



Certificat complémentaire en géomatique

---

# Dynamique derrière les incendies et la déforestation dans la région du Rondônia en Amazonie brésilienne

Mémoire de certificat

Étudiant : Simon Collet

Directeur de mémoire : Dr. Grégory Giuliani

Genève, Novembre 2019

## Table des matières

Résumé .....	1
Introduction .....	1
Contexte de la déforestation au Rondônia .....	4
Données .....	7
Landsat .....	7
Landsat 8 .....	8
Temporalité des images .....	9
Méthode .....	9
Programmes .....	9
Détail des images Landsat .....	10
Zone d'étude .....	11
Indices spectraux .....	13
Indice NDVI .....	13
Indice NBR .....	14
Indice BAI .....	15
Classification supervisée .....	15
Dynamique de la déforestation et des incendies .....	15
Affichage en fausse couleur .....	18
Qualification des incendies .....	19
Classification supervisée et matrices de transition .....	20
Résultats et interprétation .....	23
Limites .....	31
Discussion et conclusions .....	31
Bibliographie .....	32
Annexes .....	34

Figure 1 : Déforestation en "arrêtes de poisson", typique au Rondônia .....	5
Figure 2 : Surface déforestée en Amazonie légale .....	6
Figure 3 : Surface déforestée au Rondônia .....	7
Figure 4 : Détail des bandes Landsat 8 .....	8
Figure 5 : Localisation de la zone d'étude au Brésil.....	11
Figure 6 : Zone d'étude et ses états limitrophes .....	11
Figure 7 : Image Landsat en fausses couleurs (RGB : SWIR2, NIR, Green) et zones d'étude .....	12
Figure 8 : Coordonnées de la zone en vraies couleurs avec les autoroutes principales .....	13
Figure 9 : Indice NDVI de la carte.....	16
Figure 10 : NDVI moyen .....	16
Figure 11 : Déforestation, zone B (INPE).....	17
Figure 12 : Somme des polygones de déforestation .....	17
Figure 13 : Évolution de la déforestation dans la zone B .....	18
Figure 14 : Évolution de la déforestation dans la zone A .....	19
Figure 15 : Zoom sur une parcelle ayant subi des incendies en zone B .....	20
Figure 16 : Zones d'entraînement en vraies couleur en zone B .....	22
Figure 17 : Zones d'entraînement en fausses couleurs (RGB : NIR, Red, Green) .....	23
Figure 18 : Résultat de la classification SMAP .....	24
Figure 19 : Classification du 28 août 2019 en zone B.....	25
Figure 20 : Burn Area Index du 28 août 2019 en zone B.....	26
Figure 21 : Transformation de la forêt primaire en zone A.....	28
Figure 22 : Transformation de la forêt primaire en zone B.....	28
Figure 23 : Type de sol des incendies (zone A).....	29
Figure 24 : Type de sol des incendies (zone B).....	30

## Résumé

De nombreux travaux ont traité des problématiques liées à la forêt amazonienne. Parmi ceux-là, la relation entre incendies et forêt a été abordée. Notre travail vise à étudier la relation qu'il existe entre les incendies et la déforestation en Amazonie et d'apporter une mise à jour sur cette dynamique en 2019 afin de montrer visuellement et quantitativement les endroits où se déroulent majoritairement ces incendies. Nous avons pour cela eu recours à la télédétection afin de différencier cinq types de sol distincts (forêt primaire, secondes pousses ou prairies, savane ou sol nu, cultures et zones d'incendie) grâce à une classification supervisée avec des images du satellite Landsat 8 et une utilisation alternée entre les programmes Grass et ArcMap. Nous avons à partir de là créé des matrices de transition afin de voir combien de pixels d'une classe se transforment en pixels d'une autre classe. Nos principaux résultats montrent que les zones incendiées sont majoritairement les cultures, la savane et les secondes pousses ou prairies. Ces résultats pour la saison des incendies 2019 confirment les théories avancées qui disent que c'est rarement la forêt primaire qui brûle lors des incendies mais qu'ils aident à accélérer le processus de déforestation. La classification aura tout de même montré ses limites en termes de précision dans le rendu des classes. La précision de cette dernière laisse à désirer puisque les pixels ne sont pas identifiés de la manière la plus précise par exemple lorsque les cartes présentent des volutes de fumée résultant des incendies. Cependant, bien que cette technique manque de précision, elle permet de faire ressortir le lien existant entre la déforestation et les incendies ce qui était le but de notre travail au départ.

## Introduction

La forêt amazonienne est la plus grande forêt tropicale de notre planète. Elle s'étend sur 5'500'000 km<sup>2</sup>, dont 60% se trouvent au Brésil selon le CNES (Centre national d'études spatiales). Le phénomène de déforestation n'est pas nouveau en Amazonie. Ses responsables directs sont les compagnies forestières, les exploitations minières, les grands exploitants de bétail et de cultures de rentes ainsi que les petits agriculteurs.

Les petits agriculteurs utilisent depuis plusieurs décennies la technique dite « d'abattis-brûlis » qui consiste à défricher des petites parcelles de forêts afin d'y implanter une culture. Une fois que la terre n'a plus assez de nutriments à fournir, le fermier laisse le terrain en jachère pour y revenir quelques années plus tard et brûlera les plantes ayant réussi à recoloniser la parcelle afin de fournir une fertilité nouvelle au sol. De même, les grandes exploitations, qui portent le nom de Fazendas au Brésil, utilisent aussi le feu pour dégager d'immenses parcelles aux formes rectangulaires afin d'y faire paître leur bétail élevé pour la viande.

La déforestation au Brésil a connu de nombreuses variations depuis 1990. En effet, elle a connu une forte expansion avec des pics en 1995 et 2004 avec respectivement 29'059  $km^2$  et 27'772  $km^2$  déforestés ces années-là contre 13'730  $km^2$  en 1990. Cette augmentation drastique est due avant tout à l'expansion des cultures de soja et à l'extensification des pâturages destinés aux bovins. La perte de forêt primaire annuelle a en revanche bien diminué depuis le plan pour réduire massivement la déforestation mis en place par le président de l'époque, Luiz Inacio Lula da Silva, en 2009. Ce revirement politique a fait passer la moyenne du déboisement annuel de 17'500  $km^2$  entre 1990 et 2008 à 6494  $km^2$  entre 2009 et 2018 selon l'agence spatiale brésilienne (INPE).

Cependant, l'investiture de Jair Bolsonaro au 1<sup>er</sup> janvier 2019 risque de réduire ces efforts à néant puisqu'il a clairement exprimé son désir de s'appuyer sur la déforestation de l'Amazonie pour soutenir l'économie brésilienne, notamment en privant les peuples primaires de leurs droits à la terre et en favorisant les compagnies de bois.

Dans les discours alarmants des médias que l'on a pu voir se multiplier tout au long de l'été 2019, les incendies semblent devenir un sujet de plus en plus préoccupant. Ces derniers semblent être incontrôlables et paraissent favoriser gravement l'avancée de la déforestation comme le laisse penser la première phrase d'un article sur la BBC News : « Thousands of fires are ravaging the Amazon rainforest in Brazil - the most intense blazes for almost a decade » (Rodgers et al., 2019).

Une autre phrase relayée par le Los Angeles Times : « This year has been especially bad as more than 70,000 fires — most set by farmers and ranchers to clear land — have dramatically accelerated the pace of deforestation. » (Hyde, 2019) suggère que les feux ont permis d'accélérer la déforestation.

Dans la littérature académique, nous retrouvons également des papiers qui traitent de la relation entre incendies et déforestation comme Lima et al. (2012) qui choisissent de compléter les lacunes de relations spatiales entre incendies et déforestation en créant une carte de zones d'incendie au Mato Grosso et au Rondônia grâce à un modèle de mélange spectral linéaire et une classification non-supervisée afin de montrer l'occurrence d'incendies dans des zones déforestées. Ils arrivent à trouver une forte corrélation entre déforestation et occurrence d'incendies.

Roberts et al. (2002) s'intéressent aux changements dans l'occupation des sols au centre du Rondônia. Selon eux, les prairies ou pâturages ne sont pas laissés en jachère pour se transformer en secondes pousses et sont utilisés pendant huit ans au maximum. De plus, ils trouvent que la

déforestation est plus intense dans une périphérie allant jusqu'à 50 kilomètres autour des autoroutes, notamment la BR-364 qui traverse notre zone d'étude.

Souza da Silva et al. (2018) tentent eux de présenter la dynamique des feux de forêt dans l'état d'Acre, à l'ouest du Rondônia. Leur période d'analyse s'étend sur une durée très longue de 33 ans entre 1984 et 2016 et ils se concentrent sur les incendies survenant exclusivement dans les forêts grâce au Burn Scar Index en les mettant en lien avec les sécheresses survenues sur la période d'étude. Ils trouvent d'ailleurs que 95% des forêts ayant connu un ou plusieurs incendies l'ont subi pendant une des années de sécheresse importante en 2005, 2010 et 2016. Ces résultats nous donnent déjà une première intuition que la forêt tropicale au Brésil ne peut brûler que dans des conditions météorologiques très particulières. Ils décèlent tout de même une relation avec la déforestation puisque 88% des marques d'incendies surviennent dans l'est d'Acre, où la déforestation est plus importante mais sans quantifier de manière exacte cette relation.

Morton et al. (2008) déplorent le manque d'informations au niveau des dynamiques entre zones déforestées et incendies. Selon eux, l'usage du feu au Mato Grosso pour la culture mécanisée est plus important que pour l'élevage du bétail. Ils décident donc de calculer la répétition de feux sur l'ensemble de l'Amazonie brésilienne. Ils concluent que le type d'usage de la terre post-incendie a plus d'importance que la taille du terrain à défricher dans la dynamique des incendies.

En effet, le Brésil a connu une augmentation de 48% de ses foyers d'incendies par rapport à 2018 pour atteindre 163'219 incendies entre le 1<sup>er</sup> janvier et le 28 octobre 2019 selon l'INPE. Ce chiffre s'élève à 10'751 pour l'état du Rondônia qui va nous intéresser pour cette analyse.

L'état du Rondônia, en Amazonie brésilienne nous a paru comme pertinent à étudier car il connaît de forts taux de déforestation annuel (4% selon Demaze et al. (2011)) et se place en 5<sup>ème</sup> position des états brésiliens connaissant le plus d'incendies.

L'objectif principal de ce travail sera donc de montrer à la fois visuellement et quantitativement le lien qui existe entre la déforestation et les incendies qui ont eu lieu au Rondônia durant cet été 2019. Nous voulons ainsi montrer les types de sol où surviennent majoritairement les incendies et montrer si nous pouvons retrouver une tendance marquée dans ces derniers. L'intérêt de ce travail est donc de découvrir les zones où interviennent les incendies grâce à la télédétection et aux outils de géomatique.

## Contexte de la déforestation au Rondônia

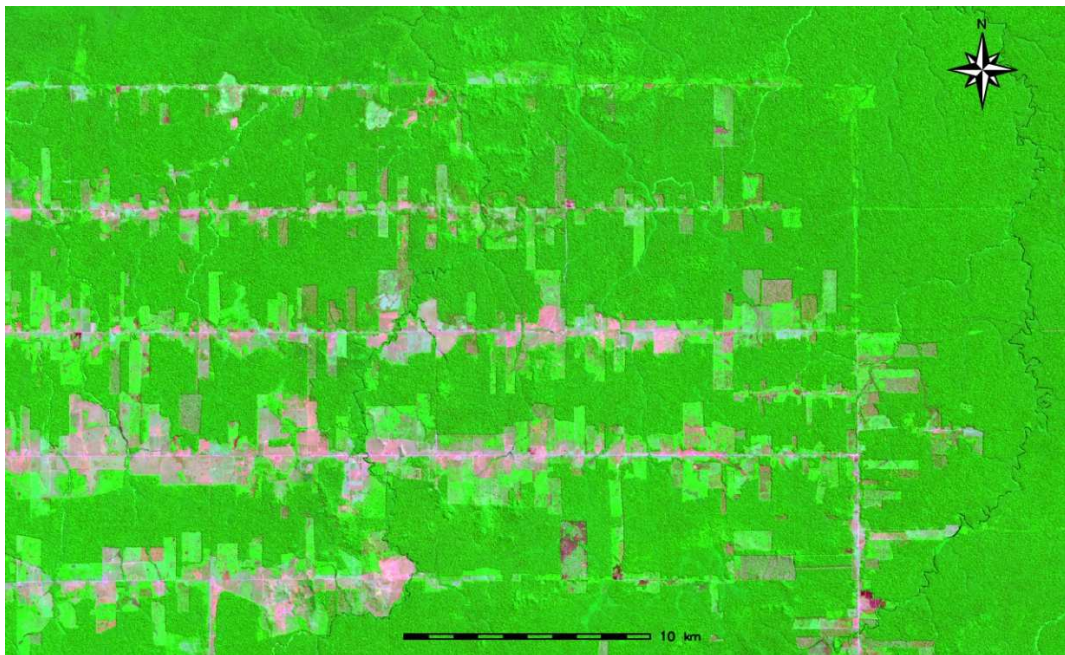
Selon Le Tourneau (2015), le Rondônia est dominé principalement par de petites et moyennes exploitations. On y retrouve de petites propriétés où la tendance passe d'un élevage pour la viande à un élevage laitier qui se trouve être plus rentable pour ce type d'exploitation.

La production de soja, qui se cantonnait principalement à l'état du Mato Grosso, a également connu une expansion au Rondônia depuis 2002 avec une augmentation de plus de 600% de la surface cultivée jusqu'en 2013.

Le Rondônia est notamment traversé par l'axe autoroutier BR-364, reliant Cuiaba, dans l'État du Mato Grosso, à Porto Velho, capitale du Rondônia, qui a amené un front colonisateur dans les années 70. Ce dernier fut renforcé entre 2007 et 2013 du fait de la construction des deux centrales électriques de Jirau et Santo Antônio et de l'arrivée d'une importante force de travail. La population du Rondônia a notamment connu une forte croissance passant de 116'505 à 1'777'225 habitants entre 1970 et 2019.

Cette pression démographique est une des causes de la déforestation dans la région. La déforestation au Rondônia prend majoritairement la forme « d'arrêtes de poisson » typique de la colonisation initiée par le gouvernement Medici qui vise à distribuer « la terre sans homme aux hommes sans terre ». Cette forme en « arrête de poissons » se construit autour d'une route principale qui s'enfonce dans la forêt et qui ainsi va être le point de départ pour desservir différents lots de part et autre de la route ce qui facilite la pénétration et l'installation des nouveaux colons dans la forêt tropicale. Nous retrouvons ces formes de déforestation particulières dans la Figure 1. Nous y distinguons bien les cinq routes horizontales en parallèle et la route en verticale avec des zones défrichées de part et autres qui suggèrent une déforestation supervisée. Une déforestation sans aucune forme de supervision aurait eu un aspect beaucoup plus chaotique et aléatoire. Cette dynamique à l'aspect militaire et ces formes sont d'ailleurs originaires du projet PIC Ouro Preto.

Figure 1 : Déforestation en "arrêtes de poisson", typique au Rondônia



C'est en 1970 que le gouvernement militaire lance le projet de colonisation PIC (Project of Integrated Colonization) à Ouro Preto qui vise à distribuer 1000 lots de terre pour les nouveaux colons au Rondônia. Ce sont finalement 5164 lots qui seront attribués pour un total de 500'000 ha. Cette initiative aura pour conséquence l'arrivée d'une importante vague migratoire venue du sud du Brésil selon Droulers et al. (2001) dont beaucoup de métayers, expulsés de leurs terres d'origine et ne possédant aucun capital de base qui aurait pu contribuer à lancer des exploitations agricoles plus soutenables au Rondônia (Pedlowski et al., 1997). Cette dynamique est associée à une exploitation par de petits exploitants qui vivent d'une culture vivrière, annuelle ou de l'élevage. De plus, la politique l'INCRA (Institut national de la colonisation et de la réforme agraire) octroyait des droits de propriétés temporaires aux colons sur les parcelles qu'ils « mettaient en valeur » à travers le défrichage de la forêt. Ce que nous apprend le centre national d'études spatiales (CNES) et que nous pourrions observer sur nos cartes, c'est que cette colonisation en « arrêtes de poisson » peut laisser des parties ou des pans entiers de forêt primaire entre les axes de pénétration.

Selon Imbernon (2000), pour obtenir ces formes particulières, les colons pratiquent l'abattis-brûlis qui consiste à défricher puis à brûler la végétation sur une parcelle définie, d'y cultiver des denrées durant un à trois ans selon la fertilité du sol puis soit de mettre en place leur propre pâturage soit d'abandonner leur terrain devenu infertile pour en trouver un autre. Selon Brown et al. (2004), cette décroissance de la fertilité encourage les individus à défricher toujours plus de parcelles pour cultiver leurs denrées. Selon Pedlowski et al. (1997), les petits exploitants préfèrent l'extension de leur



zone de production sur les secondes pousses au lieu de défricher une partie supplémentaire de forêt primaire qui demande plus d'efforts et de moyens.

Ce sont souvent des éleveurs de bétail qui vont réutiliser ces terrains abandonnés pour y faire paître leur troupeau. Pour résumer, lorsqu'un terrain n'est plus assez fertile pour une culture vivrière, ces petites exploitations vont laisser place aux Fazendas, énormes exploitations qui s'étendent sur plusieurs milliers d'hectares et consacrées aux cultures ou à l'élevage de bétail de manière extensive. Les espaces utilisés sont d'ailleurs plus grands car le bétail a besoin de beaucoup d'espace pour pouvoir se nourrir, à l'inverse de l'élevage intensif. Ils présentent d'ailleurs des formes très géométriques.

Pour ce qui est des incendies, leur source est principalement anthropologique selon plusieurs auteurs (Kauffman (1990), Lai et al. (2019), Morton et al. (2008), Souza da Silva et al. (2018)) qui s'accordent à dire que ce sont essentiellement les zones déjà défrichées qui sont mis à feu pour se débarrasser soit de la végétation ayant recolonisé la parcelle soit des troncs d'arbres résultant d'un défrichement plus tôt dans l'année. Ce processus accélère par la même occasion la dynamique de déforestation puisque le feu permet de débarrasser plus rapidement les éléments non désirés que la main de l'homme aurait mis beaucoup plus de temps à déplacer.

Pour ce qui des chiffres de la déforestation, le Rondônia correspond à 13.20% de la surface déforestée en Amazonie légale entre 2008 et 2018, ce qui le place en 3<sup>ème</sup> position des états les plus déforestés du Brésil après les états du Pará (41.69%) et du Mato Grosso (20.09%). Nous illustrons cette augmentation dans la figure 2 et 3 (INPE).

Figure 2 : Surface déforestée en Amazonie légale

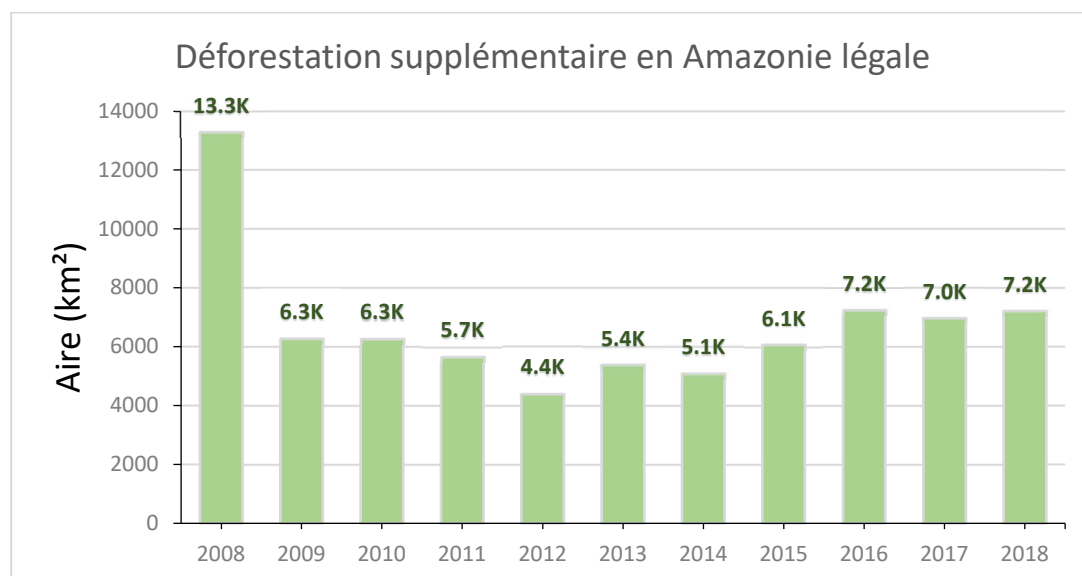
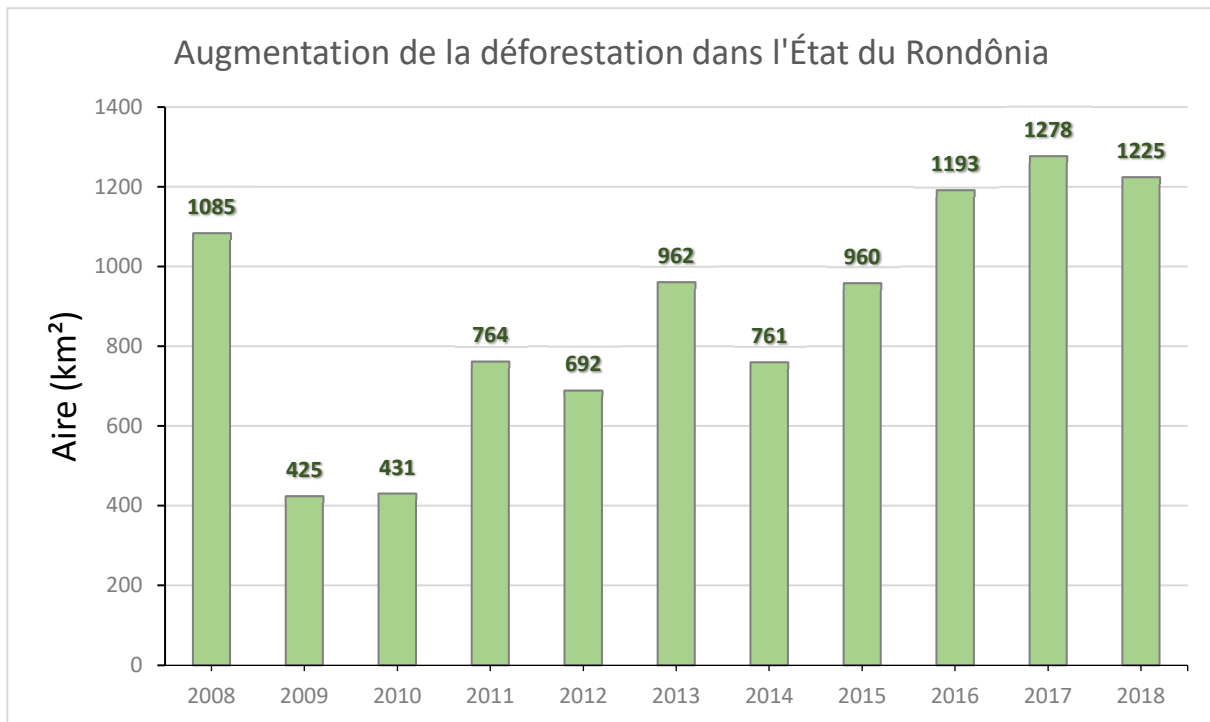


Figure 3 : Surface déforestée au Rondônia



Nous pouvons constater que l'état du Rondônia a également une baisse importante entre 2008 et 2009 tout comme dans l'Amazonie légale. Cependant, l'état connaît une recrudescence de sa déforestation depuis 2010 avec une déforestation plus importante en 2018 qu'en 2008, à l'inverse de l'Amazonie légale dans son ensemble. Nous pouvons donc voir que la politique de Lula a moins fonctionné dans cet état que pour l'Amazonie, en moyenne.

## Données

Les données utiles à ce travail ont été récoltées sur le site du US Geological Survey ([www.usgs.gov](http://www.usgs.gov)). Elles se composent de onze images du satellite Landsat 8, dont cinq en 2019 qui serviront à illustrer le mécanisme derrière les incendies. Ces images sont détaillées dans le tableau 1.

## Landsat

Le programme Landsat est le premier programme de reconnaissance spatiale civile. L'idée germa en 1965 lorsque William Pecora, alors directeur de la US Geological Survey, voulut développer un satellite capable de rassembler des données qui seraient disponibles au grand public sur les changements en ressources naturelles. Malgré de forte réticence de la part du secrétariat de la Défense, la NASA obtint la permission de construire un satellite et c'est en 1972 qu'est lancé le premier satellite Landsat (voir le site <https://landsat.gsfc.nasa.gov>). Aujourd'hui, ce sont les deux satellites

Landsat 7 et Landsat 8 qui assurent la continuité dans la prise d'image terrestre depuis l'espace. Ces images sont très utiles notamment pour étudier des évènements sur une période donnée. Elles doivent cependant présenter un minimum de couverture nuageuse ce qui peut être une lacune lorsque la période étudiée est courte.

## Landsat 8

Le satellite Landsat 8 développé en collaboration par la NASA et le US Geological Survey a été mis en orbite le 11 février 2013 et a commencé son service le 30 mai 2013. Sa récurrence de passage sur une même zone est d'environ 16 jours ce qui donne environ 23 images potentiellement utilisables d'une zone par année.

Landsat 8 possède deux nouveaux capteurs : le « Operational Land Imager » (OLI) et le « Thermal Infrared Sensor » (TIRS). Ces deux capteurs fournissent une image de la couverture des sols avec une précision à 30 mètres [visible, Proche Infrarouge (NIR), Infrarouge courte portée (SWIR1 et SWIR2)], à 100 mètres (thermique) et à 15 mètres (panchromatique). Ces bandes sont illustrées par la Figure 4 (voir le site <https://landsat.gsfc.nasa.gov>).

Figure 4 : Détail des bandes Landsat 8

Landsat-8 OLI and TIRS Bands (µm)		
30 m Coastal/Aerosol	0.435 - 0.451	Band 1
30 m Blue	0.452 - 0.512	Band 2
30 m Green	0.533 - 0.590	Band 3
30 m Red	0.636 - 0.673	Band 4
30 m NIR	0.851 - 0.879	Band 5
30 m SWIR-1	1.566 - 1.651	Band 6
100 m TIR-1	10.60 - 11.19	Band 10
100 m TIR-2	11.50 - 12.51	Band 11
30 m SWIR-2	2.107 - 2.294	Band 7
15 m Pan	0.503 - 0.676	Band 8
30 m Cirrus	1.363 - 1.384	Band 9

La bande 1 sert principalement pour l'observation des plans d'eau et les études concernant la détection de fumées. La bande 2 contribue à différencier le sol de la végétation et à reconnaître les types de forêts. La 3<sup>ème</sup> sert à repérer les pics de végétation ainsi qu'à évaluer la vigueur des plantes. La 4<sup>ème</sup> bande sert à l'identification du type de végétation et à détecter les sols et les éléments urbains. La bande 5 est utile pour la détection et l'analyse des végétaux. La bande 6 sert à l'évaluation de l'humidité de la végétation mais également à la détection de marques d'incendies et la mise en

évidence des incendies eux-mêmes. La bande 7 sert également à la détection d'incendies, mais de nuit cette fois. La bande 8 est celle qui sert à améliorer la qualité des autres bandes grâce à la technique dite de *Pansharpening* permettant d'avoir une meilleure résolution d'image mais qui évidemment sera

plus lourde à traiter. La bande 9 permet de détecter les couvertures nuageuses. Les bandes 10 et 11 servent toutes les deux à évaluer la température et l'humidité au sol.

### Temporalité des images

Nous avons prélevé une image satellite par année depuis 2013 jusqu'en 2018 pour illustrer l'avancée de la déforestation. En tenant compte d'une couverture nuageuse la plus faible possible, nous avons pris les images les plus rapprochées au niveau des dates pour que la période végétative soit à peu près au même stade et que le NDVI ne soit pas influencé par la période de l'année. Même en faisant cela, il faut bien relever que le NDVI pourra changer d'une année à l'autre car certaines années peuvent être plus chaudes ou plus humides (ou l'inverse).

Pour ce qui est de l'année 2019, nous avons prélevé cinq images satellites allant du 25 juin au 28 août pour illustrer visuellement et quantitativement le mécanisme derrière les incendies.

Le détail de ces images Landsat sont illustrés au tableau 1.

Tableau 1 : Résumé des images Landsat 8

Date d'acquisition	WRS (path/row)	Qualité de l'image	Couverture nuageuse en %
2013-07-26	232/066	9	0.01
2014-08-14	232/066	9	1.44
2015-08-01	232/066	9	0.08
2016-08-03	232/066	9	0
2017-08-05	232/066	9	0.29
2018-07-24	232/066	9	0.08
2019-06-25	232/066	9	1.03
2019-07-11	232/066	9	8.8
2019-07-27	232/066	9	0
2019-08-12	232/066	9	0.04
2019-08-28	232/066	9	2.7

### Méthode

Dans ce chapitre, nous allons décrire la méthode utilisée pour réaliser notre analyse.

### Programmes

Pour notre cas d'étude, nous avons principalement utilisé deux programmes : ArcMap 10.3 et Grass 7.2. Nous avons également utilisé le navigateur *EO Browser* du site web : Sentinel Hub (voir le

site : <https://apps.sentinel-hub.com>). Ce navigateur nous a permis d'avoir un soutien visuel rapide sur les zones pour vérifier si nos cartes créées sur Grass étaient adéquates et pour nous aider lors de la classification supervisée.

Grass nous a permis d'effectuer tous les traitements d'images préalables comme le passage des bandes en réflectance ou en 8 bits. Nous l'avons aussi utilisé pour réaliser des compositions colorées qui nous ont permis de visualiser l'ampleur de la déforestation et des incendies. Finalement, il nous a été utile pour effectuer une classification supervisée des zones grâce à l'outil *g.gui.iclass* et à la classification par le maximum séquentiel à postériori (*i.smap*).

ArcMap a été un outil utile dans les activités redondantes comme le calcul des index comme le *Normalized Burn Ratio (NBR)* ou le *Burn Area Index (BAI)* grâce à l'utilisation de l'outil *Model Builder*. Nous l'avons aussi utilisé pour la lecture de fichiers vecteurs comme les polygones de déforestation fournis par l'Institut National de Recherche Spatiale (INPE) avec les images Landsat 8 en soutien. L'outil *Reclassify (Spatial Analyst)* nous a permis de choisir plusieurs classes sur la base du NDVI afin de faire ressortir l'avancée de la déforestation de manière sommaire. Nous avons également utilisé l'outil *Tabulate Area (Spatial Analyst)* qui nous a permis de finaliser notre analyse en faisant ressortir plusieurs tables qui ont permis de connaître les changements de classes (créées lors de la classification supervisée) des pixels de nos zones d'intérêt.

### Détail des images Landsat

Notre Dataset se compose d'une seule zone avec un total de 11 images. Nous avons préféré nous concentrer sur une seule zone car nous voulions réaliser une étude sur un espace restreint afin de pouvoir choisir les zones d'intérêts. Le secteur d'intérêt se situe à l'ouest du Brésil à la frontière avec la Bolivie, à cheval entre l'État du Rondônia et celui de l'Amazonas avec la partie principale au Rondônia. La figure 5 et 6 détaillent la localisation de ce secteur.

Figure 5 : Localisation de la zone d'étude au Brésil

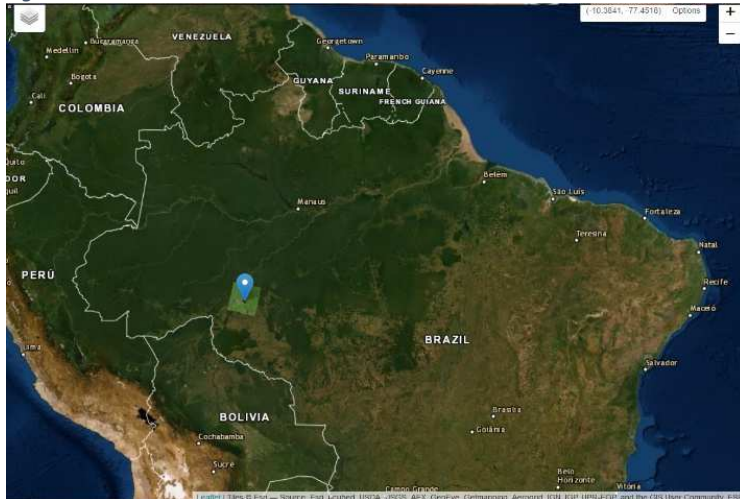
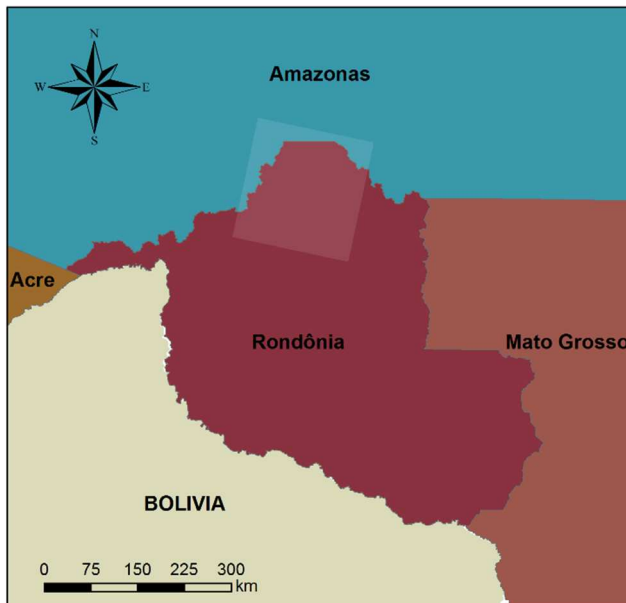


Figure 6 : Zone d'étude et ses états limitrophes



### Zone d'étude

Notre zone d'intérêt se trouve au nord du Rondônia, avec Porto Velho légèrement à l'ouest et la frontière avec l'état de l'Amazonas au nord.

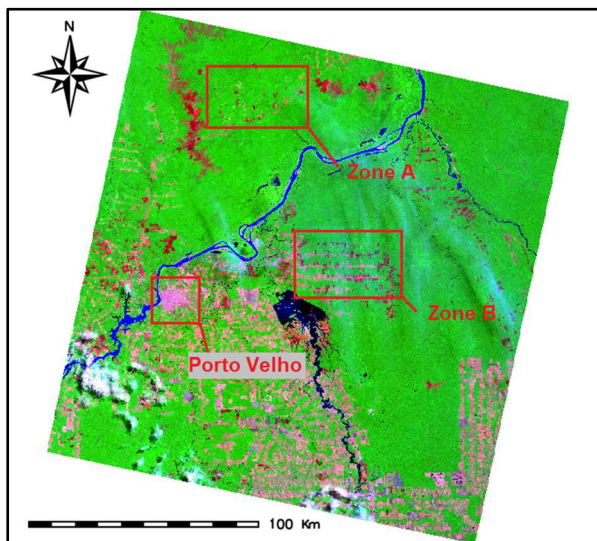
Pour faciliter le traitement d'image, nous avons sélectionné deux zones que nous avons simplement nommé A et B. Cela nous permet d'avoir plusieurs illustrations de la dynamique des incendies et de la déforestation car ces deux zones connaissent des types de déforestation de formes différentes qui pourraient se traduire par des types d'exploitations différentes.

La zone A est très proche de la route 319 reliant Manaus en Amazonas à Porto Velho. Cette zone présente de faibles marques de déforestation avec des alvéoles éparses et irrégulières, plutôt typique d'une colonisation par de petits agriculteurs comme le présentent Pedlowski et al. (1997). Notre hypothèse est que les individus ont un accès facile à la forêt depuis la route 319 et ne s'enfoncent pas plus loin dans la forêt que nécessaire. Sa surface est de  $1354,825 \text{ km}^2$ .

La zone B se trouve à l'est de Porto Velho et montre plusieurs fazendas. C'est une région typique des grandes cultures du Rondônia avec des formes en « arrêtes de poisson ». Cette zone est d'intérêt car elle a commencé à apparaître tardivement (entre 2007 et 2008) et permet de bien illustrer l'avancée fulgurante de la déforestation lorsque les moyens sont mis en place pour développer de grandes exploitations comme pour le soja ou l'élevage bovin. Sa surface est de  $1154,42 \text{ km}^2$ .

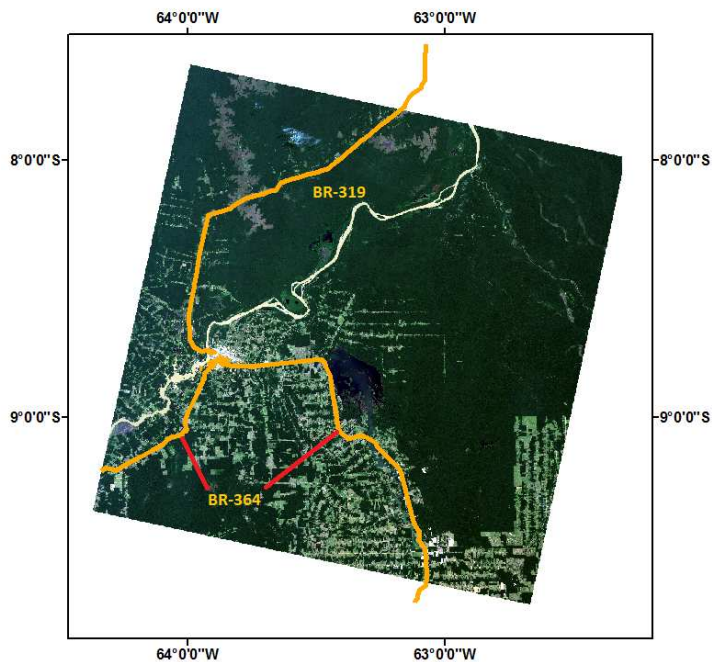
Ce sont ces zones qui ont été choisies car nous pouvons observer une forte expansion de la déforestation entre 2013 et 2019 ainsi que de nombreux incendies en 2019. Nous illustrons ces deux zones d'études dans la figure 7. Nous voyons que ces deux zones sont environ de la même taille mais qu'elles présentent toutes deux des échelles de déforestation bien différentes.

Figure 7 : Image Landsat en fausses couleurs (RGB : SWIR2, NIR, Green) et zones d'étude



La figure 8 nous montre les deux autoroutes principales qui traversent notre zone d'étude à savoir la BR-319, reliant Manaus à Porto Velho et la BR-364 en provenance de Sao Paulo. La BR-364 a contribué à amener une importante vague migratoire venant du sud du pays au Rondônia comme le laisse suggérer la forte déforestation dans son périmètre direct. Comme le présentent Roberts et al. (2002), la déforestation autour de cette autoroute s'étend parfois jusqu'à 50 kilomètres. La BR-319 a pendant longtemps été impraticable et c'est pourquoi nous avons choisi de placer notre zone d'étude à cet endroit afin de voir une évolution depuis une étape peu avancée de la déforestation.

Figure 8 : Coordonnées de la zone en vraies couleurs avec les autoroutes principales



## Indices spectraux

Les indices spectraux ont été très utiles pour détecter les différents types de sol. Ils permettent de faire ressortir visuellement les zones d'intérêts comme des zones agricoles, urbaines, incendiées ou encore humides. Nous allons détailler ci-dessous le fonctionnement des indices que nous utiliserons pour notre analyse.

### Indice NDVI

Le NDVI ou Normalized Difference Vegetation Index est l'indice de base en télédétection pour ce qui concerne l'analyse du couvert végétal et d'utilisation des terres en matière agricole. Cet indice se base sur la capacité des plantes à absorber la lumière visible via la photosynthèse, à l'exception du vert. Les feuilles quant à elles vont refléter la lumière infrarouge.

Pour résumer, plus une plante sera en bonne santé plus sa capacité à absorber la lumière rouge et à refléter le proche-infrarouge sera importante. L'indice NDVI sera donc élevé. À l'inverse, si on se trouve en présence d'une plante en mauvaise santé ou d'un sol nu, alors la réflectance de la bande rouge sera plus importante et celle du proche-infrarouge plus faible.

La formule du NDVI utilise donc la bande rouge et la bande proche-infrarouge selon la formule suivante :



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

Le NDVI est un indice normalisé, qui varie donc de -1 à +1. De manière générale, un indice négatif représentera de l'eau. Un indice faible (<0.2) représentera des sols nus ou des zones urbanisées. Des prairies ou de la végétation éparses auront un indice entre 0.2 et 0.5 et finalement un indice supérieur à 0.5 représentera une végétation plutôt dense. Ces indices sont à apprécier visuellement et à comparer avec une carte en vraies couleurs ou sur le terrain car les seuils d'indices sont indicatifs et peuvent légèrement varier selon la période végétative ou le type de végétation de la zone d'étude (forêt tropicale, savane, forêt tempérée, taïga, etc.).

### Indice NBR

Le NBR ou Normalized Burn Ratio est un indice qui met en évidence des espaces ayant subi des incendies. Cet outil a un intérêt uniquement lorsque l'on veut connaître l'avancée d'un incendie ou son étendue entre deux dates. En effet il est utile pour calculer les différentes conditions avant et après un incendie.

Sa formule utilise la bande proche-infrarouge ainsi que la bande infrarouge à courte portée comme suit :

$$NBR = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$$

Pour détecter l'évolution d'un incendie, il suffit de soustraire le NBR post-incendie au NBR pré-incendie comme dans l'équation suivante :

$$\Delta NBR = NBR_{pré-incendie} - NBR_{post-incendie}$$

La meilleure manière d'utiliser le  $\Delta NBR$  est de collecter une carte pré-incendie au plus proche de la date de l'incendie et une carte post-incendie au plus près de la fin de l'incendie.

La seule limite de cet indice tiré du commentaire précédent est que si trop de temps passe, la végétation va repousser sur la zone d'incendie ce qui aura pour effet d'augmenter la réflectance proche-infrarouge et donc de baisser l'indice de différence NBR. Pour cela, cet indice fonctionne mieux dans les zones où le recouvrement végétal est plus lent. Dans notre cas, où la croissance des plantes est assez rapide, la différence NBR est peut-être moins efficace. C'est pour cela que nous nous sommes tournés vers le BAI que nous allons expliciter ci-dessous.

## Indice BAI

Le BAI ou Burn Area Index a l'avantage de relever les zones incendiées à un instant t. Cette caractéristique nous a semblé pertinente pour pallier les éventuels biais du NBR et pour pouvoir comparer ces deux indices. La formule du BAI se décline ainsi :

$$BAI = \frac{1}{(0.1 - RED)^2 + (0.06 - NIR)^2}$$

Un BAI important illustrera une zone ayant subi un incendie.

## Classification supervisée

La classification supervisée est une technique en télédétection qui consiste à grouper des pixels ayant des valeurs spectrales similaires. Ces valeurs de regroupement sont définies lors de la création de zones d'entraînement par l'utilisateur qui va créer le nombre de classe souhaité et les identifier manuellement sur une image Landsat ou autre afin d'obtenir une signature contenant les propriétés spectrales de chaque classe.

Pour faire une classification, qu'elle soit supervisée ou non, il est obligatoire de créer des groupes d'image. Pour ce faire, nous avons rassemblé les bandes 2, 3, 4, 8 en 8 bits en réflectance et la bande NDVI.

## Dynamique de la déforestation et des incendies

Afin de donner un premier aperçu de la déforestation, nous avons pensé qu'il serait intéressant d'explorer l'indice NDVI entre 2013 et 2019.

Nous avons donc réalisé une classification manuelle du NDVI pour l'entièreté de l'image Landsat. En nous basant sur une appréciation visuelle, nous avons divisé la carte en 4 classes basées sur le NDVI grâce à l'outil *Reclassify* de ArcMap. De -1 à 0.1, nous retrouvons les plans d'eau. De 0.1 à 0.2, les sols nus puis de 0.2 à 0.6 les cultures et les prairies/pâturages et finalement pour un NDVI supérieur à 0.6, la végétation dense ou la forêt tropicale humide. Nous pouvons retrouver ces quatre classes dans la figure 9.

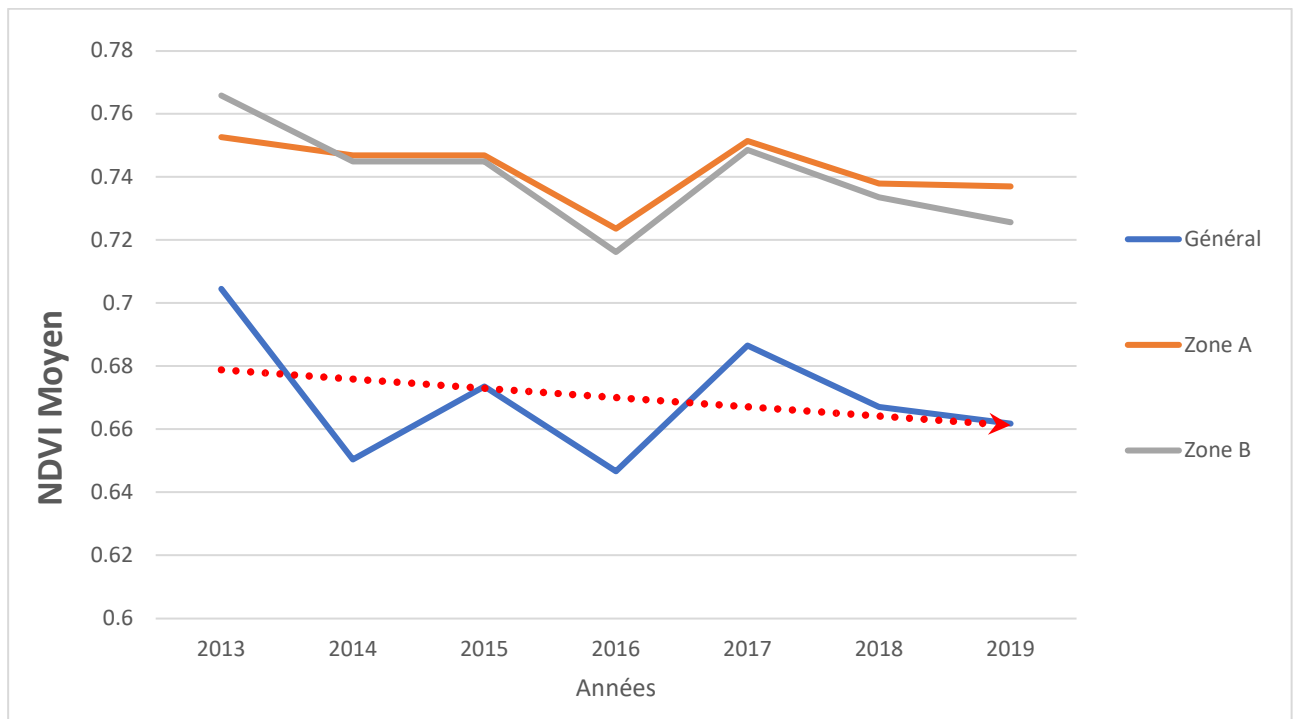
Figure 9 : Indice NDVI de la carte



Nous voyons bien ici la répartition des différentes classes. La forêt primaire occupe la majeure partie de notre carte avec 88%. Ce chiffre passe à 78% en 2019 ce qui équivaut à une déforestation de 10% entre 2013 et 2019.

Pour corroborer cette augmentation de la déforestation, nous avons pris la moyenne de l'indice NDVI pour chaque année entre 2013 et 2019 pour toute l'image Landsat et pour nos deux zones d'intérêt. Nous l'illustrons avec la figure 10.

Figure 10 : NDVI moyen



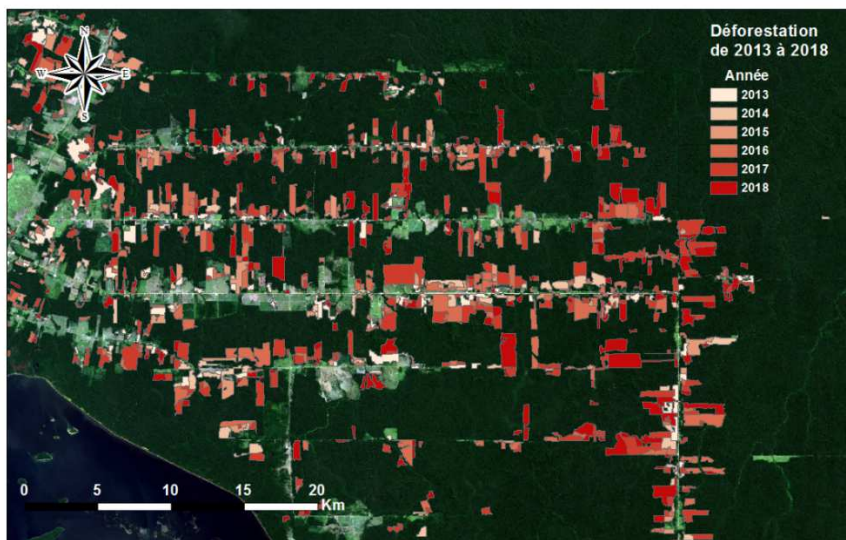
Bien que ce graphique soit très sommaire, nous voyons que l'indice NDVI connaît une légère tendance négative, illustrée par la flèche rouge. Bien qu'un calcul sur une plus longue période de temps

aurait pu montrer clairement la tendance dans la baisse du NDVI moyen, ce graphique nous donne déjà une première intuition quant à sa réduction et à la déforestation.

Nous avons également récupéré un shapefile sur TerraBrasilis (voir le site [terrabrasilis.dpi.inpe.br](http://terrabrasilis.dpi.inpe.br)) qui donne l'augmentation de la déforestation annuelle entre 2013 et 2018 présentée dans la figure 11 pour la zone B.

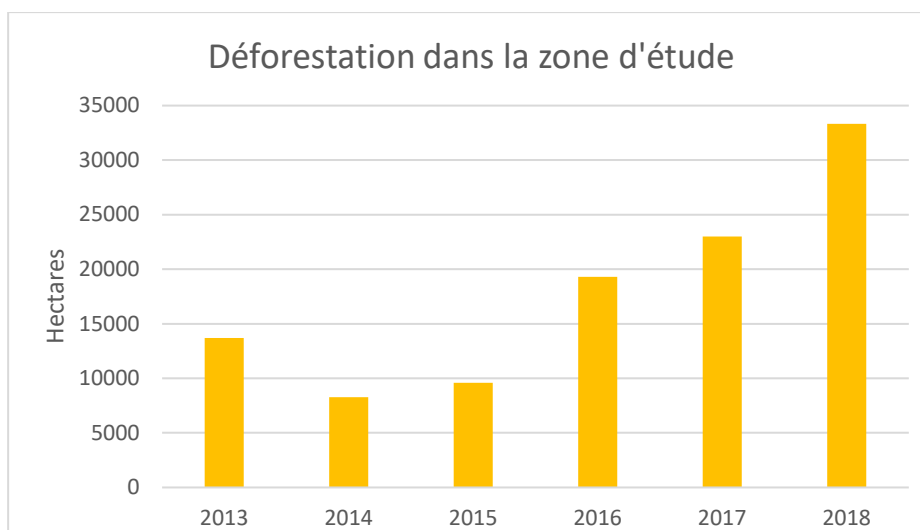
Figure 11 : Déforestation, zone B (INPE)

### Évolution de la déforestation d'après l'INPE



Grâce à ces fichiers vecteurs qui s'étendent sur toute l'Amazonie brésilienne, nous avons pu calculer le taux de déforestation annuel pour l'entier de notre image Landsat. La déforestation calculée par l'INPE est représentée dans la figure 12.

Figure 12 : Somme des polygones de déforestation



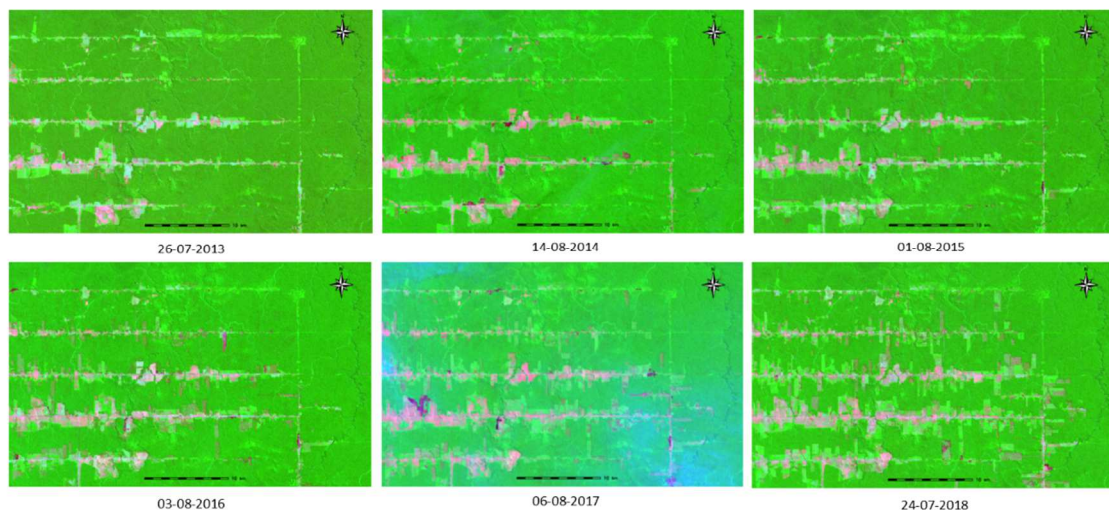
Il est intéressant de voir que la déforestation calculée pour notre zone d'étude suit fortement la tendance de déforestation pour l'état du Rondônia comme illustré à la figure 3, sauf pour l'année 2018 où nous avons une augmentation de la déforestation alors que l'état du Rondônia a connu une diminution cette année-là. Notre zone d'étude correspond donc bien à la tendance moyenne de déforestation que l'on pourrait retrouver au Rondônia et est donc assez représentative de la dynamique de défrichement au Rondônia.

### Affichage en fausse couleur

Cet affichage en fausse couleur va nous permettre d'apprécier une première fois l'avancée de la déforestation et de visualiser une première fois la dynamique derrière la déforestation.

Nous avons choisi un affichage en fausse couleur (Red : SWIR2, Green : NIR et Blue : GREEN) inspiré par Long et al. (2019) qui nous permet de bien faire ressortir les zones incendiées, les cultures et les zones de prairies. Sur les images de la figure 13, nous pouvons voir les cultures en rose, les prairies et les secondes pousses en vert clair, la forêt en vert foncé et finalement les zones d'incendie en magenta foncé.

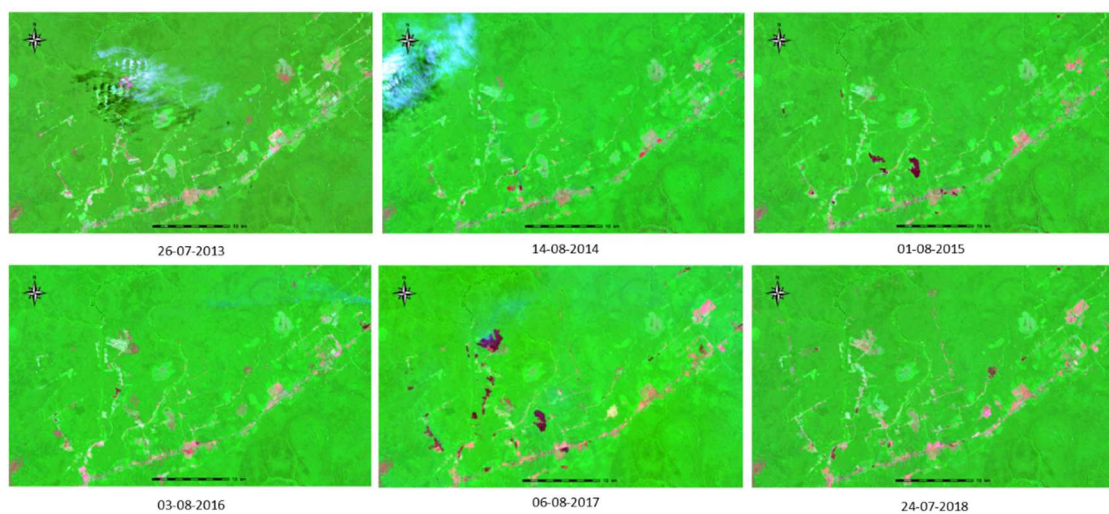
Figure 13 : Évolution de la déforestation dans la zone B



Nous voyons sur ces images de la zone B ci-dessus que la déforestation évolue rapidement autour des axes routiers. Il est déjà possible d'observer une augmentation importante de la déforestation sur les trois dernières images de 2016 à 2018. Nous le confirmons d'ailleurs grâce aux données de l'INPE avec une surface annuelle déforestée de  $12 \text{ km}^2$  en moyenne entre 2013 et 2015 contre  $43 \text{ km}^2$  entre 2016 et 2018.

La déforestation dans la zone A est quant à elle beaucoup plus faible pour une zone d'étude de taille à peu près équivalente à la zone B. La raison principale est qu'il n'existe pas de route perpendiculaire à l'autoroute A-319 qui permettrait aux nouveaux colons de s'enfoncer plus facilement dans la forêt tropicale. Les exploitants doivent se frayer un chemin en déboisant eux-mêmes des parcelles pour avancer dans la forêt primaire. Les chiffres, bien que plus faibles, suivent d'une certaine manière celle de la zone B. Les espaces déforestés sont tout de même beaucoup moins importants avec un minimum de  $0.343 \text{ km}^2$  en 2015 et un maximum de  $15 \text{ km}^2$  en 2018. Ces chiffres sur la déforestation sont relatés en annexe 1.

Figure 14 : Évolution de la déforestation dans la zone A



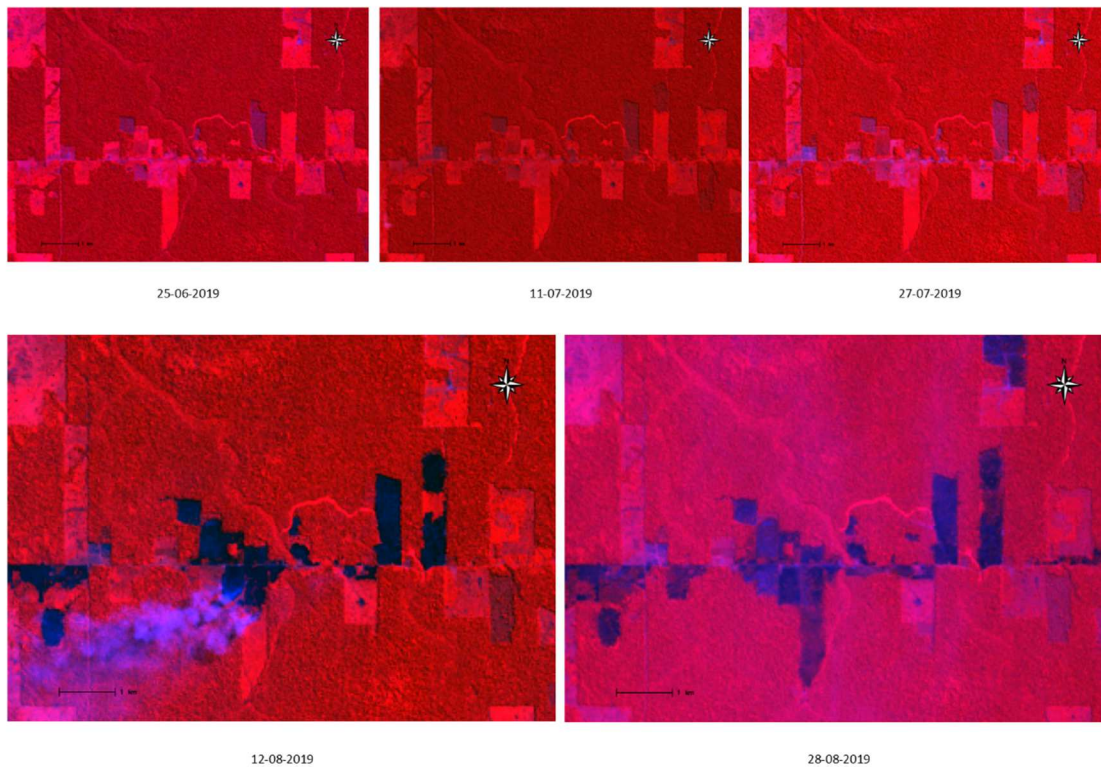
Nous avons ainsi pu montrer visuellement et chiffres à l'appui l'augmentation de la déforestation sur nos deux zones d'intérêt. À présent que la dynamique visuelle a été illustrée, nous pouvons passer à la partie sur les incendies et leur lien avec la déforestation.

### Qualification des incendies

Pour débiter, nous prenons toutes les cartes disponibles durant la saison des incendies de 2019, de juin à septembre (excepté celle du 9 juin car la couverture nuageuse est proche de 40%). En affichant ces cartes en fausses couleurs, inspiré par le site web *Sentinel Hub* (Red : NIR, Green : Red, Blue : Green), nous pouvons déjà avoir une première impression de l'ampleur des incendies.



Figure 15 : Zoom sur une parcelle ayant subi des incendies en zone B



Les zones d'incendies sont assez distinctement visibles en noir et en violet très foncé.

Nous nous apercevons très vite que ces incendies surviennent principalement sur des zones déjà déboisées ou en cours de repousse et plus rarement dans des zones non déboisées (les zones de repousse sont en rouge vif tandis que la forêt primaire est en rouge foncé) et principalement durant le mois d'août. Ainsi, nous pouvons confirmer visuellement notre première hypothèse qui dit que les agriculteurs préfèrent brûler des zones déjà déboisées. Bien que nous soyons conscients que ce zoom en particulier ne peut pas représenter la dynamique générale derrière les incendies, nous pouvons tout de même lui accorder une utilité pour commencer à comprendre cette dynamique. Afin de pallier cette lacune, nous allons vérifier cela de manière quantitative dans le chapitre suivant au moyen de la classification supervisée.

### Classification supervisée et matrices de transition

De façon à quantifier au mieux le type de couverture du sol d'où commencent les incendies, nous avons jugé pertinent de réaliser une classification supervisée sur les zones A et B pour chaque date de l'été 2019. Nous avons préféré la classification supervisée à la classification non-supervisée car les classes que nous avons choisies peuvent être très proche en termes de NDVI et également au niveau

de leurs valeurs. C'est pourquoi nous avons préféré créer une signature spectrale à partir d'une classification supervisée.

Les classes que nous avons choisies sont inspirées par Roberts et al. (2002) qui présentent les classes suivantes :

- Forêt primaire
- Prairies
- Prairies vertes
- Secondes pousses
- Eau
- Urbain
- Pierre / Savane

Pour notre classification, nous avons choisi d'adapter ces classes à nos zones d'étude. Nous avons donc groupé les classes « Prairies, prairies vertes et secondes pousses » en une seule classe nommée « Secondes pousses ou prairies » et nous avons rajouter une classe « Cultures » pour les exploitations vivrières ou les grandes étendues de cultures dans les fazendas. Nous avons également supprimé la classe « eau » et « urbain » car aucune des zones n'en comporte de manière significative et nous avons forcément créé une classe « zones d'incendie » afin de connaître la dynamique des incendies.

Notre classification se fera donc via ces cinq classes dont les définitions sont les suivantes :

*Forêt primaire* : zones de forêts denses humides tropicales

*Secondes pousses ou 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.

*Savane ou sol nu* : surfaces possédant une végétation faible avec quelques arbustes où la régénération végétale se fait plus lentement que dans les surfaces de secondes pousses voire pas du tout.

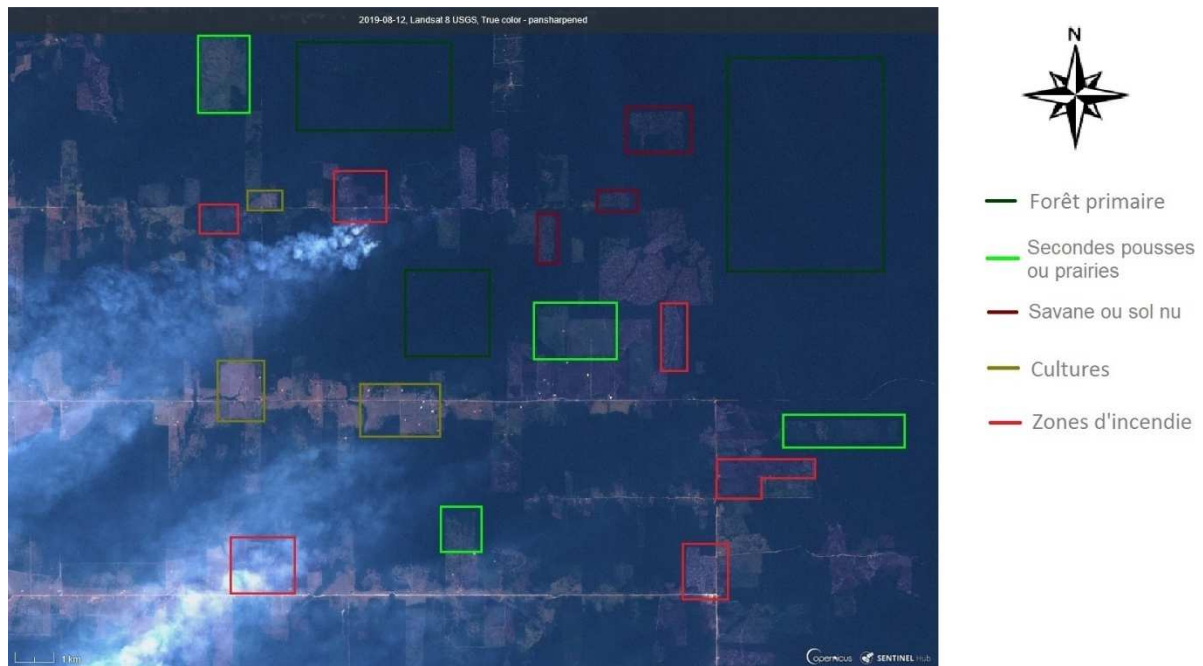
*Cultures* : étendues qui servent à la culture vivrière ou à la culture de rente.

*Zones d'incendie* : toutes surfaces confondues montrant un noircissement du sol après un incendie naturel ou de la main de l'homme et présentant une absence de végétation.



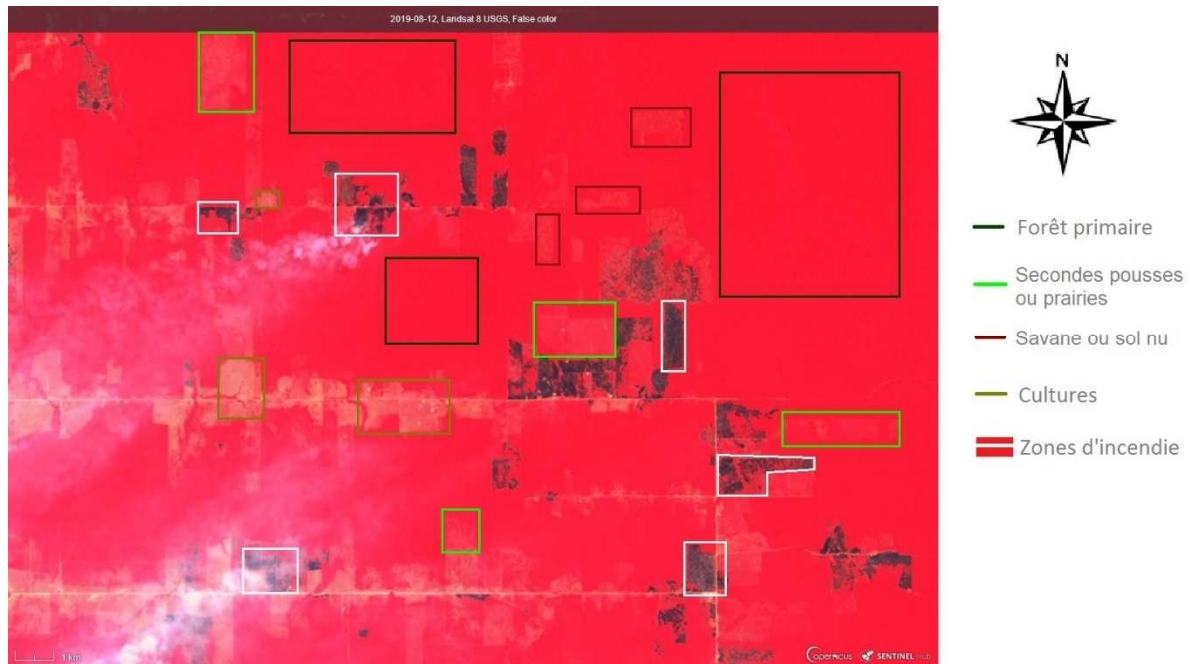
Les figures 16 et 17 illustrent ces classes de manière visuelle.

Figure 16 : Zones d'entraînement en vraies couleurs en zone B



Dans cette image en vraies couleurs, nous pouvons facilement distinguer la classe « cultures » avec de grands rectangles de couleurs marron-jaunâtre. La classe « forêt primaire » est assez facilement distinguable car elle se situe autour des zones de culture et présente le vert le plus foncé. La classe « secondes pousses ou prairies » se compose de prairies vertes facilement décelable à l'œil mais les secondes pousses ont une couleur très proche de la forêt primaire. Nous avons tenu à distinguer les secondes pousses de la forêt primaire car selon la théorie, c'est souvent dans ces milieux que les agriculteurs vont mettre le feu. Si ces repousses sont difficilement décelables en vraies couleurs, elles sont marquées plus fortement en fausses couleurs comme dans la figure 17. La classe « savane ou sol nu » se rapproche beaucoup de la classe « zone d'incendies » du fait de sa texture en vraies couleurs. Cependant, sa couleur se rapproche plus du brun-marron tandis que les zones d'incendies seront plutôt de couleur gris-noir. Nous pouvons clairement différencier ces deux classes en fausses couleurs dans la figure 17 car les incendies apparaissent en noir tandis que la savane garde une couleur dans la tonalité des rouges.

Figure 17 : Zones d'entraînement en fausses couleurs (RGB : NIR, Red, Green)

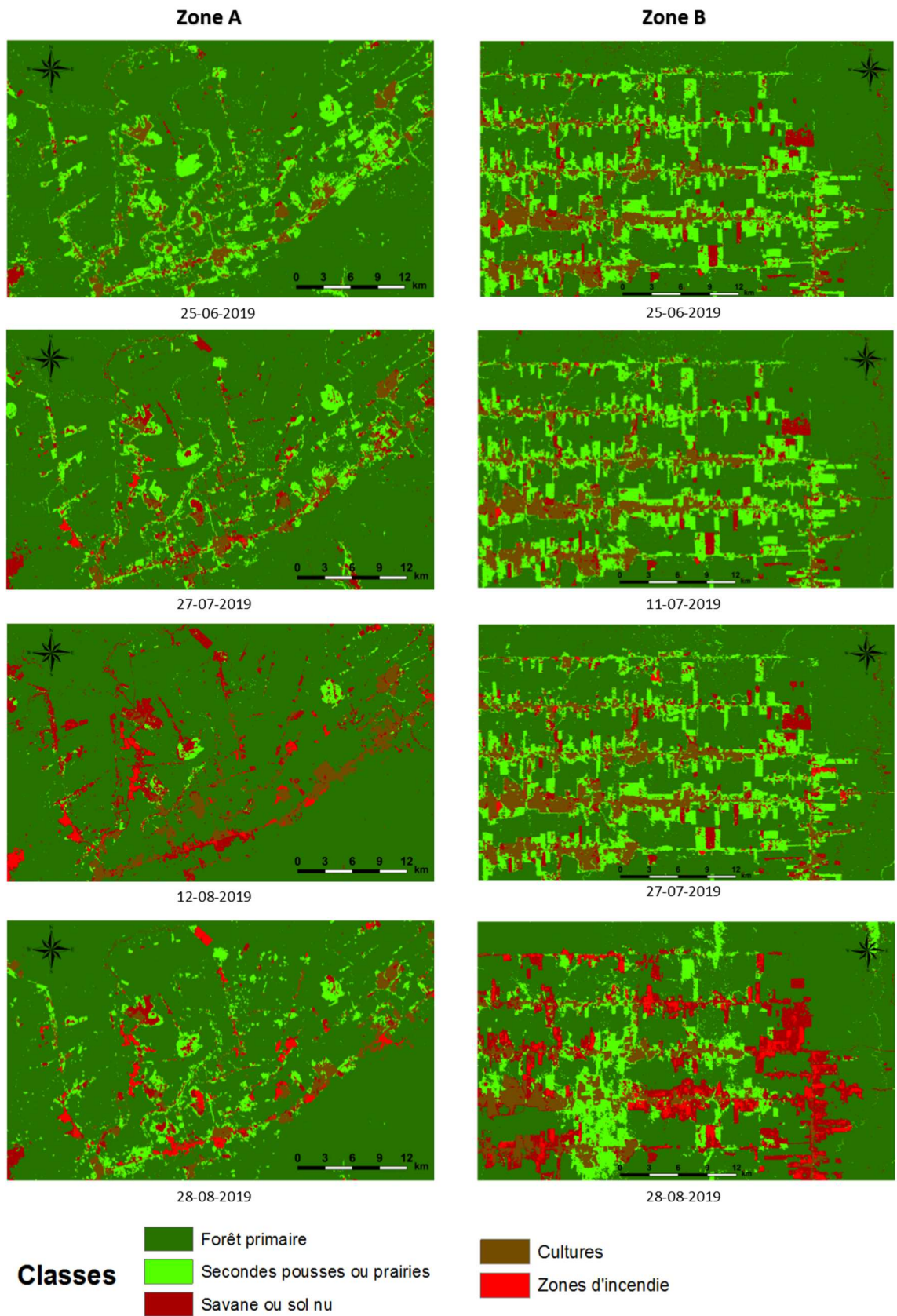


Après avoir créé les signatures spectrales pour chacune des images de l'été 2019 grâce aux zones d'entraînement détaillées ci-dessus étendues aux deux zones d'étude, nous passons par une estimation séquentielle maximale a posteriori (SMAP) qui effectue une classification en considérant que chaque pixel a une forte probabilité d'appartenir à la classe de ses voisins plutôt qu'à la classe dans laquelle il aurait été classé si nous avons utilisé la classification par le maximum de vraisemblance (MLC). Cette méthode permet d'obtenir un résultat plus homogène et plus « lisse » visuellement. Nous avons effectué cette classification pour chaque date de 2019 afin de faire ressortir les cinq classes.

### Résultats et interprétation

Le résultat de la classification nous donne les huit images suivantes (figure 18) :

Figure 18 : Résultat de la classification SMAP



Dans ces huit images, nous voyons tout de suite que la forêt primaire prend une place plus importante en zone A qu'en zone B où la taille de la déforestation beaucoup plus importante. Nous tenons à préciser que pour des raisons de fumées trop importantes venant des incendies en cours pendant la photographie de nos zones, nous n'avons pas sélectionné l'image du 11 juillet pour la zone A et du 12 août pour la zone B. La raison est que la fumée rend très difficile la classification supervisée et que le résultat ne correspondait pas du tout à la réalité.

Pour confirmer l'efficacité de notre classification et pour savoir si les zones d'incendies ont été bien identifiées, nous reproduisons la carte du 28 août en zone B en utilisant le Burn Area Index. Cela nous permet de vérifier si la classe « zones d'incendie » a été bien identifiée et distribuée sur la carte.

Figure 19 : Classification du 28 août 2019 en zone B

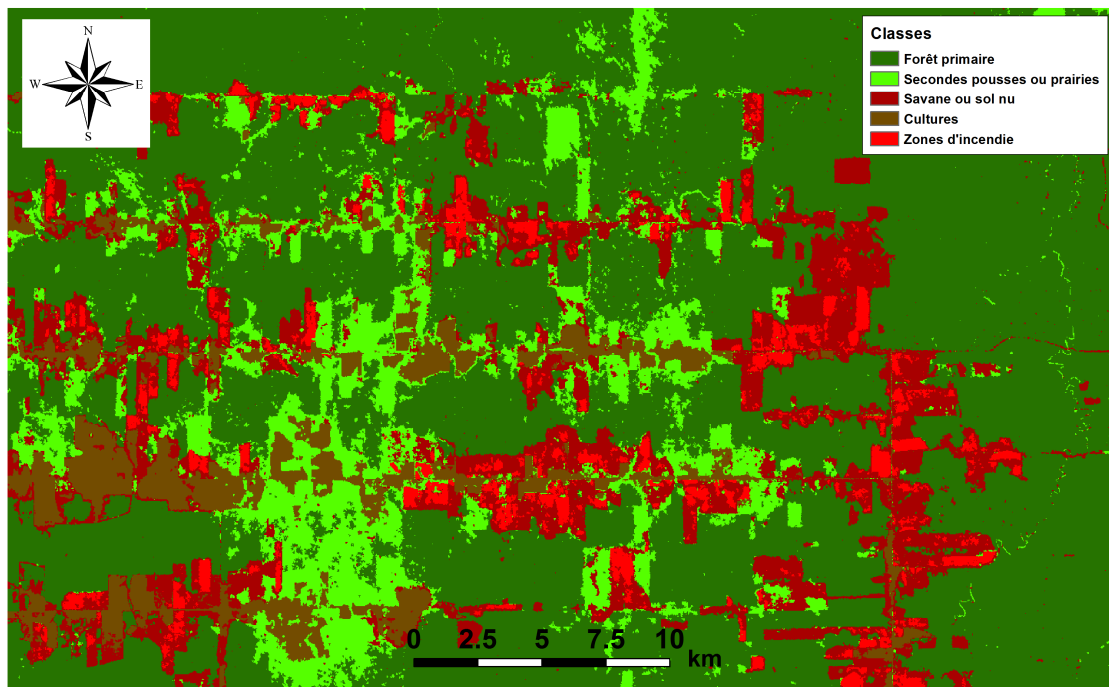
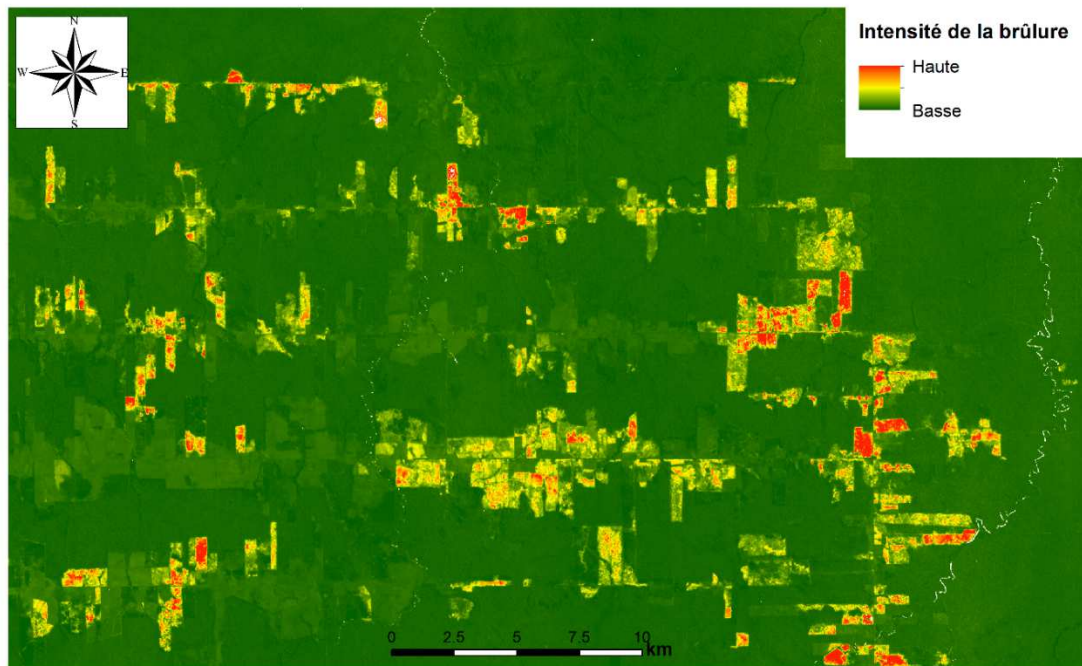




Figure 20 : Burn Area Index du 28 août 2019 en zone B



En comparant ces deux figures, nous pouvons voir que la classification a été bien réalisée pour les « zones d'incendies » et que nous pouvons nous fier aux chiffres qui en résultent. Dans une autre mesure, nous pouvons observer à la figure 19 que la classe « secondes pousses ou prairies » prend une forme inhabituelle au sud de l'image. Cela provient de la fumée résultant des incendies qui faussent le NDVI et présentent à Grass les pixels comme faisant partie de la classe « secondes pousses ou prairies » alors qu'en réalité, c'est de la forêt primaire qui se trouve sous la fumée.

Malgré cette légère lacune, l'avantage de cette classification est de distinguer quantitativement les différentes classes plutôt que simplement visuellement. Ainsi, nous pouvons connaître l'espace pris par chaque type d'occupation du sol.

Nous pouvons également estimer la quantité de déforestation pour cette période en comparant la classe « forêt primaire » entre le 25 juin et le 28 août. La zone A aurait connu une augmentation de ses forêts de  $15 \text{ km}^2$  contre une diminution de  $55.82 \text{ km}^2$  pour la zone B. L'augmentation de forêt primaire en zone A est à rejeter immédiatement puisqu'il est impossible dans la réalité qu'une quelconque classe devienne de la forêt primaire étant donné que factuellement, une forêt primaire détruite est une forêt primaire perdue. Cette augmentation est certainement due à une légère surestimation de la classe « secondes pousses ou prairies » au 25 juin 2019 puisque cela aurait comme conséquence de nous avoir donné une mauvaise estimation de la forêt primaire à la base. Ces deux classes étant très proches au niveau du NDVI, la signature spectrale a pu être mal calibrée pour

certain pixels. La diminution de forêt dans la zone B semble plus vraisemblable, bien qu'il soit possible qu'elle soit un peu surestimée étant donné que cette diminution se serait passée sur deux mois alors qu'on sait que l'année précédente, la déforestation était de 45 km<sup>2</sup> sur toute l'année.

Afin de connaître le type de surface qui est majoritairement incendiée dans nos zones d'étude, nous avons décidé de passer les classifications SMAP sur ArcMap. Nous avons ainsi réalisé des matrices de transition entre chaque date à l'aide de l'outil *Tabulate Area (Spatial Analyst)* pour aboutir à un fichier Excel représentant la surface pour chaque classe qui est passé dans une autre classe ou restée dans la même. Nous prenons comme exemple la matrice de transition de la zone B entre le 27 juillet et le 28 août.

Tableau 2 : Matrice de transition entre 27 juillet et 28 août en hectares (zone B)

De \ Vers	Forêt primaire	Secondes pousses ou prairies	Savane ou sol nu	Cultures	Zones d'incendies
Forêt primaire	72504	4724	2576	16	97
Secondes pousses ou prairies	2955	6482	7467	338	1611
Savane ou sol nu	338	947	3469	220	1046
Cultures	3	1092	1482	6600	1002
Zone d'incendies	8	62	347	28	102

L'interprétation de ce tableau est la suivante : entre le 27 juillet et le 28 août 4724 hectares de forêt primaires ont été rasés pour donner des secondes pousses ou des prairies. De même, les cultures ont été entamées sur des sols qui étaient en majorité des secondes pousses ou des prairies le 27 juillet avec 337.53 hectares transformés alors que presque 6600 hectares étaient en cultures le 27 juillet et n'ont pas changé d'utilisation depuis. Les incendies quant à eux ont été principalement utilisés pour débarrasser des zones de secondes pousses ou prairies suivis de très près par les zones de savane et de cultures avec respectivement 1611, 1045 et 1002 hectares incendiées dans ces zones.

Nous pouvons voir que la classe « secondes pousses ou prairies » connaît la transformation vers la classe « forêt primaire » la plus importante avec près de trois mille hectares. Comme nous l'avons mentionné plus tôt, il n'est théoriquement pas possible qu'un terrain défriché redevienne forêt primaire, du moins pas sur une période de quelques mois. Nous pouvons expliquer cela par le fait que ces deux classes connaissent une valeur NDVI souvent très proche car bien que les prairies soient plus clairement et facilement distinguables, les secondes pousses sont très proches de la forêt primaire, tant visuellement qu'avec le NDVI et c'est pourquoi la classification supervisée a octroyé des pixels à la classe « forêt primaire » alors qu'ils auraient dû rester dans la classe « secondes pousses ou prairies ».

Notre premier résultat face à cette matrice de transition nous permet de voir que le feu n'est pas systématiquement utilisé pour transformer les déchets de forêt primaire en terrain exploitable par l'homme. En effet, bien qu'un mois se soit écoulé, les marques d'un incendie ayant servi pour débarrasser le bois mort résultant du défrichement de la forêt primaire seraient encore visibles. Les deux figures suivantes montrent bien cette dynamique.

Figure 21 : Transformation de la forêt primaire en zone A

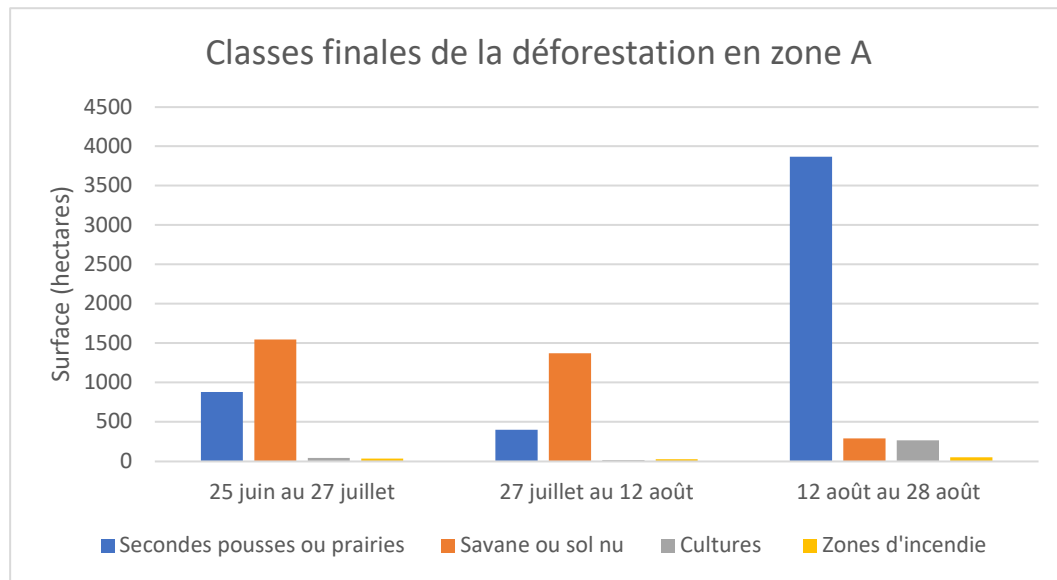
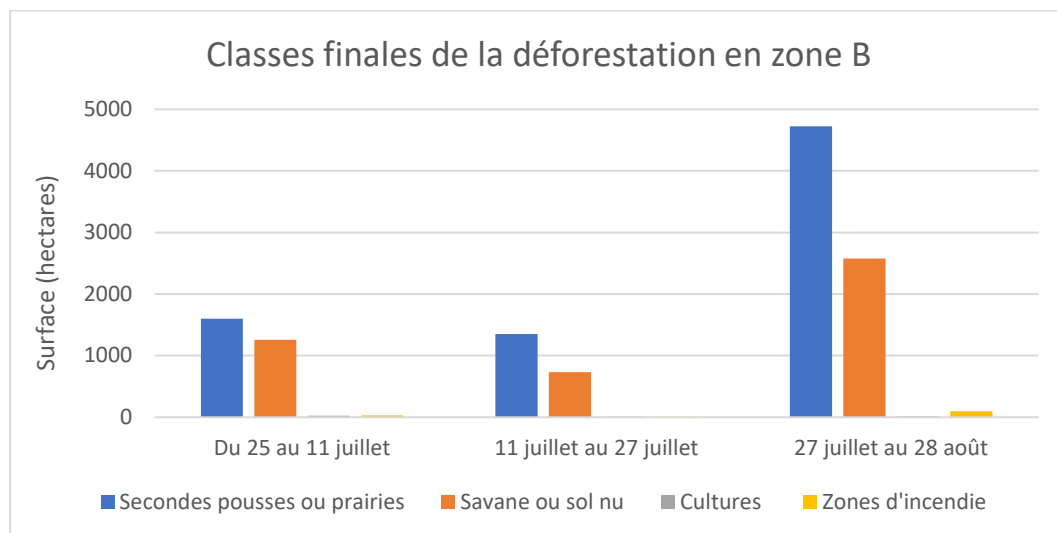


Figure 22 : Transformation de la forêt primaire en zone B



Nos résultats concernant la transformation de la forêt primaire confirment l'hypothèse avancée par Fernandes et al. (2011) stipulant que la forêt tropicale amazonienne est trop humide pour qu'un feu naturel puisse s'y déclencher. De même, il semble difficile pour les instigateurs des incendies de brûler instantanément une parcelle de forêt primaire. Comme nous le verrons plus loin, nous

observons majoritairement le passage par une classe intermédiaire entre l'état de forêt primaire et une zone d'incendie.

De manière générale, nous pouvons constater que la déforestation est plus forte durant le mois d'août pour les deux zones. La forêt est d'ailleurs transformée principalement en secondes pousses ou en prairies durant cette période. Ainsi, nous pouvons dire que lorsque la forêt primaire est détruite, c'est essentiellement pour être transformée en prairies ou en « savane ou sol nu ». Les cultures et les zones d'incendies sont responsables dans une moindre mesure de la déforestation directe. Les incendies sont plutôt un outil tandis que les cultures sont avant tout une finalité. Comme le suggère le tableau 2, les cultures sont faites à partir d'un terrain déjà défriché comme une zone de prairies ou de « savane ou sol nu ».

Dans la dynamique de la déforestation, notre classification a permis de voir que la forêt primaire passe d'abord par une étape intermédiaire, principalement des zones de prairies ou de savane/sol nu avant d'être transformé en cultures. Nous verrons dans la dynamique des incendies que les cultures sont également souvent mises à feu.

Nous allons voir ensuite la dynamique des incendies en analysant les zones sources des incendies. Pour commencer, nous tenons à préciser que les incendies de l'été ont eu lieu principalement entre le 27 juillet et le 28 août avec quelques 2641 hectares incendiés en zone A et 3755 hectares en zone B.

Figure 23 : Type de sol des incendies (zone A)

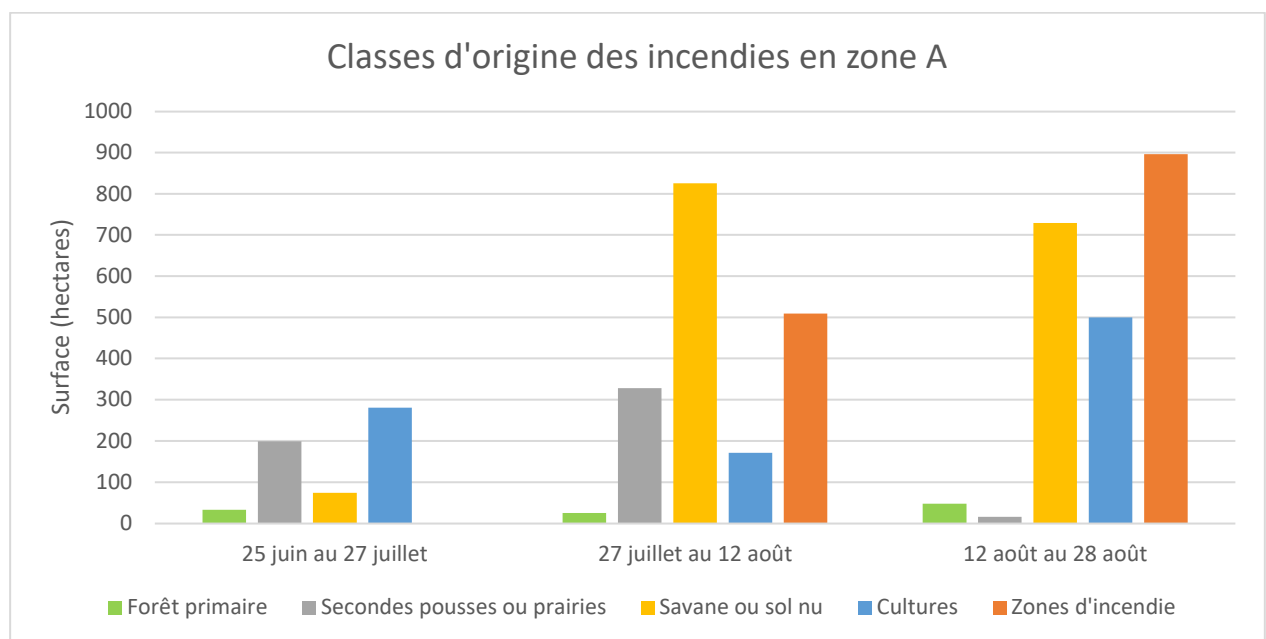
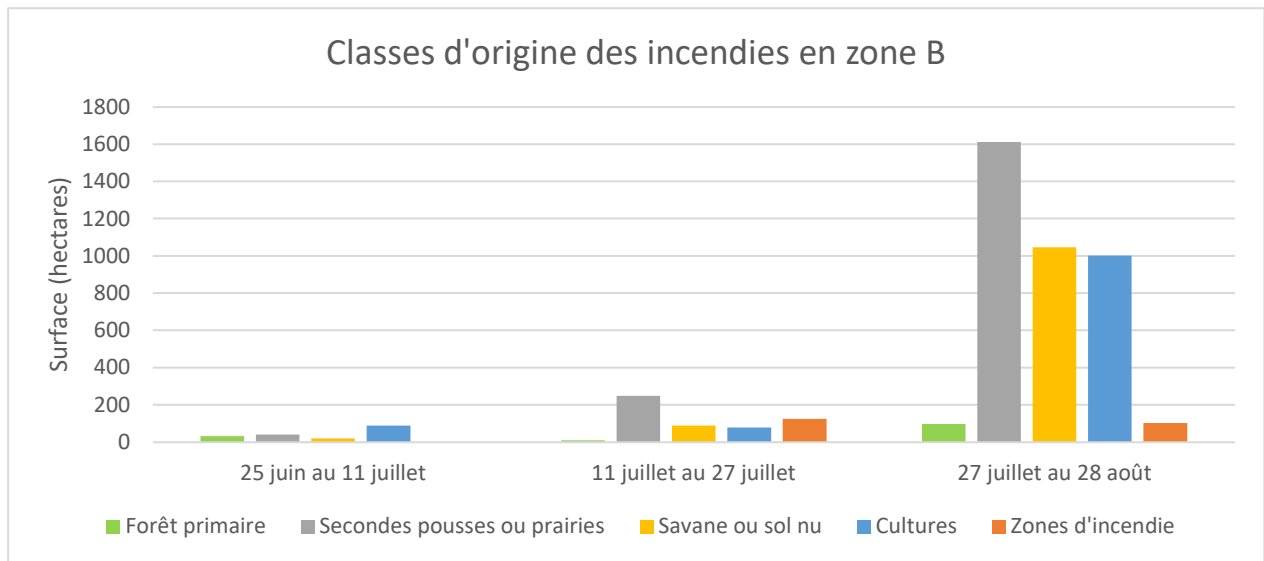




Figure 24 : Type de sol des incendies (zone B)



Nous pouvons voir que les incendies ont été bien plus importants en zone B avec une surface incendiée de 4270 hectares contre 2957 hectares pour la zone A. Nous pouvons expliquer cela par le fait que la zone B est une zone de grandes exploitations, les fazendas, qui laissent très peu de place à la forêt primaire et ont une proportion beaucoup plus importante qu'en zone A. Les moyens mis en place permettent de défricher plus rapidement la forêt et de ce fait, les incendies nécessaires à débarrasser le bois mort sont plus importants.

Les zones subissant la majorité des incendies varient aussi entre A et B. Les incendies en zone A débutent plus tôt dans l'année et sont principalement réalisés dans les zones de savane ou de sol nu. Les incendies ayant été pratiqués entre le 25 juin et le 27 juillet dans cette zone n'ont d'ailleurs pas été mis à profit puisque la quasi-totalité des terrains incendiés (509 hectares) à cette période-là le sont restés jusqu'au 12 août (« zones d'incendies » s'élève à 582 hectares au 12 août).

Pour B, ce sont les secondes pousses ou prairies qui sont principalement mis à feu. En A, les incendies connaissent un plus grand laps de temps avant que le terrain ne soit utilisé à autre chose car nous pouvons constater qu'une plus grande proportion des pixels de la classe « zones d'incendie » reste dans cette même classe entre le 27 juillet et le 28 août. Nous pouvons donc imaginer que ces terrains sont laissés à l'abandon par les agriculteurs qui n'en ont pas l'utilité immédiate ou que les mêmes zones sont remises à feu plusieurs fois. En B, ce sont les zones de secondes pousses et de prairies qui ont subi le plus d'incendies. De manière générale, les zones principales ayant subi les incendies de cet été sont partagées entre les zones de culture, de savane et de secondes pousses ou prairies.

Pour terminer, nous pouvons voir que les incendies ne surviennent que de manière infime dans le défrichement de la forêt primaire et qu'ils interviennent après qu'une parcelle ait été déboisée. Comme nous avons pu le voir, l'utilisation du feu change de fonction selon les tendances d'exploitations qui se font dans une région.

## Limites

La classification supervisée n'a peut-être pas identifié les pixels de manière chirurgicale, amenant nos calculs à être potentiellement légèrement biaisés lors de l'estimation de forêts défrichées puis mises à feu. Nous avons pu le constater notamment dans le fait que certaines classes étaient considérées comme revenues à l'état de forêt primaire. Ce problème est notamment relaté par Lu, Moran et Batistella (2002) qui expliquent que c'est l'hétérogénéité du couvert végétal qui peut poser un problème puisqu'un seul pixel contient 900 mètres carrés et peut donc contenir plusieurs classes. Cet argument peut notamment expliquer en partie la mauvaise distribution des pixels.

Une autre problématique liée à la classification supervisée est que, comme de manière générale en télédétection, la couverture nuageuse est un gros inconvénient. Dans notre cas présent, ce sont les volutes de fumée provenant des incendies qui ont pu fausser la classification, puisque le NDVI à ces endroits est plus élevé que la couverture du sol en dessous, et fausse donc la classification. Pour pallier en partie à ce problème, nous avons forcé la classification des zones d'entraînement dans les zones enfumées en forêt primaire là où c'était nécessaire.

Les classes ont été interprétées via une appréciation visuelle de la carte. Nous avons en effet choisi l'identification des classes par suite de la lecture de caractéristiques végétales de chaque milieu et avec la précision d'une image à résolution de 15 mètres ce qui n'est pas la meilleure résolution pour différencier des couvertures de sol. Ce choix arbitraire a pu éventuellement conduire à des erreurs lors de la création de signatures spectrales via la classification supervisée.

## Discussion et conclusions

Au cours de ce travail, nous avons testé plusieurs outils de télédétection afin d'obtenir le résultat le plus pertinent. Nous avons tenté de calculer la déforestation grâce au NDVI mais sans grands succès. Nous sommes aussi passés par le « tasseled cap » qui ne nous a pas donné plus grande satisfaction que le NDVI. Nous avons testé la classification non supervisée et la classification par maximum de vraisemblance mais ces deux outils n'ont pas donné des cartes assez ressemblantes à la réalité. Nous nous sommes donc appuyés sur la classification supervisée et le SMAP qui nous ont donné

les cartes les plus proches de la réalité visuelle de nos zones d'études. Bien que ces cartes puissent sembler un peu rudimentaire, les chiffres et les résultats que nous avons pu en tirer nous donne satisfaction quant à notre question de départ qui consistait à décortiquer la dynamique des incendies qui ont eu lieu à travers l'Amazonie durant cet été. Nous avons pu constater que ce n'était clairement pas la forêt primaire qui était principalement touchée par ces incendies, mais plutôt tous les milieux résultant de la déforestation car comme le suggèrent Lima et al. (2012), les incendies prévalent le plus souvent dans les zones de végétation préalablement dégradées. Nous avons d'ailleurs pu démontrer que les incendies surviennent plutôt sur les cultures, les secondes pousses et les pâturages et sont donc plutôt un outil agricole qu'un outil de destruction de la forêt primaire. Cependant, bien que les flammes n'impactent pas directement la forêt primaire, ou dans des conditions très particulières, elles sont tout de même un acteur important dans la facilitation de la déforestation puisqu'elles remplacent pour un coût presque nul des machines qui auraient pu être aussi efficaces mais qui auraient nécessité un capital beaucoup plus important.

Ce travail aura contribué à apporter un éclairage non seulement sur la relation entre déforestation et incendies mais également une information quantifiée sur le type de couverture du sol où surviennent les incendies dans le nord du Rondônia.

Une recherche future pourrait donc s'atteler à identifier les zones à risques où pourraient survenir les incendies de manière à aider les acteurs luttant contre ce phénomène.

## Bibliographie

Barona, Elizabeth. Ramankutty, Navin Hyman, Glenn. (2010). The rôle of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*. Vol.5, pp. 1-10.

Brown, J. Christopher. Jepson, Wendy. P. Price, Kevin. (2004). Expansion of Mechanized Agriculture and Land-Cover Change in Southern Rondônia, Brazil. *Journal of Latin America Geography*. Vol.3, n°1, pp. 96-102.

Déforestation et développement agricole dans l'Etat du Rondônia. *Centre national d'études spatiales*. Repéré à <https://geoimage.cnes.fr/fr/geoimage/deforestation-et-developpement-agricole-dans-letat-du-rondonia> le 20 octobre 2019

Droulers, Martine. Le Tourneau, François-Michel. Machado, Luciana (2001). Conflits d'usage de l'espace au Rondônia (Amazonie brésilienne), *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Politique, Culture, Représentations, document 194, consulté le 14 octobre 2019. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/3772> ; DOI : 10.4000/cybergeo.3772

Fernandes, K. Baethgen, W. Bernardes, S. DeFries, R. DeWitt, D.G. Goddard, L. Lavado, W. Lee, D.E. Padoch, C. Pinedo-Vasquez, M. Uriarte, M. (2011). North Tropical Atlantic influence on western Amazon fire season variability. *Geophysical Research Letters*. Vol. 38, n°12. <http://dx.doi.org/10.1029/2011GL047392>.

Hamilton James, Charlie. (2019, 30 août). As the Amazon burns, cattle ranchers are blamed. But it's complicated. *National Geographic* [En ligne], consulté le 15 octobre 2019. URL : <https://www.nationalgeographic.com/culture/2019/08/amazon-burns-cattle-ranchers-blamed-complicated-relationship/>

Hyde, Jesse. (2019, 4 octobre). Cows are killing the Amazon. Pledges from Walmart and Nike didn't help save it. *Los Angeles Times*. Repéré à <https://www.latimes.com/world-nation/story/2019-10-04/why-the-amazon-continues-to-vanish>

Imbernon, Jacques (2000). Déforestation et pression démographique au Rondônia, Brésil. *BOIS ET FORÊTS DES TROPIQUES*. Vol. 266, n°4, pp. 23-33.

Kauffman, John Boone. (1990). Deforestation, Fire Susceptibility, and Potential Tree Responses to Fire in the Eastern Amazon. *Ecology*. Vol.71, n°2, pp.437-449.

Lai, K.K. Rebecca. Lu, Denise. Migliozi, Blacki. (2019, 24 août). What Satellite Imagery Tells Us About the Amazon Rain Forest Fires. *New York Times* [En ligne], consulté le 15 octobre 2019. URL : <https://www.nytimes.com/interactive/2019/08/24/world/americas/amazon-rain-forest-fire-maps.html>

Le Tourneau, François-Michel (2015). Le Brésil maîtrise-t-il (enfin) la déforestation en Amazonie ?, *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 753, consulté le 13 octobre 2019. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/27325> ; DOI : 10.4000/cybergeo.27325

Lima, André. Silva, Thiago Sann Freire. Oliveira e Cruz de Aragão, Luiz Eduardo. Morais de Feitas, Ramon. Adami, Marcos. Formaggio, Antônio Roberto. Edemir, Yosio (2012). Land use and land cover changes determine the spatial relationship between fire and deforestation in the Brazilian Amazon. *Applied Geography*. Vol. 39, pp. 239-246.

Lu, Dengsheng. Moran, Emilio. Batistella, Mateus (2002). Linear mixture model applied to Amazonian vegetation classification. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 87, pp. 456-469.

Morton, D. C., Defries, R. S., Randerson, J. T., Giglio, L., Schroeder, W., and van der Werf, G. R. (2008). Agricultural intensification increases deforestation fire activity in Amazonia, *Global Change Biology*, Vol. 14, n°10, pp.2262–2275, doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01652.x.

Pedlowski, Marcos A. Dale, Virginia H. Matricardi, Eraldo A.T. Pereira da Silva Filho, Eliomar. (1997). Patterns and impacts of deforestation in Rondônia, Brazil. *Landscape and urban planning*. Vol. 34, n°3-4, pp. 149-157.

Roberts, D. A. Numata, I. Holmes, K. Batista, G. Krug, T. Monteiro, A. Powell, B. 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*. Vol. 107, n°D20, pp- 1 -18.

Rodgers, Lucy. Stylianou, Nassos. Guibourg, Clara. Hills, Mike. Bailey, Dominic. Bryson, Mark. (2019, 30 août). The Amazon in Brazil is on fire - how bad is it ? *BBC News*. Repéré à <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-49433767>

Shimabukuro Long, Tengfei. Zhang, Zhaoming. He, Guojin. Jiao, Weili. Tang, Chao. Wu, Bingfang. Zhang, Xiaomei. Wang, Guizhou. Yin, Ranyu. (2019). 30m resolution Global Annual Burned Area Mapping based on Landsat images and Google Earth Engine. *Remote Sens*. Vol. 11, n°5

Souza da Silva, Sonaira. Fearnside, Philip Martin. Lima de Alencastro Graça, Paulo Mauricio. Brown, Irving Foster. Alencar, Ane. Willian Flores de Melo, Antonio. (2018). Dynamics of forest fires in the southwestern Amazon. *Forest Ecology and Management*. Vol. 424, pp.312-322.

Xu, H. (2005). A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing*. Vol.9, pp.589-595.

## Annexes

### Annexe 1 : Calcul des surfaces défrichées

Calcul des surfaces déforestées en km <sup>2</sup> (INPE)						
Zone A	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Minimum	0.000022	0.000882	0.066096	0.021589	0.062719	0.010711
Maximum	1.123467	0.921256	0.128129	0.618023	1.423132	1.856487
Somme	7.221729	3.392456	0.343523	3.53676	5.69606	15.010311
Moyenne	0.153654	0.199556	0.085881	0.168417	0.178002	0.224034

Calcul des surfaces déforestées en km <sup>2</sup> (INPE)						
Zone B	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Minimum	0.000881	0.000881	0.067715	0.007892	0.062937	0.063047
Maximum	1.196826	0.96695	1.134628	2.27126	3.76865	2.394806
Somme	13.736607	12.260288	11.171029	37.631119	47.871593	44.993532
Moyenne	0.169588	0.191567	0.22798	0.211411	0.334766	0.3103

### Annexe 2 : Classes d'origine des incendies

Zone A	25 juin au 27 juillet	27 juillet au 12 août	12 août au 28 août
Forêt primaire	33.02524163	25.01639556	47.8731023
Secondes pousses ou prairies	199.0513201	327.7327793	16.01769212
Savane ou sol nu	73.78936821	825.3610796	728.8049917
Cultures	280.3995992	171.3353135	499.7879891
Zones d'incendie	0	509.4166018	895.7309405

Zone B	25 juin au 11 juillet	11 juillet au 27 juillet	27 juillet au 28 août
Forêt primaire	31.79	8.375290351	96.63103813
Secondes pousses ou prairies	40.98	247.6564351	1611.117681
Savane ou sol nu	19.00	87.80546336	1045.920668
Cultures	87.81	78.25943349	1002.062965
Zones d'incendie	0.00	124.9989571	102.3046219

### Annexe 3 : Matrices de transition

Changement d'aire (ha) entre le 25 juin et le 27 juillet (zone A)					
De \ Vers	Forêt primaire	Secondes pousses ou prairies	Savane ou sol nu	Cultures	Zones d'incendie
Forêt primaire	110623.22	878.54	1546.16	39.95	33.03
Secondes pousses ou prairies	3465.22	8927.79	1733.78	568.00	199.05
Savane ou sol nu	35.99	243.41	1081.91	70.64	73.79
Cultures	111.76	654.48	1560.20	3335.64	280.40
Zones d'incendie	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Changement d'aire (ha) entre le 27 juillet et le 12 août (zone A)					
<b>De \ Vers</b>	Forêt primaire	Secondes pousses ou prairies	Savane ou sol nu	Cultures	Zones d'incendie
Forêt primaire	112426.20	400.53	1370.05	14.40	25.02
Secondes pousses ou prairies	3030.22	1651.62	3901.03	1793.62	327.73
Savane ou sol nu	1142.21	40.49	2420.29	1493.69	825.36
Cultures	11.52	5.49	598.23	3227.65	171.34
Zones d'incendie	3.33	0.00	29.16	44.36	509.42

Changement d'aire (ha) entre le 12 août et le 28 août (zone A)					
<b>De \ Vers</b>	Forêt primaire	Secondes pousses ou prairies	Savane ou sol nu	Cultures	Zones d'incendie
Forêt primaire	112139.77	3868.81	290.03	266.99	47.87
Secondes pousses ou prairies	525.70	1366.27	157.66	32.49	16.02
Savane ou sol nu	1896.93	2730.30	1655.58	1307.15	728.80
Cultures	94.58	1097.39	1046.01	3835.97	499.79
Zones d'incendie	29.25	29.25	639.54	265.10	895.73

Changement d'aire (ha) entre le 25 juin et le 11 juillet (zone B)					
<b>De \ Vers</b>	Forêt primaire	Secondes pousses ou prairies	Savane ou sol nu	Cultures	Zones d'incendie
Forêt primaire	78483.86	1599.41	1254.94	24.95	31.79
Secondes pousses ou prairies	1860.31	17475.72	956.13	1114.45	40.98
Savane ou sol nu	90.96	354.19	2536.54	284.04	19.00
Cultures	3.96	471.27	414.35	8410.95	87.81
Zones d'incendie	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Changement d'aire (ha) entre le 11 juillet et le 27 juillet (zone B)					
<b>De \ Vers</b>	Forêt primaire	Secondes pousses ou prairies	Savane ou sol nu	Cultures	Zones d'incendie
Forêt primaire	78341.03	1350.22	732.70	6.75	8.38
Secondes pousses ou prairies	1157.23	16437.09	1215.14	843.47	247.66
Savane ou sol nu	382.29	504.05	3731.42	456.41	87.81
Cultures	5.40	556.73	334.29	8859.71	78.26
Zones d'incendie	30.89	4.77	5.85	13.06	125.00

Changement d'aire (ha) entre le 27 juillet et le 28 août (zone B)					
<b>De \ Vers</b>	Forêt primaire	Secondes pousses ou prairies	Savane ou sol nu	Cultures	Zones d'incendie
Forêt primaire	72504.35	4724.38	2575.63	15.85	96.63
Secondes pousses ou prairies	2955.49	6482.11	7466.62	337.53	1611.12
Savane ou sol nu	337.89	947.04	3468.72	219.83	1045.92
Cultures	3.33	1092.21	1481.89	6599.91	1002.06
Zones d'incendie	7.83	61.87	346.99	28.10	102.30