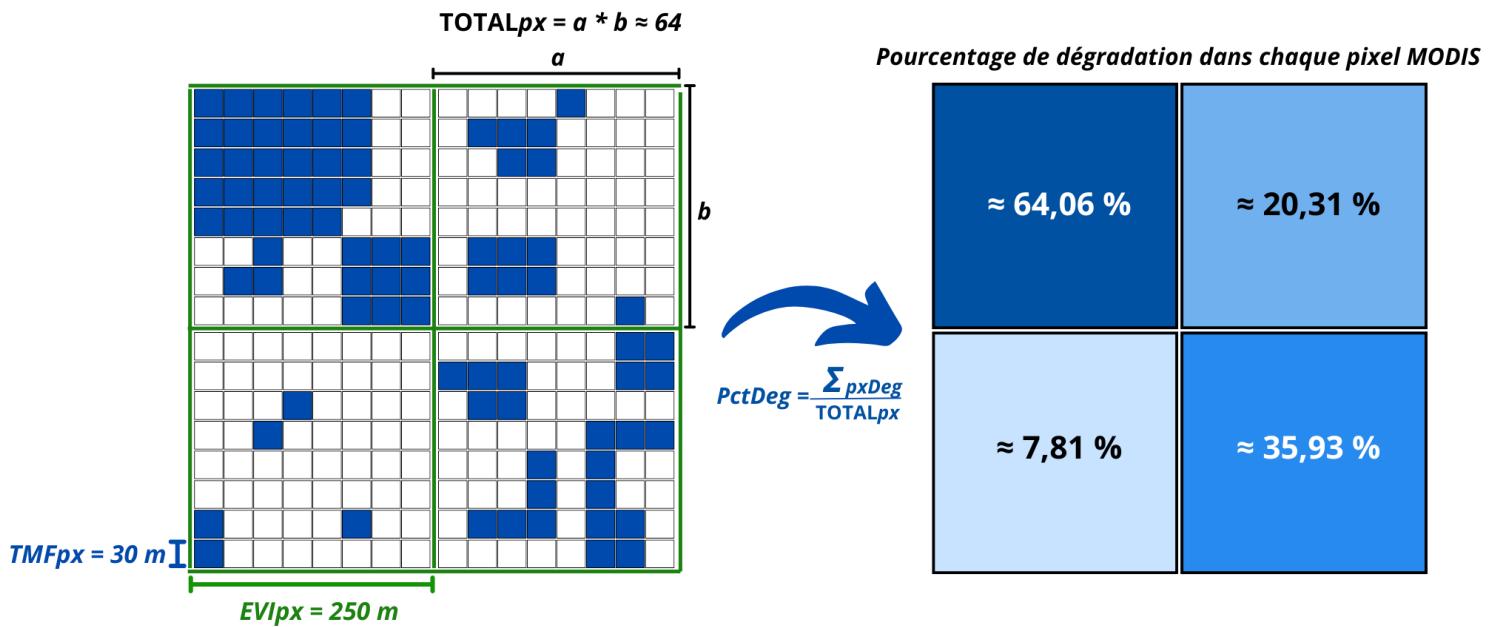


Fig. 8 : Infographie montrant comment le pourcentage de dégradation a été calculé pour chaque pixel MODIS EVI pour une année donnée

Le même masque de couverture forestière utilisé pour les données MODIS EVI est appliqué et, enfin, la dégradation est calculée de deux manières : accumulée et par période

Fenêtres temporelles de la dégradation accumulée	
1	1990 à 2005
2	1990 à 2008
3	1990 à 2011
4	1990 à 2014
5	1990 à 2017
6	1990 à 2020

Tableau 2 : Fenêtres temporelles utilisées pour calculer le pourcentage de dégradation accumulée.

Fenêtres temporelles de la dégradation par période	
1	2000 à 2005
2	2003 à 2008
3	2006 à 2011
4	2009 à 2014
5	2012 à 2017
6	2015 à 2020

Tableau 3 : Fenêtres temporelles utilisées pour calculer le pourcentage de dégradation par période

Comme il est possible de l'observer dans les tableaux précédents, la forme accumulée prend en compte la dégradation depuis 1990, en additionnant la dégradation de chaque période à celle de la période précédente (Tableau 2). Dans cette méthode, si un pixel a été dégradé à partir de 1990, il continuera d'être comptabilisé jusqu'à la fin de la série temporelle. La forme par période calcule la dégradation uniquement pour la fenêtre temporelle considérée (Tableau 3).

La métrique accumulée et la date de 1990 ont été utilisées comme référence car il était envisageable d'obtenir une mesure globale des facteurs historiques qui influencent la productivité forestière. Cette approche est pertinente car les événements de dégradation peuvent modifier la structure du sol, la disponibilité des nutriments et la capacité de rétention d'eau, affectant ainsi la résilience forestière. En l'absence d'interventions pour la protection ou la restauration, une zone peut continuer à se dégrader sur de longues périodes et être plus sujette à de nouveaux événements de perturbation, comme des incendies successifs (Chazdon, 2003).

En revanche, la dégradation par période a été calculée pour analyser le comportement de ce phénomène au cours de chaque fenêtre temporelle spécifique et examiner si des politiques visant à éviter la déforestation, telles que le Moratoire du Soja de 2006 et le Moratoire du Bœuf de 2009, ont influencé sa réduction.

Comme l'objectif de la méthodologie est d'enquêter sur la sensibilité de la tendance de l'EVI calculée avec les données MODIS aux données TMF, la surface de dégradation présentée dans les résultats (Figure 16 et 17) ne se réfère pas à la zone de dégradation en elle-même (qui serait calculée à partir du pourcentage du pixel MODIS dégradé), mais plutôt à la surface des pixels présentant une quelconque dégradation. Ainsi, si la dégradation d'un pixel est supérieure à 0, la totalité de la surface de ce pixel sera prise en compte dans le calcul de la zone.

L'ensemble des traitements effectués sur les données TMF peut être vu dans le diagramme ci-dessous :

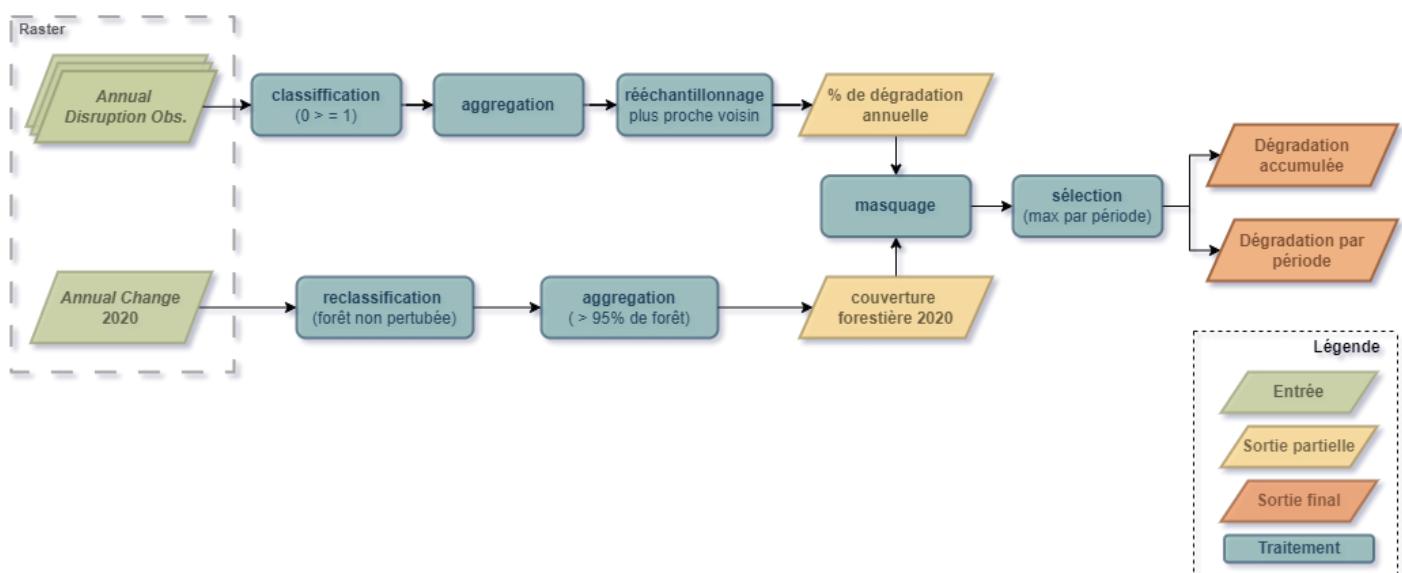


Fig. 9 : Chaîne de traitements pour calculer la dégradation à partir des données de perturbation forestière du JRC.

4.2. Les données MODIS VI Terra

Dans cette étude, des données du capteur MODIS ont été utilisées. Il s'agit d'une série d'instruments d'observation lancés par la NASA. Le premier satellite MODIS, nommé TERRA, a été mis en orbite en 1999, suivi du second, AQUA, trois ans plus tard. Les capteurs possèdent une résolution de 0,25 km à 5 km et obtiennent ensemble une image complète de la Terre tous les 1 à 2 jours.

Le calcul de la productivité forestière a été réalisé à l'aide des données MODIS VI (*Vegetation Index*) version 6.1 du satellite TERRA, qui fournit deux indices de végétation déjà calculés : le NDVI et l'EVI. Le produit dérivé du NDVI assure une continuité de la série temporelle du NOAA-AVHRR qui, avec les données MODIS, offre un enregistrement de la végétation de la couverture terrestre depuis 1981. Le second produit, l'EVI, a été privilégié dans cette étude pour les raisons déjà mentionnées (plus grande sensibilité au suivi de la végétation dans les régions à haute biomasse et réduction des influences atmosphériques).

Les indices de végétation MODIS (MODIS VI) sont générés tous les 16 jours avec une résolution spatiale de 250 mètres. L'algorithme choisit la meilleure valeur de pixel disponible parmi toutes les acquisitions sur la période de 16 jours. Les critères utilisés sont une faible couverture nuageuse, un faible angle de vision et la plus grande valeur d'EVI. Produites depuis le 18 février 2000 jusqu'à nos jours, les données MODIS VI ont été choisi car ils constituent la série temporelle la plus robuste à long terme et sont considérées comme les indices de végétation les plus précis et calibrés disponibles (Higginbottom et Symeonakis, 2014).

En plus du MODIS VI, le MODIS QA (*Quality Assessment*) a également été téléchargé. Ces métadonnées documentent la qualité du produit pixel par pixel et ont été utilisées pour le filtrage de la série temporelle (Didan et Munoz, 2019). Le MODIS EVI et le MODIS QA ont été téléchargés pour les quatre territoires du projet TerrAmaz via *l'Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples* (AppEEARS) mise à disposition par la NASA.

4.2.1. Prétraitement des données MODIS EVI

La série temporelle utilisée comprenait les années climatiques (d'août de l'année n-1 à juillet de l'année n) de 2000 à 2020. Comme une observation du MODIS EVI est générée tous les 16 jours, il y a 23 rasters par an, totalisant 460 fichiers par territoires. Les données ont été corrigées pour la diffusion moléculaire, l'absorption d'ozone et l'interférence des aérosols (Didan et Munoz, 2019). Cependant, l'interférence atmosphérique dans la région amazonienne est significative. C'est pourquoi un prétraitement minutieux des données a été réalisé, incluant des filtrages, une interpolation et un lissage des bruits résiduels perturbant le signal EVI. Ce prétraitement était essentiel pour garantir que la série temporelle ne présente pas de lacunes significatives empêchant le calcul de la tendance.

Un masque a été créé en utilisant le MODIS QA pour sélectionner uniquement les pixels considérés comme fiables¹¹. Un second filtrage a été effectué : si un pixel dans la série temporelle n'avait pas une observation valide pendant plus de 12 observations consécutives, il était exclu du calcul de la productivité. Ce seuil a été déterminé car il correspond à la moitié des observations annuelles absentes, ce qui pourrait impacter l'interpolation linéaire effectuée par la suite. Ce masque a filtré $\approx 25,48\%$ des pixels dans un total de $\approx 5.007,95 \text{ km}^2$ (Figure 7).

Dans le but d'analyser la tendance de l'EVI uniquement dans les zones dégradées, un masque de la couverture forestière (Figure 7) a été créé en utilisant le jeu de données de *l'Annual Change Collection* produit par le JRC, tel que présenté dans la section 4.2 (Tableau 1). Les pixels ayant au moins 95 % de couverture forestière en 2020, l'année la plus récente analysée, ont été conservés¹². Après l'application des filtres et du masque, la superficie analysée couvre environ $8\,141,02 \text{ km}^2$, soit 42,08 % des $19\,342 \text{ km}^2$ de la municipalité de Paragominas.

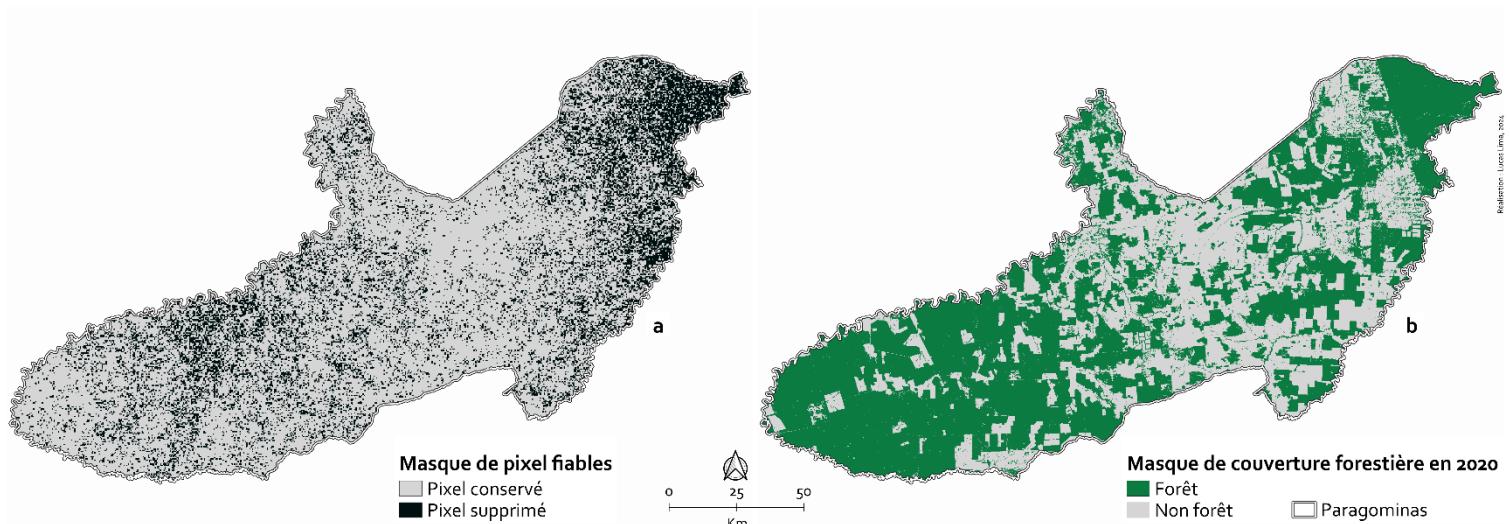


Fig. 10 : Masque pour retenir les pixels fiables (a) et la couverture forestière en 2020 (b).

Enfin, les valeurs aberrantes ont été lissées à l'aide d'un filtre Savitzky-Golay (Chen et al., 2004), qui préserve l'intégrité du signal et maintient les principales caractéristiques de la série temporelle, telles que la tendance et la variation. Ce filtre a été appliqué avec une fenêtre de taille 9 et un ordre polynomial de 3, en utilisant un miroir aux bords des données pour éviter les artefacts. La figure suivante montre la moyenne des valeurs de chaque année avant et après le lissage avec le filtre Savitzky-Golay.

¹¹ Les données MODIS QA sont codées en binaire, comme indiqué dans l'annexe 9.1. Pour la présente étude, seuls les pixels qualifiés d'utilisables selon cette codification ont été retenus.

¹² La masque de la couverture forestière a été produit avec une fonction d'agrégation également utilisée pour le calcul de la dégradation. Ce processus est expliqué en détail dans la Figure 10

MODIS EVI 250m

Paragominas - période 2000-2020

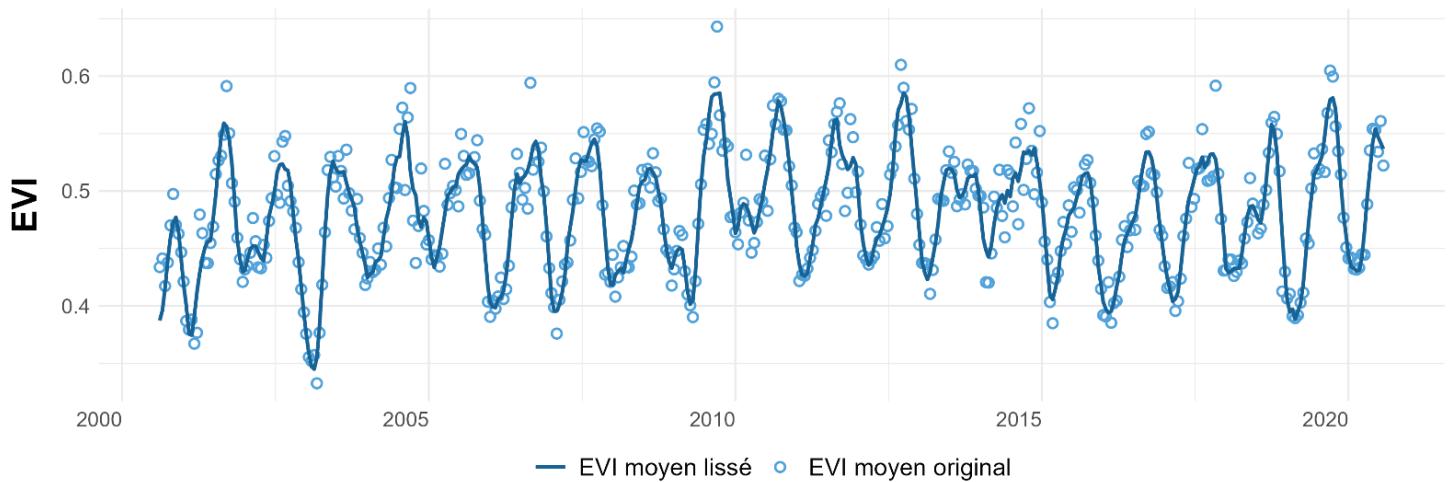


Fig. 11 : Graphique des moyennes de l'EVI avant et après le lissage par le filtre Savitzky-Golay

La chaîne complète de prétraitement des données MODIS EVI est présenté dans le diagramme ci-dessous :

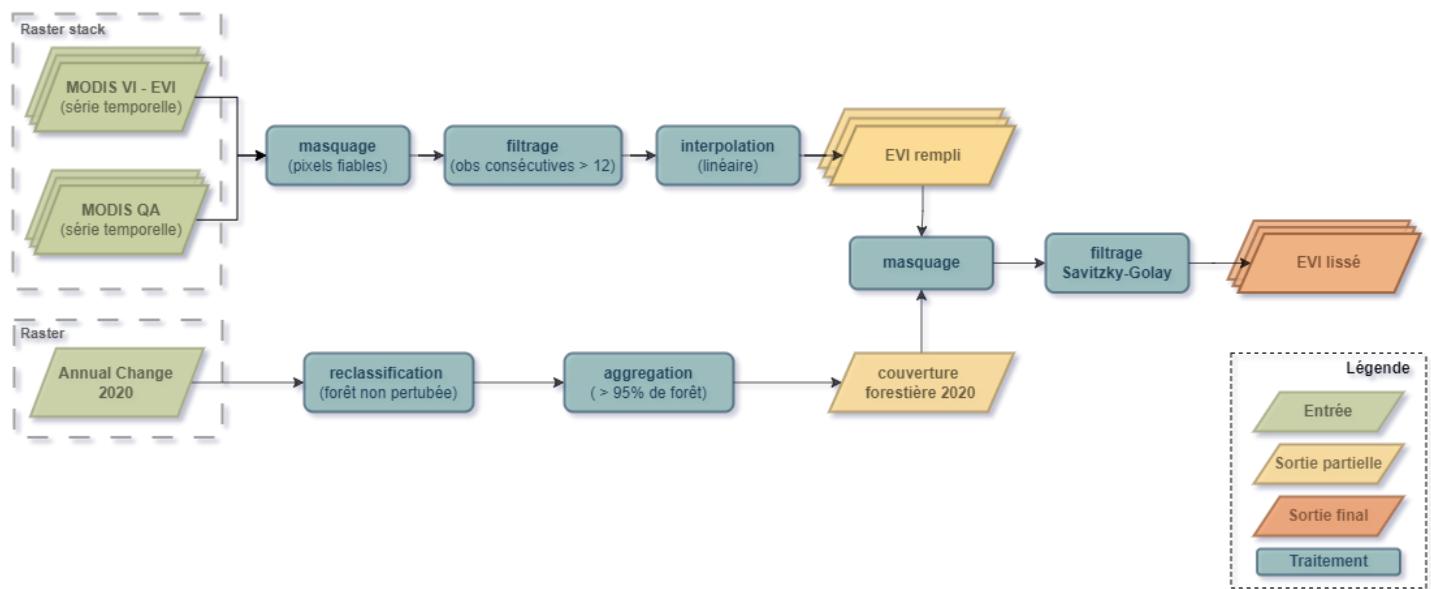


Fig. 12 : Chaîne de prétraitement des données MODIS EVI pour les préparer au calcul de la productivité

4.3. Analyse des relations entre les données MODIS et la dégradation dérivée des données TMF

L'objectif de la méthodologie utilisée était de calculer la productivité forestière à travers la tendance (positive ou négative) de l'EVI pour chaque pixel de la série temporelle et, en dernière étape, de croiser ces résultats avec les données de dégradation forestière pour vérifier s'il existe une relation

entre eux. Comme mentionné dans les sections précédentes, il est possible de distinguer deux ensembles de traitements : l'un sur les données MODIS EVI et l'autre sur les données TMF, qui ont été reliés par la suite.

La productivité forestière a été calculée en utilisant une analyse de tendance statistique basée sur la méthodologie proposée par Montfort et al. (2020). Une régression linéaire des moindres carrés ordinaires (MCO) a été utilisée pour quantifier les variations de la valeur de l'EVI (variable dépendante) par rapport au temps (variable indépendante). Un coefficient de pente positif indique une augmentation de la productivité, tandis qu'un coefficient de pente négatif indique une diminution de la productivité.

Dans cette étude, un coefficient de pente a été considéré comme significatif lorsqu'il présentait un niveau de confiance de 99,9 % ($p\text{-value} < 0,001$) pour ne retenir que les pixels pour lesquels la relation entre les variables était réellement déterminante. Enfin, chaque pixel a été classé en trois types de tendance de l'EVI : augmentation (pente positive et $p\text{-value} < 0,001$), diminution (pente négative et $p\text{-value} < 0,001$) et non significative ($p\text{-value} > 0,001$). Cette analyse statistique a été appliquée à chaque pixel de la série temporelle dans six fenêtres glissantes de cinq ans, avec des intervalles de trois ans entre elles (Tableau 4).

Fenêtres temporelles d'analyse de la tendance de l'EVI	
1	2000 à 2005
2	2003 à 2008
3	2006 à 2011
4	2009 à 2014
5	2012 à 2017
6	2015 à 2020

Tableau 4 : Fenêtres temporelles utilisées pour calculer la tendance de l'EVI

Le choix des fenêtres glissantes facilite la comparaison entre différentes périodes temporelles, permettant d'identifier les tendances avant et après des événements spécifiques. Il permet également à l'analyse d'être sensible aux événements courts et extrêmes de dégradation qui peuvent provoquer une chute brutale du signal et qui ne seraient pas captés si, par exemple, une fenêtre très longue était utilisée. En déplaçant la fenêtre d'analyse tous les 3 ans, au lieu d'utiliser des périodes fixes et non superposées, la méthodologie permet une analyse plus granulaire des changements au fil du temps.

Cela est particulièrement avantageux si l'on considère que la dégradation introduite près du début ou de la fin de la série temporelle ne se traduit généralement pas par une tendance négative et restera, pour la plupart, non détectée par les méthodes d'analyse de tendance (Wessels et al., 2012). Les fenêtres glissantes offrent une résolution temporelle plus élevée, permettant de détecter des changements progressifs et continus, ce qui est pertinent si l'on considère qu'il existe un délai de réponse entre la productivité forestière et le phénomène de dégradation (Brando et al., 2010). La robustesse de la méthode a été assurée par un niveau de confiance élevé (99,9 %) qui garantit que

seules les relations statistiquement les plus significatives soient prises en compte, minimisant ainsi la possibilité de faux positifs.

Avec la tendance de l'EVI calculée, trois masques ont été créés pour chacune des tendances et appliqués aux rasters de dégradation pour chaque période. Le résultat de ce croisement est représenté par des boîtes à moustaches (Figure 12) qui relient les valeurs de dégradation à chacune des tendances de l'EVI. Le diagramme de ces étapes et les principaux résultats peuvent être vus dans le diagramme ci-dessous.

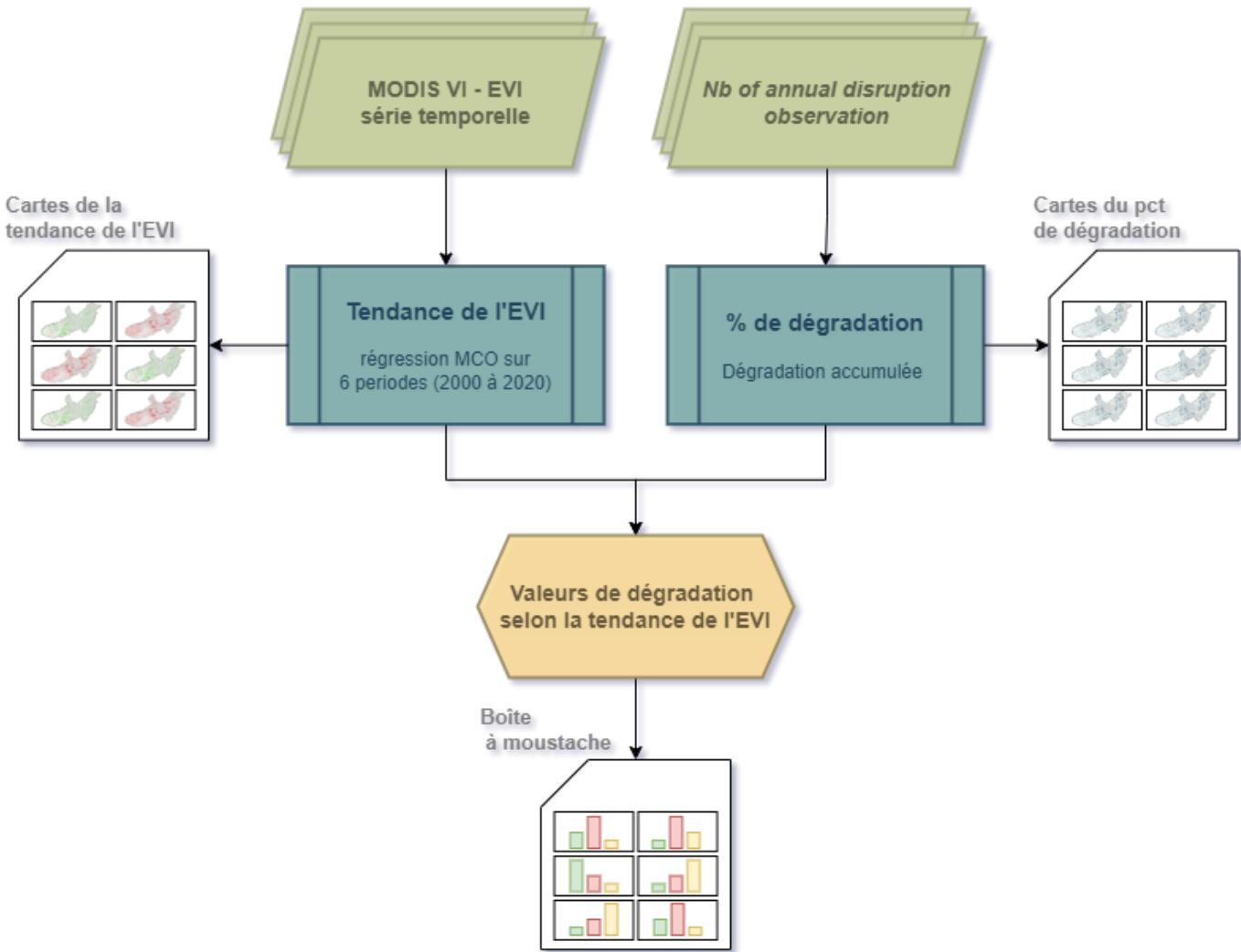


Fig. 13 : Schéma de l'approche méthodologique générale utilisée et des résultats générés.

4.4. Les outils utilisés

Tous les géotraitements et les analyses spatiales ont été réalisés en utilisant le langage R (v. 4.3.3) dans *RStudio* (v. 2024.04.1), ainsi que la création des graphiques. Les principaux packages utilisés sont les suivants:

Bibliothèque	Description
bitops	Opérations binaires sur les données MODIS QA.
data.table	Manipulation de tableaux de données volumineux.
dplyr	Manipulation et analyse des données raster et vectorielles.
ggplot2	Génération de graphiques et de plots.
leaflet	Création de cartes interactives pour l'exploration des données spatiales.
plotly	Création de graphiques interactifs.
shiny	Création d'interfaces web interactives et réactives pour l'analyse des données.
signal	Lissage Savitzky-Golay.
stringr	Manipulation des chaînes de caractères et des noms de fichiers.
terra	Manipulation et analyse des données raster et vectorielles.
tidyverse	Organisation et nettoyage des données
zoo	Manipulation et analyse des séries temporelles.

Tableau 5 : Packages utilisées dans le langage R

Pour la production des cartes, le logiciel QGIS (v. 3.34.4) a été utilisé. Pour visualiser et télécharger les données TMF *Number of Annual Disruption Observations* depuis GEE, un script Python (v.3.12) avec les bibliothèques **ee** et **geemap** dans VsCode (v.1.89) a été employé. Tous les scripts¹³ ont été construits dans une boucle « *for* » pour produire les résultats pour les quatre territoires¹⁴ du projet TerrAmaz. Cependant, dans ce rapport, en raison des résultats obtenus et par souci de concision, nous présenterons uniquement les résultats relatifs à la région de Paragominas.

¹³ Tous les scripts peuvent être consultés dans ce dépôt sur Github : https://github.com/caslumali/StageM1_ForestProductivity

¹⁴ Tous les résultats pour les autres trois territoires peuvent être consultés dans les annexes 9.2 à 9.4. Il s'agit des cartes de tendance de l'EVI, des cartes de dégradation, des boîtes à moustaches et des graphiques de la surface dégradée accumulée et de la surface dégradée par période.

5. Résultats

5.1. Cartographie des tendances de l'EVI

Les tendances de l'EVI au cours des 20 ans montrent de grandes variations selon les périodes (Figure 13).

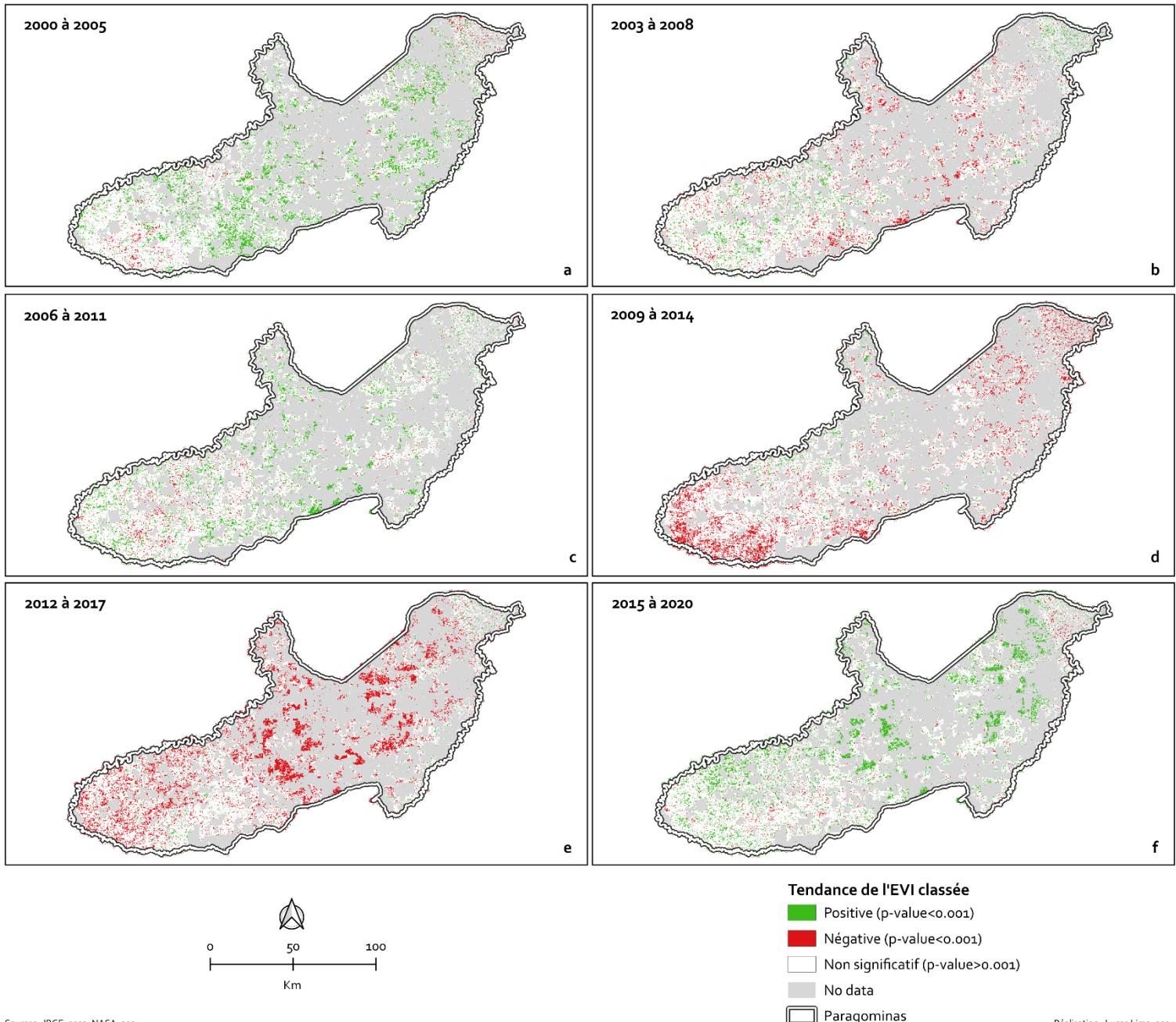


Fig. 14 : Cartes de tendance de l'EVI pour les six périodes analysées.

Dans la première image (a), on observe une tendance positive de l'EVI (20,72 % des pixels classés) qui est supérieure à la tendance négative (2,81 % des pixels classés). La deuxième image (b) montre une tendance négative de l'EVI (10,16 % des pixels classés) beaucoup plus marquée, surtout dans la région centrale, proche du siège municipal et de la zone urbaine. La quatrième image (d)

présente deux résultats inattendus : une grande tache de tendance décroissante dans le sud-ouest de la municipalité, dans la région de la ferme Rio Capim exploitée par la société CIKEL, où se pratique une exploitation forestière durable de type *Forest Stewardship Council* (FSC), et une autre dans la région nord-est où se trouve la TI Alto Rio Guamá, une aire protégée.

De grandes zones rouges dominent la partie centrale de la municipalité sur la cinquième image (e), indiquant une tendance négative atteignant 27,69 % des pixels classés. L'image suivante (f) montre une inversion de cette tendance, avec une tendance majoritairement positive de 19,34 % des pixels classés. La superficie de chaque tendance pour chaque période est visible dans les images ci-dessous.

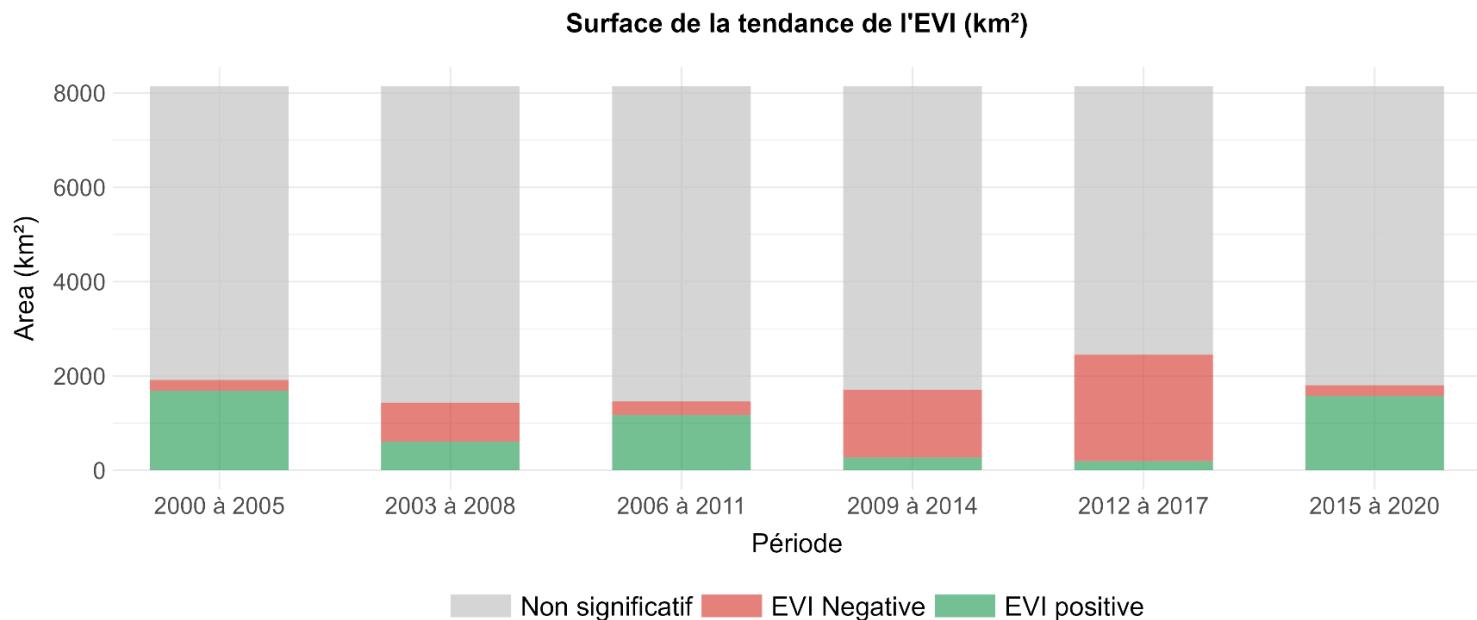


Fig. 15 : Graphique à barres empilées montrant la surface de chaque classe de tendance de l'EVI pour chaque période.

5.2. Cartographie de la dégradation

La partie centrale de la municipalité, proche de la zone urbaine, accumule le plus de dégradations dans les cartes ci-dessous (Figure 15). Pour la première période analysée (a), 47,09 % des pixels présentent une certaine dégradation. Il y a une accumulation de 6 %, atteignant 53,12 % de superficie dégradée au cours de la deuxième période (b). Ensuite (c), l'accumulation est moindre, passant à 56,23 % lors de la troisième période et à 58,79 % lors de la quatrième période (d). De la quatrième à la cinquième période (e), il y a une augmentation significative, atteignant 66,62 % de superficie dégradée, et terminant la dernière période (f) avec 70,09 % de la municipalité présentant une dégradation forestière au cours de ces 30 années.

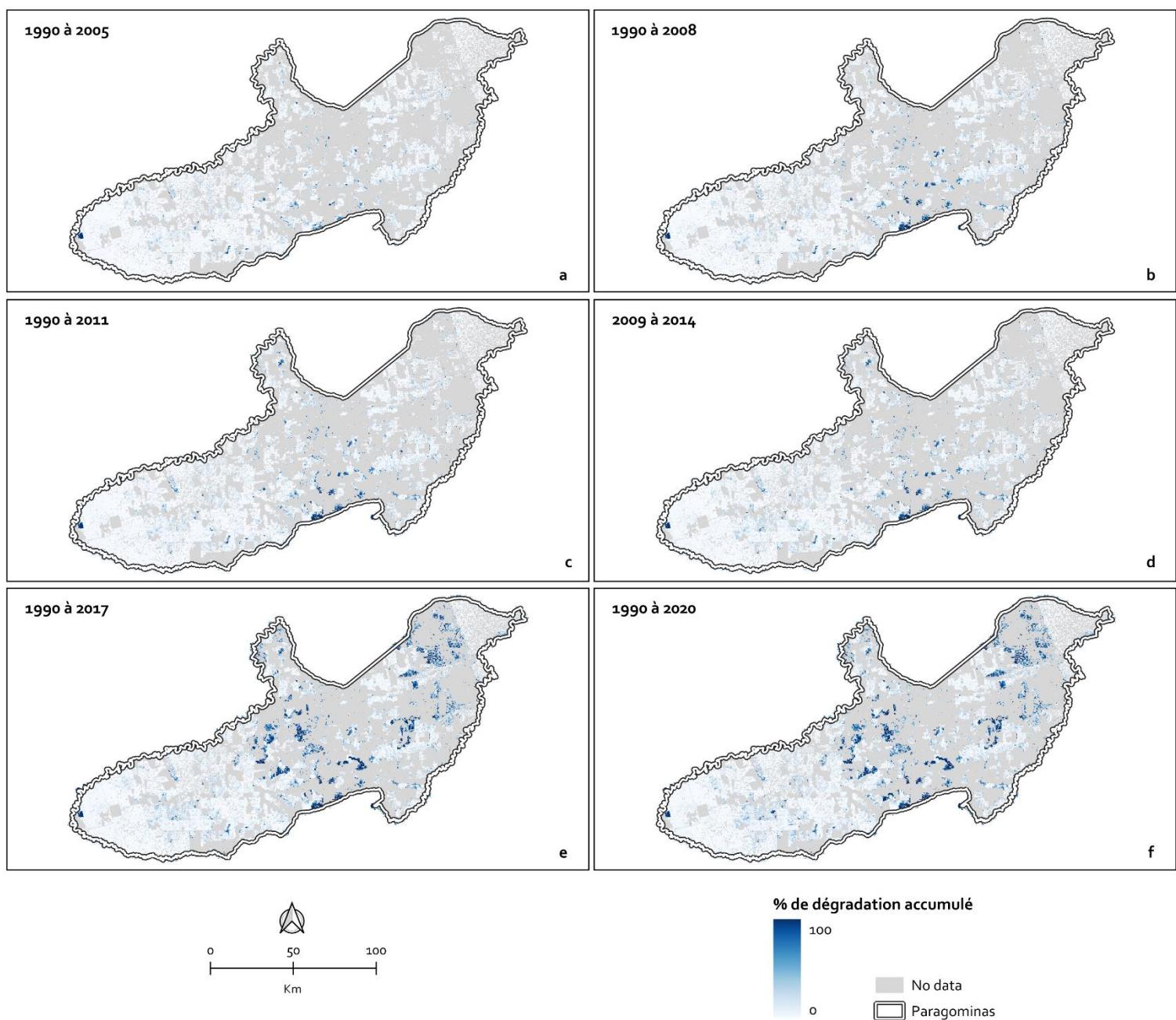


Fig. 16 : Cartes du pourcentage de dégradation accumulé dans le pixel MODIS.

Sources : IBGE, 2023; EC-JRC, 2024

Réalisation : Lucas Lima, 2024

En observant le graphique de la dégradation accumulée ci-dessous (Figure 16), on remarque que la superficie dégradée présente une croissance de la première à la deuxième période, puis elle augmente de manière légère et soutenue jusqu'à la quatrième période, où elle connaît à nouveau une forte augmentation.

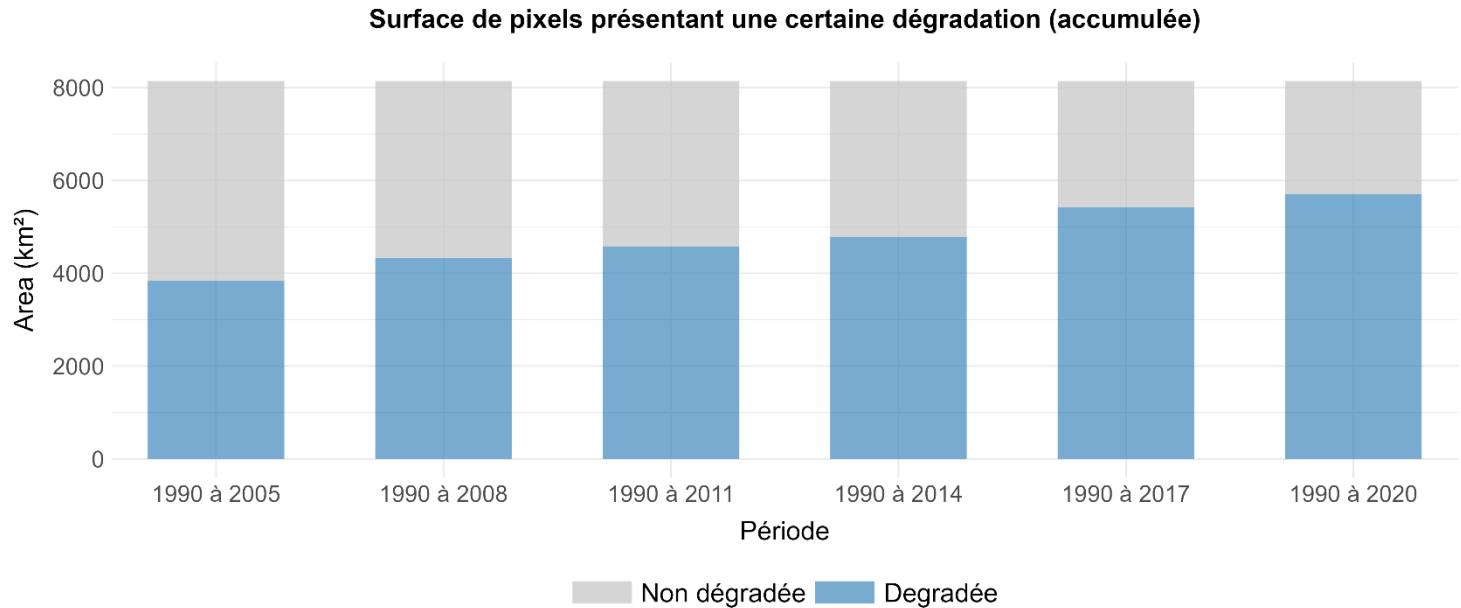


Fig. 17 : Surface des pixels présentant une certaine dégradation de manière cumulative

Depuis 2000, il y a une diminution progressive de la surface dégradée, dont la courbe descendante s'accentue à partir de 2008 et se poursuit jusqu'à la période se terminant en 2014 (Figure 17) Cette période présente le plus faible nombre de pixels de forêts dégradées (16,10 % des pixels classés). Cette tendance est inversée dans la période suivante avec une augmentation de la surface dégradée.

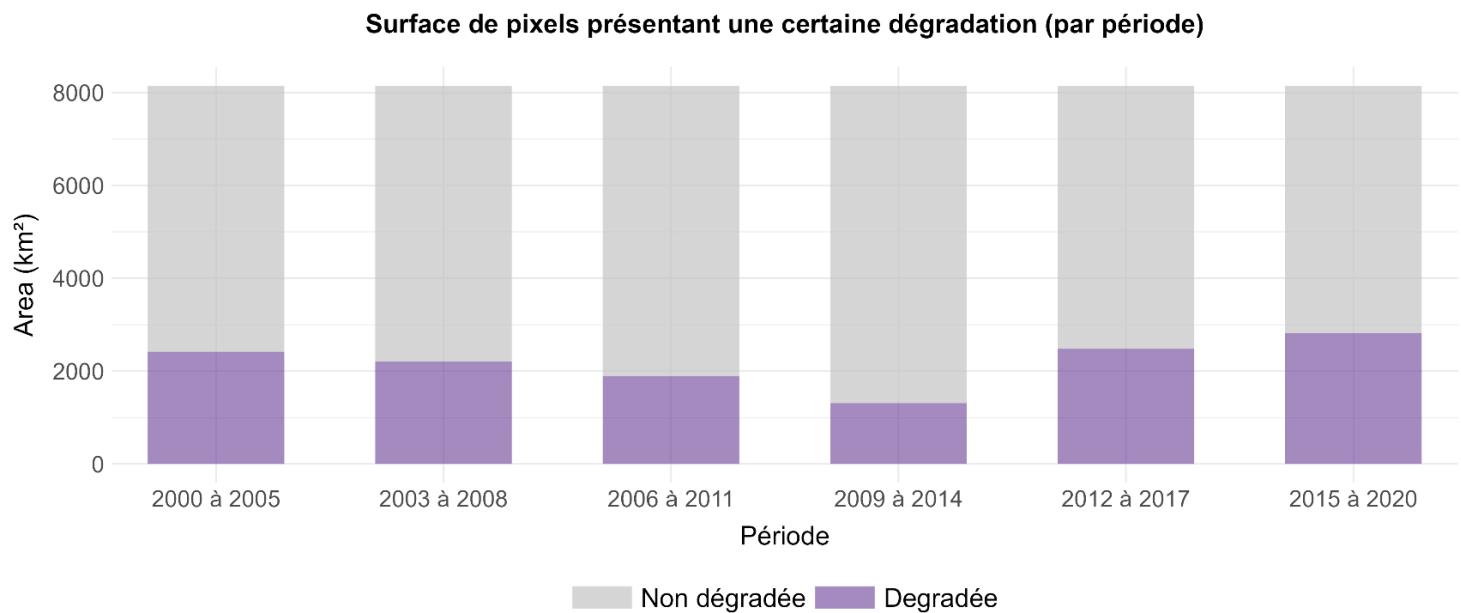


Fig. 18 : Surface des pixels présentant une certaine dégradation par période

5.3. Les valeurs de dégradation selon les tendances de l'EVI

Pour étudier la relation entre les pixels MODIS classifiés selon chaque tendance et les valeurs de dégradation issues des données TMF, des boîtes à moustaches ont été élaborées pour chacune des périodes.

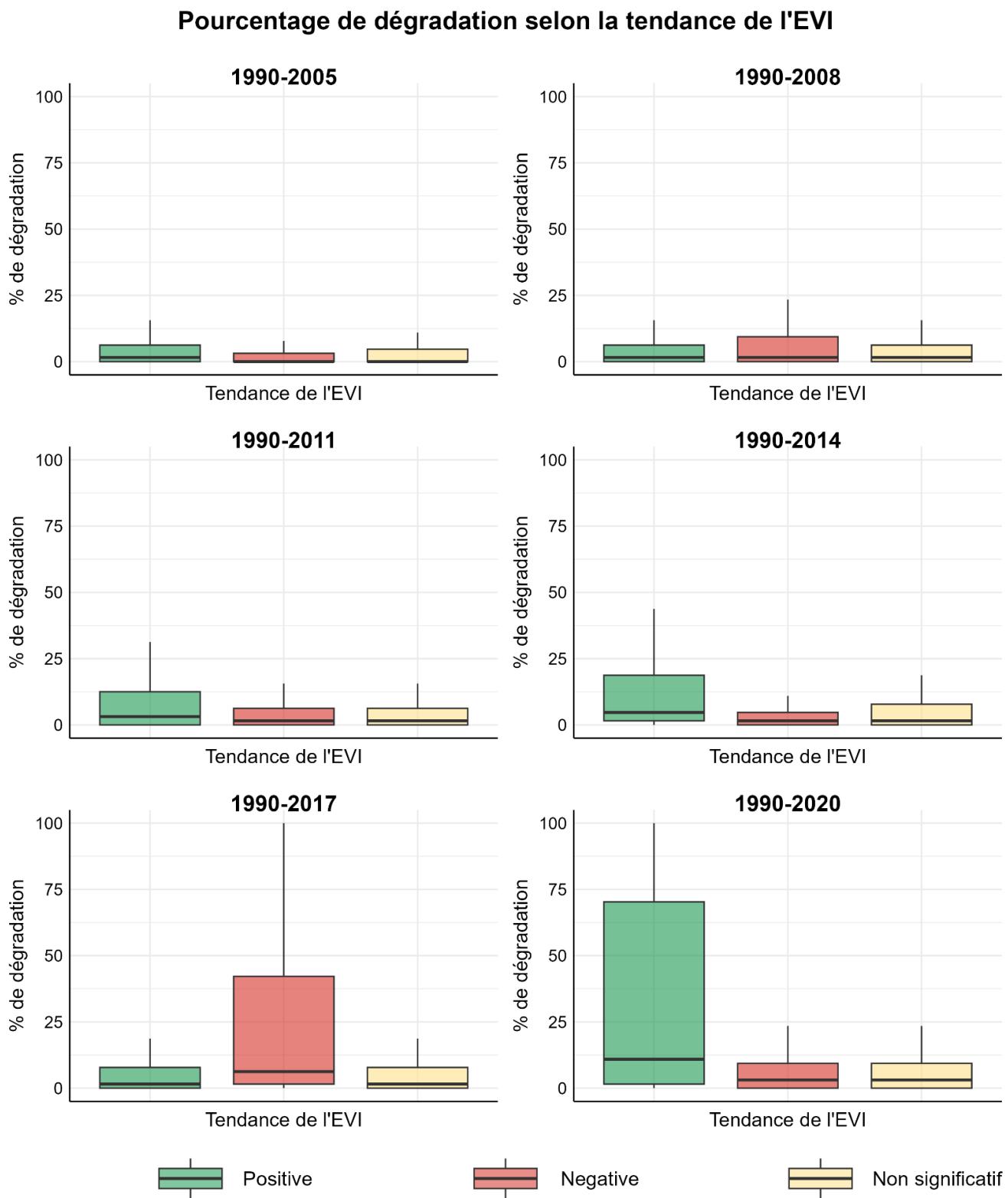


Fig. 19 : Boîte à moustaches avec les valeurs de dégradation selon les tendances de l'EVI

En observant les boîtes à moustaches, il est noté l'absence de lien entre les deux jeux de données. Les valeurs de dégradation sont majoritairement très basses, proches de 0 pour toutes les tendances. Le nombre élevé de pixels sans valeur de dégradation ne se limite pas aux zones où une tendance claire de l'EVI est observée, mais se généralise à l'ensemble des données TMF, comme en témoignent les histogrammes présentés en annexe 9.5.

En visualisant la variation de la surface au cours des périodes (Figure 19), aucune relation entre ces deux jeux de données n'est constatée. De plus, lorsque la dégradation diminue entre 2006 et 2014, la tendance négative de l'EVI augmente.

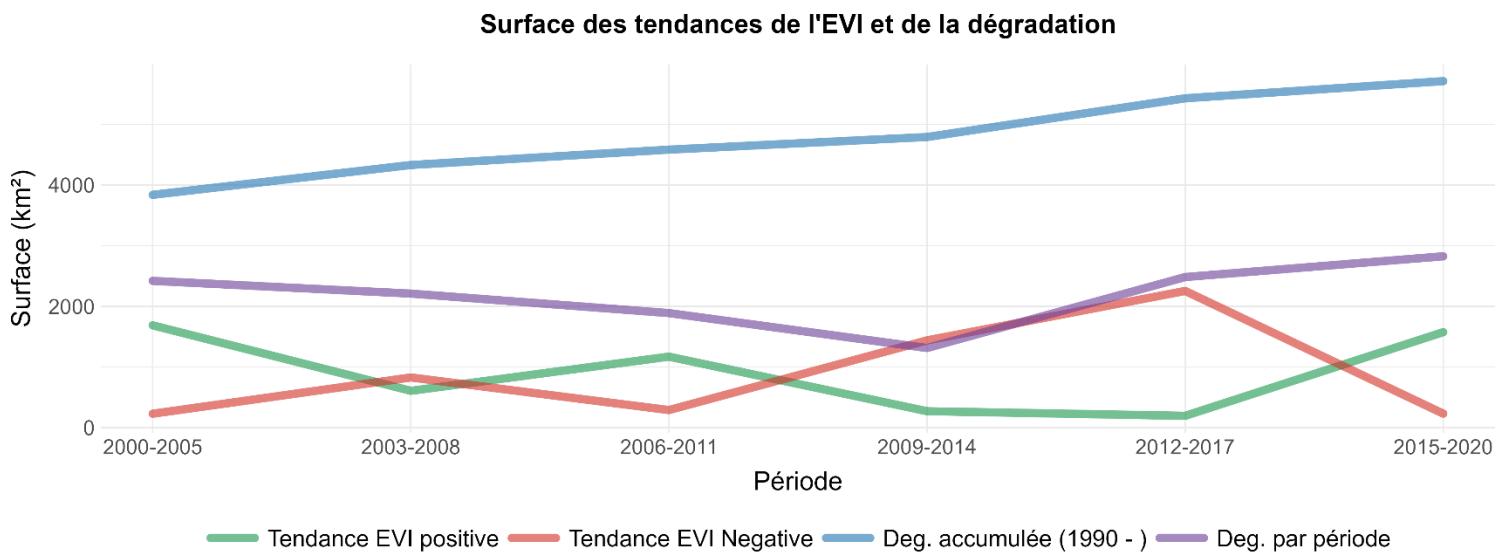


Fig. 20 : Surface des tendances de l'EVI et de la dégradation accumulée et par période.

5.4. Application *Shiny* pour appuyer l'interprétation des données

Dans le but d'approfondir l'analyse des résultats, une application a été développée en utilisant la bibliothèque *Shiny* dans R. Cette application permet d'explorer les métriques et les résultats pour chaque pixel au cours des différentes périodes. Développée avant la production des résultats finaux, son utilisation tout au long du processus a aidé à adapter l'approche méthodologique pour le prétraitement des données MODIS et l'analyse statistique de la productivité forestière.

Grâce à cet outil, il a été possible d'examiner les valeurs de l'EVI, de visualiser la régression linéaire par MCO et d'obtenir les pourcentages de dégradation pour un pixel spécifique. En explorant des zones connues, il a été possible de comprendre les limites des données et de la méthodologie employée. Ci-dessous se trouve une capture d'écran de la page principale de l'application.

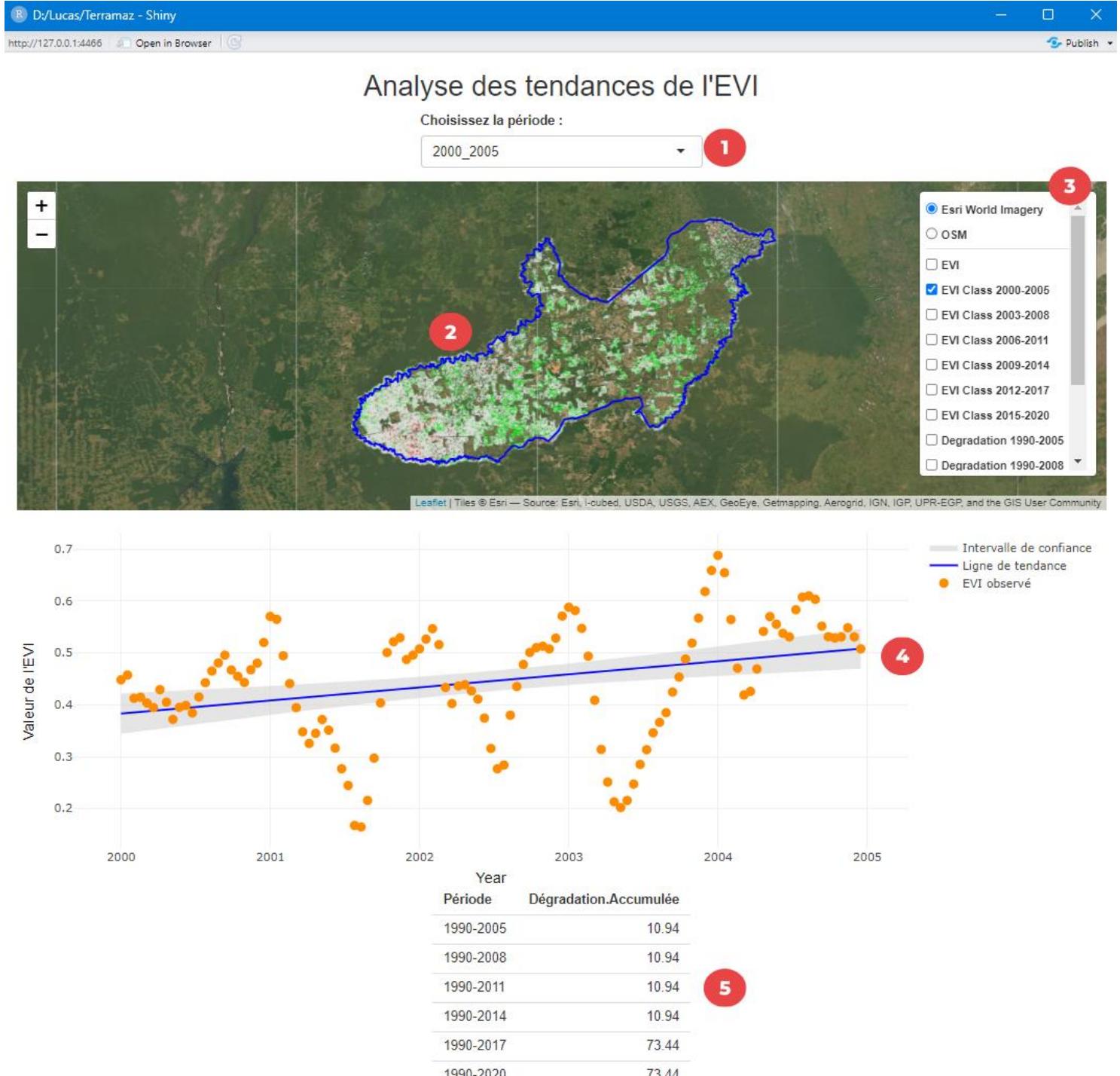


Fig. 21 : Capture d'écran de l'application *Shiny* affichant les informations d'un pixel déterminé

Dès son exécution, l'application *Shiny* utilise un serveur interne pour créer un navigateur où une visualisation dynamique des informations est effectuée. Sur la Figure 20, nous pouvons voir :

1. une liste déroulante permettant de choisir les périodes. La régression linéaire sous la carte change en fonction de cette sélection et du pixel choisi ;
2. grâce à la bibliothèque *Leaflet*, une interface interactive a été créée avec : i) des cartes de base (ESRI et OSM), ii) le raster EVI avec 460 couches (le produit final

du prétraitement des données MODIS) utilisé pour calculer la régression linéaire, iii) les rasters avec la tendance de l'EVI classifiée et iv) les pourcentages de dégradation. À chaque clic sur la carte, la régression linéaire (4) est calculée et les pourcentages de dégradation s'affichent sur le tableau (5) ;

3. la liste des couches chargées ;
4. la régression linéaire du pixel sélectionné, contenant l'intervalle de confiance, la ligne de tendance et les valeurs de l'EVI ;
5. un tableau avec les valeurs de pourcentage de dégradation.

Grâce à l'exploration de l'application *Shiny*, il a été possible de mieux comprendre ce qui se passait dans chaque pixel au cours de la série temporelle.

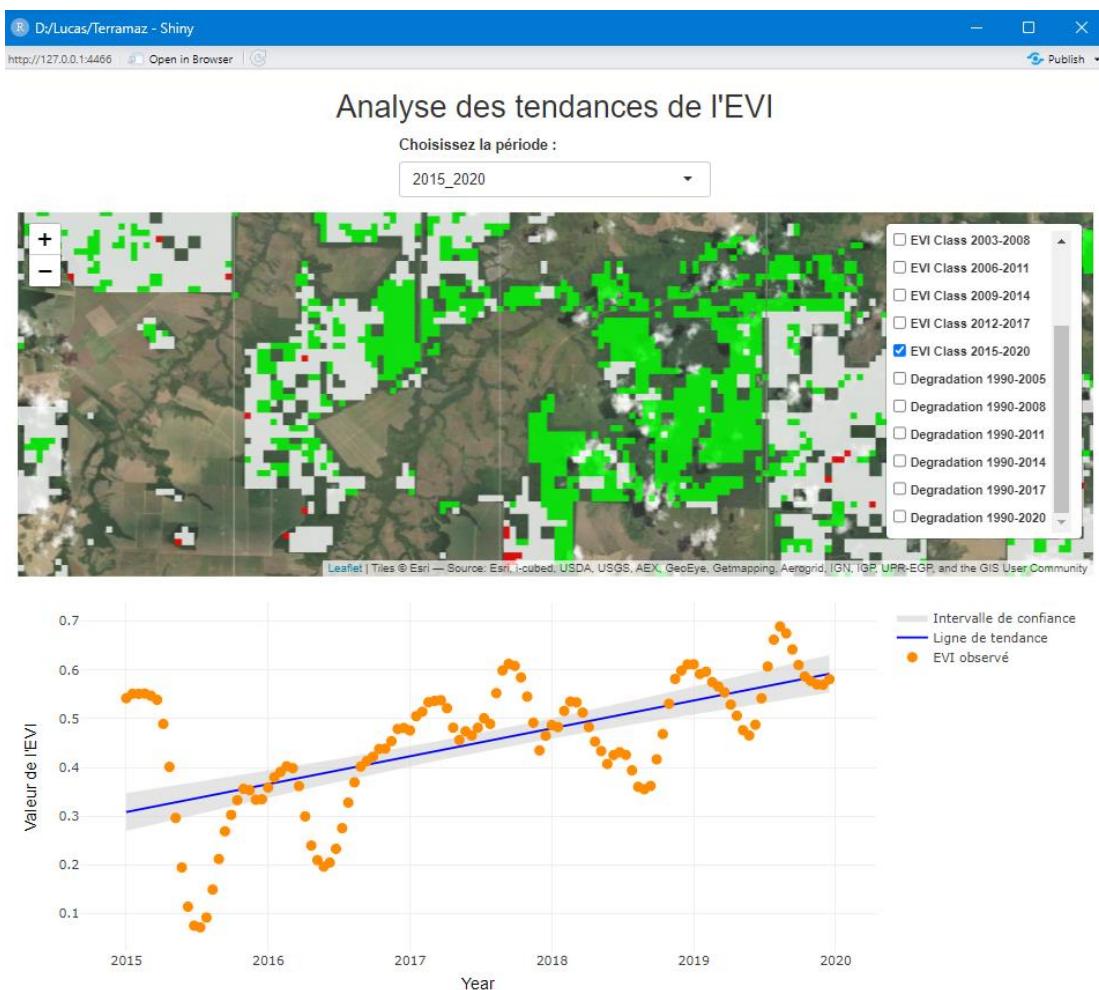


Fig. 22 : Capture d'écran de la région touchée pour le feux en 2015 et 2016 et analysée avec l'application *Shiny*

Dans la figure 21, il est possible d'observer des valeurs de l'EVI très basses après les incendies de 2015 et 2016 qui ont touché la municipalité. Ensuite, la tendance de l'indice est positive, suivant la croissance attendue de la forêt.

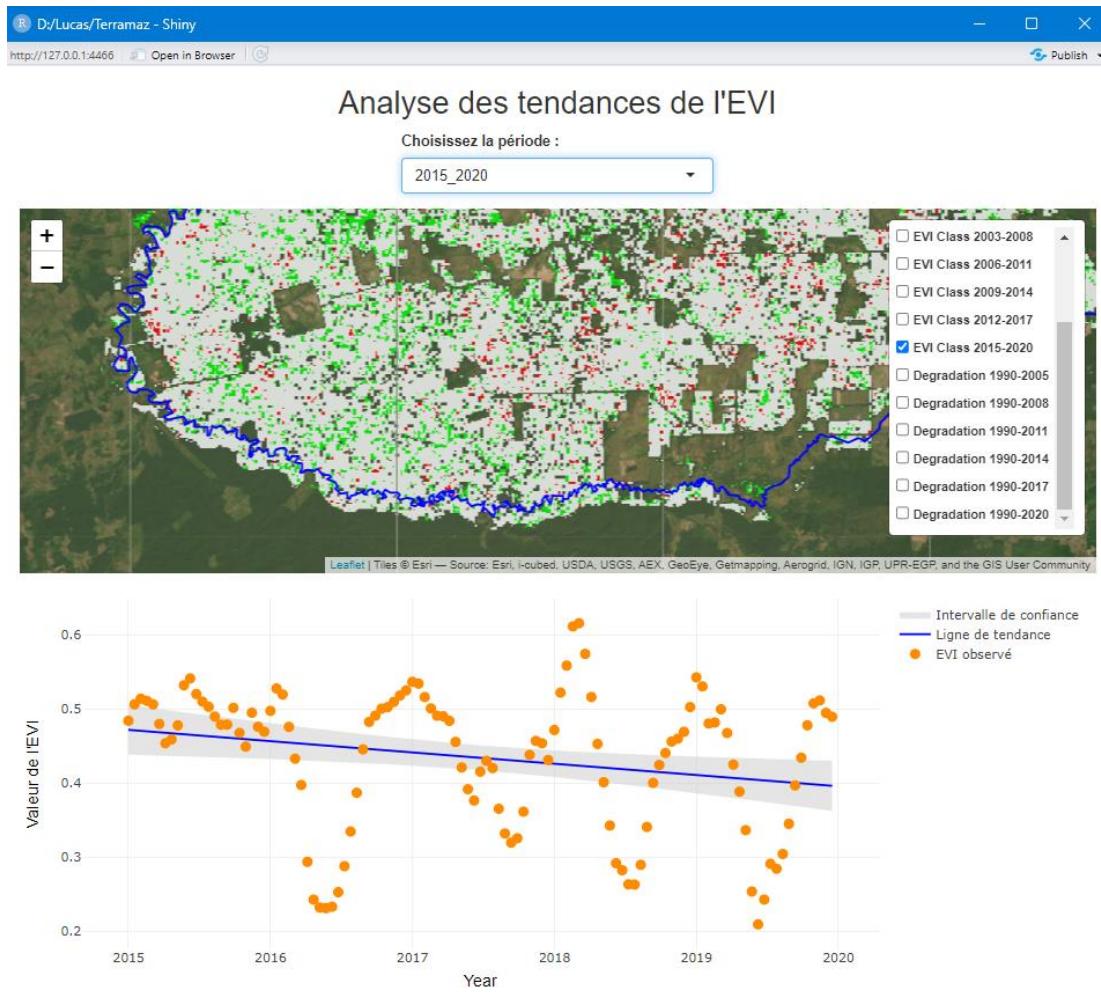


Fig. 23 : Capture d'écran de la région de la ferme Capim explorée par la société CIKEL et analysée avec l'application *Shiny*

Dans la Figure 23, il est possible d'observer un pixel situé dans la ferme exploitée par l'entreprise CIKEL qui, même sans dégradation, présente trois valeurs de l'EVI inférieures à 0,3.

6. Discussion

Comme mentionné dans la première partie de ce rapport, Paragominas a été choisie pour les analyses en raison de la connaissance des maîtres de stage sur la dynamique spatio-temporelle des perturbations forestières dans la municipalité. Ce territoire a été privilégié car il permettait d'investiguer, même sans se rendre sur le terrain, certaines régions susceptibles de révéler une relation entre la productivité forestière calculée à partir des données MODIS et la dégradation forestière produite par le JRC. Parmi ces régions d'intérêt, nous avons particulièrement utilisé les résultats de deux zones : i) la partie centrale de la municipalité, qui a subi un incendie en 2015 et 2016, et ii) l'aire de la ferme Rio Capim à l'est de la municipalité, exploitée de manière durable par l'entreprise CIKEL et qui n'a subi aucune dégradation forestière (Figure 24).

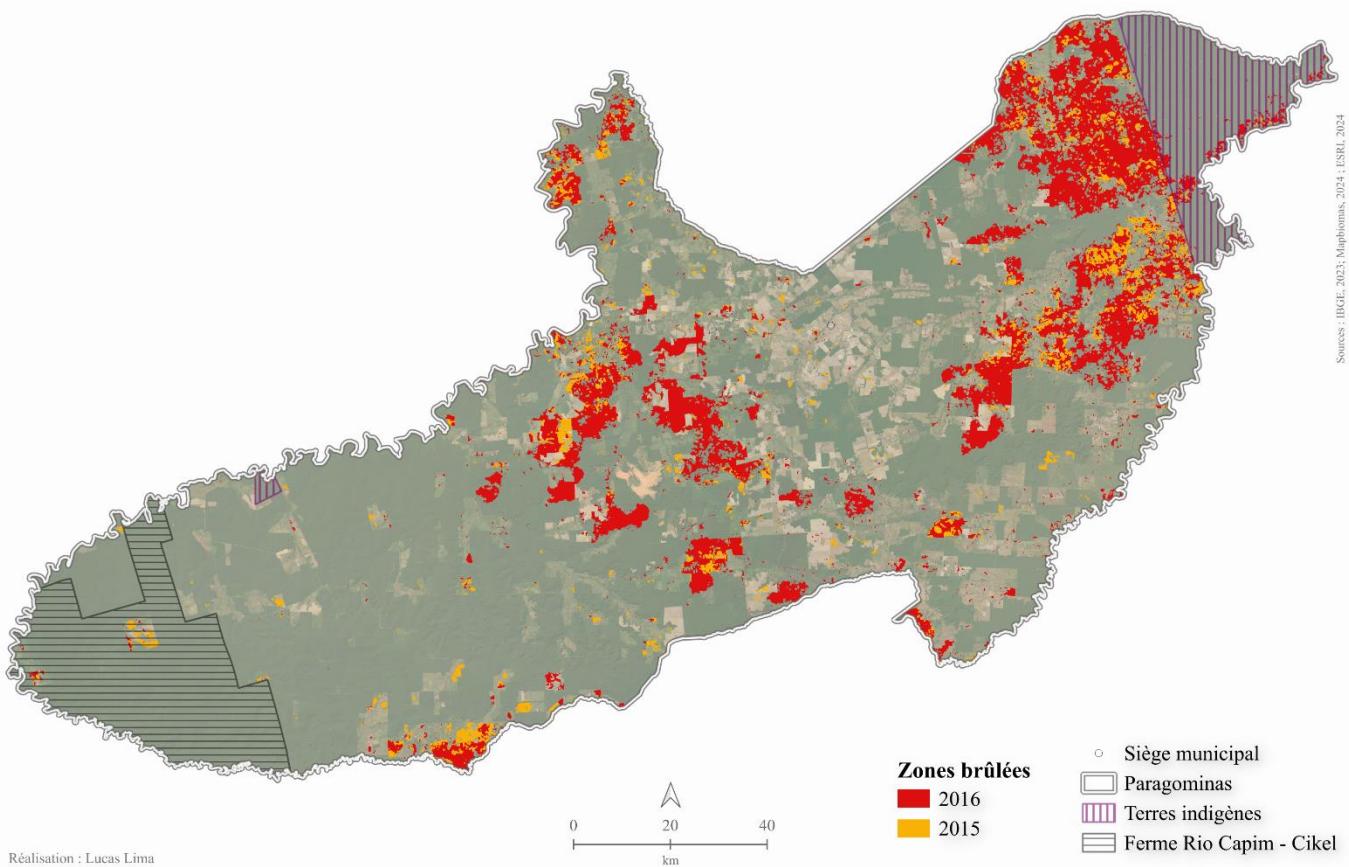


Fig. 24 : Carte des zones impactées par les incendies de forêt de 2015 et 2016 dans la municipalité de Paragominas.

Les résultats montrent que la tendance de l'EVI calculée avec MODIS n'est sensible aux phénomènes de dégradation que lorsque ceux-ci sont relativement significatifs et particulièrement rapides. Cela est notable dans la partie touchée par l'incendie de 2016. Lorsque les pixels présentaient une proportion élevée de dégradation, la tendance négative a été correctement calculée. De même, dans la période suivante, la tendance positive a été efficace pour démontrer la régénération forestière.

Compte tenu des différences d'écosystèmes, ces résultats correspondent à l'étude simulée réalisée par Wessels et al. (2012) pour tester la sensibilité des indices de végétation à la dégradation

dans les zones semi-arides. Selon les auteurs, pour être capturée et influencer l'inclinaison de la tendance, la dégradation devait être introduite rapidement et au milieu de la série temporelle. Ils indiquent qu'un seuil de dégradation de 30% à 40% est nécessaire avant qu'une inclinaison négative significative ne soit apparente.

Dans les autres territoires¹⁵ du projet (ou même dans d'autres zones de Paragominas où il n'y a pas eu de phénomènes de dégradation aussi importants), la relation entre la tendance de l'EVI et les données de dégradation n'a pas montré de linéarité et les changements entre les deux variables ne peuvent pas être expliqués. Cette absence peut être observée car la légère diminution continue de la surface dégradée à Paragominas entre les quatre fenêtres temporelles (de 2000 à 2014) n'a pas été accompagnée par une augmentation de la productivité forestière. Au contraire, la productivité a oscillé, tantôt positive, tantôt négative, sans relation claire avec la dégradation.

La limitation à capter les faibles valeurs de dégradation peut être associée à la résolution des données MODIS. Cette résolution est possiblement inadéquate pour saisir les nuances de la dégradation forestière lorsqu'elle se produit de manière fragmentée ou à échelle fine. L'observation des boîtes à moustaches reliant directement les deux données révèle que les valeurs de dégradation sont généralement très basses parmi les trois classes de tendance de l'EVI (positive, négative et non significative), démontrant l'absence de lien entre elles.

La faible résolution des données MODIS constitue une limite supplémentaire en tant que source primaire pour un indicateur destiné à surveiller la structure de la forêt à une échelle locale. Elles sont plus appropriées pour des analyses sur de vastes territoires. En revanche, les données TMF, avec leur résolution plus élevée, capturent des variations mineures qui peuvent passer inaperçues dans les données MODIS. Les résultats montrent que cette différence de granularité entre les données MODIS et TMF complique leur corrélation directe.

Un autre aspect important qui a affecté cette étude est la couverture nuageuse dans la région amazonienne, qui a impacté de manière significative la qualité des données MODIS, entraînant des lacunes dans la série temporelle qui ont compromis l'analyse de la tendance de l'EVI. Malgré le pré-traitement robuste, diverses zones présentaient encore des valeurs anormales qui ont faussé les résultats des analyses statistiques.

Ces valeurs aberrantes ont été investiguées à l'aide de l'application *Shiny*, où il a été identifié que certains pixels montraient des chutes et des augmentations brusques des valeurs de l'EVI. De telles anomalies sont particulièrement observées dans les pixels présents dans la région de la ferme Rio Capim exploitée par CIKEL, qui ne présentaient pas de pourcentages de dégradation importants, mais affichaient néanmoins une baisse inattendue de la tendance.

¹⁵ L'absence de relation entre les deux jeux de données peut être constatée dans les annexes 9.2 à 94, avec les résultats des autres territoires.

L'influence des conditions atmosphériques peut également être perçue dans l'effet « poivre et sel » (connu sous le nom de bruit impulsif) des tendances de l'EVI dans certaines régions de la zone d'étude. Dans ces régions, les valeurs négatives et positives présentent une dispersion spatiale hétérogène et déconnectée des pourcentages de dégradation, ce qui donne un aspect « éclaboussé ». En investiguant ces pixels avec l'application *Shiny*, des valeurs anormales ont également été observées dans beaucoup d'entre eux.

6.1. Perspectives

Compte tenu des résultats et des limitations mentionnées, plusieurs perspectives pour l'étude peuvent être envisagées. Étant donné que la tendance de l'EVI a correctement capté les dégradations extrêmes, une contribution possible serait de la comparer aux données de perte forestière dues aux feux de forêts développées par le *Global Land Analysis and Discovery* (GLAD) (Tyukavina et al., 2022). Cette comparaison permettrait de valider l'efficacité de l'EVI comme indicateur des dégradations extrêmes causées par les incendies.

Une autre contribution concerne la source de données pour les indices de végétation. L'utilisation de séries temporelles Landsat peut constituer une alternative viable pour obtenir des images à plus haute résolution spatiale, bien qu'elle exige un travail complexe de prétraitement et des modifications méthodologiques significatives.

Étant donné que la résolution temporelle de la constellation Landsat est de 16 jours, il serait nécessaire de calculer une moyenne annuelle des valeurs de l'EVI des observations valides, car la couverture nuageuse impacte l'acquisition des images. En travaillant avec une valeur annuelle, la régression linéaire sur des fenêtres glissantes de cinq ans devrait être ajustée pour accommoder la quantité réduite de données.

Une autre contribution possible à l'étude est l'ajout de méthodes statistiques pour distinguer si la variation de l'indice de végétation est liée à des facteurs climatiques, tels que la précipitation et la température, ou à des activités humaines. Parmi ces méthodes figure le RESTREND (Evans et Geerken, 2004), qui vise à isoler les facteurs climatiques et permet une évaluation plus précise de la dégradation. Cette méthode est souvent adoptée dans les zones semi-arides ou de forêts sèches (Ibrahim et al., 2015 ; Montfort et al., 2020 ; Wessels et al., 2007), où la relation entre les facteurs climatiques et les indices de végétation est directement corrélée.

Cependant, étant donné que l'objectif de la présente étude est de produire un indicateur pour surveiller la forêt au niveau local, les méthodes utilisant des données climatiques présentent une limitation importante liée à l'échelle, car même à la résolution la plus élevée, elles ne dépassent pas 5

km¹⁶. Cela complique leur application dans de petits territoires, en particulier dans des zones comme Cotriguaçu et Paragominas, où la distribution des variables climatiques est homogène.

L'application de ces méthodes dans les forêts tropicales humides présente une difficulté supplémentaire, car la relation entre les indices de végétation et les facteurs climatiques n'est pas toujours linéaire. Les précipitations influencent positivement la croissance forestière pendant la saison sèche. Cependant, l'excès de pluies pendant la saison humide peut dépasser les besoins en eau et inhiber la croissance des plantes (Zhong et al., 2021).

Compte tenu de la variation attendue de l'indice de végétation entre les saisons, une autre perspective pourrait être l'analyse statistique limitée à la période sèche. Dans cette approche, seule la moyenne de l'EVI des mois les plus secs serait utilisée, car ces mois tendent à avoir des valeurs plus élevées et probablement moins d'erreurs en raison de la réduction de la couverture nuageuse.

16 Parmi les sources de données climatiques à meilleure résolution, on trouve TerraClimate (température) et CHIRPS (précipitation), tous deux avec une résolution d'environ 5 km.

7. Conclusion

La présente étude avait pour objectif définir et évaluer un indicateur capable de suivre la productivité forestière dans des territoires amazonien. A cet effet, une analyse statistique a été réalisée sur les valeurs EVI fournies par la série temporelle du capteur MODIS. Pour vérifier la fiabilité de l'indicateur produit, les résultats de ces analyses ont été croisés avec les informations sur la dégradation forestière fournies par le JRC.

À l'aide de fenêtres temporelles de cinq ans glissantes tous les trois ans, nous avons analysé comment la tendance de l'EVI se comporte à différentes périodes en la reliant à la dégradation forestière. Cette étude a révélé des résultats significatifs mais aussi des limitations dans l'utilisation des données MODIS à l'échelle d'un territoire dans l'Amazonie. Les analyses ont montré que la productivité forestière était efficace pour capter les phénomènes de dégradation lorsque ceux-ci étaient importants et rapides. Cependant, il n'est pas possible d'établir une relation claire entre la tendance de l'EVI et une dégradation plus subtile ou fragmentée.

Plusieurs défis ont été identifiés, notamment la faible résolution des données MODIS, les lacunes dans la série temporelle dues à la couverture nuageuse, et la granularité des données de dégradation par rapport aux données MODIS. Pour améliorer cette recherche, des alternatives telles que l'utilisation de séries temporelles Landsat à plus haute résolution spatiale et l'analyse des tendances de l'EVI par période saisonnière pourraient être explorées.

8. Références bibliographiques

Bai Z. G., et al., « Proxy global assessment of land degradation ». *Soil Use and Management* [En ligne]. septembre 2008. Vol. 24, n°3, p. 223-234. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x>>

Bendahan A. B. et al « Paragominas ou la succession de modeloes controverses pour l'Amazonie ». In : Colloque int. CANAL2013 Circulations et appropriations des normes et des modèles de l'action locale. Montpellier, France : Agropolis, 2013.

Blanc L., et al. « Indicateurs pour le suivi et la planification de la transition des territoires vers une gestion durable sans déforestation pour le territoire de Paragominas. Projet TerrAmaz ». *Rapport Livrable 3.2.1*. décembre 2022.

Bourgoin C., et al. « The Potential of Multisource Remote Sensing for Mapping the Biomass of a Degraded Amazonian Forest ». *Forests* [En ligne]. 29 mai 2018. Vol. 9, n°6, p. 303. Disponible sur : <<https://doi.org/10.3390/f9060303>>

Bourgoin C., et al., « Looking beyond forest cover: an analysis of landscape-scale predictors of forest degradation in the Brazilian Amazon ». *Environmental Research Letters*. [En ligne]. 1 novembre 2021. Vol. 16, n°11, p. 114045. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac31eb>>

Brando P. M. et al., « Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the Amazon ». *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* [En ligne]. 17 août 2010. Vol. 107, n°33, p. 14685-14690. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1073/pnas.0908741107>>

Bullock E. L., et al. « Satellite-based estimates reveal widespread forest degradation in the Amazon ». *Global Change Biology* [En ligne]. 2020. Vol. 26, p. 2956-2969. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1111/gcb.15029>>

Chazdon R. L. « Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances ». *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* [En ligne]. janvier 2003. Vol. 6, n°1-2, p. 51-71. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1078/1433-8319-00042>>

Chen J., et al. « A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter ». *Remote Sensing of Environment* [En ligne]. juin 2004. Vol. 91, n°3-4, p. 332-344. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.014>>

Da Cruz D. C., et al., « An overview of forest loss and restoration in the Brazilian Amazon ». *New Forests* [En ligne]. janvier 2021. Vol. 52, n°1, p. 1-16. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1007/s11056-020-09777-3>>

Dalagnol R., et al. « Mapping tropical forest degradation with deep learning and Planet NICFI data ». *Remote Sensing of Environment* [En ligne]. décembre 2023. Vol. 298, p. 113798. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113798>>

Didan K., et Munoz A. B. « MODIS Vegetation Index » *User's Guide*. v.3.1. juin 2019 (collection 6.1).

Eckert S., et al. « Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia ». *Journal of Arid Environments* [En ligne]. février 2015. Vol. 113, p. 16-28. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.09.001> >

Evans J., Geerken R. « Discrimination between climate and human-induced dryland degradation ». *Journal of Arid Environments* [En ligne]. juin 2004. Vol. 57, n°4, p. 535-554. Disponible sur : < [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00121-6](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00121-6) >

FAO. « Proceedings: second expert meeting on harmonizing forest-related definitions for use by various stakeholders ». Rome, 2002.

FAO. « Assessing forest degradation: Towards the development of globally applicable guidelines ». Rome, 2011.

FAO et UNEP. « The State of the World's Forests ». *Forests, biodiversity and people*. Rome, 2020

Fearnside P. M. « Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences ». *Conservation Biology* [En ligne]. juin 2005. Vol. 19, n°3, p. 680-688. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00697.x> >

Gao B. « NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space ». *Remote Sensing of Environment* [En ligne]. décembre 1996. Vol. 58, n°3, p. 257-266. Disponible sur : < [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3) >

Ghazoul J., et al. « Conceptualizing Forest Degradation ». *Trends in Ecology & Evolution* [En ligne]. octobre 2015. Vol. 30, n°10, p. 622-632. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.08.001> >

Gitelson A. A., et al. « Detection of Red Edge Position and Chlorophyll Content by Reflectance Measurements Near 700 nm ». *Journal of Plant Physiology* [En ligne]. janvier 1996. Vol. 148, n°3-4, p. 501-508. Disponible sur : < [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80285-9](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80285-9) >

Hansen M. C., et al. « High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change ». *Science* [En ligne]. 15 novembre 2013. Vol. 342, n°6160, p. 850-853. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1126/science.1244693> >

Higginbottom T., et Symeonakis E. « Assessing Land Degradation and Desertification Using Vegetation Index Data: Current Frameworks and Future Directions ». *Remote Sensing* [En ligne]. 10 octobre 2014. Vol. 6, n°10, p. 9552-9575. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3390/rs6109552> >

Huete A. R. « A soil-adjusted vegetation index (SAVI) ». *Remote Sensing of Environment* [En ligne]. août 1988. Vol. 25, n°3, p. 295-309. Disponible sur : < [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X) >

Huete A. R. et al., « Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices ». *Remote Sensing of Environment* [En ligne]. novembre 2002. Vol. 83, n°1-2, p. 195-213. Disponible sur : < [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2) >

IBGE, « Cidades ». *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. [En ligne]. 2022. Disponible sur : < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/paragominas/panorama> >

Ibrahim Y. et al., « Land Degradation Assessment Using Residual Trend Analysis of GIMMS NDVI3g, Soil Moisture and Rainfall in Sub-Saharan West Africa from 1982 to 2012 ». *Remote Sensing* [En ligne]. 30 avril 2015. Vol. 7, n°5, p. 5471-5494. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3390/rs70505471> >

IPBES « The IPBES assessment report on land degradation and restoration ». Montanarella, L. Shcoles, R. et Brainich A. (eds.). *Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* [En ligne]. 2018. Disponible sur : < <https://doi.org/10.5281/zenodo.3237393> >

JRC-EC. « Tropical Moist Forest Data » *Users Guide*. v.1, 2020. Disponible sur : < https://forobs.jrc.ec.europa.eu/static/tmf/TMF_DataUsersGuide.pdf >

Justice C. O., et al. « Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data ». *International Journal of Remote Sensing* [En ligne]. août 1985. Vol. 6, n°8, p. 1271-1318. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1080/01431168508948281> >

Lapola D. M., et al. « The drivers and impacts of Amazon forest degradation ». *Science* [En ligne]. 27 janvier 2023. Vol. 379, n°6630, Disponible sur : < <https://doi.org/10.1126/science.abp8622> >

Laurent F. et al., « Le tournant environnemental en Amazonie : ampleur et limites du découplage entre production et déforestation ». *echogeo* [En ligne]. 28 septembre 2017. n°41., Disponible sur : < <https://doi.org/10.4000/echogeo.15035> >

Lillesand T. M. et al « Remote Sensing and Image Interpretation ». 7e éd. Hoboken, NJ : Wiley, 2015.

Liu H. Q. et Huete A. « A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [En ligne]. mars 1995. Vol. 33, n°2, p. 457-465. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1109/TGRS.1995.8746027> >

Malik A. D., et al. « Vegetation Stands Biomass and Carbon Stock Estimation using NDVI - Landsat 8 Imagery in Mixed Garden of Rancakalong, Sumedang, Indonesia ». *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [En ligne]. 1 juillet 2023. Vol. 1211, n°1, p. 012015. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1211/1/012015> >

Marengo J. A. et al. « Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone ». *Scientific Reports* [En ligne]. 10 janvier 2022. Vol. 12, n°1, p. 457. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04241-4> >

Matricardi E. A. T., et al. « Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon ». *Science* [En ligne]. 11 septembre 2020. Vol. 369, n°6509, p. 1378-1382. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1126/science.abb3021> >

Montfort F., et al. « From land productivity trends to land degradation assessment in Mozambique: Effects of climate, human activities and stakeholder definitions ». *Land Degradation and Development* [En ligne]. 20 june 2020. Vol. 32, n°1, p. 49-65. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1002/ldr.3704> >

Müller C. « Brazil and the Amazon Rainforest - Deforestation, Biodiversity and Cooperation with the EU and International Forums ». Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life

Policies, European Parliament [En ligne]. 2020. Disponible sur : < <http://www.europarl.europa.eu/supporting-analyses> >

Piketty M.-G., Poccard-Chapuis R., Drigo I., Coudel E., Plassin S., Laurent F., Thâles M. « Multi-level Governance of Land Use Changes in the Brazilian Amazon: Lessons from Paragominas, State of Pará ». *Forests* [En ligne]. 30 avril 2015. Vol. 6, n°5, p. 1516-1536. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3390/f6051516> >

Portengen L. « Classifying Mangroves in Vietnam using Radar and Optical Satellite Remote Sensing: Processing Sentinel-1 and Sentinel-2 Imagery in Google Earth Engine ». *Master's thesis*. Delft University of Technology. 2017.

RAISG. « Pasado y futuro de la deforestación en la Amazonía: Pérdida de bosque ocurrida entre 2001-2020 y escenarios predictivos al año 2025. » *Rede Amazônica de Informação Socioambiental Georreferenciada*. septembre 2022. p. 107

Rouse J. W., et al. « Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS ». *NASA special publication*, vol. 351, p. 309, 1974.

Shi H., et al. « Assessing the ability of MODIS EVI to estimate terrestrial ecosystem gross primary production of multiple land cover types ». *Ecological Indicators* [En ligne]. janvier 2017. Vol. 72, p. 153-164. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.022> >

Shimabukuro Y. E., et al. « Monitoring deforestation and forest degradation using multi-temporal fraction images derived from Landsat sensor data in the Brazilian Amazon ». *International Journal of Remote Sensing* [En ligne]. 18 juillet 2019. Vol. 40, n°14, p. 5475-5496. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1579943> >

Silva Junior C. H. L., et al. « Persistent collapse of biomass in Amazonian forest edges following deforestation leads to unaccounted carbon losses ». *Science Advances* [En ligne]. 2 octobre 2020. Vol. 6, n°40, p. eaaz8360. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz8360> >

Song X.-P. et al., « Annual Carbon Emissions from Deforestation in the Amazon Basin between 2000 and 2010 ». *PLoS ONE* [En ligne]. 7 mai 2015. Vol. 10, n°5, p. e0126754. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126754> >

Souza C. et al., « Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires ». *Remote Sensing of Environment* [En ligne]. octobre 2005. Vol. 98, n°2-3, p. 329-343. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.013> >

Tyukavina A. et al., « Global Trends of Forest Loss Due to Fire From 2001 to 2019 ». *Front. Remote Sens.* [En ligne]. 15 mars 2022. Vol. 3, p. 825190. Disponible sur : < <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.825190> >

UNCCD. « The Global Land Outlook », 2^{ème} edition. Bonn, 2022

Vancutsem C., et al. « Long-term (1990–2019) monitoring of forest cover changes in the humid tropics ». *Science Advances* [En ligne]. 5 mars 2021. Vol. 7, n°10, p. eabe1603. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe1603> >

Vásquez-Grandón A., et al. « Forest Degradation: When Is a Forest Degraded? ». *Forests* [En ligne]. 21 novembre 2018. Vol. 9, n°11, p. 726. Disponible sur : <<https://doi.org/10.3390/f9110726>>

Walker W. S., et al. « The role of forest conversion, degradation, and disturbance in the carbon dynamics of Amazon indigenous territories and protected areas ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* [En ligne]. 11 février 2020. Vol. 117, n°6, p. 3015-3025. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1073/pnas.1913321117>>

Wessels K. et al., « Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa ». *Journal of Arid Environments* [En ligne]. janvier 2007. Vol. 68, n°2, p. 271-297. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.05.015>>

Wessels K. J. et al., . « Limits to detectability of land degradation by trend analysis of vegetation index data ». *Remote Sensing of Environment* [En ligne]. octobre 2012. Vol. 125, p. 10-22. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.06.022>>

Xiao X., et al. « Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest ». *Remote Sensing of Environment* [En ligne]. février 2004. Vol. 89, n°4, p. 519-534. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.008>>

Ya'acob N., et al. « Temporal Forest Change Detection and Forest Health Assessment using Remote Sensing ». IOP Conference Series: Earth and Environmental Science [En ligne]. 10 mars 2014. Vol. 19, p. 012017. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1088/1755-1315/19/1/012017>>

Zhang Y., et al. « Tracking small-scale tropical forest disturbances: Fusing the Landsat and Sentinel-2 data record ». *Remote Sensing of Environment* [En ligne]. août 2021. Vol. 261, p. 112470. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112470>>

Zhong R. et al. « Spatiotemporal variation of enhanced vegetation index in the Amazon Basin and its response to climate change ». *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* [En ligne]. octobre 2021. Vol. 123, p. 103024. Disponible sur : <<https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103024>>

8.1. Sites utilisés

- AppEEARS : <https://appears.earthdatacloud.nasa.gov>
- CIRAD : <https://www.cirad.fr/>
- GEE : <https://earthengine.google.com/>
- JRC - TMF : <https://forobs.jrc.ec.europa.eu/TMF>
- MODIS : <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v061/>
- TerrAmaz : <https://www.terramaz.org/>
- UPR Forêts & Sociétés : <https://ur-forets-societes.cirad.fr/>

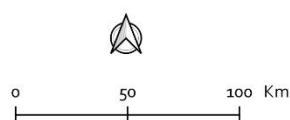
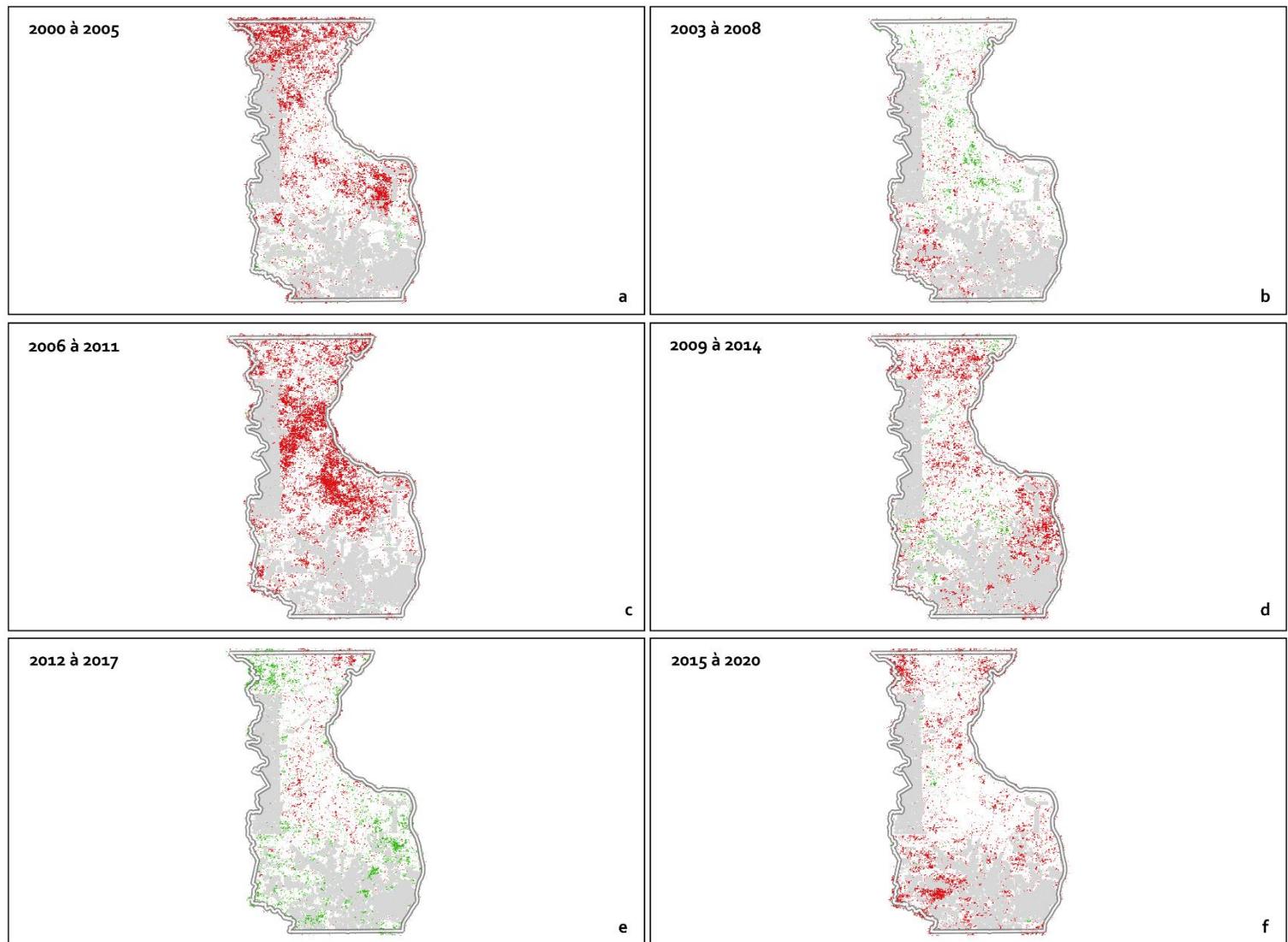
9. Annexes

9.1. Tableau avec les codes binaires dans le MODIS QA et leurs descriptions

Bits	Nom du paramètre	Valeur	Description
0 - 1	Qualité VI (QA MODLAND Bits)	0	VI produit avec une bonne qualité
		1	VI produit, mais vérifier les autres QA
		10	Pixel produit, mais probablement nuageux
		11	Pixel non produit pour d'autres raisons que les nuages
2 - 5	Utilité VI	0	Qualité la plus élevée
		1	Qualité inférieure
		10	Qualité décroissante
		100	Qualité décroissante
		1000	Qualité décroissante
		1001	Qualité décroissante
		1010	Qualité décroissante
		1100	Qualité la plus basse
		1101	Qualité si basse qu'elle n'est pas utile
		1110	Données L1B défectueuses
6 - 7	Quantité d'aérosol	0	Climatologie
		1	Faible
		10	Intermédiaire
		11	Élevée
8	Nuage adjacent détecté	0	Non
9	Correction BRDF de l'atmosphère	0	Non
10	Nuages mélangés	0	Non
11 - 13	Masque Terre/Eau	1	Oui
		0	Océan peu profond
		1	Terre (rien d'autre que la terre)
		10	Côtes océaniques et rivages des lacs
		11	Eaux intérieures peu profondes
		100	Eaux éphémères
		101	Eaux intérieures profondes
		110	Océan modéré ou continental
14	Neige/glace possible	111	Océan profond
		0	Non
15	Ombre possible	1	Oui

Adapté de Didan et Munoz (2019)

9.2. Résultats de Cotriguaçu

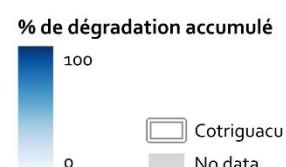
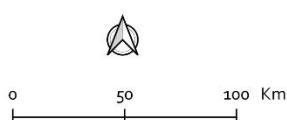
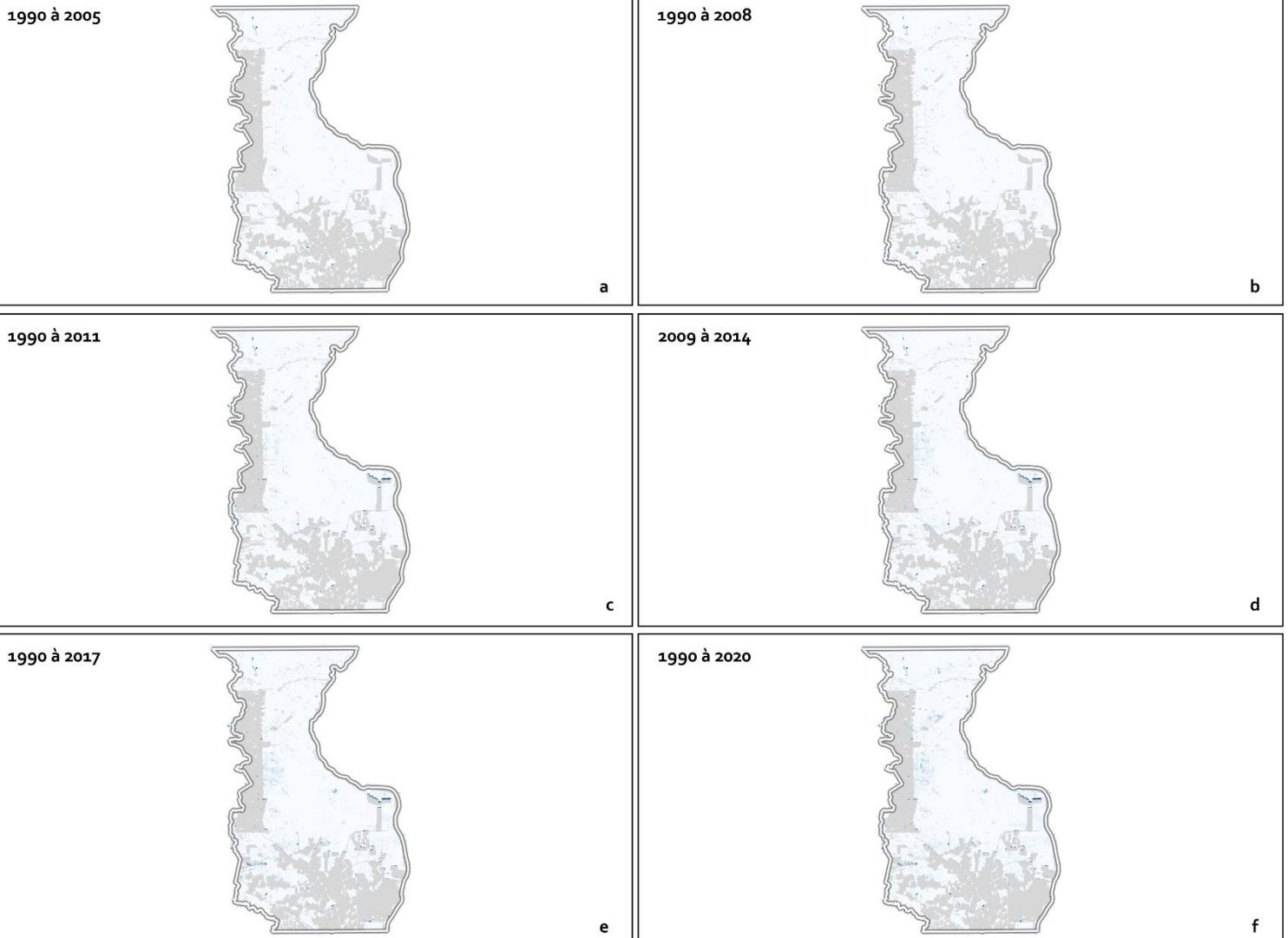


Tendance de l'EVI classée

- [Green square] Positive ($p\text{-value} < 0.001$)
- [Red square] Négative ($p\text{-value} < 0.001$)
- [White square] Non significatif ($p\text{-value} > 0.001$)
- [Grey square] Cotriguaçu
- [Grey square] No data

Sources : TerrAmaz, 2023; NASA, 2024

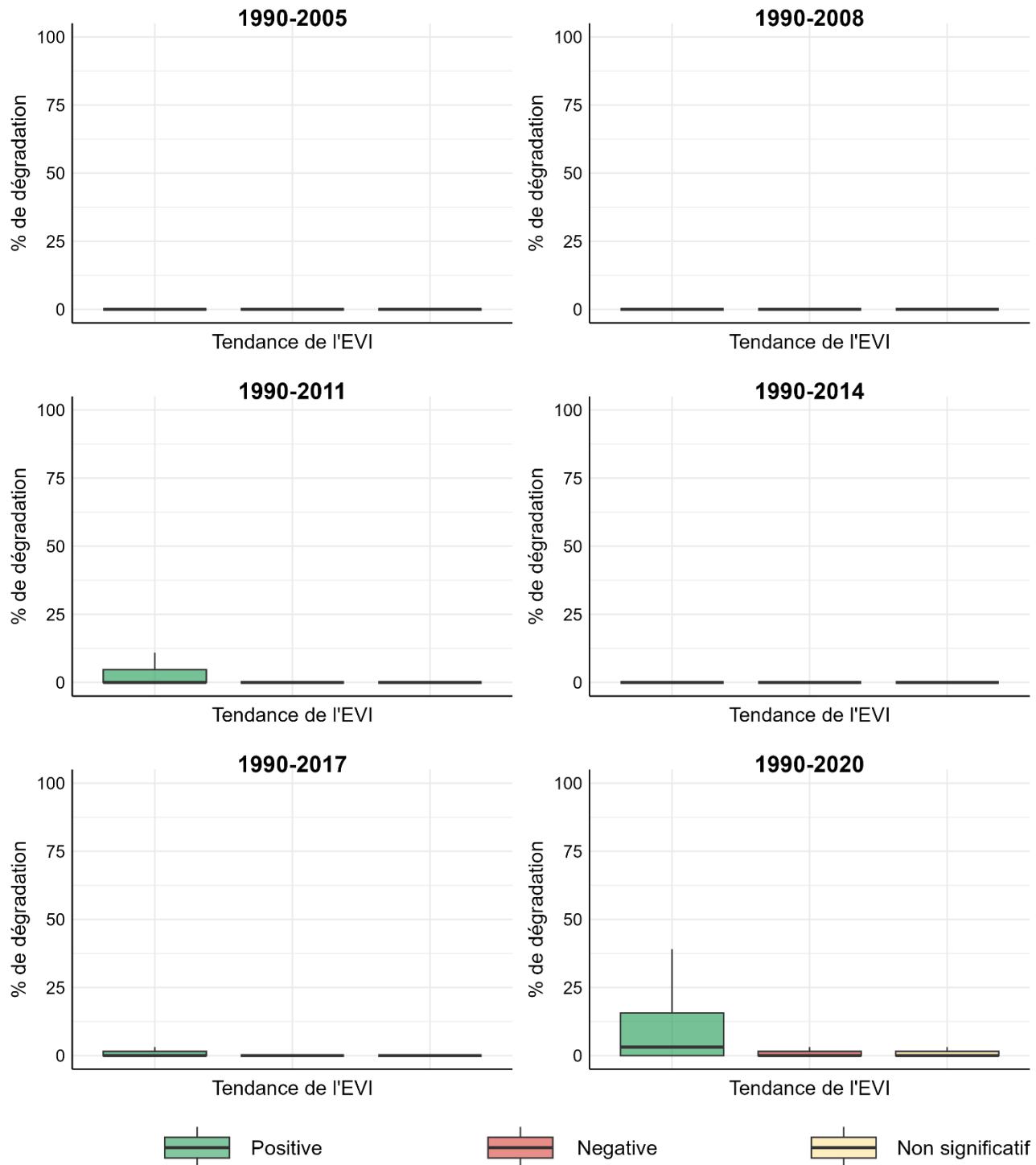
Réalisation : Lucas Lima, 2024

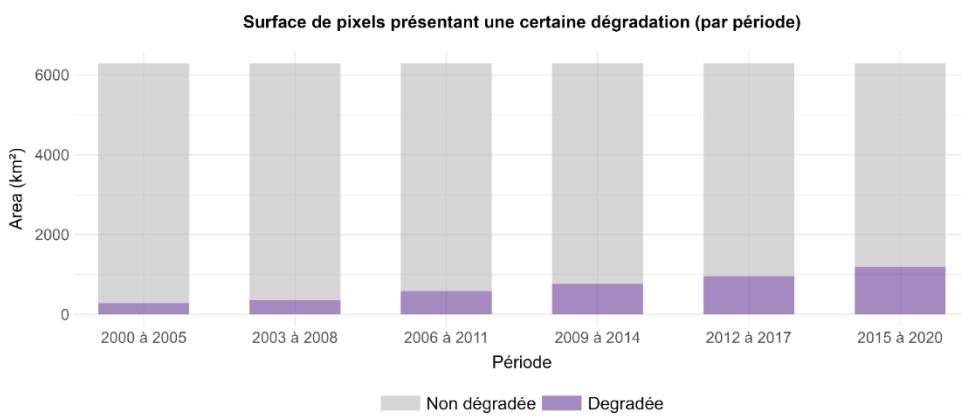
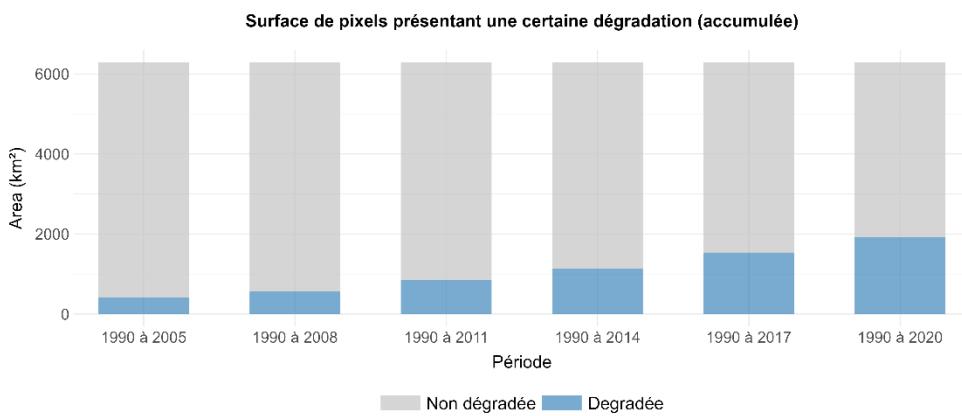
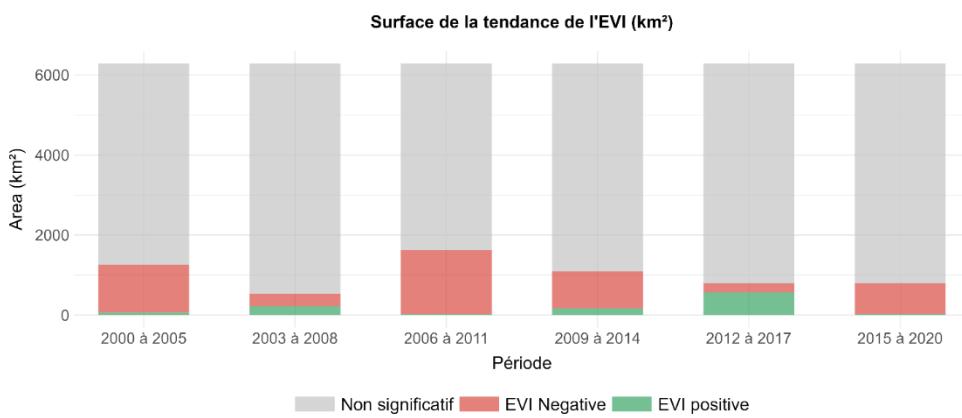


Sources : IBGE, 2023; EC-JRC, 2024

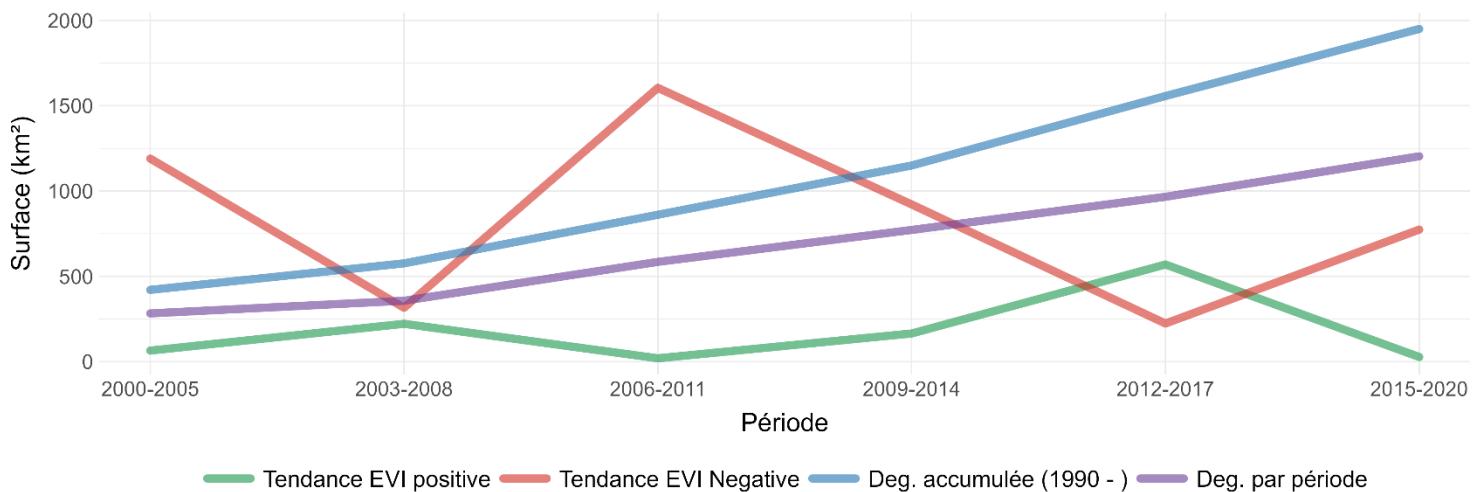
Réalisation : Lucas Lima, 2024

Pourcentage de dégradation selon la tendance de l'EVI

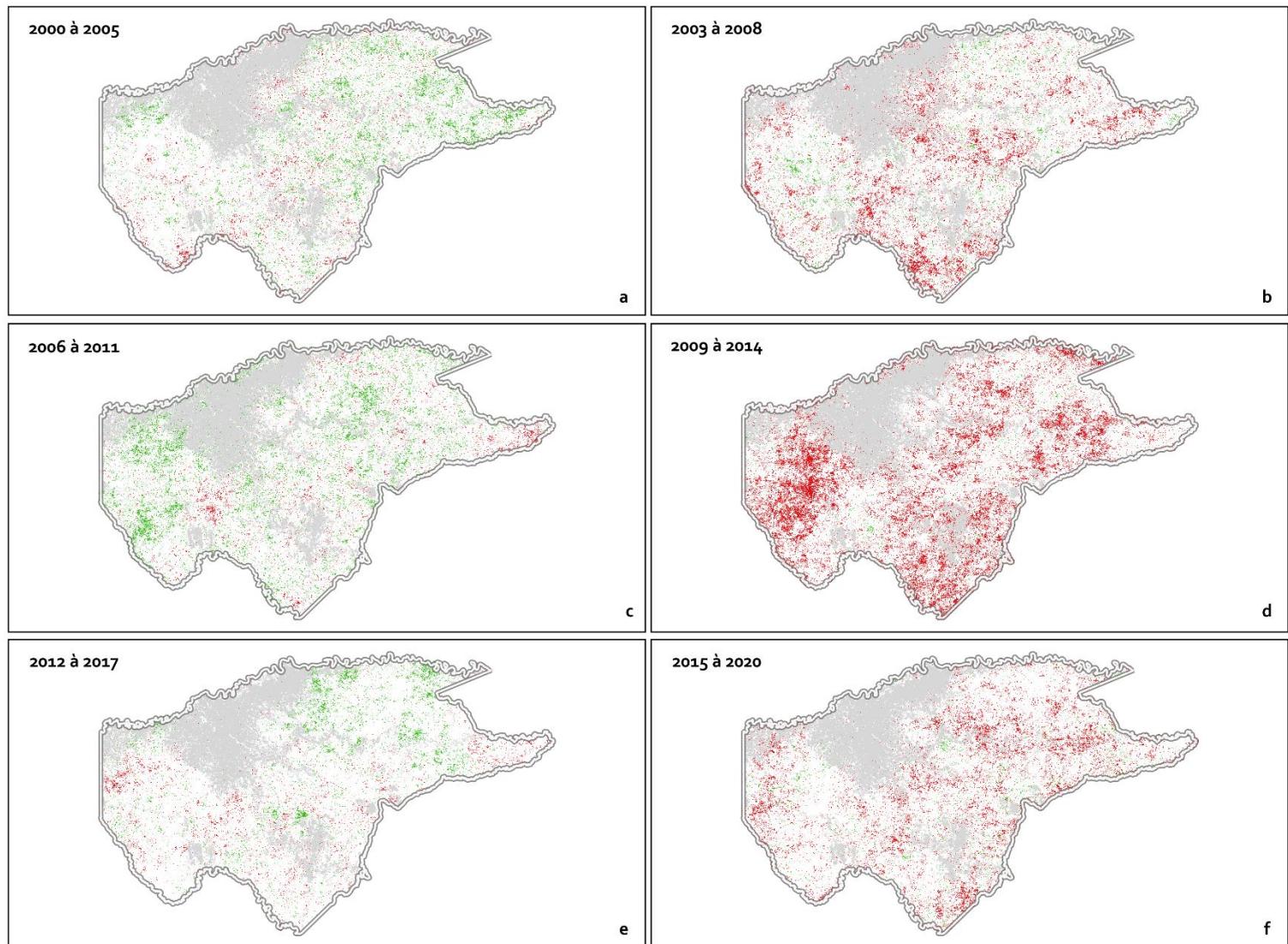




Surface des tendances de l'EVI et de la dégradation



9.3. Résultats de Guaviare



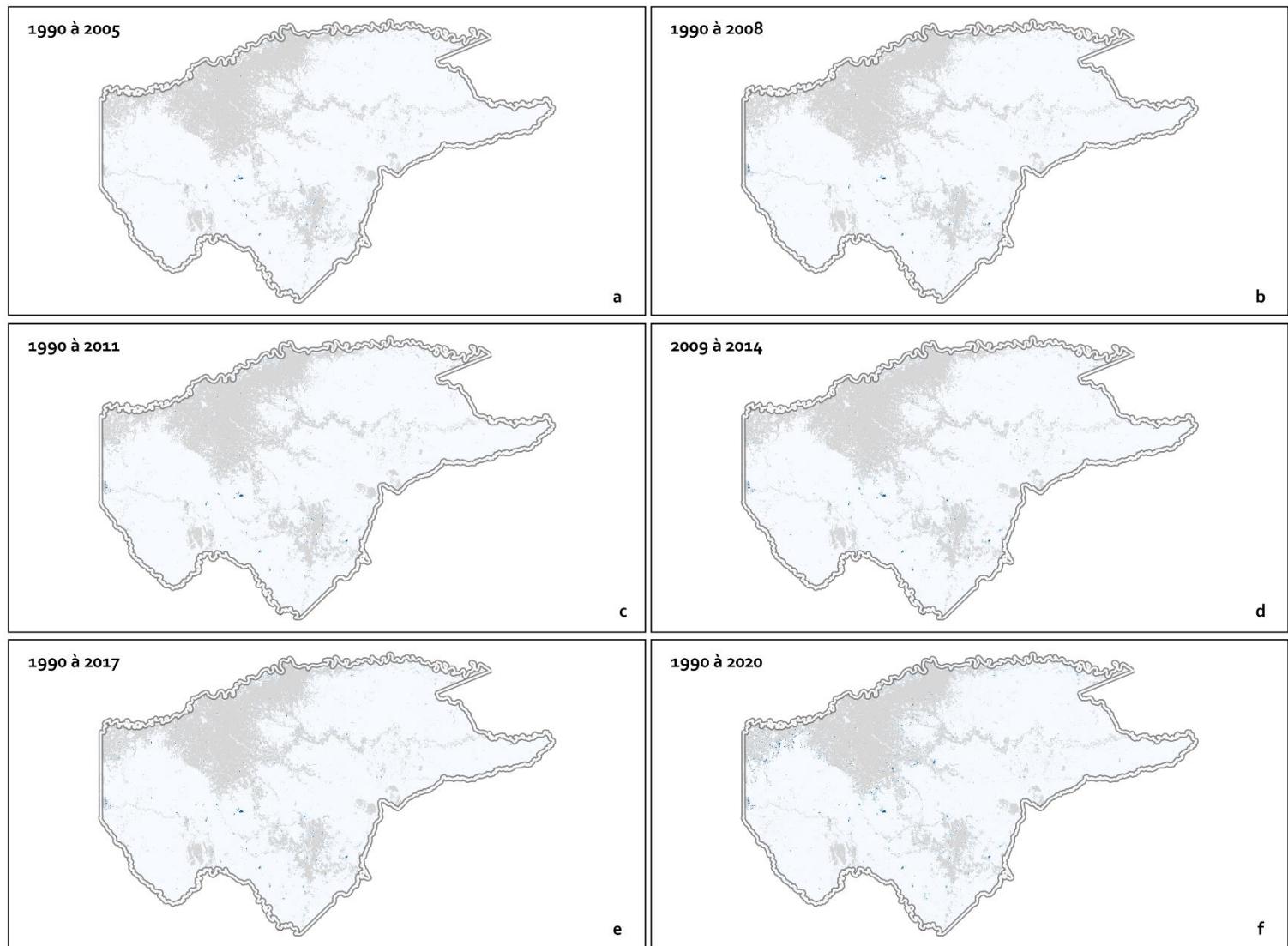
0 90 180 Km

Tendance de l'EVI classée

- Positive ($p\text{-value} < 0.001$)
- Négative ($p\text{-value} < 0.001$)
- Non significatif ($p\text{-value} > 0.001$)
- Guaviare
- No data

Sources : TerrAmaz, 2023; NASA, 2024

Réalisation : Lucas Lima, 2024



0 90 180 Km

% de dégradation accumulé

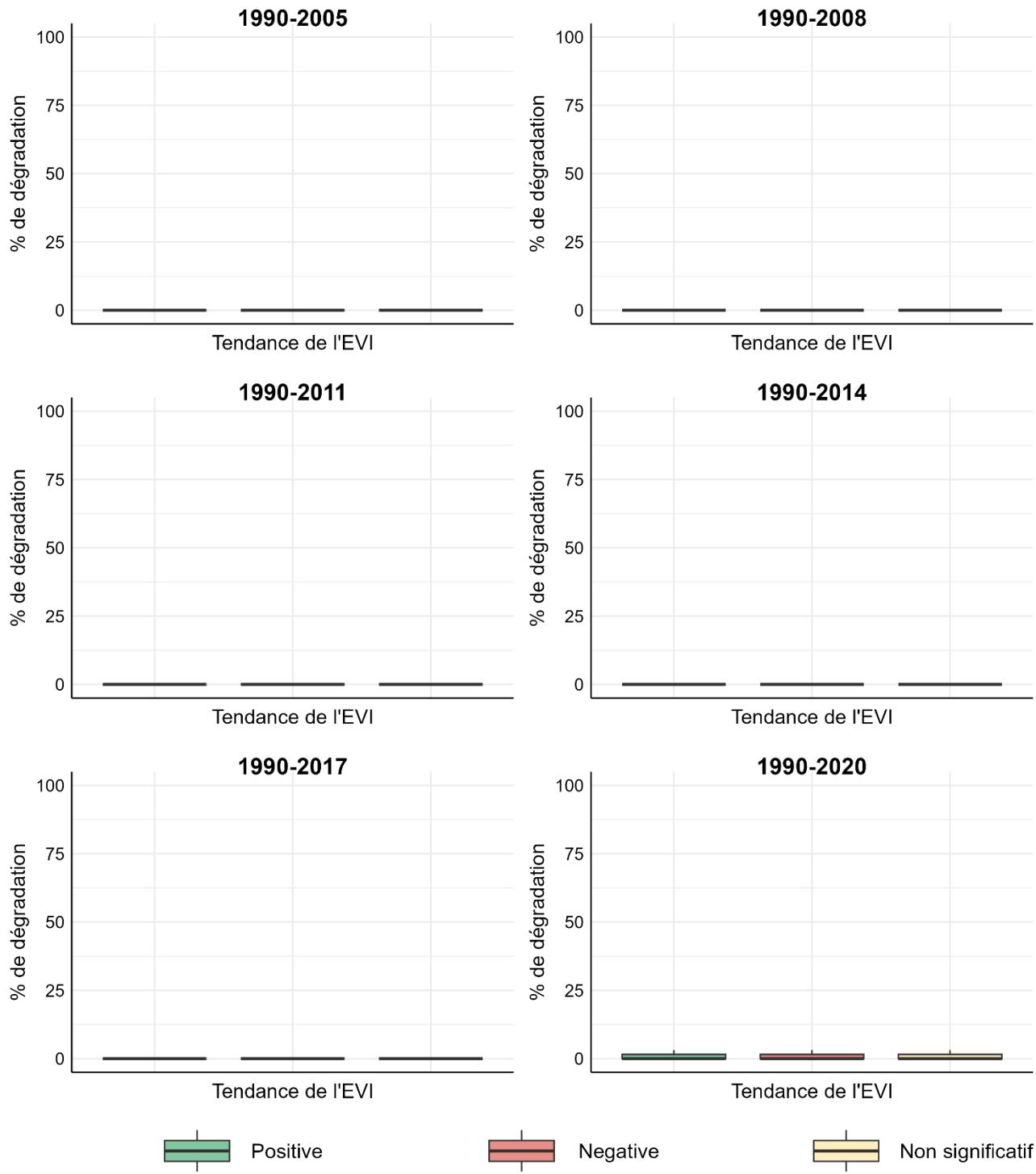


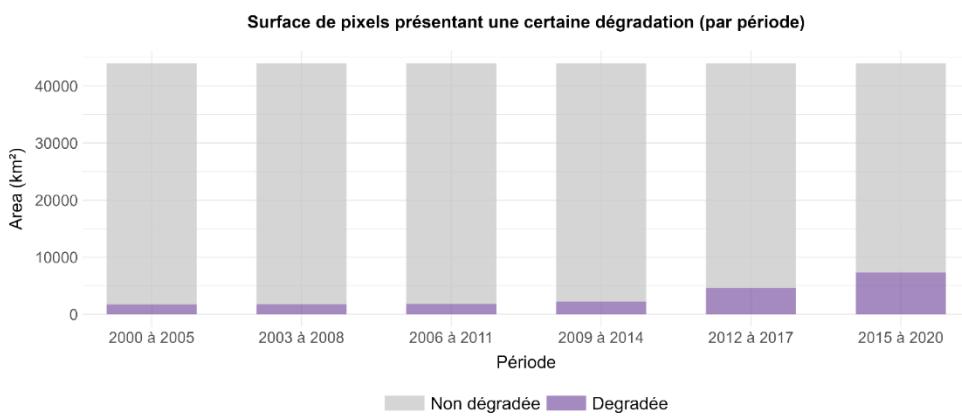
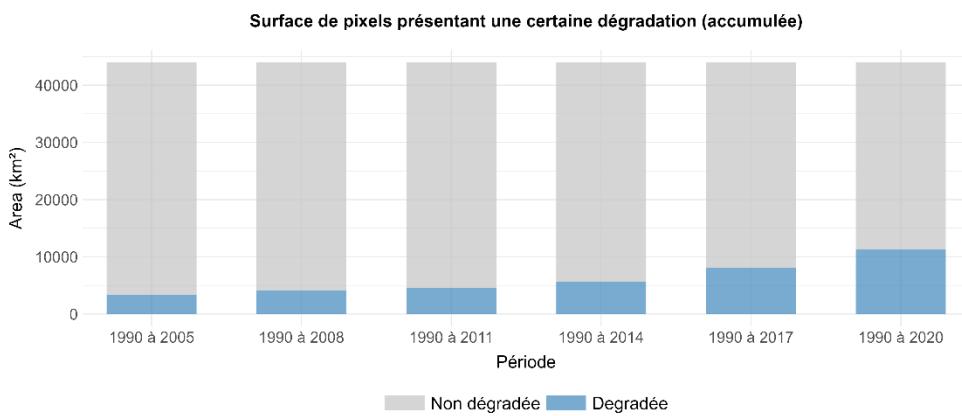
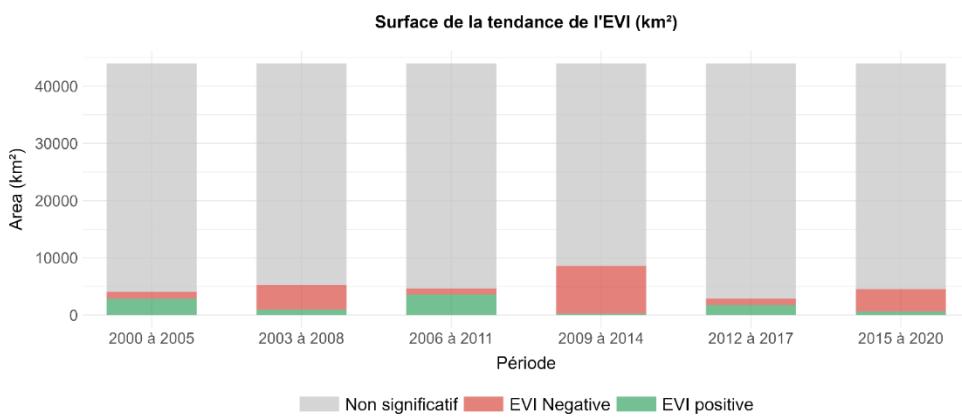
Guaviare
No data

Sources : IBGE, 2023; EC-JRC, 2024

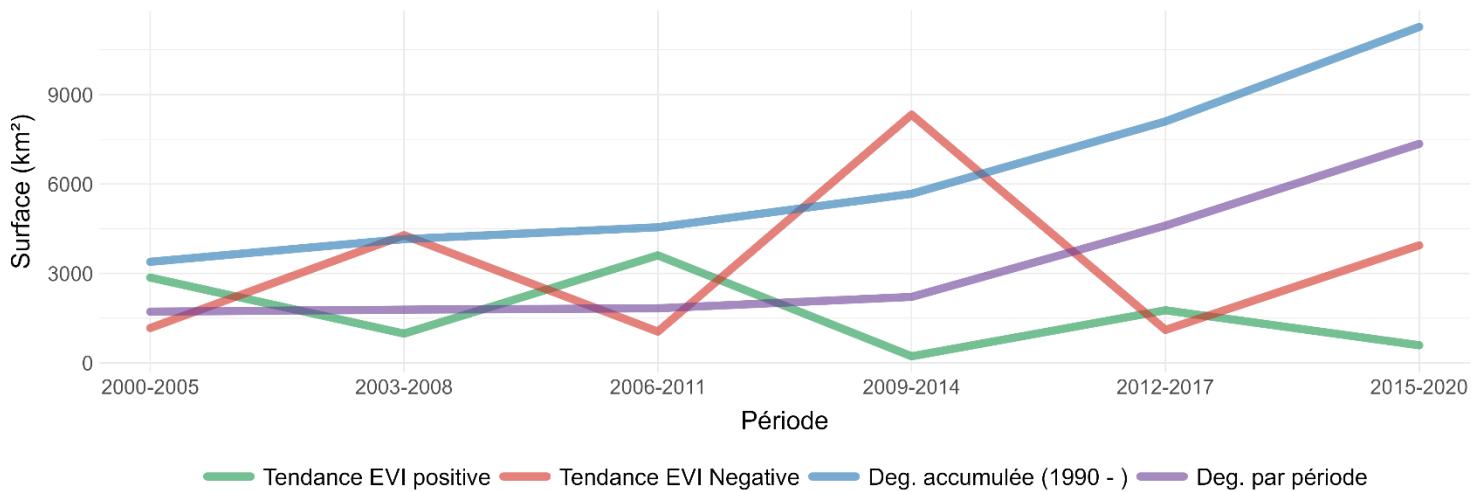
Réalisation : Lucas Lima, 2024

Pourcentage de dégradation selon la tendance de l'EVI

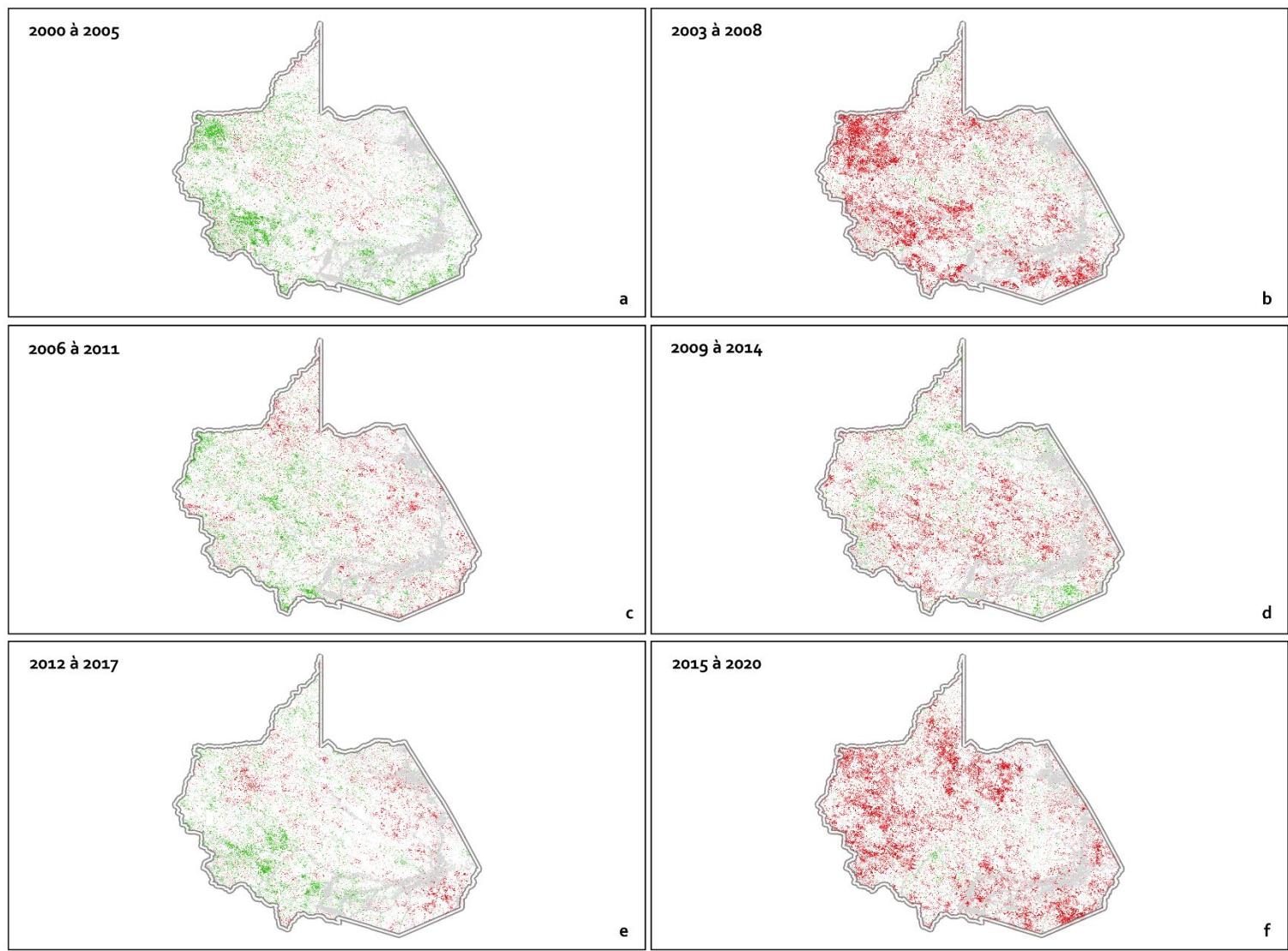




Surface des tendances de l'EVI et de la dégradation



9.4. Résultats de Madre de Dios



0 100 200 Km

Tendance de l'EVI classée

- Positive ($p\text{-value} < 0.001$)
- Négative ($p\text{-value} < 0.001$)
- Non significatif ($p\text{-value} > 0.001$)
- Madre de Dios
- No data

Sources : TerrAmaz, 2023; NASA, 2024

Réalisation : Lucas Lima, 2024

1990 à 2005



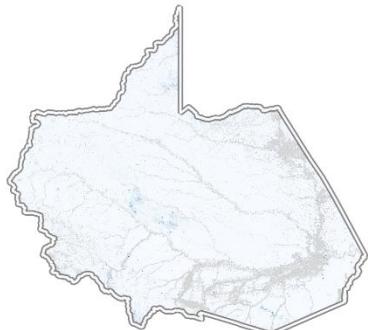
a

1990 à 2008



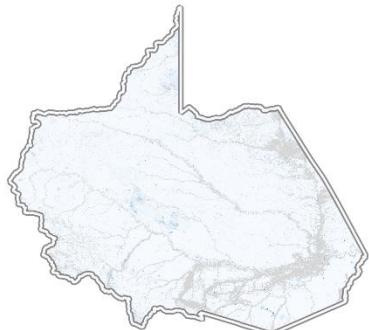
b

1990 à 2011



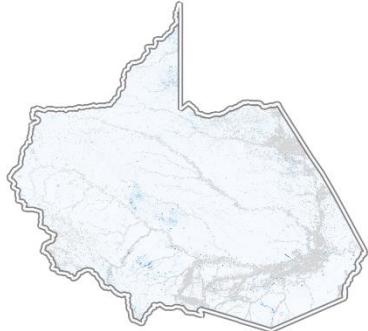
c

2009 à 2014



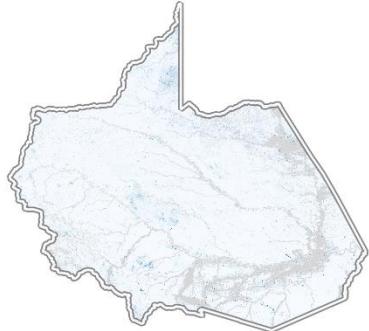
d

1990 à 2017



e

1990 à 2020

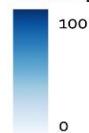


f



0 100 200 Km

% de dégradation accumulé

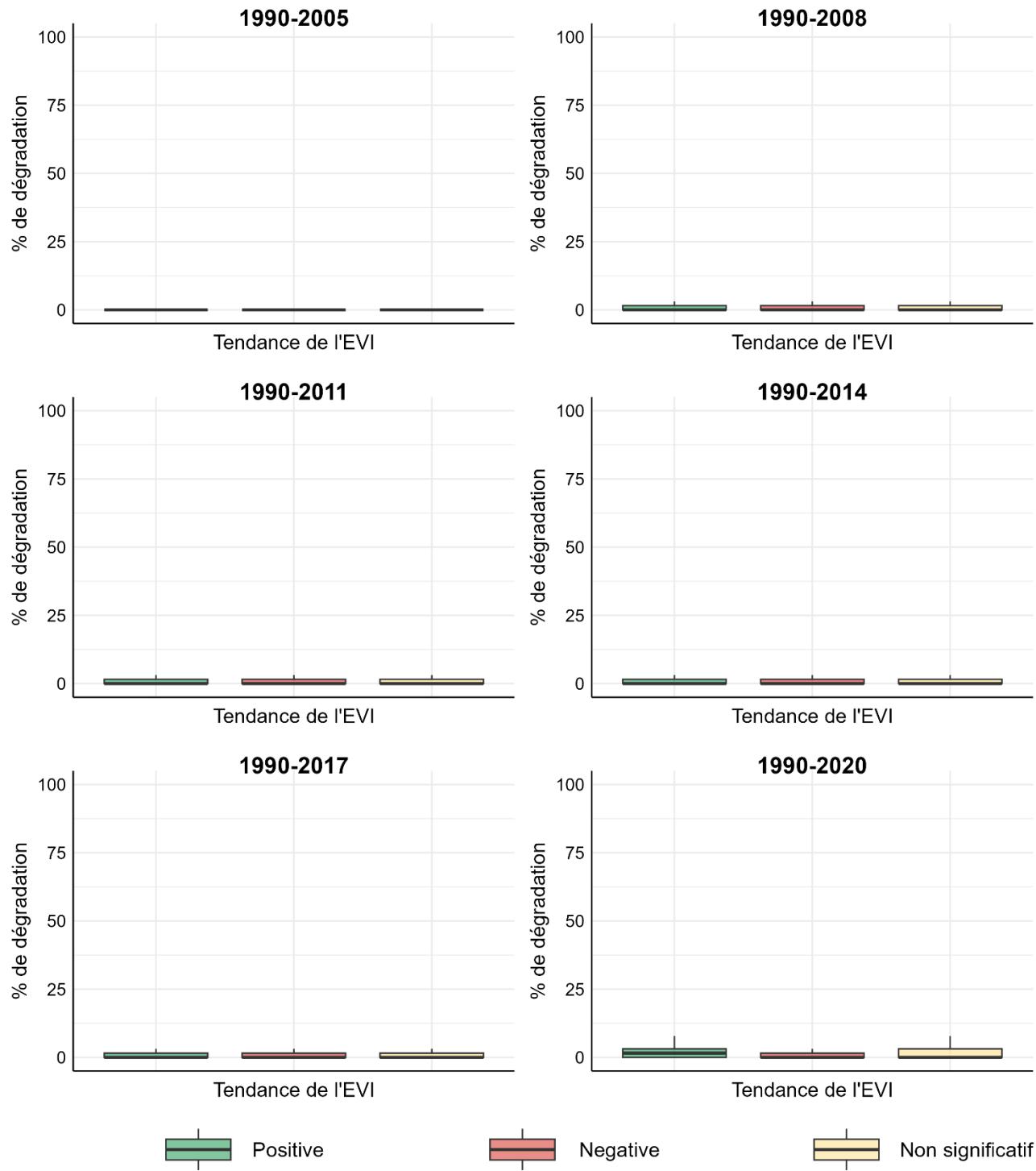


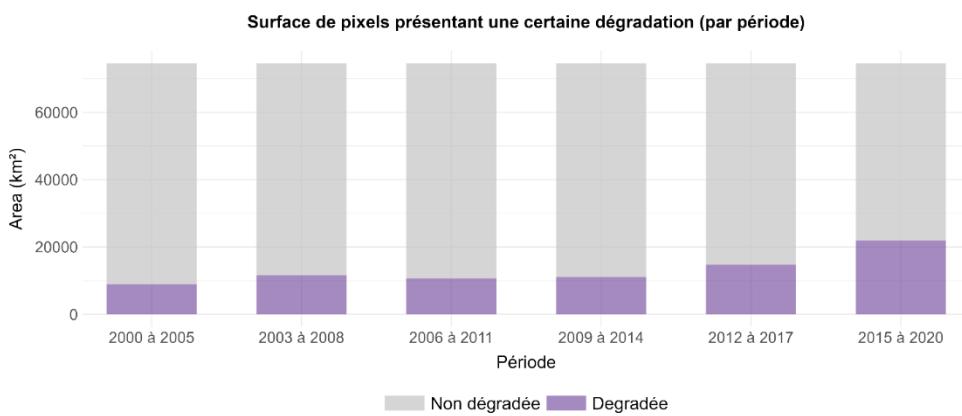
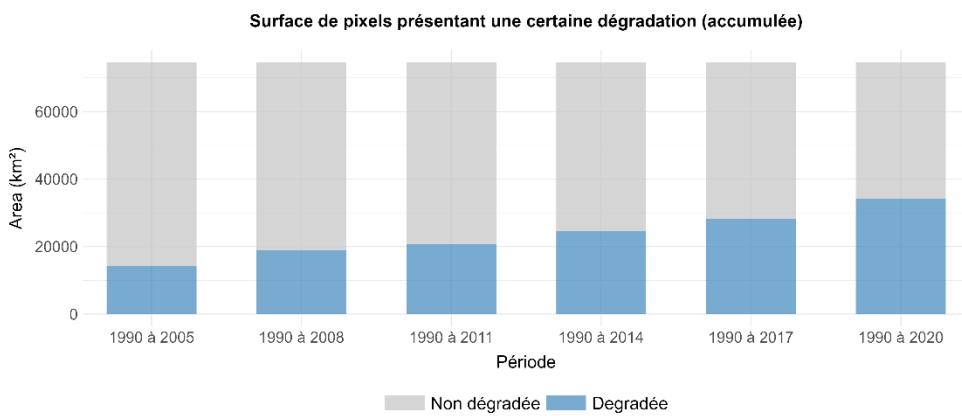
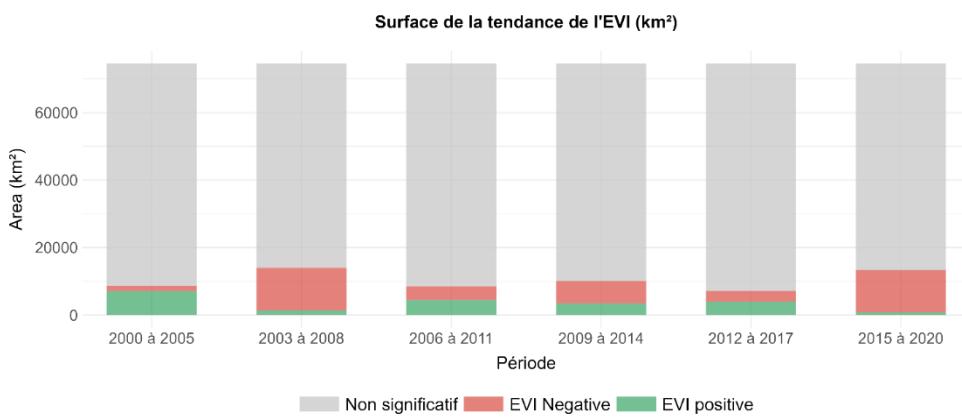
Madre de Dios
No data

Sources : IBGE, 2023; EC-JRC, 2024

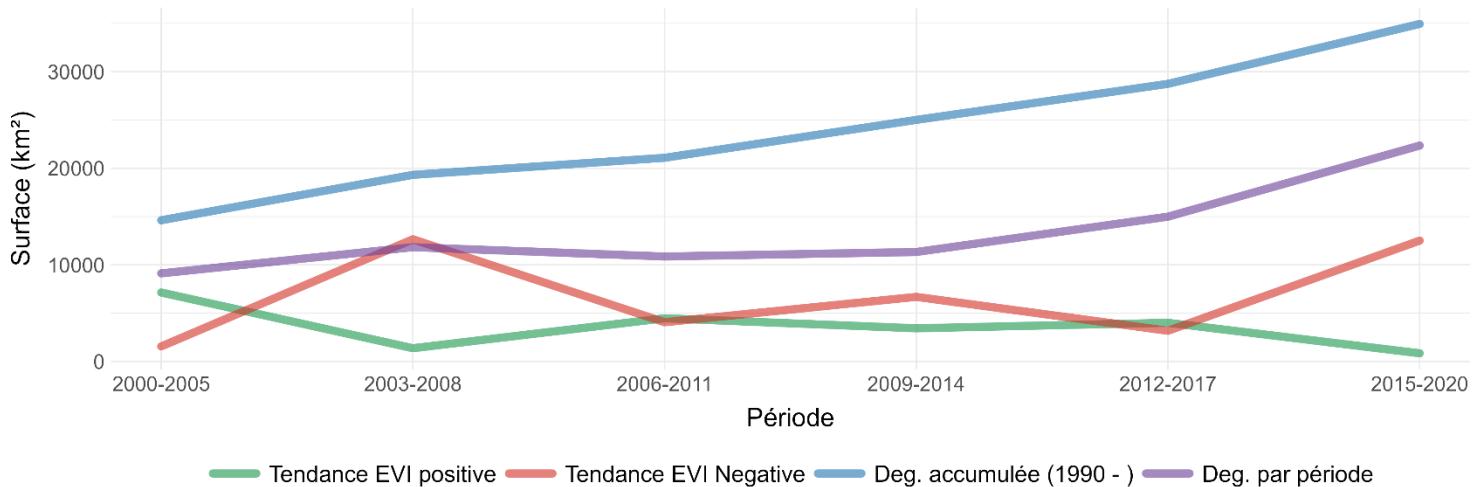
Réalisation : Lucas Lima, 2024

Pourcentage de dégradation selon la tendance de l'EVI





Surface des tendances de l'EVI et de la dégradation



9.5. Histogrammes de la dégradation accumulée

Histogrammes du pourcentage de dégradation

