

# Impact de « l'abattis-brulis » sur la dynamique végétale dans l'Etat de Pará, en Amazonie brésilienne de 2013 à 2023

SERY Ange<sup>1</sup>, UOZUMI Misaki<sup>1</sup>, KONE Djakaridja<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Etudiant en Master 2 OTG (Observation de la Terre et Géomatique) à l'Université de Strasbourg - Faculté de géographie et aménagement

## 1. Contexte

La forêt amazonienne, couvrant environ 5,5 millions de Km<sup>2</sup>, est la plus vaste au monde, dont près de 60 % se situe au Brésil [1]. Ce « poumon vert » mondial joue un rôle crucial pour la biodiversité, le stockage du carbone et le climat. Toutefois, la déforestation demeure un problème majeur depuis des décennies, principalement en raison de plusieurs activités anthropiques [2] dont « l'abattis-brulis ». Cette pratique consiste à défricher des parcelles de forêts et à les brûler pour en restaurer temporairement leur fertilité [3]. Notre objectif était donc d'évaluer l'impact de « l'abattis-brulis » sur la dynamique végétale en amazonienne de 2013 à 2023, et plus précisément dans l'Etat de Pará.

## 2. Site d'étude et Données



Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude.

Les données utilisées sont :

- **2 produits** du capteurs MODIS (**MOD13Q1** et **MOD15A2H** - qui fournissent des données sur les indices globaux de végétation, respectivement l'**EVI** et le **LAI** avec une résolution spatiale de 250 m et 500 m ) de septembre à décembre ;
- **2 images multispectraux** du satellite Landsat 8, téléchargées pour les mois de novembre 2013 et novembre 2023.

Pour cette étude, nous avons considéré **2 sites d'étude**, situés dans l'**Etat de Pará** (le premier en **jaune** et le deuxième en **rouge**) (Figure 1). Cet Etat a été choisi pour son statut d'épicentre de la déforestation en Amazonie légale [4]. Le climat est de type **tropical humide**, avec une saison pluvieuse d'octobre à avril et une saison sèche de mai à septembre. **Les précipitations totales** annuelles entre 2013 et 2023 sont de **2 349 mm** et la **température annuelle** moyenne est de **28 °C** (Figure 2)

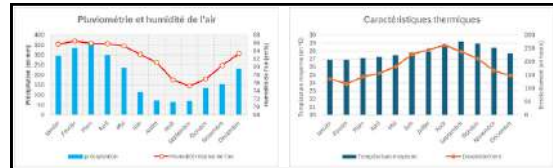
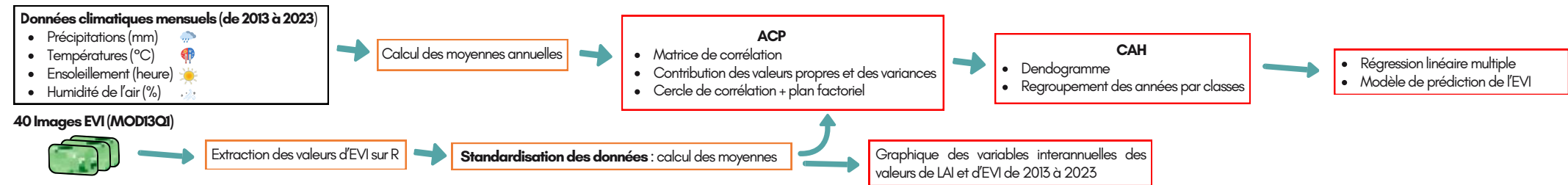


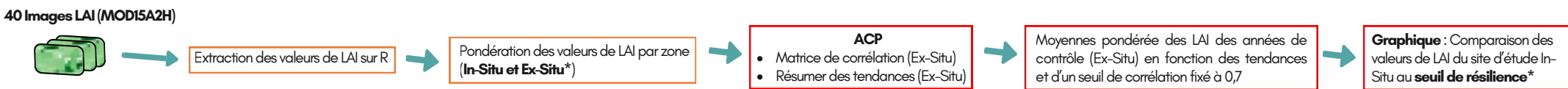
Figure 2 : Pluviométrie, ensoleillement, et caractéristiques thermiques mensuelle. (Station d'Itaituba)

## 3. Méthodologie

**Hypothèse 1 : la capacité de régénération de la végétation post abattis-brûlis est influencée par les conditions climatiques (température, précipitation, ensoleillement et humidité relative de l'air)**



**Hypothèse 2 : La pratique récurrente de l'abattis-brûlis nuit à la régénération de la végétation : la capacité de résilience des végétaux affectés est insuffisante pour rétablir un couvert « normal » sur une période de 4 mois (de septembre à décembre).**

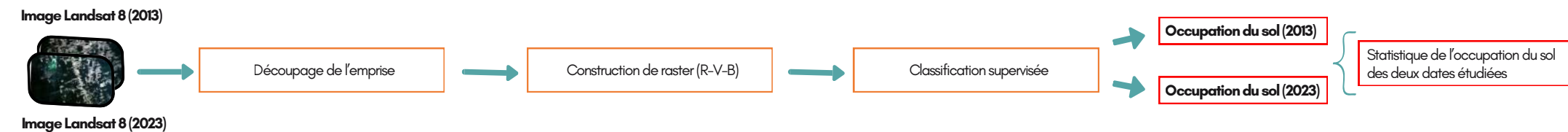


\*In-Situ : Le premier site d'étude (Figure 1)

\*Ex-Situ : Zone témoin (non affectée par l'abattis-brûlis)

\*Seul de résilience : moyenne des LAI des années témoins - écart-type des années témoins

**Hypothèse 3 : la pratique de l'abattis-brûlis a conduit à une réduction notable des surfaces de la forêt primaire amazonienne entre 2013 et 2023.**



## 4. Résultats

### Hypothèse 1

Le plan factoriel (Figure 4) fait ressortir des oppositions entre certaines années. **2013, 2014, 2015** et **2016** se caractérisent par des années plutôt ensoleillées avec un EVI élevé. Tandis que **2023** est une année plutôt froide, avec un EVI faible. **2021** est l'année la plus humide et **2014**, la plus sèche. Cependant, les années proches du centre (**2017, 2020, 2019, 2022**) sont des années avec des conditions climatiques moyennées, sans grandes variations.

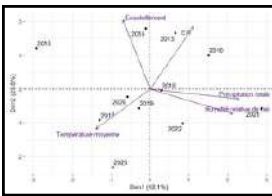
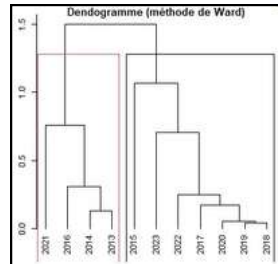


Figure 3 : ACP des variables climatiques et des années



La CAH (Figure 4) a permis de regrouper les années ayant des conditions climatiques similaires et de les relier à la régénération de la végétation grâce à l'EVI. La méthode de Ward a été choisie pour minimiser l'inertie intra-classe et maximiser l'inertie inter-classe, afin d'obtenir des classes aussi homogènes que possible. **Deux (2) classes ont donc été constituées** (Figure 5)

Figure 5 : CAH des années étudiées.

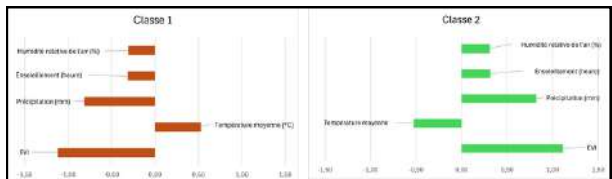


Figure 6 : Classe représentative des années

**La classe 1** inclut les années 2015, 2017, 2018, 2019, 2020, 2022 et 2023, qui sont plus chaudes que la moyenne (sur la période de septembre à décembre), avec un ensoleillement plutôt faible et un EVI également faible. **La classe 2** regroupe les années 2013, 2014, 2016 et 2021, qui sont plutôt froides que la moyenne, avec un ensoleillement élevé et un EVI très élevé.

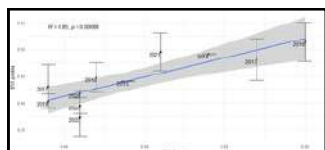


Figure 7 : Modèle de prédiction de l'EVI. Moyenne des erreurs du modèle : 0,0229

**Un modèle de prédiction de l'EVI** (Figure 7) a été mise en place pour expliquer l'influence directe des variables climatiques sur la régénération de la végétation post-abattis-brûlis. Le R<sup>2</sup> de 0,85 et le P-value de 0,00099 indique que les valeurs prédites et observées sont étroitement alignées.

### Hypothèse 2

Pour la vérification de l'hypothèse 2, une zone témoin (Ex-Situ) a été définie pour comparer dans un premier temps les valeurs de LAI à celle de la zone d'étude sur la période étudiée (2013 à 2023).

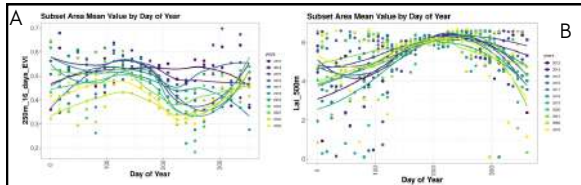


Figure 8 : Variations intra-annuelles et interannuelle des moyennes de LAI dans la zone d'étude (A) et dans une zone témoin (B).

Il en ressort que pour la zone témoin (Figure 8-B), le LAI affiche une tendance à la hausse, atteignant des maxima supérieurs à 6 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> pendant les mois de croissance (de juillet à novembre). En revanche, dans la zone d'étude (Figure 8-A), le LAI chute significativement durant cette période de croissance, avec une diminution continue d'année en année atteignant 2 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> en 2022.

L'ACP des valeurs de LAI de la zone témoin montre que toutes les années suivent une tendance phénologique similaire (de septembre à décembre) (Figure 9). **Le seuil de résilience** (seuil en deçà duquel un écosystème n'est plus capable de revenir à son équilibre initial [5]) a été calculé de la manière suivante : **moyenne des LAI des années témoins (de 2013 à 2023) - écart type des années témoins.**

Figure 9 : ACP des valeurs de LAI de la zone témoin (de septembre à décembre entre 2013 et 2023).

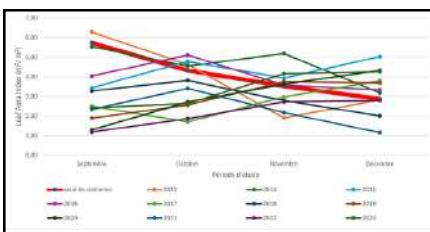


Figure 10 : comparaison des valeurs de LAI de la zone d'étude (In-Situ) au seuil de résilience.

Ce qui pourrait correspondre à la durée nécessaire pour retrouver un couvert végétatif normal.

La Figure 10 montre que les valeurs de LAI de la zone d'étude varient considérablement d'une année à l'autre. On remarque aussi que dans la plupart des années observées (zone d'étude), le LAI ne parvient pas à atteindre le seuil de résilience entre septembre et novembre, mais le dépasse durant la période mi-novembre-décembre.

### Hypothèse 3

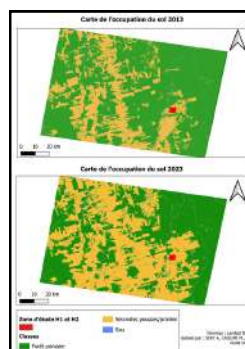


Figure 11 : Classification des images Landsat-8 des occupations du sol de 2013 et 2023.

Les classes d'occupation du sol choisies, sont inspirées de l'étude de [6], qui a défini plusieurs classes pour décrire la variation spatio-temporelle de l'occupation du sol entre les années 1975 et 1999 dans le centre du Rondônia au Brésil. **La classification de 2013**, a été validée avec un **F-Score** de **98,85 %**, pour un **rappel moyen** de **98,54** et une **précision moyenne** de **98,35 %**. Celle de 2023, présente un **F-Score** de **99,55 %**, pour un **rappel moyen** de **99,46 %** et une **précision moyenne** de **99,62 %**.

Statistiquement (Figure 12), nous remarquons qu'en 2013, les classes **forêt primaire** et **secondes pousses/prairies** occupaient des surfaces pratiquement similaires : **634 568 hectares** pour la forêt primaire contre **585 962 hectares** pour les secondes pousses/prairies, soit une différence de 48 606 hectares.

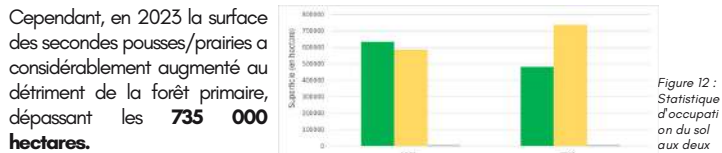


Figure 12 : Statistique d'occupation du sol aux deux dates étudiées.

Cependant, en 2023 la surface des secondes pousses/prairies a considérablement augmenté au détriment de la forêt primaire, dépassant les **735 000 hectares**.

## 5. Conclusion

- **Pour la première hypothèse**, les résultats ont mis en évidence l'importance des précipitations, de l'humidité et de l'ensoleillement dans la capacité de récupération de la végétation après l'abattis-brûlis. En effet, les conditions humides, dans un contexte de climat tropical humide favorisent la germination et la croissance des espèces pionnières, essentielles pour restaurer le couvert végétal. En revanche, pendant les années plus sèches et chaudes la régénération est plus lente du faite d'un stress hydrique accentué chez les jeunes plantes.
- **Pour la seconde hypothèse**, les résultats ont montré que les zones régulièrement brûlées, n'arrivent pas à retrouver une densité de couverture végétale suffisante dans les mois suivants les mises à feu. Cependant, pour certaines années un retour progressif à un couvert végétal normal est observé entre mi-novembre et décembre, indiquant que le temps, en plus des conditions climatiques favorable est un facteur clé pour une récupération durables.
- **Pour la troisième hypothèse**, les classifications supervisées des images Landsat-8 sur la période étudiée confirment une diminution des surfaces de forêt primaire au profit des zones de prairies et de secondes pousses. La transformation progressive du couvert forestier montre donc l'impact à long terme de l'abattis-brûlis sur la structure de l'écosystème forestier.

[1] : Banque Mondiale, 2019, « Pourquoi la biodiversité de l'Amazonie est-elle si essentielle pour la planète ? Un entretien avec Thomas Lovejoy » : <https://www.banquemondiale.org/fr/news/feature/2019>

[2] : Feamside P. M., 2005, Deforestation in Brazilian Amazonia : History, Rates, and Consequences, Conservation Biology, 19(3), p. 680-688. DOI : 10.1111/j.1523-1739.2005.00697.x

[3] : Collet S., 2019, Dynamique derrière les incendies et la déforestation dans la région du Rondônia en Amazonie brésilienne. ([Mémoire de certificat]). Genève : Université de Genève. Repéré à <https://scholar.google.fr/>

[4] : Silva S. M., Santos P. M., Molina K. T., Lopes A. M. C., Braga F. G., Ohana A., Miranda F. R. et Bertassoni A., 2020, Wildfire against the survival of Xenarthra: anteaters, armadillos, and sloths, Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais, 15(3), p. 523-532. DOI : 10.46357/bonaturais.v15i3.214 / [ 5 ] : Payet A., Vonau C. et Wagner J., 2021, Analyse et quantification des dégâts causés par un insecte ravageur via les données libres MODIS: le cas du Bombyx disparate dans l'Etat Américain du Rhode Island. Université de Strasbourg. / [ 6 ] : Roberts D. A., Numata I., Holmes K., Batista G., Krug T., Monteiro A., Powell B. et Chadwick O. A., 2002, Large area mapping of land-cover change in Rondônia using multitemporal spectral mixture analysis and decision tree classifiers, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 107(D20). DOI : 10.1029/2001JD000574

# RAPPORT BASES PHYSIQUES

Master 1 Géomatique : Observation de la Terre et Géomatique

## Impact de « l'abattis-brulis » sur la dynamique végétale dans l'Etat de Pará, en Amazonie brésilienne, de 2013 à 2023

SERY Ange, KONE Djakaridja et UOZUMI Misaki



Source : United Nations Development Programme (PNUD)

Année Universitaire : 2024 - 2025

Professeur : M. Romain WENGER

## Table des matières

Table des matières.....	1
Introduction .....	2
I.    Localisation du site d'étude.....	3
II.   Données.....	3
2.1.   Produits MODIS.....	3
2.2.   Image Landsat – 8 .....	4
2.3.   Données climatiques .....	4
III.  Méthodologie.....	5
IV.  Analyse des hypothèses d'étude.....	5
V.   Discussion.....	13
Conclusion .....	14
Bibliographie .....	15
Annexe.....	16



## Introduction

La forêt amazonienne, couvrant environ 5,5 millions de km<sup>2</sup>, est la plus vaste forêt tropicale au monde, dont près de 60 % se situe au Brésil (Banque Mondiale, 2019). Ce poumon vert de la planète joue un rôle crucial dans le maintien de la biodiversité, le stockage de carbone et la régulation du climat mondial. Cependant, la déforestation demeure un problème majeur depuis plusieurs décennies, principalement en raison des activités humaines telles que l'exploitation forestière, minière, l'agriculture commerciale et l'élevage (Fearnside, 2005). Parmi ces activités, la pratique traditionnelle de l'« abattis-brûlis », utilisée par les petits agriculteurs pour cultiver de nouvelles terres, est l'une des principales causes de la perte de couvert forestier en Amazonie (Collet, 2019). Cette technique consiste à défricher une parcelle de forêt et à la brûler pour en restaurer temporairement la fertilité. Une fois le sol épuisé, la terre est laissée en jachère, puis défrichée et brûlée de nouveau (Collet, 2019). Elle se manifeste souvent sous la forme « d'arêtes de poisson », un modèle de colonisation initié par le gouvernement Medici pour distribuer « des terres sans habitants aux hommes sans terres » (Collet, 2019). Ce modèle s'articule autour d'une route centrale, facilitant l'accès et l'installation des colons dans la forêt tropicale (Annexe 1).

Les grandes exploitations, connues sous le nom de « fazendas » au Brésil, adoptent également le brûlis, mais à une échelle bien plus vaste, pour dégager des parcelles de pâturages destinées à l'élevage intensif. Ces pratiques, bien qu'économiquement motivées, exacerbent la déforestation et contribuent à la dégradation des écosystèmes locaux, augmentant la fréquence des feux qui ravagent de grandes surfaces forestières amazonienne (Silva et al., 2018).

La télédétection, avec des indicateurs comme l'EVI (Enhanced Vegetation Index) et LAI (Indice de Surface Foliaire), permet de suivre les changements dans la dynamique de la végétation et d'analyser l'impact des pratiques de brûlis sur les écosystèmes forestiers. Notre étude, se concentre donc sur l'impact de « l'abattis-brûlis » sur la dynamique végétale dans l'Etat de Pará, en Amazonie brésilienne, de 2013 à 2023.

L'Etat de Pará, nous a paru comme pertinent à étudier en raison de son statut d'épicentre de la déforestation en Amazonie légale (Silva et al., 2020), avec un taux de déforestation annuel de 41,69% entre 2008 et 2018, le plaçant en tête de position devant l'Etat de Mato Grosso (20,09%) et de Rondônia (13,20%), selon Institut National de Recherche Spatiale Brésilien.

Pour mener à bien cette étude, nous avons téléchargé, prétraité et analysé diverses données. Cela inclut des données climatiques provenant de la station d'Itaituba située à 300 kilomètres environ de la zone d'étude, ainsi que des données satellitaires issues des produits Landsat-8 et MODIS, qui offrent une couverture spatiale et temporelle adéquate, permettant d'explorer différents indices de végétation.

L'ensemble de nos analyses, visera à répondre à cette problématique :

***Dans quelle mesure la déforestation, associée à l'incendie des terres défrichées, dans un contexte de conversion du couvert forestier en zones exploitable, impacte-t-elle la dynamique végétale en Amazonie ?***

Dans le but d'apporter une réponse à cette problématique, trois hypothèses seront étudiées :

**Hypothèse 1 :** la capacité de régénération de la végétation post abattis-brûlis est influencée par les conditions climatiques (température, précipitation, ensoleillement et humidité relative de l'air).

**Hypothèse 2 :** La pratique récurrente de l'abattis-brûlis nuit à la régénération de la végétation : la capacité de résilience des végétaux affectés est insuffisante pour rétablir un couvert « normal » sur une période de 4 mois (de septembre à décembre).

**Hypothèse 3 :** la pratique de l'abattis-brûlis a conduit à une réduction notable des surfaces de la forêt primaire amazonienne entre 2013 et 2023.

## I. Localisation du site d'étude

Pour cette étude, nous avons choisi deux sites. Le premier site, de 450 hectares, est situé dans la microrégion d'Altamira, au sud-ouest de l'État de Pará, pour analyser les hypothèses 1 et 2. Le deuxième site, également dans l'État de Pará, couvre les microrégions d'Altamira et d'Itaituba, et est destiné à vérifier l'hypothèse 3 (figure 1). Ces zones d'étude ont été choisies en raison de la récurrence de feux observé sur plusieurs années entre les mois de juillet et d'août sur le site « *Active Fire Data* » de la NASA.

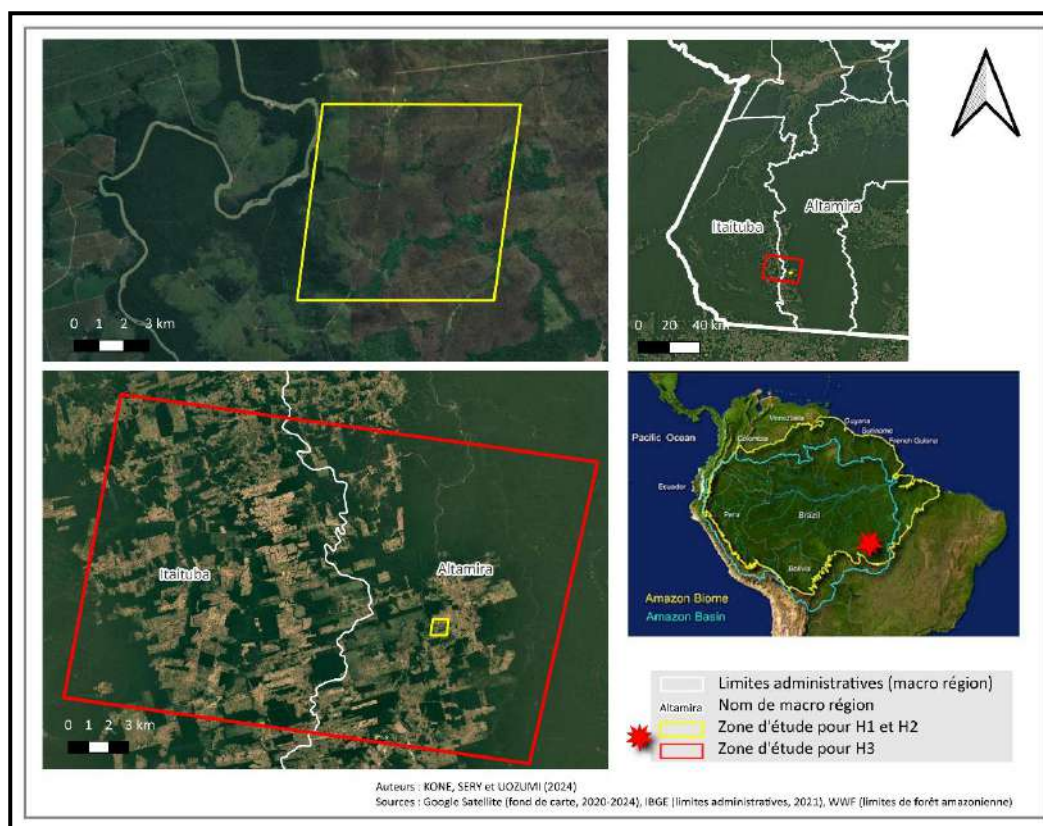


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude.

## II. Données

### 2.1. Produits MODIS

Le capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), installé sur les satellites TERRA et AQUA lancés respectivement en 1999 et 2002, offre des produits à moyenne résolution spatiale et haute résolution

temporelle pour détecter et modéliser des changements à l'échelle mondiale (NASA – MODIS, 2019). Pour cette étude, nous avons utilisé deux produits de ce capteur :

- **Le produit MOD13Q1** : Il fournit des données sur des indices globaux de végétation comme le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et l'EVI (Enhanced Vegetation Index) tous les 16 jours, avec une résolution spatiale de 250 m sous forme de produit maillé de niveau 3 en projection sinusoïdale (NASA - MODQ13, 2019). Le choix d'utiliser l'EVI plutôt que le NDVI est motivé par la qualité des données et des résultats.
- **Le produit MOD15A2H** : Il fournit des données sur l'indice de végétation LAI (Leaf Area Index), acquis tous les 8 jours avec une résolution spatiale de 500 m. Cet indice est défini comme la moitié de la surface des éléments verts par unité de surface horizontale (Chen et Black, 1992). Selon le guide utilisateur du produit, un facteur de 0,1 doit être appliqué aux valeurs de LAI extraites de l'image, et toutes les valeurs comprises entre 0 et 100 sont considérées comme valides.

## 2.2. Image Landsat – 8

Landsat-8, lancé le 11 février 2013, est équipé de deux capteurs : l'OLI (Operational Land Imager) et le TIRS (Thermal Infrared Sensor). Ces capteurs assurent une couverture saisonnière de toutes les terres émergées, avec une résolution spatiale de 30 mètres pour les bandes visibles, NIR et SWIR, 100 mètres pour les mesures thermiques et 15 mètres pour les images panchromatiques (NASA - Landsat Science, 2019). Dans cette étude, deux images multispectrales sont utilisées (vraie couleur : R-V-B et fausse couleur : PIR-R-V), pertinentes pour la classification de l'occupation du sol entre 2013 et 2023. Les images ont été téléchargées pour la plupart en novembre en raison d'une faible couverture nuageuse, élément très important à prendre en compte pour une bonne classification.

## 2.3. Données climatiques

Les données climatiques en libre accès partagés par l'Institut national de météorologie (INMET) sont utilisées pour caractériser le climat de nos sites d'étude. Ces données proviennent de la station d'Itaituba. Le climat est de type tropical humide, avec des pluies s'étendant sur 7 mois, d'octobre à avril, et une saison sèche de 4 à 5 mois. Les précipitations totales annuelles entre 2013 et 2023 sont de 2349 mm, la température annuelle moyenne est de 28 °C, avec un ensoleillement mensuel moyen de 186 h et une humidité relative variant entre 79,18 % et 85,73 %.

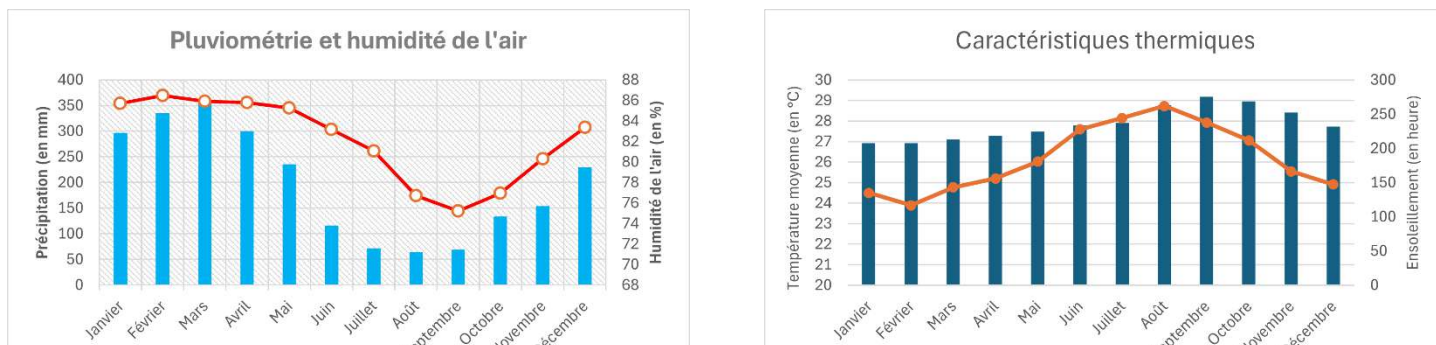


Figure 2 : Représentation graphique de la pluviométrie et de l'ensoleillement mensuel (à gauche) et caractéristiques thermiques mensuelles (à droite) à la station d'Itaituba (dans l'Etat de Pará au Brésil).

### III. Méthodologie

Pour vérifier les hypothèses, une méthodologie planifiée a été appliquée (figure 3).

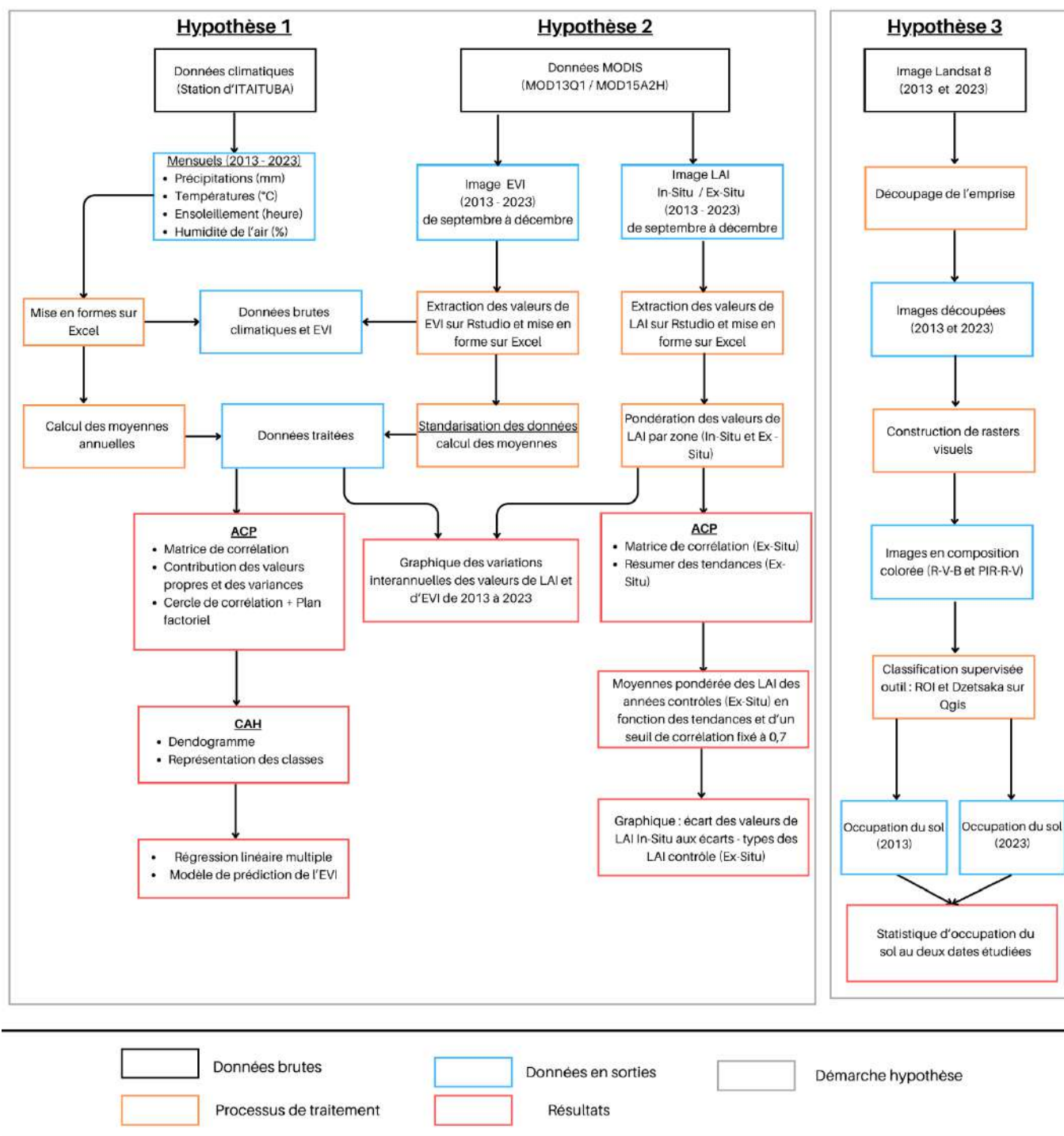


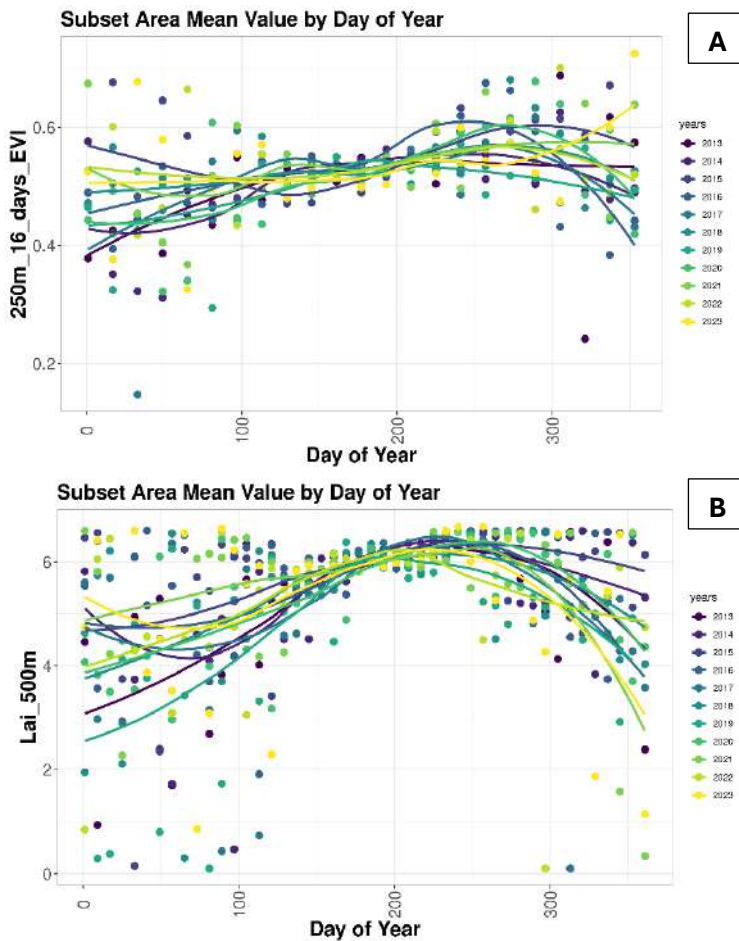
Figure 3 : Méthodologie des traitements.

### IV. Analyse des hypothèses d'étude

Avant de commencer l'analyse des hypothèses, nous avons jugé bon de présenter la tendance générale de la variation des indices de végétation (EVI et LAI) du premier site d'étude comparé à celle d'une zone témoin (non impacté par la pratique de l'abattis-brûlis). En effet, nous avons utilisé cette zone témoin pour la vérification de la deuxième hypothèse.



## Zone témoin



## Zone d'étude

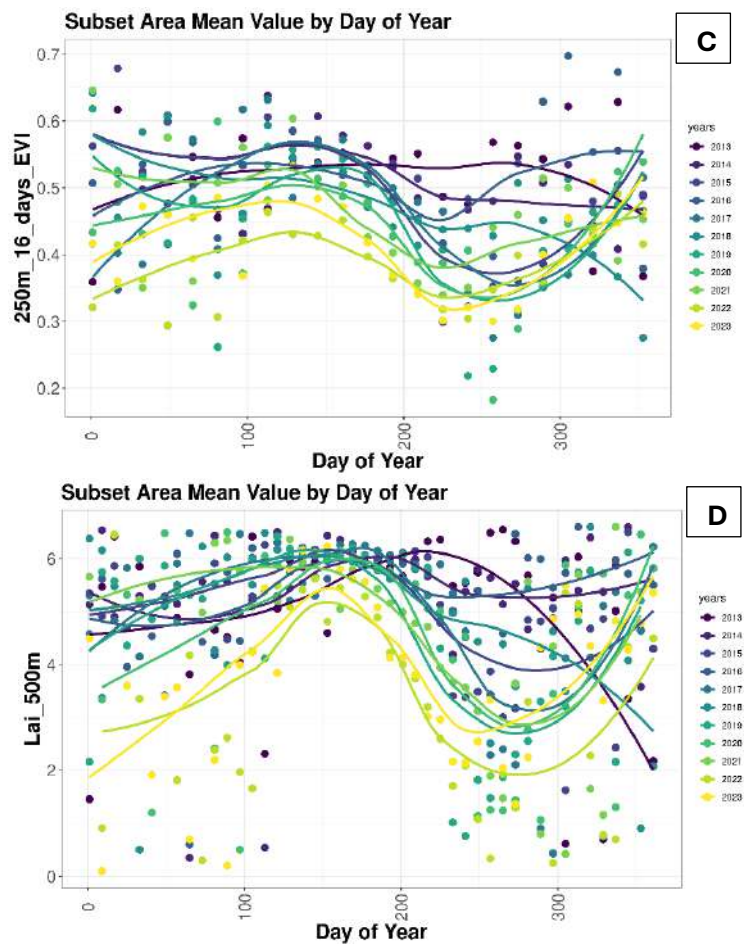


Figure 4 : Variations intra-annuelles et interannuelle des moyennes de l'EVI et de LAI dans notre zone d'étude (à droite) et dans une zone témoin (à gauche).

La zone témoin constitue une partie de la forêt amazonienne dans l'Etat de Pará qui n'a pas été affectée par la pratique de l'abattis-brûlis pendant la période d'étude choisie. Nous avons confirmé cela grâce à des images satellitaires de Google Earth et au site web « Active Fire Data » de la NASA. Elle s'étend sur 450 hectares.

Les graphiques révèlent que l'EVI de la zone témoin (graphique A) reste relativement stable, avec une moyenne entre 0,4 et 0,6, et une légère hausse entre les jours 200 et 330 (juillet à novembre), correspondant à la période de croissance maximale de la végétation (voir tableau phénologique : Annexe 3). En revanche, dans la zone d'étude (graphique C), l'EVI présente une forte variabilité. Elle est stable entre les jours 0 et 200 (janvier à juillet) avec une moyenne de 0,3 à 0,6, mais chute entre les jours 200 et 330, alors que cette période coïncide avec la croissance maximale observée dans la zone témoin. De plus, les valeurs moyennes d'EVI diminuent chaque année (de 2013 à 2023).

Comparativement, les variations intra-annuelles et interannuelles des moyennes de LAI de la zone témoin et la zone d'étude montre une très grande différence. Pour la zone témoin (graphique B), le LAI affiche une tendance à la hausse, atteignant des maxima supérieurs à 6  $\text{m}^2/\text{m}^2$  pendant les mois de croissance (de juillet à novembre). En revanche, dans la zone d'étude (graphique D), le LAI chute significativement durant cette période de croissance, avec une diminution continue d'année en année atteignant 2  $\text{m}^2/\text{m}^2$  en 2022.

Cette comparaison met en évidence l'impact des pressions anthropiques (dans notre cas, la pratique de l'abattis-Brûlis) sur la dynamique de la végétation.



**Hypothèse 1 : la capacité de régénération de la végétation post abattis-brûlis est influencée par les conditions climatiques (température, précipitation, ensoleillement et humidité relative de l'air).**

Pour évaluer l'influence des conditions climatiques sur la régénération de la végétation après des événements tels que l'abattis-brûlis, une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée. Cette ACP vise à réduire la dimensionnalité des données climatiques et à synthétiser les variables influençant la régénération de la végétation sur une période de 4 mois glissants (septembre à décembre). Ce choix de donner une importance à ces mois est fondé sur l'idée que les conditions climatiques de la saison des pluies

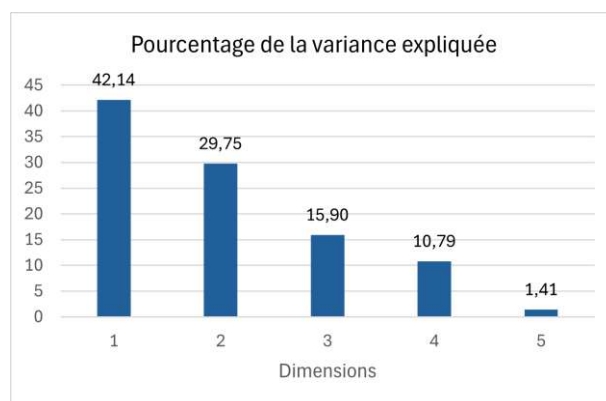


Figure 5 : Pourcentage de la variance expliquée

(d'octobre à avril) peuvent affecter la régénération, étant donné que les feux sont généralement déclenchés en juillet et août, parfois septembre (*Active Fire Datan, NASA*). La figure 5 illustre le pourcentage de variance expliqué par les différentes composantes, où les composantes 1 et 2 représentent 71,89 % de l'information. Nous nous concentrerons donc sur ces deux composantes (valeurs propres > 1), selon la règle de Kaiser-Guttman.

Le cercle de corrélation des variables (figure 6) montre que la première composante présente une forte

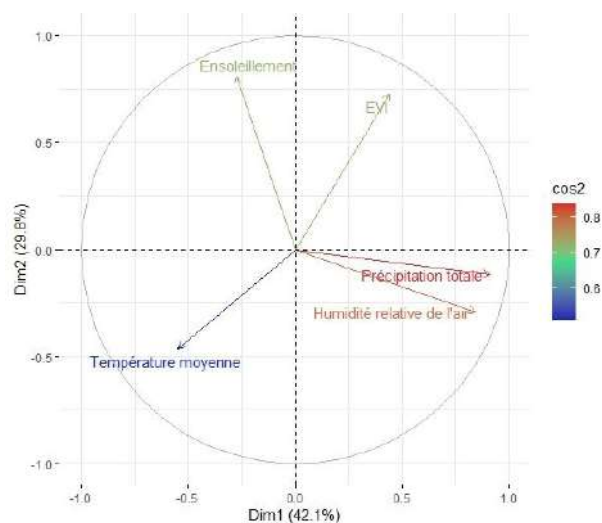
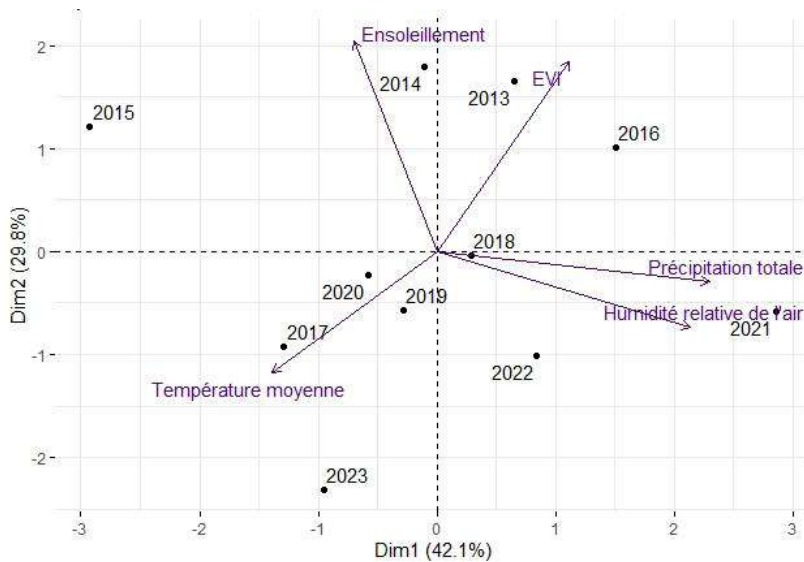


Figure 6 : Cercle de corrélation des variables. Cos2 : qualité de représentation sur les deux premiers axes.

corrélation positive entre la précipitation et l'humidité relative de l'air, ce qui paraît logique : plus il pleut, plus l'humidité est élevée, tandis qu'il existe une opposition avec la température moyenne. Ainsi, les années qui se trouveront donc dans la partie droite du plan factoriel représenteront des années moins chaudes et humides, tandis que celles à gauche représenteront des années plus chaudes et moins humides. Le deuxième axe révèle une corrélation, bien que faible, entre l'EVI et l'ensoleillement. Cet axe permettra de distinguer les années fortement ensoleillées avec un EVI élevé de celles moins ensoleillées avec un EVI faible.

Le plan factoriel (individus et variables) (figure 7) révèle une forte opposition entre certaines années sur le deuxième axe, avec un ensoleillement élevé et un EVI élevé pour 2013, 2014 et 2016, tandis que 2023 présente un faible ensoleillement et un EVI bas. Sur le premier axe, l'année 2021, la plus humide, s'oppose à 2015, une



année assez sèche. Les années proches du centre (2017, 2019, 2020, 2022) semblent moins influencées par les variables climatiques, suggérant des conditions climatiques moyennes sans grandes variations.

Figure 7 : Plan factoriel des variables (paramètre climatique) et individus (années)

Après l'ACP, une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été réalisée pour approfondir les informations obtenues. La CAH a permis de regrouper les années ayant des conditions climatiques similaires et de les relier à la régénération de la végétation grâce à l'EVI. La méthode de Ward a été choisie pour minimiser l'inertie intra-classe et maximiser l'inertie inter-classe, afin d'obtenir des classes aussi homogènes que possible. Nous avons donc constitué 2 classes (figure 8).

L'ACP et la CAH nous ont permis de regrouper les années selon des tendances climatiques similaires et la variation de l'EVI. La classe 1 inclut les années 2015, 2017, 2018, 2019, 2020, 2022 et 2023, qui sont plus chaudes que la moyenne (sur la période de septembre à décembre), avec un ensoleillement plutôt faible et un EVI également faible. La classe 2 regroupe les années 2013, 2014, 2016 et 2021, qui sont plutôt froides que la moyenne, avec un ensoleillement élevé et un EVI très élevé.

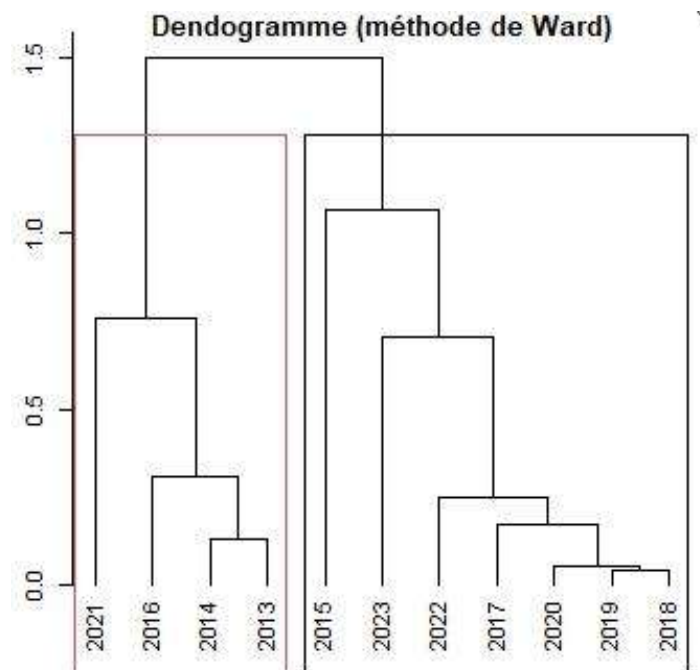


Figure 8 : Dendrogramme.

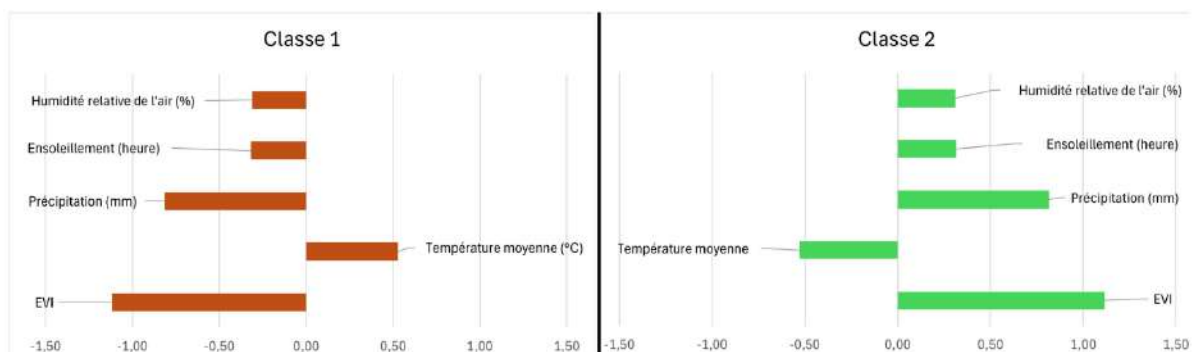


Figure 9 : Classes représentatives des années.

Enfin, après avoir regroupé les années selon des tendances similaires, nous avons réalisé une régression linéaire multiple pour estimer l'influence directe des variables climatiques sur la régénération de la végétation post abattis-brûlis. Le tableau 1 présente les coefficients et les valeurs de significativité obtenus à partir des calculs du modèle.

Tableau 1: Valeurs de significativités du modèle.

Variables explicatives	Variable dépendante	Coéfficients	R <sup>2</sup>	P-value	Equation de régression
Température	EVI	-0,04783	0,7183	0,0705	EVI = -0,04783*Température + 0,00034*Précipitation + 0,00096*Ensoleillement - 0,01153*Humidité + 2,34187
précipitation		0,00034			
Ensoleillement		0,00096			
Humidité de l'air		-0,01153			

Nous constatons un R<sup>2</sup> relativement élevé de 0,7183, indiquant que 71,83 % de la variance de l'EVI est expliquée par les variables climatiques. La P-value est de 0,0705, proche du seuil de significativité fixé à 0,05. Bien qu'elle soit légèrement supérieure, cette valeur suggère que le modèle est presque significatif. Nous avons donc cherché à établir un modèle de prédiction de l'EVI en fonction des paramètres climatiques (figure 10).

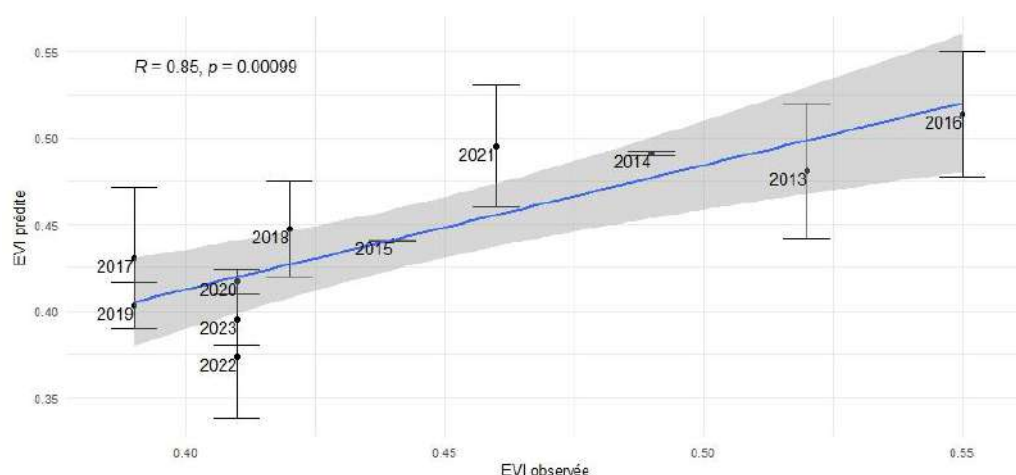


Figure 10 : Modèle de prédiction de l'EVI. Moyenne des erreurs du modèle (0,0229)

Nous observons une forte corrélation positive ( $R = 0,85$ ) avec une P-value de 0,00099, ce qui indique que les valeurs prédites et observées de l'EVI sont étroitement alignées. Cela valide la qualité du modèle de régression multiple pour expliquer les variations de l'EVI (capacité de régénération de la végétation) en fonction des paramètres climatiques. En analysant le modèle de prédiction, on remarque que la plupart des années se situent près de la ligne de régression, indiquant que le modèle capture bien la tendance générale, bien que certaines années, comme 2013, 2016 et 2021, qui correspondent à des années plutôt froides que la moyenne, avec un ensoleillement élevé et un EVI élevé, présentent des écarts plus importants.

**Hypothèse 2 : La pratique récurrente de l'abattis-brûlis nuit à la régénération de la végétation : la capacité de résilience des végétaux affectés est insuffisante pour rétablir un couvert « normal » sur une période de 4 mois (de septembre à décembre).**

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons considéré deux zones : la zone d'étude principale (In-Situ) et une zone témoin (Ex-Situ) qui n'a pas été affectée par la pratique de l'abattis-brûlis pendant notre période d'étude. Nous avons confirmé cela grâce à des images satellitaires de Google Earth et au site de la NASA : Active Fire Data. La



zone Ex-Situ est située à environ 50 km de la zone In-Situ (toujours dans l'Etat de Pará), avec des superficies similaires, mais une occupation du sol de type forêt (figure 11).

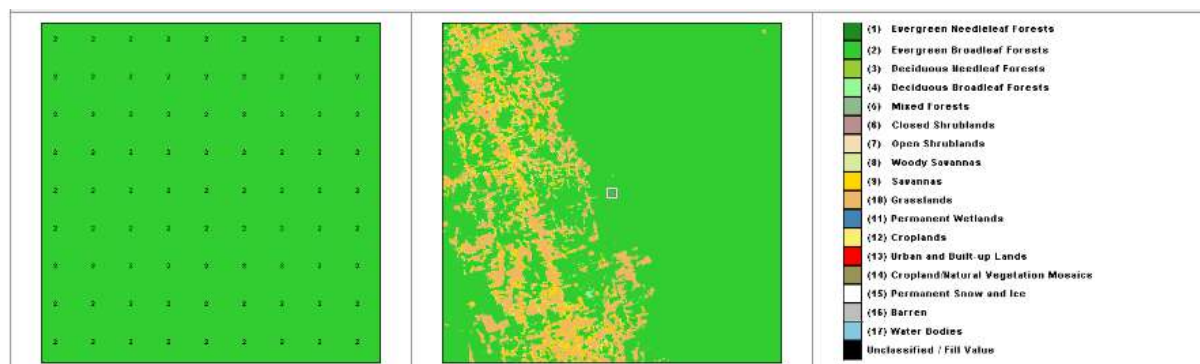


Figure 11 : Occupation du sol de la zone d'étude témoins (Ex-Situ).

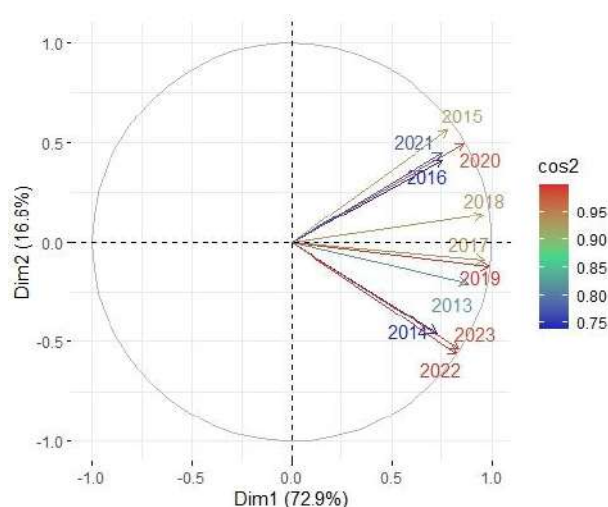


Figure 12 : Analyse en composante principale des valeurs de LAI de la zone témoin (de septembre à décembre entre 2013 et 2023).

entre les années (de septembre à décembre) (figure 12).

La première dimension explique 72,9 % de la variance, tandis que le deuxième axe en explique 16,59 %. L'analyse visuelle du graphique révèle que toutes les années se regroupent et suivent une tendance similaire. Ces années ont donc servi à pondérer les valeurs de LAI en cycle moyen, auquel nous avons soustrait l'écart-type pour comparer les cycles de la zone In-Situ à ce seuil de valeurs « normales ». Cependant, lorsque les valeurs de LAI de la zone In-Situ retournent à des valeurs inférieures à ce seuil, il est possible de parler de résilience insuffisante du couvert végétal. La résilience peut être définie comme un seuil en deçà duquel un écosystème n'est plus capable de revenir à son équilibre initial mais tend vers un nouvel équilibre (Payet et al., 2020)

Le graphique ci-dessous compare les valeurs de LAI de la zone In-Situ au seuil de résilience, représenté par la ligne rouge opaque. Ce seuil est calculé comme suit : **Seuil de résilience = moyenne des LAI des années témoins – écart-type des années témoins.**

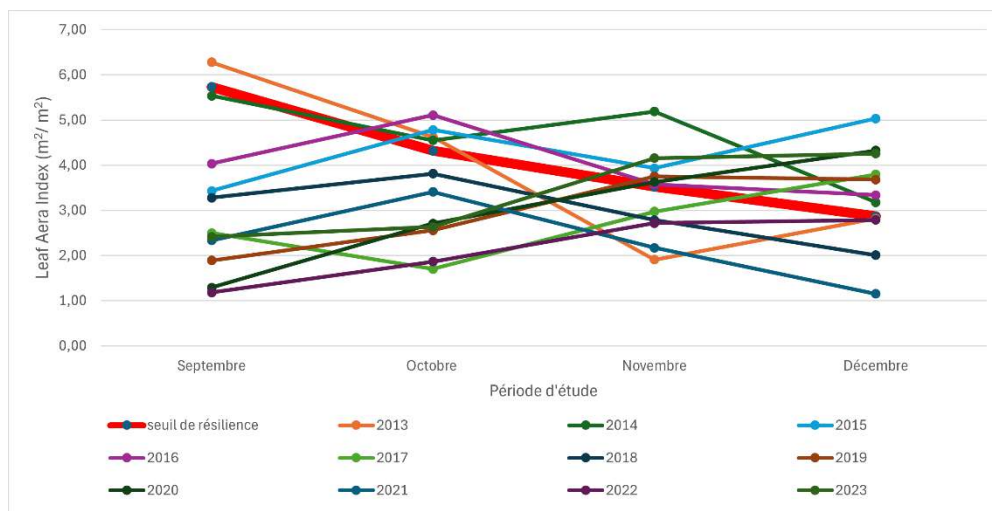


Figure 13 : comparaison des valeurs de LAI de la zone d'étude (In-Situ) au seuil de résilience).

L'analyse du graphique révèle que les valeurs de LAI dans la zone d'étude varient considérablement d'une année à l'autre, généralement en augmentant de septembre à octobre, puis en diminuant en novembre. Cependant, certaines années (2013, 2014, 2017) dérogent à cette tendance, affichant une baisse d'octobre à novembre. Cette variabilité pourrait s'expliquer par des facteurs tels que les conditions climatiques interannuelles, l'intensité ou les effets cumulatifs des incendies. Les années 2019, 2020, 2022, et 2023 présentent des valeurs de LAI particulièrement faibles, bien que certaines dépassent le seuil de résilience entre mi-novembre et décembre. Ces années sont plus chaudes que la moyenne avec un ensoleillement réduit, défavorables au développement rapide de la végétation (cf. hypothèse 1). De plus, l'effet cumulatif des feux sur la même surface peut limiter la régénération naturelle, entraînant une succession d'événements perturbateurs où les jeunes plants n'ont pas le temps de s'établir avant les prochains feux.

Le seuil de résilience montre que les valeurs de LAI dans la zone Ex-Situ restent relativement stables, bien qu'une baisse continue soit observée de septembre ( $5,73 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ) à décembre ( $2,87 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ). Cette diminution peut être due à la diversité des espèces végétales qui réagissent différemment aux fluctuations climatiques saisonnières. Dans la plupart des années observées (zone impactée), le LAI ne parvient pas à atteindre ce seuil entre septembre et novembre, mais le dépasse durant la période mi-novembre-décembre. Ce qui peut potentiellement correspondre à la durée nécessaire pour que la zone impactée commence à retrouver un couvert végétatif « normal ».

**Hypothèse 3 : la pratique de l'abattis-brûlis a conduit à une réduction notable des surfaces de la forêt primaire amazonienne entre 2013 et 2023.**

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons décidé d'étendre notre analyse à une échelle plus grande que celle de notre zone d'étude afin d'avoir un résultat satisfaisant. Mais notre zone d'étude principale reste toujours présente dans cette nouvelle emprise (figure 14). Une classification supervisée de notre nouvelle emprise a été réalisée pour les années 2013 et 2023, afin de quantifier au mieux le type de couverture au sol et de démontrer que la pratique de l'abattis-brûlis a conduit à une réduction notable de la forêt primaire amazonienne de 2013 à 2023.

La classification supervisée est une technique en télédétection qui consiste à grouper des pixels ayant des valeurs spectrales similaires. Cette méthode de classification passe avant tout par une phase d'apprentissage, qui consiste à créer manuellement sur l'image à classer, des zones d'entraînement (polygone) selon le nombre de classe souhaité. La différence entre les classes, est visualisée grâce à leurs signatures spectrales.

Les classes d'occupation du sol choisies, sont inspirées par Roberts et al. (2002), qui a défini plusieurs classes pour décrire la variation spatio-temporelle de l'occupation du sol sur 80 000 km<sup>2</sup> entre les années 1975 et 1999 dans le centre du Rondônia au Brésil : forêt primaire, prairies, prairies vertes, secondes pousses, Eau, urbain et Pierre/savane.

Pour éviter les confusions (car nous les avons rencontrés lors de phase d'apprentissage), nous avons décidé de créer trois classes : forêt primaire, secondes pousses/prairies et eau.

- Définition des classes : **Forêt primaire** : zones de forêts denses humides tropicales ; **Secondes pousses/prairies** : zones ayant subi un premier défrichement où l'on retrouve une forêt ou une végétation en régénération et/ou étendues vertes servant à l'élevage du bétail comme les pâturages.

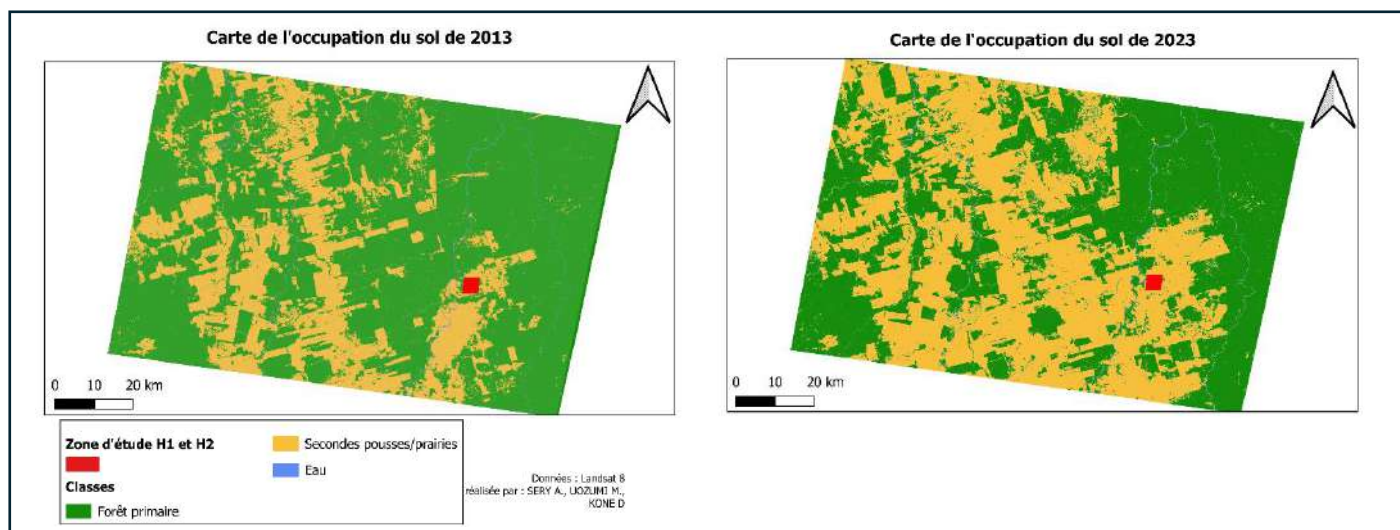
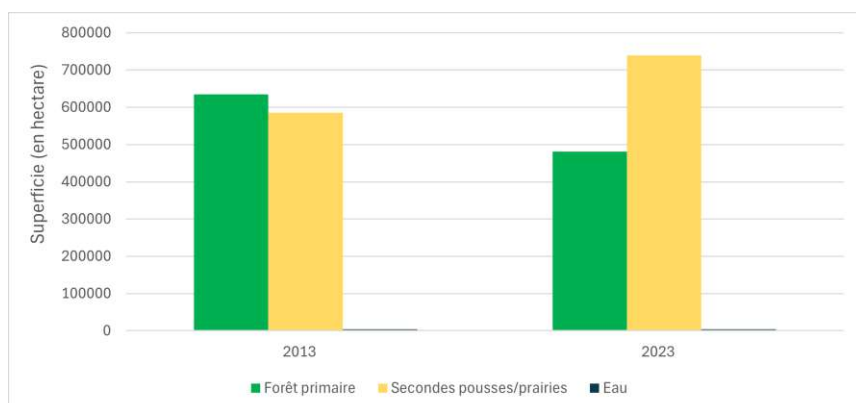


Figure 14 : Classification des images Landsat-8 des occupations du sol de 2013 et 2023.

La classification de 2013, a été validé avec un F-Score 98,85 %, pour un rappel moyen de 98,54 et une précision moyenne de 98,35 %. La classification de 2023, présente un F-Score de 99,55 %, pour un rappel moyen de 99,46 % et une précision moyenne de 99,62 %. A partir de la figure 14, nous voyons tout de suite que la forêt primaire occupe une place importante en 2013 qu'en 2023. Pour quantifier ce changement, nous avons calculé la surface



de chaque classe pour l'année 2013 et 2023 puis représenté graphiquement (figure 15).

Figure 15 : Statistique d'occupation du sol aux deux dates étudiées.



Le constat qu'on fait à l'issu des résultats statistiques de la classification est qu'en 2013, les classes forêt primaire et secondes pousses/prairies occupent des surfaces pratiquement similaires : 634 568 hectares pour la forêt primaire contre 585 962 hectares pour les secondes pousses/prairies, soit une différence de 48 606 hectares. En 2023, la surface des secondes pousses/prairies a considérablement augmenté, dépassant les 735 000 hectares, au détriment de la forêt primaire.

## V. Discussion

La première hypothèse visant à établir une relation entre la régénération de la végétation et les conditions climatiques a donné des résultats concluants. En effet, L'ACP souligne l'importance des précipitations et de l'humidité, qui favorisent la régénération après l'abattis-brûlis, car des conditions humides permettent un développement végétal rapide. Les pluies et une humidité élevée créent un microclimat favorable à la germination et à la croissance des espèces pionnières, cruciales pour le rétablissement du couvert forestier (Silva et al., 2020). En revanche, les années sèches et chaudes (2015, 2017, 2018, 2019, 2020, 2022, 2023) ralentissent la régénération, car la végétation, déjà affaiblie, lutte pour se rétablir. Cela est particulièrement critique pour les jeunes plants, qui, sans pluies abondantes, subissent un stress hydrique limitant leur croissance. De plus, les résultats de la régression multiple indiquent que la précipitation et l'ensoleillement sont les facteurs les plus influents pour la régénération du couvert végétal, surtout pendant la saison humide (septembre-décembre). L'ensoleillement, bien qu'ayant un effet moins direct contribue également à l'évolution de l'EVI : des périodes ensoleillées avec une humidité modérée boostent la photosynthèse et la croissance (Morton et al., 2008). Cependant, une exposition excessive sans humidité adéquate peut assécher les sols et compromettre la régénération, en particulier dans les zones endommagées.

Dans la deuxième hypothèse, la comparaison du cycle de LAI entre la zone d'étude (In-Situ) et la zone témoin (Ex-Situ) révèle que la récurrence (chaque année) de l'abattis-brûlis limite la capacité de régénération de la végétation. Les valeurs de LAI dans la zone d'étude sont inférieures au seuil de résilience entre septembre et novembre, indiquant que la végétation peine à retrouver un couvert comparable à celui de la zone non perturbée. Mais à partir de mi-novembre, certaines années dépassent néanmoins ce seuil, suggérant la durée nécessaire pour un retour à un couvert végétatif « normal ».

Concernant la troisième hypothèse, les analyses confirment une réduction significative de la forêt primaire amazonienne due à l'abattis-brûlis. En effet, les classifications supervisées des images Landsat-8 sur une période de 11 ans montrent une diminution de la surface de la forêt primaire entre 2013 et 2023, accompagnée d'une augmentation des prairies et des secondes pousses. La précision élevée des classifications pour chaque année (F-Score > 98 %) renforce la fiabilité de ces résultats, attribuable à un échantillonnage rigoureux. Toutefois, nous avons rencontré des confusions relatives aux signatures spectrales des prairies et des secondes pousses. Nous avons constaté que ces deux types d'occupations, partageaient des signatures spectrales très similaires. Ainsi par soucis de praticité, nous avons décidé de rassembler ces deux catégories en une seule classe pour éviter les erreurs de classification.

## Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'impact de la pratique de l'abattis-brûlis sur la dynamique de la végétation dans l'État de Pará en Amazonie brésilienne, avec un focus sur trois hypothèses spécifiques. Pour cela, nous avons utilisé des images Landsat-8 et des produits de télédétection MODIS (indices NDVI et LAI) couvrant une période de onze ans (de 2013 à 2023).

La première hypothèse visait à déterminer si les conditions climatiques influencent la régénération de la végétation après les feux de brûlis. L'analyse en composantes principales (ACP) a mis en lumière l'importance des précipitations, de l'humidité et de l'ensoleillement dans la capacité de récupération de la végétation. En effet, des conditions humides favorisent la germination et la croissance des espèces pionnières, essentielles pour restaurer le couvert végétal. En revanche, les années plus sèches et chaudes se traduisent par une régénération plus lente, particulièrement chez les jeunes plants affectés par le stress hydrique. Ces résultats valident l'hypothèse, démontrant que le climat joue un rôle crucial dans la régénération des écosystèmes forestiers post-brûlis.

La seconde hypothèse cherchait à déterminer si la récurrence de l'abattis-brûlis nuit à la régénération végétale et empêche le retour à un couvert normal. Les comparaisons de l'indice LAI entre la zone d'étude affectée par le brûlis et une zone témoin montrent que les zones régulièrement brûlées ne retrouvent pas une densité de couverture végétale suffisante dans les mois suivant les incendies. Les valeurs de LAI dans la zone affectée restent généralement inférieures au seuil de résilience défini par les valeurs de la zone témoin, illustrant une régénération insuffisante. Cependant, certaines années permettent un retour progressif à un couvert normal entre mi-novembre et décembre, indiquant que le temps de régénération est un facteur clé pour une récupération durable. Ainsi, l'hypothèse est partiellement validée, la régénération étant conditionnée par le rythme des brûlis et les conditions climatiques.

Enfin, la troisième hypothèse postulait que l'abattis-brûlis contribue à une réduction significative des surfaces de forêt primaire. Les classifications supervisées des images Landsat-8 sur la période étudiée confirment une diminution des surfaces de forêt primaire, avec une augmentation notable des zones de prairies et de secondes pousses. La transformation progressive du couvert forestier montre l'impact à long terme de l'abattis-brûlis sur la structure de l'écosystème forestier, validant cette hypothèse.

En conclusion, les outils de télédétection tels que les produits MODIS et les images Landsat-8 se sont révélés efficaces pour analyser l'impact de l'abattis-brûlis. Le suivi des indices de végétation (EVI et LAI) a permis de mesurer les changements de couverture végétale, tandis que la précision des images Landsat-8 a rendu possible une classification rigoureuse des types de couvert. Cette étude met en avant la nécessité de gérer durablement les pratiques agricoles et de développer des alternatives pour préserver les écosystèmes de l'Amazonie. Des politiques de conservation renforcées et des pratiques d'utilisation des terres moins destructrices sont essentielles pour préserver la résilience de la forêt amazonienne face aux pressions humaines croissantes et aux défis climatiques.

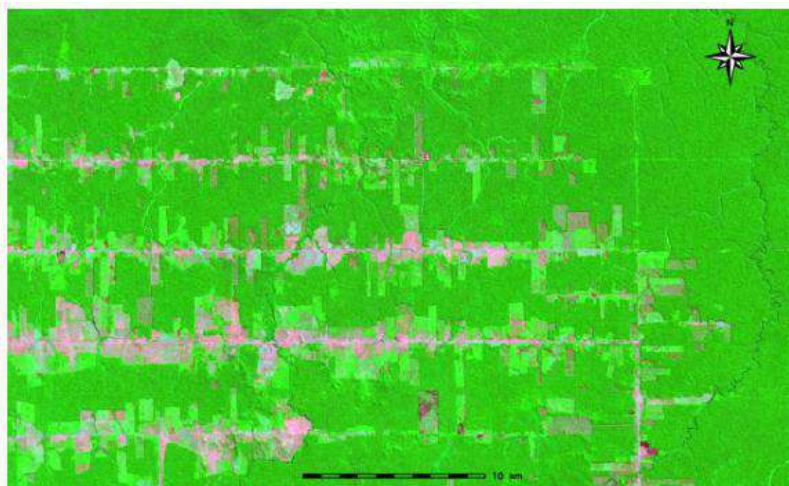
## Bibliographie

- Banque Mondiale, 2019, « Pourquoi la biodiversité de l'Amazonie est-elle si essentielle pour la planète ? Un entretien avec Thomas Lovejoy ». : <https://www.banquemonddiale.org/fr/news/feature/2019>
- Chen J. M. et Black T. A., 1992, Defining leaf area index for non-flat leaves, *Plant, Cell & Environment*, 15(4), p. 421-429. DOI : [10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x)
- Collet S., (s. d.), *Dynamique derrière les incendies et la déforestation dans la région du Rondônia en Amazonie brésilienne*. ([Mémoire de certificat]). Genève : Université de Genève. Repéré à <https://scholar.google.fr/>
- Didan K., 2021, MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. DOI : [10.5067/MODIS/MOD13Q1.061](https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061)
- Fearnside P. M., 2005, Deforestation in Brazilian Amazonia : History, Rates, and Consequences, *Conservation Biology*, 19(3), p. 680-688. DOI : [10.1111/j.1523-1739.2005.00697.x](https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00697.x)
- Morton D. C., Defries R. S., Randerson J. T., Giglio L., Schroeder W. et Van Der Werf G. R., 2008, Agricultural intensification increases deforestation fire activity in Amazonia, *Global Change Biology*, 14(10), p. 2262-2275. DOI : [10.1111/j.1365-2486.2008.01652.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01652.x)
- Myneni R., Knyazikhin Y. et Park T., 2021, MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. DOI : [10.5067/MODIS/MOD15A2H.061](https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD15A2H.061)
- NASA, 2019, Landsat 8. Repéré à <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>
- Payet A., Vonau C. et Wagner J., 2021, *Analyse et quantification des dégâts causés par un insecte ravageur via les données libres MODIS : le cas du Bombyx disparate dans l'Etat Américain du Rhode Island*. Université de Strasbourg.
- Roberts D. A., Numata I., Holmes K., Batista G., Krug T., Monteiro A., Powell B. et Chadwick O. A., 2002, Large area mapping of land-cover change in Rondônia using multitemporal spectral mixture analysis and decision tree classifiers, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D20). DOI : [10.1029/2001JD000374](https://doi.org/10.1029/2001JD000374)
- Silva S. M., Santos P. M., Molina K. T., Lopes A. M. C., Braga F. G., Ohana A., Miranda F. R. et Bertassoni A., 2020, Wildfire against the survival of Xenarthra: anteaters, armadillos, and sloths, *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais*, 15(3), p. 523-532. DOI : [10.46357/bcnaturais.v15i3.214](https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v15i3.214)
- Silva S. S. D., Fearnside P. M., Graça P. M. L. D. A., Brown I. F., Alencar A. et Melo A. W. F. D., 2018, Dynamics of forest fires in the southwestern Amazon, *Forest Ecology and Management*, 424, p. 312-322. DOI : [10.1016/j.foreco.2018.04.041](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.041)



## Annexe

Annexe 1 : Déforestation en "arêtes de poisson", typique au Rondônia. Source : Collet, 2019.



Annexe 2 : Tableau de erreurs de prédiction de l'EVI.

Année	EVI observé	EVI prédit	Erreur de prédiction
2013	0,52	0,48	0,0389
2014	0,49	0,49	0,0014
2015	0,44	0,44	0,0005
2016	0,55	0,51	0,0361
2017	0,39	0,43	0,0408
2018	0,42	0,45	0,0274
2019	0,39	0,4	0,0134
2020	0,41	0,42	0,0069
2021	0,46	0,5	0,0354
2022	0,41	0,37	0,0361
2023	0,41	0,4	0,0148
		<b>Moyenne</b>	0,0229

Annexe 3 : Cycle phénologique de la zone témoin (Ex-Situ).

Year	Dormancy	Greenup	Maturity	Peak	Senescence	MidGreendown	MidGreenup
2010	90	201	311	329	352	37	272
2011	75	181	285	305	324	27	246
2012	100	198	299	322	356	53	260
2013	318	80	164	195	222	273	123
2014	225	346	90	117	141	186	30
2015	160	325	53	74	94	131	364
2016	89	226	287	309	338	34	257
2017	129	216	326	353	31	88	277
2018	271	44	125	147	170	225	91
2019	39	208	284	301	322	2	260
2020	76	187	280	301	331	32	238
2021	88	197	281	306	335	39	245