

## Détection de sites d'orpaillage par la télédétection dans le Parc National de la Garamba en République Démocratique du Congo

**Auteur** : Scaillet, François

**Promoteur(s)** : Lejeune, Philippe; 18131

**Faculté** : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme** : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

**Année académique** : 2021-2022

**URI/URL** : <http://hdl.handle.net/2268.2/16250>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

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

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

---



---

---

DÉTECTION DE SITES D'ORPAILLAGE PAR LA TÉLÉDÉTECTION  
DANS LE PARC DE LA GARAMBA EN RÉPUBLIQUE  
DÉMOCRATIQUE DU CONGO

---

---

*Auteur :*

FRANÇOIS SCAILLET

*Promoteurs :*

PR. PHILIPPE LEJEUNE

IR. THIERRY NORMAND

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER  
BIOINGÉNIEUR EN SCIENCE ET TECHNOLOGIE DE L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

## Remerciements

Merci à Thierry, Stéphanie et l'ex-lapin de m'avoir si bien accueilli au Parc National de la Garamba et de m'avoir suivi pendant ce travail d'étude. Et surtout merci de m'avoir permis de vivre cette expérience incroyable.

Merci au Professeur Philippe Lejeune de m'avoir donné la possibilité de réaliser ce travail de fin d'études ainsi que d'avoir accepté d'être co-promoteur.

Merci à Nicolas Latte pour son aide précieuse et pour ses conseils avisés.

Merci à Gregory de m'avoir relu attentivement et de m'avoir donné son avis d'expert.

Merci à Nell d'avoir été à mes côtés durant tout ce travail. Merci de me transmettre cette joie de vivre. Heureusement que tu étais là pour me faire rire même dans les moments les plus stressants. J'espère vivre encore plein de beaux moments à tes côtés.

Merci à toi Bourl d'être venu me rejoindre à Gembloux et de m'avoir fait vivre tant de beaux moments. Je suis impatient de vivre en colocation avec toi l'année prochaine.

Merci au kot corquette d'avoir été ma famille pendant ces années d'études. Bossch, Calvi et Germouille, vous serez à jamais dans mon coeur. Impatient de commencer cette nouvelle vie avec vous, pas loin.

Merci à mes deux équipes Bar de m'avoir fait vivre mes 2,5 plus belles années d'études. Plus particulièrement à Johnny et Remy d'avoir été mes collègues, mes amis et plus encore.

Merci aux pingouins du Comité de Bienvenue qui ont été ma seconde famille et qui m'ont donné l'amour du folkore gembloutois. Plus particulièrement à vous, Bosssch, Laurare, Trollinette, Gypsouille, Flèchare, Hibou, la chaude buse et Johnny. On se sera quand même bien amusé.

Merci au comité Ag 2021-2022 pour avoir partagé cette expérience avec moi. Malgré le covid, on aura quand même vécu de belles choses.

Enfin merci à mes parents de m'avoir donné la possibilité de réaliser ces magnifiques études. Merci de m'avoir supporté et encouragé pendant ces 5 dernières années. Merci de m'avoir suivi jusqu'au bout, jusqu'aux dernières lignes de ce travail. Merci maman, papa, Malérie et Eric de m'avoir transmis toutes vos belles valeurs qui ont contribué à la personne que je suis devenue aujourd'hui. Je suis impatient de rentrer dans la vie active avec vous pas trop loin. Et Paupau. . . Merci à toi d'être une petite soeur aussi géniale.

## Résumé

La République Démocratique du Congo, regorgeant de sols riches en minerais, est fortement impactée par les activités liées à l’orpaillage. Plus particulièrement, la Province du Haut-Uélé, dans laquelle se situe le Parc National de la Garamba, est réputée pour ses sols riches en gisements aurifères. Afin d’éradiquer ces zones de prospection, des lois ont été érigées par les instances gouvernementales congolaises. Ainsi, l’un des objectifs du parc National de la Garamba dans lequel s’inscrit cette étude, est de surveiller l’évolution de ces sites d’extraction dans les domaines de chasse entourant le parc de la Garamba. Cependant, la nature très dynamique de cette activité extractive et sa propagation dans les zones rurales et reculées rendent sa cartographie et son suivi très difficiles.

Grâce à la disponibilité croissante d’images satellites à haute résolution, la télédétection peut être rentable et efficace pour ce type d’application. Le présent travail utilise des images optiques à haute résolution proposées par LATTE & LEJEUNE, 2020 issues de la fusion d’images Sentinel-2 et PlanetScope afin d’identifier les zones d’orpaillage et suivre leur dynamique d’expansion. Ces premières données seront comparées à des images PlanetScope, déjà utilisées par les gestionnaires du parc. Le modèle proposé utilise une approche basée sur les pixels par le biais de la segmentation sémantique.

Sur base des images “super-résolues” et PlanetScope, le modèle a respectivement calculé une surface totale allouée aux sites d’orpaillage de :

- 7,82 et 12,18 ha dans une zone d’étude entourant les villages de Tekadje et de Gbere en 2020.
- 0.364 et 1.73 ha dans une zone d’étude au nord du village Sambia en 2022.
- 350,68 et 164,37 ha dans une zone d’étude au sud du village Sambia en 2022.

De manière générale, les résultats basés sur les images PlanetScope ont tendance à sur-évaluer la superficie occupée par les sites d’orpaillage, hormis pour la région Sambia sud. En effet, les images PlanetScope créent plus de faux positifs. Elles arrivent à moins bien différencier les signatures spectrales définissant les sites d’orpaillage des autres occupations de sol.

Les performances du modèle varient également selon les régions étudiées. Plus la quantité de données d’entraînement est suffisante et plus ces données sont certifiées grâce aux connaissances du terrain, meilleures seront les prédictions apportées par le modèle. Lorsque la phase d’entraînement manque de données, il est conseillé de diminuer les exigences du modèle. Les performances seront également meilleures dans des régions où les sites d’orpaillage se différencient fortement des autres occupations de sols.

Cette étude propose également un suivi temporel afin de surveiller l’évolution des sites d’orpaillage. Cette fonction a fourni des résultats exploitables pour les régions de Tekadje/Gbere et de Sambia nord. Cependant, les signatures spectrales des images varient selon les années rendant les résultats moins comparables. Afin d’améliorer les précisions de cette fonction, une perspective serait de réaliser un étalonnage radiométrique sur les différentes images.

### Mots clés :

Télédétection, Orpaillage, Multispectrale, Segmentation sémantique, Détection de changement, République Démocratique du Congo, Parc National de la Garamba, Sentinel-2, PlanetScope

## Abstract

The Democratic Republic of Congo, full of ore-rich soils, is very impacted by gold mining activities. More specifically, the province of Haut-Uélé, where the National Park of Garamba is located, is known for its soils rich in gold deposits. To stop these prospecting areas, laws have been made by government authorities of Congo. One of the goals of the National Park of Garamba, in which this study is included, is to monitor the evolution of these extraction sites in the hunting grounds around the park of Garamba. However, the very dynamic nature of this extractive activity and its spread in rural and remote areas make his mapping and his monitoring very difficult.

Thanks to the increasing availability of high-resolution satellite images, remote sensing can be profitable and efficient for this type of application. This work uses high-resolution optical images proposed by LATTE LEJEUNE, 2020, coming from images fusion between Sentinel-2 and PlanetScope in order to identify gold mining areas and to follow their dynamic of expansion. These first data will be compared to PlanetScope images, already used by the park managers. The proposed model uses an approach based on pixels through semantic segmentation.

Based on “super-resolved” images and PlanetScope, the model has respectively calculated a total surface allocated to gold mining of :

- 7.82 and 12.18 ha in a study area surrounding the villages of Tekadje and Gbere in 2020.
- 0.364 and 1.73 ha in a study area in the north of Sambia village in 2022.
- 350.68 and 164.37 ha in a study area in the south of Sambia village in 2022.

In general, the results based on the PlanetScope images tend to overestimate the area occupied by gold panning sites, except for the southern Sambia region. Indeed, PlanetScope images create more false positives. They are less able to isolate the spectral signatures defining the gold panning sites from other land uses.

The performance of the model also varies according to the regions studied. The higher the amount of sufficient training data and more these data are certified thanks to the knowledge of the field, better will be the predictions provided by the model. Performances will also be better in the regions where the gold panning sites differ greatly from other land uses.

This study also proposes a temporal follow-up in order to monitor the evolution of gold panning sites. This function provided usable results for the Tekadje/Gbere and Sambia North regions. However, the spectral signature of the images varies according to the years making the results less comparable. In order to improve the precision of this function, one prospect would be to carry out a radiometric calibration on the different images.

### **Keywords :**

Remote sensing, Gold panning, Multispectral, Semantic segmentation, Change detection, Democratic Republic of Congo, Garamba National Park, Sentinel-2, PlanetScope

---

# Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>14</b>
1.1	African Parks . . . . .	15
1.2	Parc National de la Garamba . . . . .	15
1.3	Contexte social . . . . .	16
1.4	Lois . . . . .	16
1.5	Téledétection (état de l’art) . . . . .	17
1.5.1	Programmes spatiaux . . . . .	17
1.5.2	Images multi-spectrales . . . . .	18
1.5.3	Amplification des contrastes . . . . .	18
1.5.4	Modèles de détection . . . . .	18
1.6	Ojectifs . . . . .	20
<b>2</b>	<b>Matériels et méthodes</b>	<b>21</b>
2.1	Zone d’étude . . . . .	21
2.2	Fonctionnement d’un site d’orpaillage . . . . .	24
2.3	Acquisition des données de terrain . . . . .	25
2.4	Acquisition des données images . . . . .	26
2.4.1	Images PlanetScope . . . . .	27
2.4.2	images “super-résolues ” . . . . .	29
2.5	Méthodologie . . . . .	29
2.6	Pré-traitement . . . . .	30
2.6.1	Indices spectraux . . . . .	30
2.6.2	Amplification des contrastes . . . . .	33
2.7	Entraînement du modèle . . . . .	38
2.7.1	Quantiles spectraux . . . . .	38
2.7.2	Seuillage . . . . .	39
2.7.3	Tamissage . . . . .	41
2.7.4	Quantiles sur les formes et sur les statistiques descriptives . . . . .	42
2.8	Application du modèle . . . . .	44
2.8.1	Seuillage sur les valeurs spectrales des indices spectraux amplifiés et normalisés	45
2.8.2	Tamissage . . . . .	46
2.8.3	Filtre sur les formes et les statistiques descriptives . . . . .	46
2.9	Suivi temporel . . . . .	47
2.10	Contrôle des prédictions par survol aérien . . . . .	47
<b>3</b>	<b>Résultats</b>	<b>48</b>
3.1	Images super-résolues . . . . .	49
3.1.1	Zone Tekadje/Gbere . . . . .	49
3.1.2	Zone Sambia nord . . . . .	55
3.1.3	Zone Sambia sud . . . . .	57
3.2	Images PlanetScope . . . . .	61

3.2.1	Zone Tekadje/Gbere . . . . .	61
3.2.2	Zone Sambia nord . . . . .	63
3.2.3	Zone Sambia sud . . . . .	65
3.3	Comparaison des images Sentinel-2/PlanetScope . . . . .	71
3.3.1	Suivi temporel . . . . .	73
3.4	Ortho-images acquises lors des survols aériens . . . . .	74
<b>4</b>	<b>Discussion</b>	<b>75</b>
4.1	Années de référence . . . . .	77
4.1.1	Zone Tekadje/Gbere - 2020 . . . . .	77
4.1.2	Zone Sambia nord - 2022 . . . . .	78
4.1.3	Sambia sud - 2022 . . . . .	80
4.2	Suivi temporel . . . . .	82
4.3	Contrôle des prédictions par survol aérien . . . . .	83
<b>5</b>	<b>Perspectives</b>	<b>84</b>
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>85</b>
<b>A</b>	<b>Caractéristiques des données</b>	<b>91</b>
A.1	Sentinel-2/PlanetScope . . . . .	91
A.2	PlanetScope . . . . .	91
<b>B</b>	<b>Indices spectraux</b>	<b>92</b>
B.1	Sentinel-2/PlanetScope . . . . .	92
B.2	PlanetScope . . . . .	93
<b>C</b>	<b>Images transformées amplifiées et normalisées</b>	<b>94</b>
C.1	Exemple de différentes échelles gaussiennes . . . . .	94
C.2	Echelles gaussiennes sélectionnées . . . . .	96
C.2.1	images “super-résolues ” . . . . .	96
C.2.2	Images PlanetScope . . . . .	96
C.3	Région Tekadje . . . . .	98
<b>D</b>	<b>images “super-résolues ”</b>	<b>106</b>
D.1	Zones détectées par le modèle dans la Région de Tekadje/Gbere en 2020 . . . . .	106
D.2	Sites détectés par le modèle dans la Région de Sambia nord en 2022 grâce à des images “super-résolues ” . . . . .	115
<b>E</b>	<b>PlanetScope</b>	<b>118</b>
E.1	Zones détectées par le modèle dans la Région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images PlanetScope . . . . .	118
E.2	Sites détectés par le modèle dans la Région de Sambia nord en 2022 grâce à des images PlanetScope . . . . .	125
<b>F</b>	<b>Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d’orpaillage et l’ensemble des étendues étudiées</b>	<b>128</b>

<b>G</b>	<b>Différences de signatures spectrales entre sites d'orpillage et terres brûlées sur base des indices de terres brûlées (NBRI et BAI) amplifiés pour les zones brûlées et normalisés</b>	<b>131</b>
<b>H</b>	<b>Comparaison des différentes bandes spectrales utilisées lors des calculs des indices spectraux selon différentes dates</b>	<b>134</b>

---



## Table des figures

1	Frontières de la RDC et du PNG . . . . .	15
2	Zones d'étude au sein du parc national de la Garamba et ses domaines de chasse . . .	22
3	Illustration de la couverture terrestre dans les trois zones d'étude (Tekadje/Gbere, Sambia nord et Sambia sud . . . . .	23
4	Exemple d'un site d'orpaillage (Kwa sasa) avec pompe à essence et écluses bordées d'un «tapis de mineur» . . . . .	24
5	Objets portant à confusion lors de l'interprétation des images . . . . .	25
6	Diagramme de classe de l'acquisition des données PlanetScope . . . . .	27
7	Organigramme de l'acquisition des données sur la plateforme PlanetScope . . . . .	27
8	Organigramme du mosaïquage des tuiles PlanetScope . . . . .	28
9	Organigramme général . . . . .	29
10	Site d'orpaillage Ouest Gbere . . . . .	30
11	Illustration d'un noyau gaussien de second ordre . (a) Visualisation tridimensionnelle; (b) Visualisation planaire. (WANG et al., 2020) . . . . .	33
12	Illustration d'un laplacien de noyau gaussien . (a) Visualisation tridimensionnelle; (b) Visualisation planaire. (WANG et al., 2020) . . . . .	34
13	Différence entre deux échelles gaussiennes . . . . .	34
14	Illustration d'une matrice d'un laplacien de noyau gaussien modifié ( $\sigma = 1$ ) . . . . .	35
15	Organigramme du choix des échelles gaussiennes $\sigma$ . . . . .	35
16	Différence entre une image NDVI « brute » et une image NDVI amplifiée et normalisée	37
17	Organigramme représentant les étapes d'entraînement du modèle . . . . .	38
18	Diagramme de classe de la définition des quantiles spectraux . . . . .	38
19	Histogramme représentant la différence des valeurs spectrales entre les sites d'orpaillage et la zone d'étude en 2020 . . . . .	39
20	Diagramme de classe de la création des masques minimums et maximums . . . . .	40
21	Diagramme de classe du tamisage . . . . .	41
22	Diagramme de classe de la définition des quantiles de forme et de statistiques descriptives	42
23	Organigramme représentant les étapes d'application du modèle . . . . .	44
24	Tamisage des masques . . . . .	46
25	Diagramme de classe de la filtration selon les formes et les statistiques descriptives . .	46
26	Sites détectés par le modèle avec des images "super-résolues" dans la région Tekadje/Gbere pour l'année 2020 . . . . .	50
27	Exemples de sites détectés par le modèle avec des images "super-résolues" sur les quatre années étudiées au nord de Tekadje . . . . .	53
28	Sites détectés par le modèle avec des images "super-résolues" sur les années 2019, 2021 et 2022 dans la région Tekadje/Gbere . . . . .	54
29	Exemple du recouvrement d'un site d'orpaillage détecté par le modèle dans la région de Sambia nord grâce à des images "super-résolues" en 2022 . . . . .	56
30	Exemple de sites d'orpaillage détectés grâce à des images "super-résolues" à l'Ouest du village Sambia en 2022 . . . . .	57
31	Sites détectés par le modèle avec des images images "super-résolues" dans la région Sambia sud pour l'année 2022 . . . . .	58

32	Sites d'orpaillage détectés par le modèle dans la région Sambia sud en 2019 . . . . .	59
33	Faux positifs créés par le modèle dans la région Sambia sud sur base d'images "super-résolues" . . . . .	60
34	Sites détectés par le modèle avec des images "super-résolues" sur l'année 2021 dans la région Sambia sud . . . . .	60
35	Sites détectés par le modèle avec des images PlanetScope dans la région Tekadje/Gbere pour l'année 2020 . . . . .	62
36	Exemple du recouvrement d'un site d'orpaillage détecté par le modèle dans la région de Sambia nord grâce à des images PlanetScope en 2022 . . . . .	64
37	Exemple de sites d'orpaillage détectés grâce à des images PlanetScope à l'Ouest du village Sambia en 2022 . . . . .	65
38	Sites détectés par le modèle avec des images images PlanetScope dans la région Sambia sud pour l'année 2022 . . . . .	66
39	Faux positifs créés par le modèle dans la région Sambia sud sur base d'images PlanetScope	67
40	Sites détectés par le modèle avec des images PlanetScope sur l'année 2020 dans la région Sambia sud . . . . .	68
41	Sites détectés par le modèle avec des images PlanetScope sur l'année 2021 dans la région Sambia sud . . . . .	69
42	Exemple de sites détectés par le modèle avec des images PlanetScope sur l'année 2021 dans la région Sambia sud au nord du village Canon . . . . .	69
43	Exemple de sites détectés par le modèle avec des images PlanetScope en Avril 2022 dans la région Sambia sud autour du village Tomeka . . . . .	70
44	Comparaison entre les deux types d'images dans la région Sambia sud pour des sites d'orpaillage près du village Canon en 2021 . . . . .	72
45	Suivi temporel pour un site au nord de Tekadje entre les années 2020 et 2021 . . . . .	73
46	Exemple d'ortho-image créée par le programme métashape . . . . .	74
47	Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d'orpaillage et l'ensemble de l'étendue Tekadje/Gbere en 2020 sur base d'images super-résolues . . . . .	75
48	Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d'orpaillage et l'ensemble de l'étendue Tekadje/Gbere en 2020 sur base d'images PlanetScope . . . . .	76
49	Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d'orpaillage et l'ensemble de l'étendue Sambia nord en 2022 sur base d'images super-résolues . . . . .	78
50	Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d'orpaillage et l'ensemble de l'étendue Sambia nord en 2022 sur base d'images PlanetScope . . . . .	79
51	Exemples de sites détectés par le modèle grâce à des images "super-résolues" dans la région Sambia sud . . . . .	80
52	Exemples de sites détectés par le modèle grâce à des images PlanetScope dans la région Sambia sud . . . . .	81
53	Illustration de différentes échelles gaussiennes $\sigma$ des images "super-résolues" NDVI amplifiée et normalisée zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 1 . . . . .	94
54	Illustration de différentes échelles gaussiennes $\sigma$ des images "super-résolues" NDVI amplifiée et normalisée zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 2 . . . . .	95
55	Illustration des échelles gaussiennes $\sigma$ sélectionnées pour les indices spectraux amplifiée et normalisée des images "super-résolues" zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 1	98

56	Illustration des échelles gaussiennes $\sigma$ sélectionnées pour les indices spectraux amplifiée et normalisée des images “super-résolues ” zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 2	99
57	Illustration des échelles gaussiennes $\sigma$ sélectionnées pour les indices spectraux amplifiée et normalisée des images “super-résolues ” zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 3	100
58	Illustration des échelles gaussiennes $\sigma$ sélectionnées pour les indices spectraux amplifiée et normalisée des images PlanetScope zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 1 . .	101
59	Illustration des échelles gaussiennes $\sigma$ sélectionnées pour les indices spectraux amplifiée et normalisée des images PlanetScope zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 2 . .	102
60	Illustration des échelles gaussiennes $\sigma$ sélectionnées pour les indices spectraux amplifiée et normalisée des images PlanetScope zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 3 . .	103
61	Illustration des échelles gaussiennes $\sigma$ sélectionnées pour les indices spectraux amplifiée et normalisée des images PlanetScope zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 4 . .	104
62	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 1 . . . . .	106
63	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 2 . . . . .	107
64	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 3 . . . . .	108
65	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 4 . . . . .	109
66	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 5 . . . . .	110
67	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 6 . . . . .	111
68	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 7 . . . . .	112
69	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 8 . . . . .	113
70	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Sambia nord en 2022 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 1 . . . . .	115
71	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Sambia nord en 2022 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 2 . . . . .	116
72	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 1 . . . . .	118
73	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 2 . . . . .	119
74	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 3 . . . . .	120
75	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 4 . . . . .	121
76	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 5 . . . . .	122
77	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 6 . . . . .	123

78	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Sambia nord en 2022 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 1 . . . . .	125
79	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Sambia nord en 2022 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 2 . . . . .	126
80	Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Sambia nord en 2022 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 3 . . . . .	127
81	Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d’orpaillage et l’ensemble des étendues étudiées sur les années de référence PARTIE - 1 . . . . .	128
82	Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d’orpaillage et l’ensemble des étendues étudiées sur les années de référence PARTIE - 2 . . . . .	129
83	Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d’orpaillage et l’ensemble des étendues étudiées sur les années de référence PARTIE - 3 . . . . .	130
84	Différences de signatures spectrales entre sites d’orpaillage et terres brûlées sur base des indices de terres brûlées (NBRI et BAI) amplifiés pour les zones brûlées et normalisés - PARTIE 1 . . . . .	131
85	Différences de signatures spectrales entre sites d’orpaillage et terres brûlées sur base des indices de terres brûlées (NBRI et BAI) amplifiés pour les zones brûlées et normalisés - PARTIE 1 . . . . .	132
86	Différences de signatures spectrales entre sites d’orpaillage et terres brûlées sur base des indices de terres brûlées (NBRI et BAI) amplifiés pour les zones brûlées et normalisés - PARTIE 1 . . . . .	133
87	Comparaison des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2020) des images “super-résolues ” dans la zone Tekadje/Gbere . . . . .	134
88	Comparaison des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2022) des images “super-résolues ” dans la zone Sambia nord . . . . .	135
89	Comparaison des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2022) des images “super-résolues ” dans la zone Sambia sud . . . . .	136
90	Comparaison des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2020) des images PlanetScope dans la zone Tekadje/Gbere . . . . .	137
91	Comparaison des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2022) des images PlanetScope dans la zone Sambia nord . . . . .	138
92	Comparaison des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2022) des images PlanetScope dans la zone Sambia sud . . . . .	139

## Liste des tableaux

1	Différences entre les images “super-résolues ” et « PlanetScope » . . . . .	26
2	Valeurs de seuillage retenues selon les images et les sites d’études . . . . .	40
3	Tailles de groupes de pixels minimums . . . . .	41
4	Statistiques descriptives appliquées aux indices spectraux amplifiés et normalisés sur les sites d’orpaillage et leur environnement . . . . .	43
5	Valeurs de seuillage minimum retenues selon les images et les sites d’études sur différentes années . . . . .	45
6	Caractéristiques d’une caméra Sony Pregius GS-CMOS . . . . .	47
7	Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Tekadje/Gbere pour l’année 2020 ( images “super-résolues ”) . . . . .	49
8	Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Tekadje/Gbere pour l’année 2019 ( images “super-résolues ”) . . . . .	51
9	Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Tekadje/Gbere pour l’année 2021 ( images “super-résolues ”) . . . . .	51
10	Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Tekadje/Gbere pour l’année 2022 ( images “super-résolues ”) . . . . .	52
11	Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Sambia nord pour l’année 2022 ( images “super-résolues ”) . . . . .	55
12	Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Sambia sud pour l’année 2022 ( images “super-résolues ”) . . . . .	57
13	Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Tekadje/Gbere pour l’année 2020 (images « PlanetScope ») . . . . .	61
14	Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Sambia nord pour l’année 2022 (images « PlanetScope ») . . . . .	63
15	Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Sambia sud pour l’année 2022 (Mars) (images « PlanetScope ») . . . . .	65
16	Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Sambia sud pour l’année 2022 (Avril) (images « PlanetScope ») . . . . .	70
17	Comparaison des différents résultats donnés par le modèle selon les images, les zones et les années . . . . .	71
18	Comparaison des corrélations des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2022) des images “super-résolues ” dans la zone Sambia sud .	83
19	Caractéristiques des données Sentinel-2/PlanetScope . . . . .	91
20	Caractéristiques des données PlanetScope . . . . .	91
21	Indices spectraux pour les images “super-résolues ” . . . . .	92
22	Indices spectraux pour les images PlanetScope . . . . .	93
23	$\sigma$ des images “super-résolues ” . . . . .	96
24	$\sigma$ des images PlanetScope . . . . .	96
25	Comparaison des corrélations des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2020) des images “super-résolues ” dans la zone Tekadje/Gbere	134
26	Comparaison des corrélations des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2022) des images “super-résolues ” dans la zone Sambia nord	135

27	Comparaison des corrélations des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l'année de référence (2022) des images "super-résolues " dans la zone Sambia sud .	136
28	Comparaison des corrélations des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l'année de référence (2020) des images PlanetScope dans la zone Tekadje/Gbere .	137
29	Comparaison des corrélations des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l'année de référence (2022) des images PlanetScope dans la zone Sambia nord . .	138
30	Comparaison des corrélations des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l'année de référence (2022) des images PlanetScope dans la zone Sambia sud . . .	139

## Glossaire

**Images « super-résolues »** Images de 2.5m de résolution couvrant les bandes Red, Green, Blue, NIR et SWIR résultant de la fusion d'images sentinel 2 et PlanetScope (LATTE & LEJEUNE, 2020). 2, 4, 5, 7–12, 26, 27, 29–31, 37, 38, 45, 49, 51–61, 73, 77–83, 85, 86, 92, 94–96, 98–100, 106–113, 115, 116, 134–136

**Images optiques** Acquises passivement où des ondes émises par une source lumineuse (ex : le soleil) sont réfléchies par la surface d'un objet (ex : la Terre) et enregistrées par un capteur. 18

**Images radar** Acquises par un radar actif où des ondes émises sont réfléchies par la surface d'un objet et enregistrées par un capteur. 17, 18

**Nébulosité** La nébulosité est la proportion de nuages couvrant le ciel. Elle se mesure en « huitième » du ciel observé (« octa »), par estimation de la partie couverte. On se contente souvent de qualificatifs comme abondante, faible, variable (IRM - Nébulosité 2022). 18

**Orpillage** Exploitation artisanale d'alluvions aurifères (LAROUSSE, 2022). 16

**Résolution spectrale** Pouvoir de séparation d'un spectrographe. Plus la résolution spectrale est grande, plus le spectre obtenu est détaillé, et plus on peut y mesurer des raies de faible intensité ou profondeur. 26

## Acronymes

**ESA** European Space Agency. 17

**ICCN** Institut Congolais pour la Conservation de la Nature. 15

**LWIR** Long-Wave Infrared (Infrarouge à longue longueur d'onde). 47

**NASA** National Aeronautics and Space Administration. 17

**NIR** Near InfraRed (Infrarouge proche). 47

**ONG** Organisation Non Gouvernementale. 15

**PNG** Parc National de la Garamba. 7, 14–16, 84, 85

**RDC** République Démocratique du Congo. 16

**SWIR** Short Wavelength InfraRed (Infrarouge à courte longueur d'onde). 30

**UE** Union Européenne. 15

**USAID** Agency for International Development (L'agence américaine pour le développement international). 15

**USGS** United States Geological Survey. 17

**ZEA** Zone d'Exploitation Artisanale. 20

---

# 1 Introduction

Principalement localisés dans les pays pauvres en développement, les exploitations minières à petite échelle et artisanales sont peu surveillées et réglementées. Bien que représentant 1% de la surface terrestre à l'échelle mondiale (DUDKA & ADRIANO, 1997), ces activités d'extraction peuvent induire des impacts environnementaux, sanitaires et sociaux majeurs (IBRAHIM et al., 2020). Ainsi, le contrôle de l'orpaillage rentre dans les Objectifs de Développement Durable des Nations Unies pour 2030<sup>1</sup>.

La République Démocratique du Congo possède des sols riches et regorge de mines d'extraction et notamment d'or<sup>2</sup>. On constate que depuis 2010, la filière aurifère est en plein essor dans le pays. En 2016, la production industrielle d'or était de 22,6 tonnes. Cependant, selon le Ministère des mines, les 18 exploitations industrielles n'assurent qu'une partie de la production nationale<sup>3</sup>. D'après différentes sources, l'orpaillage artisanal, très développé, fournirait entre 400 kg et 20 tonnes d'or par an<sup>4 5</sup>(entre 23 Million et 1,144 Milliard \$<sup>6</sup>).

La province du Haut Uélé, dans laquelle se trouve le PNG, est réputée pour ses sols riches en gisements aurifères<sup>7</sup>. Beaucoup d'allochtones à la recherche de richesses migrent vers ces terres afin de créer des sites d'extractions artisanaux. Bien que le mercure ou le cyanure ne semblent pas être utilisés, comme dans la plupart des sites aurifères à travers le monde (CARMOUZE et al., 2001, GODARD et al., 2006, NIANE, 2014), ces sites d'orpaillage modifient toutefois le paysage et dégradent l'environnement NGOM et al., 2020. En effet, les dégâts engendrés sont responsables de l'érosion, de l'envasement, de la sédimentation d'eau, de la déforestation, de la perte d'habitat et de connectivité des espèces biologiques (CORDY et al., 2011; ARIAS ESPANA et al., 2018; LARA-RODRÍGUEZ, 2018; IBRAHIM et al., 2020; NKUBA et al., 2021).

Par conséquent, le PNG essaie de stopper le développement de cette activité interdite dans les aires protégées conformément à la loi 14/003 (PRÉSIDENT DE LA RÉPUBLIQUE, 2022) et au code minier. Il est donc nécessaire de pouvoir cartographier ces sites afin de surveiller leur évolution. A cette fin, la télédétection pourrait être un outil efficace.

---

1. <https://sdgs.un.org/2030agenda>

2. <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Pays/CD/le-secteur-minier-en-rd-congo>

3. <https://www.tresor.economie.gouv.fr/PagesInternationales/Pages/c4657524-6a6d-4cf3-8391-9d70556e302b/files/5a28b9a8-fb05-4129-989c-db141bae3025>

4. <https://www.tresor.economie.gouv.fr/PagesInternationales/Pages/c4657524-6a6d-4cf3-8391-9d70556e302b/files/5a28b9a8-fb05-4129-989c-db141bae3025>

5. [https://www.lemonde.fr/afrique/article/2015/01/21/rdc-la-fievre-de-l-or\\_4560516\\_3212.html](https://www.lemonde.fr/afrique/article/2015/01/21/rdc-la-fievre-de-l-or_4560516_3212.html)

6. <https://or.fr/cours/or/usd>

7. <https://www.jeuneafrique.com/mag/459346/economie/rdc-la-fievre-de-lor/>



## 1.1 African Parks

African Parks Network est une ONG sud-africaine. Elle est principalement axée sur la conservation de la nature, la lutte anti-braconnage et le développement durable des communautés riveraines. L'entreprise gère 19 aires protégées dans 11 pays. Pour atteindre ses objectifs, l'ONG en collaboration avec les différents gouvernements, forme des eco-gardes et reçoit ses subsides de différents partenaires tels que l'UE, l'USAID, la « National Geographic Society ».

## 1.2 Parc National de la Garamba

Géré par African Parks, le PNG est situé dans la province du Haut Uélé (dans le Nord-Est de la République Démocratique du Congo à la frontière du Soudan du Sud)(cfr. Figure 1). La Garamba a obtenu son statut de Parc National Africain en 1938, ce qui en fait le plus ancien du pays, et est classé au patrimoine mondial de l'Unesco depuis 1980. En 2005, l'ICCN a délégué la gestion du parc à « African Parks Network ».

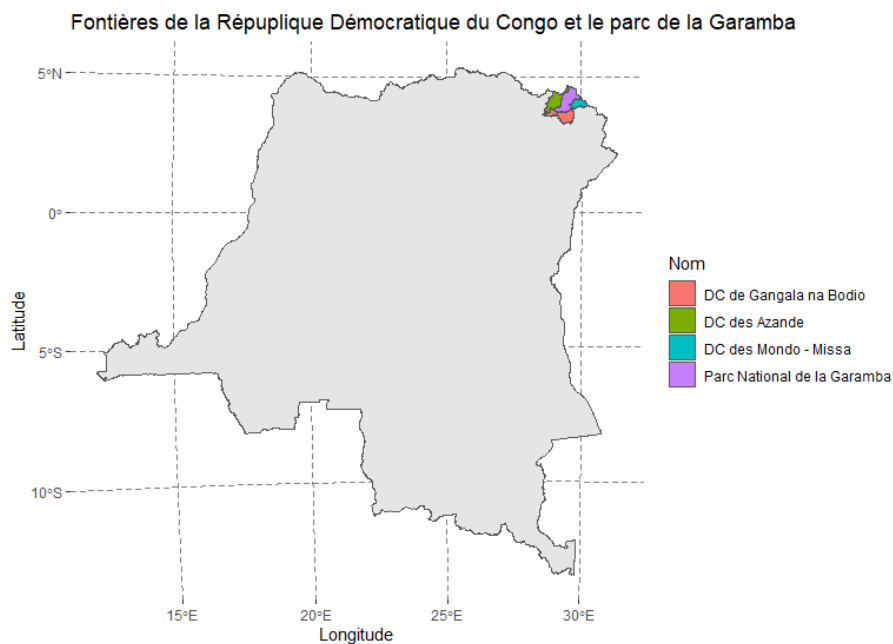


FIGURE 1 – Frontières de la RDC et du PNG

Le complexe de la Garamba comprend le PNG qui est une aire protégée de catégorie II (IUCN). Cette catégorie englobe de vastes zones naturelles ou quasi naturelles mises en réserve pour protéger les processus écologiques à grande échelle. L'objectif dans cette zone est de protéger la biodiversité naturelle ainsi que la structure écologique sous-jacente et les processus environnementaux qui la soutiennent. Ainsi, aucune activité humaine n'y est autorisée. Le PNG est entouré de domaines de chasse

qui sont des aires protégées de catégorie VI. Dans ces zones protégées, les populations autochtones peuvent y vivre avec une gestion durable des écosystèmes<sup>8</sup>. Les exploitations des ressources forestière, minières, des hydrocarbures ou des carrières y sont interdites conformément à la loi 14/003 (PRÉSIDENT DE LA RÉPUBLIQUE, 2022).

Pour son fonctionnement, le parc engage environ 500 employés à temps plein et plus encore à temps partiel. Il collabore également avec les communautés locales pour une gestion participative des ressources naturelles. Ceci lui confère le statut du plus gros employeur de la région.

### 1.3 Contexte social

Frontalier du Soudan du Sud, plongé dans une guerre civile, et menacé par des braconniers, un sentiment d'insécurité règne dans le PNG. Cependant, depuis 2016, grâce à un remaniement de l'organisation, les groupes rebelles, ainsi que la plupart des braconniers ont été repoussés de la région.

Bien que la RDC soit dotée d'immenses ressources naturelles, de sols riches en minerais, de grands potentiels hydroélectriques et d'une importante biodiversité, la pauvreté y reste très répandue. Selon la banque mondiale, 73% de sa population ( $\pm$  60 millions de personnes) vit avec moins de 1,90\$ par jour en 2018<sup>9</sup>.

Les régions couvertes par le PNG et ses domaines de chasse ne sont pas épargnées par cette pauvreté. Bien que le PNG soit à la base de nombreuses initiatives telles que l'agro-foresterie, l'apiculture, l'électrification solaire de 3 villes limitrophes du PNG, l'orpaillage illégal est toujours pratiqué dans certaines zones des domaines de chasse du complexe de la Garamba.

### 1.4 Lois

Une augmentation des mines d'orpaillage à petite échelle et artisanales dans le monde menacent les forêts tropicales riches en biodiversité. En réponse, les gouvernements établissent des lois afin de réglementer les zones d'extraction et ainsi éloigner l'exploitation minière des zones écologiquement sensibles.

Dans le cas de la RDC, la loi n° 14/003 du 11 février 2014 relative à la conservation de la nature (PRÉSIDENT DE LA RÉPUBLIQUE, 2022) interdit l'exploitation des ressources naturelles, y compris minières, dans les aires protégées en RDC. De plus, dans le cas de la zone d'étude, l'arrêté ministériel des mines n°0532 en concertation avec le PNG interdit l'exploitation artisanale dans les domaines de chasse de Gangala Na Bodio, Azande et Mondo Missa du complexe de la Garamba dans la province du Haut-Uélé.

---

8. <https://www.iucn.org/fr>

9. <https://www.banquemondiale.org/fr/country/drc/overview#1>

## 1.5 Télédétection (état de l'art)

La télédétection peut être un outil efficace pour suivre continuellement l'évolution de ces différents sites d'extraction et ainsi agir rapidement en cas de création de nouveaux sites d'orpaillage.

La télédétection a été largement et efficacement utilisée pour surveiller le changement d'occupation et d'utilisation des terres (CAMPBELL & WYNNE, 2011). Plus précisément, elle a été utilisée pour cartographier le secteur minier au Ghana (BASOMMI et al., 2015; MANU et al., 2004; SNAPIR et al., 2017), pour détecter et caractériser les perturbations minières dans le secteur du charbon en Inde (AREENDRAN et al., s. d.; MALAVIYA et al., 2010; PRAKASH & GUPTA, 1998), pour surveiller des exploitations minières artisanales au Pérou (ELMES et al., 2014) et d'orpaillage en Colombie (IBRAHIM et al., 2020), au Sénégal (NGOM et al., 2020), au Myanmar (LAJEUNESSE CONNETTE et al., 2016) ou encore en Guyane française (GOND & BROGNOLI, 2005).

### 1.5.1 Programmes spatiaux

Au cours de ces dernières années, plusieurs programmes ou entreprises, mettant en place des satellites d'observation, ont vu le jour :

- Le programme Copernicus de l'ESA, lancé en 2015 avec ses satellites Sentinel 1 et Sentinel 2. La première constellation de satellites offre des images radar avec une résolution spatiale de 5 m et une résolution temporelle de 12 jours. Tandis que la seconde offre des images multispectrales avec une résolution spatiale allant de 10 à 60 m et une résolution temporelle de 2 à 5 jours.
- Le programme Landsat de la NASA à l'instigation de l'USGS et du département de l'agriculture. Développé au milieu des années 1960, il s'agit du premier programme spatial d'observation de la Terre destiné à des fins civiles. Ce dernier possède encore 2 satellites en activité, Landsat 7 et 8, avec une résolution temporelle de 16 jours. La résolution spatiale des images capturées par ces derniers est comprise entre 15 et 120 mètres.
- L'entreprise américaine Planet Labs, fondée en 2010, fabrique et exploite des nano-satellites produisant des images. Les images satellitaires de Planet Labs sont collectées principalement par une constellation de satellites « Flock » qui offrent des images multispectrales avec une résolution spatiale de 3 à 5 mètres et une résolution temporelle journalière.

### 1.5.2 Images multi-spectrales

Ces différents programmes offrent une base de données d’images optiques et/ou d’images radar au fil des années sur toute la surface terrestre. Grâce aux ondes émises par les satellites qui traversent les nuages, la télédétection radar présente l’avantage de s’affranchir des contraintes de couverture nuageuse ; Cette spécificité est particulièrement intéressante pour notre zone d’étude où la nébulosité est abondante pendant la saison des pluies (GOND & BROGNOLI, 2005). Cependant, le milieu est principalement constitué de savane où la télédétection par images radar connaît de moins bons résultats pour la détection d’objets avec un faible relief (MARTINEZ & LE TOAN, 2007 ; KOUASSI et al., 2011). De plus, les activités liées à l’orpaillage se déroulent principalement en saison sèche (décembre - mai)<sup>10</sup> (MAÏGA & KOUADIO, 2020 ; NDIAYE, s. d.), meilleure période, notamment en fin de saison, pour discriminer les zones d’orpaillages par rapport aux autres types de terre (NGOM et al., 2020). Par contre, en saison de pluies, les zones d’extraction sont souvent inondées. Dès lors, il est intéressant d’assurer un suivi de ces différents sites lors de leur mise en activité puisqu’à cette période, la nébulosité moins importante rend les images spectrales exploitables.

### 1.5.3 Amplification des contrastes

Le principe général de la méthode employée est fondé sur les contrastes entre l’objet observé et son environnement. Il est donc intéressant de pouvoir amplifier ces contrastes sur des indices spectraux préalablement calculés afin de mieux isoler les objets d’étude et mieux les identifier (GOND & BROGNOLI, 2005). Pour ce faire, plusieurs techniques existent, mais la plus courante consiste à utiliser la méthode différentielle proposée par LINDBERG, 1998 qui est le « Blob detection » sur le Laplacien de Gausse (KONG et al., 2013).

### 1.5.4 Modèles de détection

La littérature scientifique fait ressortir diverses approches, basées soit sur les pixels, soit sur les objets. Toutes deux ont démontré leur potentiel dans la cartographie de zones d’extraction artisanales à petite échelle (MYINT et al., 2011). L’approche par objet se différencie de celle par pixels par le fait que l’information sémantique nécessaire à l’interprétation d’une image n’est pas représentée dans des pixels individuels, mais dans des objets. La classification par objets est donc basée sur des groupes de pixels associés (LIU & XIA, 2010).

En outre, IBRAHIM et al., 2020 ont utilisé des images Sentinel-2 pour identifier les zones minières en Colombie avec une approche basée sur les pixels suivie d’un traitement de post-classification utilisant les connaissances sur le terrain pour corriger les erreurs de classification dues aux signatures de réflectance similaires. Les techniques de traitement d’images utilisées dans cette étude ont été la classification supervisée et l’extraction de motifs séquentiels d’images classifiées. NGOM et al., 2020 ont également utilisé les données Sentinel-2 pour cartographier les exploitations minières artisanales et à petite échelle dans le sud-est du Sénégal grâce à l’algorithme de classification automatisé SVM.

---

10. <https://partir.ouest-france.fr/meteo/republique-democratique-du-congo-idpaysmois-158-2.html#:~:text=Le%20climat%20est%20de%20type,%C3%A9quateur%20de%20mai%20%C3%A0%20septembre>

Grâce à la détection des changements de la classification supervisée basée sur les pixels, OBODAI et al., 2019 ont détecté l'impact de l'exploitation minière à petite échelle au Ghana sur des images issues de la constellation Landsat 8. ISIDRO et al., 2017 ont également utilisé la classification supervisée mais basée sur des objets afin d'identifier les empreintes minières à petite échelle aux Philippines.

Pour une étude plus large dans le secteur minier, BASOMMI et al., 2015 ont utilisé la classification supervisée sur base du maximum de vraisemblance afin de surveiller l'utilisation des terres et leur changement au Ghana.

En Guyane française, GOND & BROGNOLI, 2005 ont travaillé sur des images issues de trois satellites différents, Spot 4, Landsat 5 et Landsat 7. Afin de détecter des mines d'orpaillage, ils ont utilisé une approche basée sur le pixel. Suite à différents seuillages sur des images modifiées, des polygones ont été extraits sous forme vectorielle, délimitant les sites de prospection. L'information sémantique contenue dans ces polygones a servi à alimenter un système d'informations afin de détecter d'autres sites d'orpaillage.

Bien que les approches basées sur les pixels aient été les plus utilisées et aient démontré de grandes capacités, celles-ci peuvent conduire à des erreurs de classification dans la cartographie de sites d'orpaillage dues à la similarité de leur signature de réflectance spectrale avec d'autres types de sols (ISIDRO et al., 2017; NGOM et al., 2020; MYINT et al., 2011, IBRAHIM et al., 2020). Concernant l'approche basée sur des groupes de pixels, elle présente également des avantages et des inconvénients. Dans un premier temps, elle limite l'effet de poivre et sel typique de la classification basée sur les pixels. Cependant, cette approche est sensible aux effets de sous et sur-segmentation qui pourraient réduire la précision de la classification (LIU & XIA, 2010; SONG et al., 2005).

Pour ce travail, une approche basée sur les pixels a été utilisée par le biais de la segmentation sémantique. Ce processus permet de classifier chaque pixel d'une image en un label particulier. Cette technique détecte proprement les objets de forme irrégulière, contrairement à la détection d'objets, où les objets doivent s'insérer dans un cadre délimité<sup>11</sup>. Ainsi, les informations sémantiques extraites des polygones de sites connus ont servi de référence pour le modèle appliqué sur les images modifiées sur les indices spectraux. La cartographie de ces sites a pour but de surveiller et/ou d'identifier l'évolution et les changements des sites connus ou non au cours du temps.

---

11. <https://fr.mathworks.com/solutions/image-video-processing/semantic-segmentation.html>

## 1.6 Ojectifs

L'un des objectifs des gestionnaires du parc est de stopper l'orpaillage illégale, conformément à la loi 14/003 (PRÉSIDENT DE LA RÉPUBLIQUE, 2022) et code minier, et relocaliser cette activité en dehors de l'aire protégée. Pour ce faire, le développement d'activités génératrices de revenus durables sont proposées à la population telles que l'agriculture vivrière, la culture de graines de chia, l'apiculture, la pisciculture. De plus, pour atténuer la transition, le parc a également prospecté la région afin de créer des ZEA en dehors du complexe de la Garamba. Ces ZEA ont pour but de concentrer les orpailleurs dans une région afin d'avoir un contrôle sur les dégâts environnementaux que cette activité peut engendrer, ainsi que de sécuriser les revenus alloués aux orpailleurs.

Dans cette démarche, un système adapté et adéquat du contrôle de la région doit être mis en place afin de s'assurer de la bonne volonté de la population et d'agir rapidement en cas de transgression de la loi.

C'est dans ce contexte que la télédétection peut aider à surveiller l'expansion et/ou l'apparition de sites d'orpaillage. Ainsi, l'objectif de ce travail est de mettre au point une méthode basée sur la télédétection qui permet de détecter ces différents sites et de surveiller leur évolution .

Dans ce cadre, plusieurs types d'images seront utilisées. En premier lieu, des images à très haute résolution issues de la fusion d'images satellites « SENTINEL-2 » et « PLANET » seront utilisées afin de créer un suivi annuel précis des sites d'orpaillage. En second lieu, un suivi quotidien sera mis en place avec des images « PLANET ». Enfin, les prédictions d'appariation de nouveaux sites ou de développement d'anciens sites d'orpaillage seront confirmées à l'aide d'images aériennes, les gestionnaires disposant d'un avion équipé d'une caméra.

---

## 2 Matériels et méthodes

### 2.1 Zone d'étude

Ce travail se réalise au sein du complexe de la Garamba,, se trouvant dans la zone de transition entre les forêts denses humides du bassin du Congo et les savanes guinéo-soudaniennes. Le parc est constitué de savanes herbeuses ou boisées, entrecoupées de forêts-galeries et de dépressions marécageuses. Son étendue de 490 000ha, entourée de 982 900 ha de trois domaines de chasse, abrite une biomasse exceptionnellement élevée de grande faune.

Cette étude s'est principalement concentrée sur trois régions distinctes au sein du complexe, illustrées dans les Figures 2 et 3. La première se trouve dans le domaine de chasse de Mondo Missa, situé à l'est du Parc National, entourant les villages de Tekadje et de Gbere. Cette étendue possède une végétation légèrement plus dense et est moins touchée que dans les deux autres zones par les activités d'orpaillage.

Les deux autres régions se trouvent dans le domaine de chasse de Gangala situé au sud du Parc National. La région nord dispose d'une végétation plus primaire et est également moins touchée que la région sud par les activités d'orpaillage. Les sites d'extraction se retrouvent principalement dans des forêts-galeries autour de rivières.

Enfin, la partie Sud est fortement impactée par l'orpaillage et se retrouve avec beaucoup de sols nus. Les zones d'extraction artisanales se retrouvent parfois à quelques mètres des villages. Il est donc plus difficile de distinguer les sites recherchés d'autres occupations du sols représentant un aspect similaire.

### Parc national de la Garamba et ses 3 domaines de chasses

Gangala, Mondo Missa et Azande

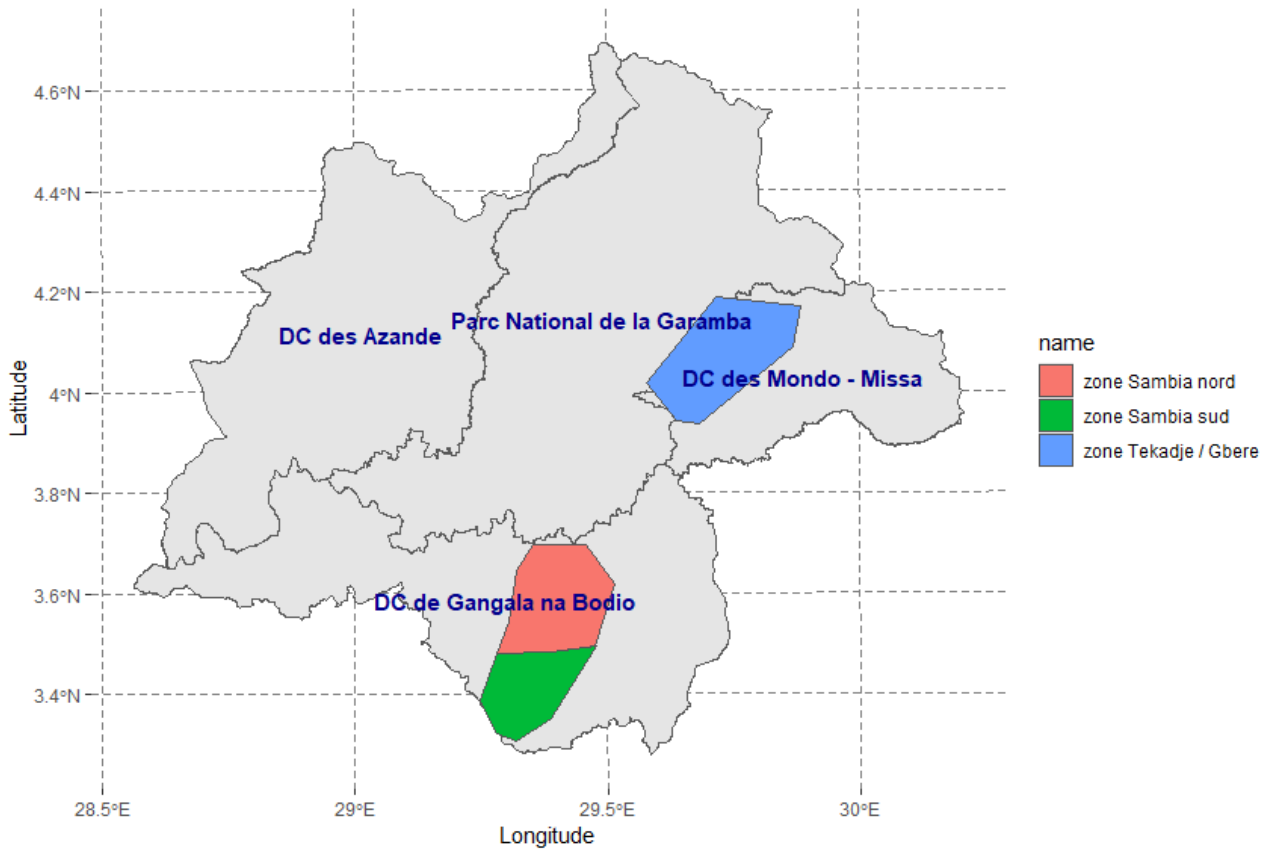


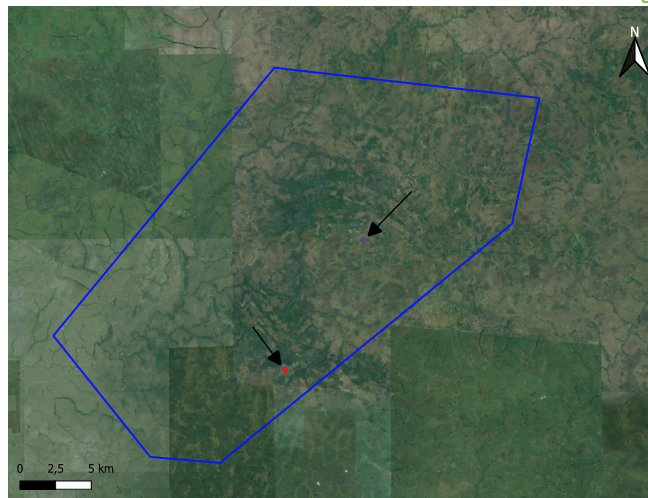
FIGURE 2 – Zones d'étude au sein du parc national de la Garamba et ses domaines de chasse



FIGURE 3 – Illustration de la couverture terrestre dans les trois zones d'étude (Tekadje/Gbere, Sambia nord et Sambia sud)

Zone d'étude Tekadje / Gbere

CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Image Google map (Aout 2022)

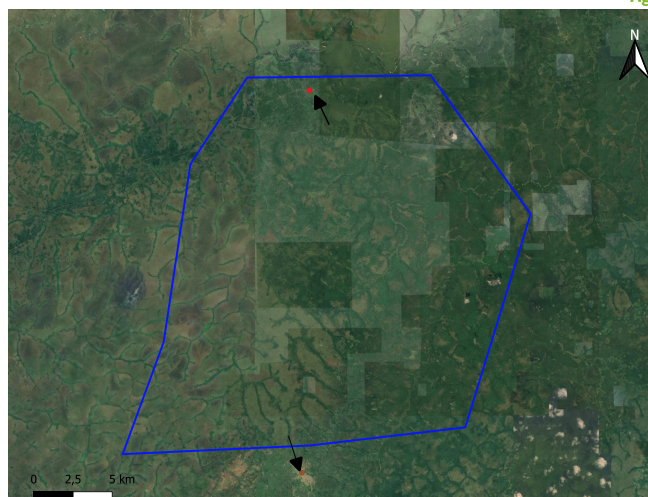


- Légende
- Gbere
  - Tekadje
  - Limite\_tekadje
- Google map

(a) Zone Tekadje / Gbere

Zone d'étude Sambia nord / Zambaleke

CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Image Google map (Aout 2022)

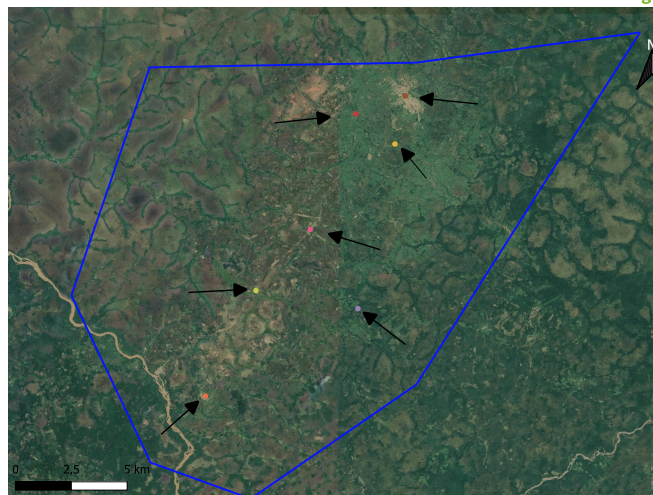


- Légende
- Sambia
  - Zambaleke
  - Limite\_sambia\_nord
- Google map

(b) Zone Sambia nord

Zone d'étude Sambia sud

CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Image Google map (Aout 2022)



- Légende
- Limite\_sambia\_sud
  - Sambia
  - Tomeka
  - Bumva
  - Canon
  - Azimugu
  - Orinzinva
  - Subani
- Google map

(c) Zone Sambia sud

## 2.2 Fonctionnement d'un site d'orpaillage

Afin de pouvoir extraire l'or de la terre, les orpailleurs creusent des « puits » de minimum 6 m<sup>2</sup> à l'aide de pelles. Ces puits sont ensuite remplis d'eau, provenant d'un plan d'eau voisin, grâce à une pompe à eau. Les matériaux excavés se mélangent avec la boue créée qui est également pompée pour arriver sur des écluses bordées d'un « tapis de mineur » (cfr. Figure 4). Les particules d'or sont ainsi séparées des autres éléments par tamisage. Ce processus est répété afin d'extraire la majeure partie de l'or se trouvant dans la boue. Certains petits sites artisanaux ne disposent pas toujours tout ce matériel. Ces derniers séparent l'or dans des grands bols en métal en faisant tourner la boue sur elle-même. L'or étant plus lourd, il reste dans le fond tandis que le solde du mélange est écarté sur le côté.



FIGURE 4 – Exemple d'un site d'orpaillage (Kwa sasa) avec pompe à essence et écluses bordées d'un «tapis de mineur»

Les sites d'orpaillage sont principalement actifs durant la saison sèche de décembre à mai et se mettent en pause pendant la saison des pluies. Un site qui n'a pas été actif pendant une année (ou plusieurs) peut être réouvert à tout moment, n'étant jamais vidé à 100% de sa capacité en minerais.

### 2.3 Acquisition des données de terrain

Un travail de terrain a été réalisé entre le 17 mars et le 15 avril 2022. Celui-ci a permis de recenser 204 points GPS avec précision indiquant 78 sites d'orpaillage dans la région de Tekadje/Gbere et 90 points pour 25 sites pour la région de Sambia nord. Concernant la zone de Sambia sud, les sites de prospection étant beaucoup plus étendus et disséminés dans le paysage, une analyse d'images, comparée à des données connues de 2019, a suffi pour identifier 304 sites avec 2983 points générés dans leur limite.

Cette étape de terrain a permis d'acquérir une bonne connaissance de celui-ci afin d'être capable de mieux photo-interpréter les images lors de la sélection des points d'entraînement. Un effet, certains objets du paysage peuvent porter à confusion la photo interprétation. Ces derniers pouvant être des éléments de roche, des flaques d'eau, des bras de rivières, etc. (cfr. Figure 5).

FIGURE 5 – Objets portant à confusion lors de l'interprétation des images



(a) Roche affleurante près de Gbere



(b) Flaque d'eau près de Tekadje



(c) Bras de la rivière Lumani

## 2.4 Acquisition des données images

Jusqu'à présent, le parc de la Garamba utilise des images issues de la constellation PlanetScope pour la surveillance du parc. Néanmoins, l'imagerie Sentinel-2 est utilisée dans de nombreux domaines d'application, grâce à sa résolution spectrale élevée et sa large gamme du spectre électromagnétique recouverte (442 à 2202 nm) (NGOM et al., 2020 ; IBRAHIM et al., 2020). Cependant, sa résolution spatiale, comprise entre 10 et 20 mètres selon les longueurs d'onde, n'est pas suffisante pour détecter de petits objets, de minimum  $6 m^2$  dans notre cas d'étude. LATTE & LEJEUNE, 2020 ont proposé une méthode afin d'affiner cette résolution jusqu'à 2.5m grâce à la fusion d'images Sentinel-2 et PlanetScope. Ce processus délivre des images dites « super-résolues » qui présentent une résolution spatiale de 2,5 m et reprennent les 10 bandes spectrales des images Sentinel-2. Les caractéristiques de ces images sont reprises en Annexe A dans le Tableau 19. Dans la suite de notre travail, ces images seront qualifiée de super-résolues. Dès lors, les images PlanetScope et « super-résolue » serviront de données de base et sont comparées lors de ce travail. Le Tableau 1 met en parallèle les principales caractéristiques de ces deux types d'images.

TABLE 1 – Différences entre les images “super-résolues ” et « PlanetScope »

	<b>images “super-résolues ”</b>	<b>PlanetScope</b>
Résolution spatiale	2.5 m/px	3 m/px
Résolution temporelle	1 an	1 jour
Gamme de longueur d'ondes couvertes	0.490 - 2.190 $\mu m$	0.455 - 0.860 $\mu m$
Nombre de bandes couvertes	10	4

### 2.4.1 Images PlanetScope

Les données proposées par PlanetScope sont des images multispectrales dont les caractéristiques sont reprises dans le Tableau 20 en Annexe A. Théoriquement, puisque leur couverture spectrale est plus petite, les images PlanetScope offriront des résultats moins précis que les images “super-résolues”. Cependant, leur acquisition plus aisée et leur résolution temporelle élevée permettent d’avoir un suivi plus régulier.

Ces images sont disponibles sur la plateforme « planet.com ». Une fois téléchargées, les tuiles d’images sont assemblées en une mosaïque multibande dans l’environnement de Rstudio. La Figure 6 illustre le diagramme de classe menant à l’acquisition des données PlanetScope finales.

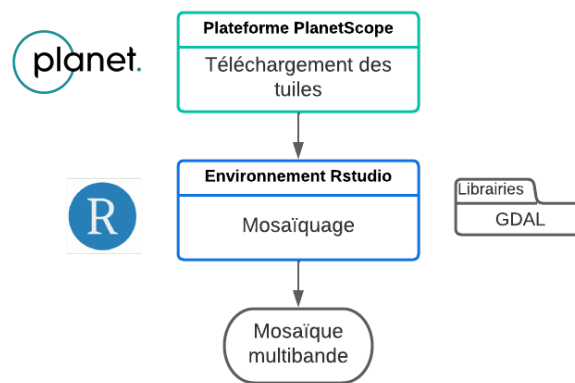


FIGURE 6 – Diagramme de classe de l’acquisition des données PlanetScope

La figure 7 illustre l’organigramme expliquant les étapes à réaliser sur la plateforme PlanetScope pour télécharger les tuiles d’images d’intérêts.

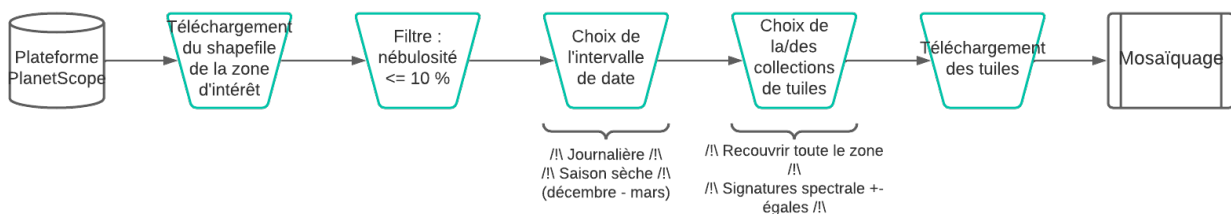


FIGURE 7 – Organigramme de l’acquisition des données sur la plateforme PlanetScope

Après avoir téléchargé le shapefile de la zone d’étude dans la plateforme, la suite des étapes s’appliquera sur les données journalières offertes par PlanetScope afin de pouvoir exploiter la région proche infra-rouge du spectre électromagnétique. La première étape consiste à appliquer un filtre sélectionnant les images avec une nébulosité inférieure à 10%. Une fois ce premier filtre appliqué, il faut choisir un intervalle de dates durant la saison sèche (décembre - mars). Parmi les dates proposées, il convient

de choisir celle où la zone est couverte au maximum par les tuiles d'images proposées. Par photo-interprétation, ces dernières doivent de préférence posséder une signature spectrale plus au moins similaire. Les données peuvent enfin être téléchargées afin d'être traitées dans l'environnement Rstudio.

Une fois les tuiles PlanetScope acquises, celles-ci doivent être assemblées afin de créer un seul raster multi-bandes. Les étapes menant à ce résultat sont résumées dans la Figure 8.

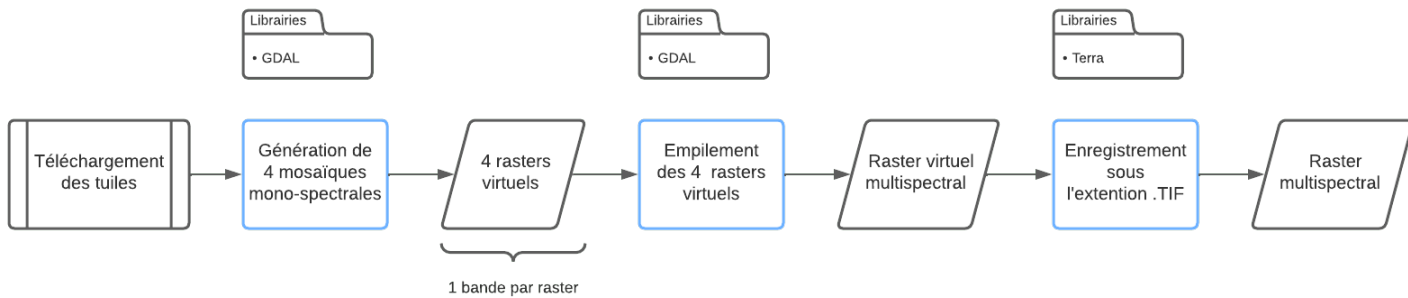


FIGURE 8 – Organigramme du mosaïquage des tuiles PlanetScope

Ce pré-traitement se réalise en trois étapes :

- Mosaïquage des différentes bandes spectrales, ici quatre, pour produire quatre rasters virtuels mono-spectrales distincts (Librairie GDAL).
- Empilement des rasters virtuels mono-spectrales pour créer un raster virtuel multi-spectrale (Librairie GDAL).
- Enregistrement sous l'extension .TIF (Librairie Terra).

Ces opérations permettent de créer un seul fichier « multi-bandes » couvrant l'ensemble de la zone d'étude.

### 2.4.2 images “super-résolues ”

Le parc de la Garamba peut obtenir ces images gratuitement grâce à une collaboration existante avec l’université de Gembloux Agro-Biotech. Cependant, pour pouvoir créer ce type d’images, il faut que les conditions météorologiques soient optimales simultanément pour les images PlanetScope et Sentinel-2. Afin de répondre à ces deux conditions simultanément, et ainsi obtenir des images de bonne qualité, ces dernières sont créées en début d’année, en saison sèche, sur base de la médiane de trois mois (LATTE & LEJEUNE, 2020). Toutefois, une seule image est in fine créée chaque année. Les images images “super-résolues ” serviront principalement à établir un suivi de précision annuelle.

## 2.5 Méthodologie

La méthodologie implique une approche de segmentation sémantique sur base des données transformées à l’origine d’images “super-résolues ”et PlanetScope. À la suite de ceci, une analyse du changement temporel de la couverture terrestre des sites est appliquée sur différentes dates. Un post traitement est proposé grâce à des ortho-images acquises par imagerie multibande de haute résolution aéroportée. L’étude utilise des images acquises à partir de 2019 jusqu’à 2022. Les dates d’images d’entraînement ont été choisies pour qu’elles recouvrent au maximum les régions étudiées avec le minimum de trous possible dans la matrice. Ainsi, pour la zone Tekadje/Gbere, les images d’entraînement datent de 2020. Tandis que, pour les zones de Sambia, les images datent de 2022. Cependant, le modèle pourra être appliqué à des dates postérieures à ce travail. La Figure 9 représente les principales étapes de la démarche appliquée dans l’environnement de Rstudio.

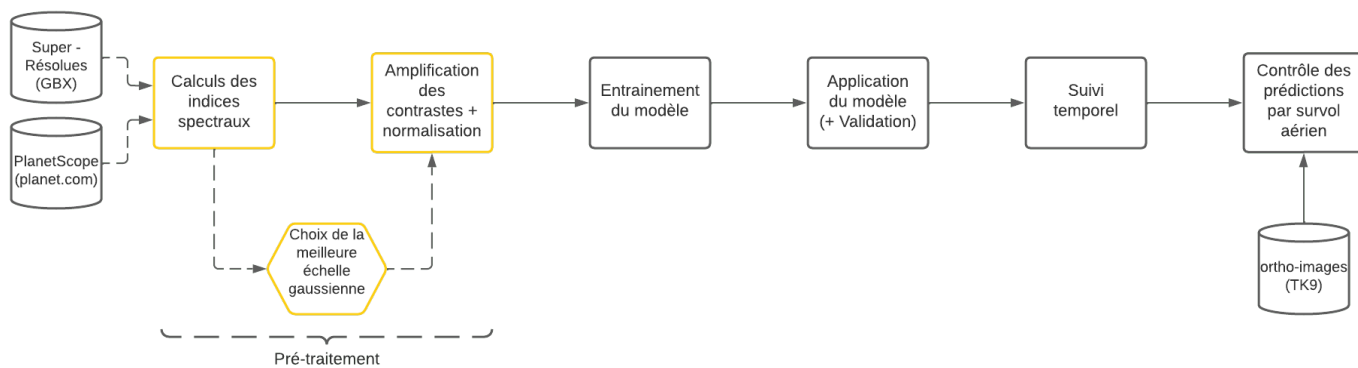


FIGURE 9 – Organigramme général

## 2.6 Pré-traitement

### 2.6.1 Indices spectraux

Les indices spectraux permettent de discriminer des objets d'une image, des sites d'orpaillage dans notre cas. Dans ces zones d'extraction, la végétation est souvent abattue, laissant les sols à nu. De plus, afin d'extraire l'or du sol, celui-ci est retourné, ce qui rend le terrain plus « clair » (cfr. Figure 10) (NGOM et al., 2020), lui donnant un albédo plus élevé (LAJEUNESSE CONNETTE et al., 2016).



FIGURE 10 – Site d'orpaillage Ouest Gbere

Pour cette étude, plusieurs indices sont susceptibles de différencier ces zones de prospection. Cependant, les images proposées par LATTE & LEJEUNE, 2020 et par les constellations PlanetScope ne couvrent pas la même gamme du champ spectral (Table 1). Il est donc intéressant d'exploiter les bandes supplémentaires qu'offrent les images "super-résolues" (cfr. Annexe A). Ainsi, différents indices spectraux sont exploitables selon les images utilisées. Ces derniers ont été recensés dans l'Annexe B pour les deux types d'images. Ces indices ont été sélectionnés afin de couvrir la plus large gamme du spectre électromagnétique. Généralement, ces indices consistent en la combinaison et la réalisation de ratios entre les diverses bandes pour intégrer, extraire les différences ou amplifier les informations.

Pour les images "super-résolues", huit indices spectraux ont été repris et synthétisés dans la Table 21 en annexe B. Représentant un bon indice de séparabilité avec des sols nus, les bandes d'infrarouge court SWIR ont été utilisées un maximum (NGOM et al., 2020). Dans ces huit indices, quatre sont des indices de mesure de la vigueur végétale :

- **L'indice de ratio brûlé normalisé (NBRI)** (GARCÍA & CASELLES, 1991 ; HEREDIA et al., 2003). Il permet de détecter les zones brûlées et de surveiller le rétablissement de l'écosystème. Une des difficultés de ce travail est liée à la similitude de réflectance spectrale entre les sols nus liés à l'extraction de l'or et d'autres sols naturels (ISIDRO et al., 2017 ; NGOM et al., 2020 ; MYINT et al., 2011). Il est donc intéressant d'utiliser cet indice afin de différencier les sites de prospections des terres brûlées (LI et al., 2015, LAJEUNESSE CONNETTE et al., 2016).
- **L'indice d'humidité par différence normalisée (NDMI)**. Il permet de capter la contenance en eau dans la végétation. Cet indice ajoute une information en exploitant la bande SWIR1, tout en réduisant les effets de diffusion des aérosols atmosphériques (GAO, 1996). Il a déjà été utilisé dans des travaux similaires à ceux réalisés dans le cadre de la présente étude (LAJEUNESSE CONNETTE et al., 2016 ; LI et al., 2015, NGOM et al., 2020, GOND & BROGNOLI, 2005).



- **L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI)** (ROUSE et al., 1974). Il permet de caractériser l'état de vigueur de la végétation dans un référentiel normalisé. Cet indice est le plus référencé dans la littérature concernant notre cas d'étude (IBRAHIM et al., 2020, BASOMMI et al., 2015, NGOM et al., 2020, LAJEUNESSE CONNETTE et al., 2016 FERNÁNDEZ-MANSO et al., 2012, PRAKASH & GUPTA, 1998, LI et al., 2015, KORUYAN et al., 2012, ISIDRO et al., 2017).
- **L'indice de végétation ajusté au sol (SAVI)** (A. R HUETE, 1988). Il ajoute un terme dans sa formule pour considérer l'influence du sol dans le résultat (L).

Ces indices mettent en évidence la végétation, ce qui permettra de la séparer des sols dépourvus de végétaux engendrés par les activités d'orpaillage.

Les quatre autres indices ont pour but de faire ressortir les sols nus et les surfaces d'eau libres, caractérisant les sites d'orpaillage :

- **L'indice de sol nu (BSI)** (RIKIMARU et al., 2002). Le BSI a été principalement utilisé dans la recherche forestière pour différencier le sol nu des autres types de couvertures terrestres (DEKA et al., 2013). Il a également été utilisé pour la détection de sites d'orpaillage au Sénégal, où NGOM et al., 2020 ont découvert que BSI était un très bon indice de séparabilité avec les autres types de sol.
- **L'indice de sol nu sec (DBSI)** (RASUL et al., 2018). Le DBSI a initialement été créé pour différencier les zones urbaines des terres nues dans des régions climatiques arides. Bien que n'étant pas adapté pour le climat tropical de la province du Haut-Uélé, cet indice peut être intéressant pour notre cas d'étude en saison sèche et notamment dans la région de Sambia.
- **L'indice de sol nu modifié (MBI)** (NGUYEN et al., 2021). NGUYEN et al., 2021 suggèrent d'utiliser cet indice pour la détection des sols nus dans les régions climatiques tropicales.
- **L'indice de différence normalisée de l'eau (NDWI)**. Cet indice a été développé pour délimiter les éléments d'eau libre (MCFEETERS, 1996). Il est possible que des sites d'orpaillage fassent apparaître à la surface des plans d'eau (cfr. Figure 10).

Il est à noter que comparés à d'autres indices, tels que NDVI et NDMI, qui peuvent être appliqués dans beaucoup de régions et pour toutes conditions climatiques, les indices de sols nus sont relativement sensibles. Ces indices dépendent de la composition et de l'humidité du sol, ainsi que de la couverture végétale qui les entoure (RASUL et al., 2018, NGUYEN et al., 2021).

Lors de la création des indices spectraux sur les images images "super-résolues ", un seuil a été appliqué sur les données brutes afin d'éliminer les anomalies dans la matrice paysagère dues à la nébulosité. Celles-ci sont définies par des valeurs spectrales très faibles dans les différentes bandes. Ainsi, les valeurs au-dessus de 100 ont été utilisées dans les différentes bandes pour créer les indices spectraux. Celles inférieures au seuil défini seront qualifiées de « No Data » pour le reste du traitement.

Quant aux images PlanetScope, neuf indices spectraux ont été sélectionnés et synthétisés dans la Table 22 en annexe B, parmi lesquels sept d’entre eux représentent la vigueur végétale :

- **L’indice de végétation amélioré (EVI)** (A. HUETE, JUSTICE et al., 1994, A. R. HUETE et al., 1997, A. HUETE, DIDAN et al., 2002). Cet indice a pour but de corriger simultanément les effets du sol et de l’atmosphère.
- **L’indice de végétation normalisé sur le canal vert (GNDVI)** (GITELSON et al., 1996). Cet indice est plus sensible à la chlorophylle.
- **L’indice de végétation ajusté au sol modifié (MSAVI2)** (RICHARDSON, s. d.). MSAVI2 a été développé pour calculer de manière plus fiable et plus simple un facteur de correction de la luminosité du sol. Il est principalement utilisé dans l’analyse de la croissance des plantes, la recherche sur la désertification, l’estimation du rendement des prairies, l’évaluation du LAI, l’analyse de la matière organique du sol, la surveillance de la sécheresse et l’analyse de l’érosion du sol (XUE & SU, 2017).
- **L’indice de végétation par différence normalisée (NDVI)** (ROUSE et al., 1974).
- **L’indice de végétation ajusté au sol optimisé (OSAVI)** (RONDEAUX et al., 1996). Principalement utilisé pour le calcul de la biomasse aérienne, de la teneur en azote des feuilles et de la teneur en chlorophylle (XUE & SU, 2017).
- **L’indice de végétation ajusté au sol (SAVI)** (A. R. HUETE, 1988).
- **Le rapport de l’infrarouge sur le rouge (SR)** (JORDAN, 1969). Basé sur le principe que les feuilles absorbent relativement plus de rouge que la lumière infrarouge.

Les deux autres indices ont pour but de mettre en évidence les terres brûlées (BAI) et les surfaces d’eau libre (NDWI) afin de différencier ces occupations de terre des sites d’orpillage recherchés.

- **L’indice d’aire brûlée (BAI)** (CHUVIECO et al., 2002). Cet indice a pour but d’identifier les zones touchées par le feu. En effet, les zones brûlées ont une signature spectrale proche des sites d’orpillage. Il est donc intéressant de les différencier.
- **L’indice de différence normalisée de l’eau (NDWI)** (McFEETERS, 1996).

Les indices ont donc été sélectionnés afin d’exploiter au maximum la gamme spectrale mise à disposition et d’isoler au mieux les sites d’orpillage des autres utilisations de terres. Cependant, la synthèse de la littérature n’a fait ressortir aucune méthode utilisant une gamme spectrale aussi restreinte qu’offrent les images PlanetScope. De plus, la zone occupée par le sol nu sur la parcelle Red-NIR est plus petite que la zone de végétation. Ainsi, il est plus difficile de discriminer les sols nus des autres types de couvertures terrestres en général (NGUYEN et al., 2021).

## 2.6.2 Amplification des contrastes

Amplifier le contraste entre l'objet observé et son environnement permettra de mieux isoler les sites d'orpaillage et de mieux les identifier (GOND & BROGNOLI, 2005). Pour ce faire, la méthode la plus utilisée est le « Blob detection » basée sur le Laplacien de Gauss partant de la fonction Gaussienne 1 (KONG et al., 2013) :

$$G(x, y; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

où  $\sigma \in \mathbb{R}_+$  est la dérivée standard représentant l'échelle dans l'espace du noyau gaussien.

La représentation d'échelle-espace gaussien  $L(x, y; \sigma)$  de l'image  $f(x, y)$  est :

$$L(x, y; \sigma) = f(x, y) * G(x, y; \sigma) \quad (2)$$

Ainsi, la dérivée d'une représentation échelle-espace est obtenue en convoluant le signal avec la dérivée d'un noyau gaussien de second ordre. Ce dernier mesure essentiellement le contraste local entre la région centrale et les deux régions latérales (WANG et al., 2020) (cfr. Figure 11)

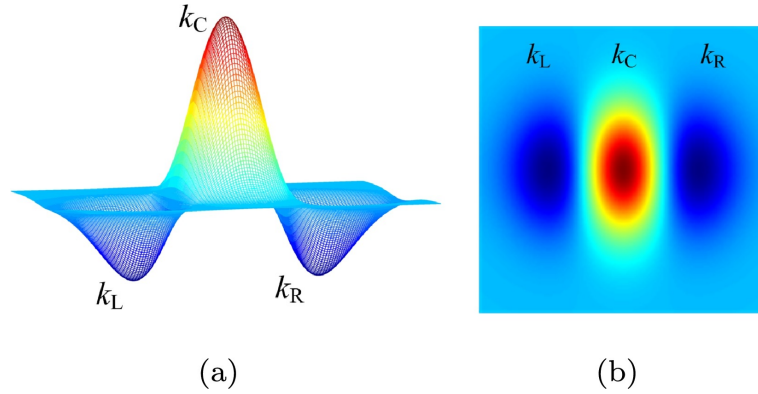


FIGURE 11 – Illustration d'un noyau gaussien de second ordre . (a) Visualisation tridimensionnelle ; (b) Visualisation planaire. (WANG et al., 2020)

Alors, l'opérateur laplacien  $\nabla^2$  3 peut être appliqué à la représentation de l'espace à l'échelle gaussienne d'une image.

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (3)$$

Ou de manière équivalente, l'opérateur LoG (4) est d'abord calculé puis convolué avec l'image pour créer la représentation de l'espace à l'échelle LoG.

$$\nabla^2 G(x, y) = \frac{x^2 + y^2 - 2\sigma^2}{\pi\sigma^4} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

Comme illustré à la figure 12, ce nouveau noyau est isotrope et mesure le contraste local moyen entre la région centrale et ce qui l’entoure. Ainsi, le noyau LoG accentuera le signal aux endroits où l’intensité des niveaux de gris change fortement.

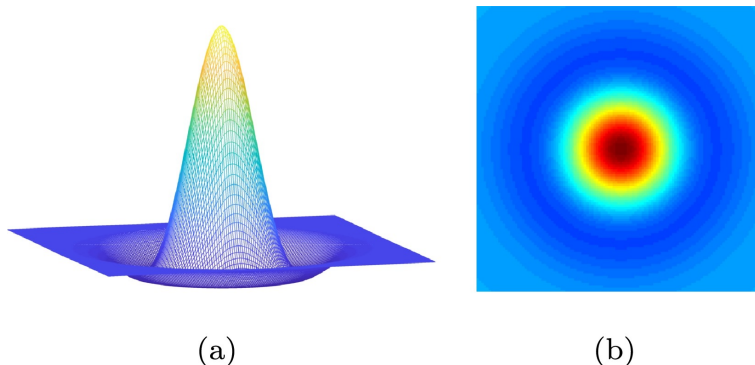
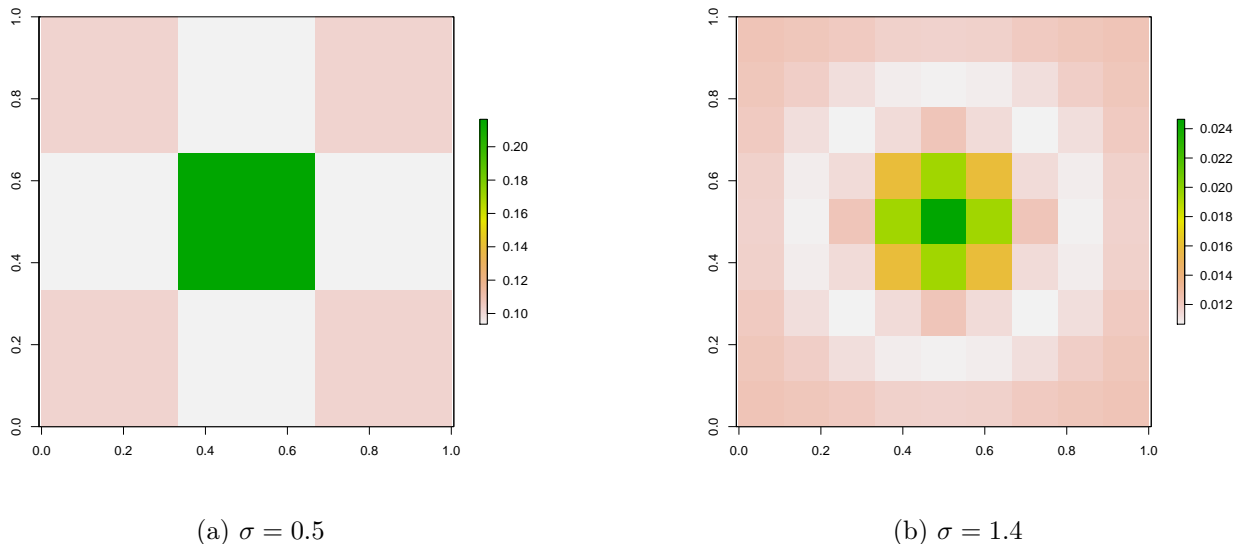


FIGURE 12 – Illustration d’un laplacien de noyau gaussien . (a) Visualisation tridimensionnelle ; (b) Visualisation planaire. (WANG et al., 2020)

L’étape Gaussienne avant la Laplacienne sert à lisser et atténuer le bruit de l’image. Tandis que l’étape Laplacienne sert à amplifier les régions où le changement d’intensité est rapide. Il est à noter que la réponse d’un détecteur de blob LoG dépend fortement de la relation entre la taille des structures de blob et l’échelle du noyau gaussien utilisé pour le pré-lissage (cfr. Figure 13) (KONG et al., 2013).

FIGURE 13 – Différence entre deux échelles gaussiennes



Une dernière étape a été appliquée à la méthode existante afin de rendre la somme de la fenêtre focale égale à 1.

$$LoG = LoG + min(LoG) \tag{5}$$

$$LoG = \frac{LoG}{\Sigma LoG} \tag{6}$$

Ceci donne une matrice illustrée à la Figure 14, qui permet d'appliquer une somme modifiée lors de l'appel de la fonction focale de la librairie terra. Cette somme modifiée permet de ne pas tenir compte des « NO VALUES » dans les calculs, tout en modifiant la taille du noyau gaussien afin que ces valeurs n'altèrent pas le poids de la somme (effective).

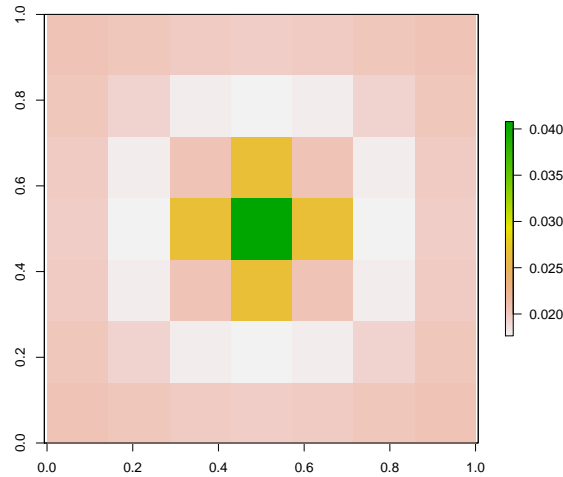


FIGURE 14 – Illustration d'une matrice d'un laplacien de noyau gaussien modifié ( $\sigma = 1$ )

### Choix de l'échelle du noyau gaussien $\sigma$

La Figure 15 illustre l'organigramme menant aux choix de la meilleure échelle gaussienne pour les différents indices spectraux.

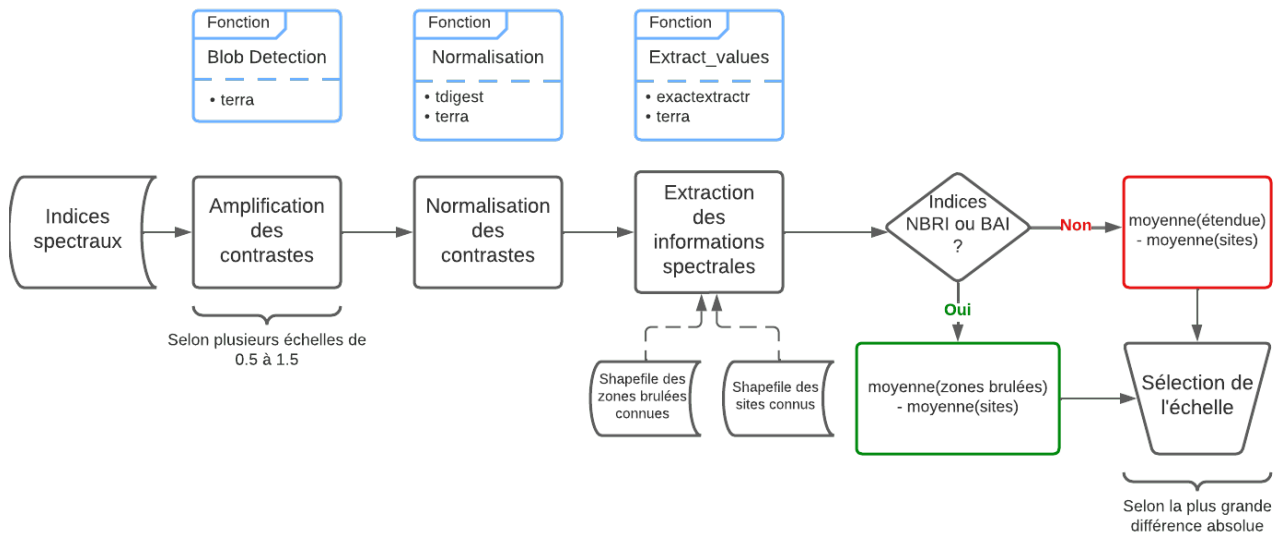


FIGURE 15 – Organigramme du choix des échelles gaussiennes  $\sigma$

Avant de choisir le meilleur  $\sigma$ , chaque image amplifiée a été normalisée selon l'équation 7 afin de pouvoir les comparer entre elles et à terme comparer différentes dates.

$$Valeur.Transforme = \frac{Valeur - Percentile\ 0.1}{Percentile\ 9.9 - Percentile\ 0.1} * 1000 \quad (7)$$

Grâce à la phase de terrain, plusieurs sites d'orpaillage et zones brûlées ont été recensés sur les zones Tekadje et Sambia. Sur base de ces observations, les informations spectrales des sites d'extraction et des aires brûlées, pour chaque indice amplifié et normalisé, ont été extraites grâce au package « exactextractr ». Tandis que la moyenne spectrale de l'étendue a été calculée grâce à la fonction « global » du package « terra ».

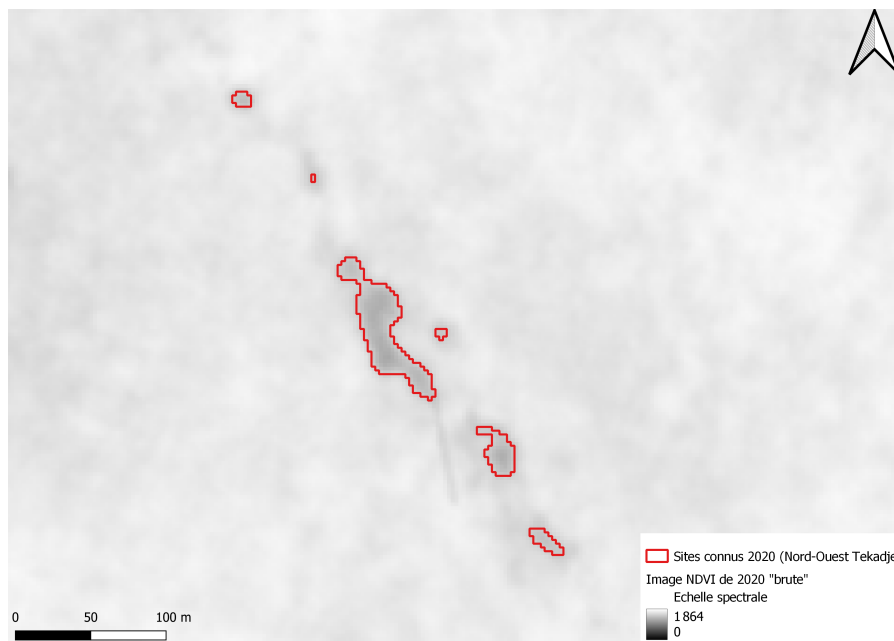
Afin de choisir l'échelle du noyau gaussien la plus appropriée pour chaque indice spectral, plusieurs  $\sigma$  ont été testés par indice afin d'amplifier le contraste sur les objets recherchés.

Ainsi, les différentes échelles du noyau gaussien ont été choisies selon les équations 8 et 9 (pour les indices NBRI et BAI). Le  $\sigma$  sélectionné est celui qui marque la plus grande différence entre le moyenne des sites d'orpaillage connus et la moyenne de l'ensemble de l'étendue (ou la moyenne des zones brûlées pour les indices NBRI et BAI).

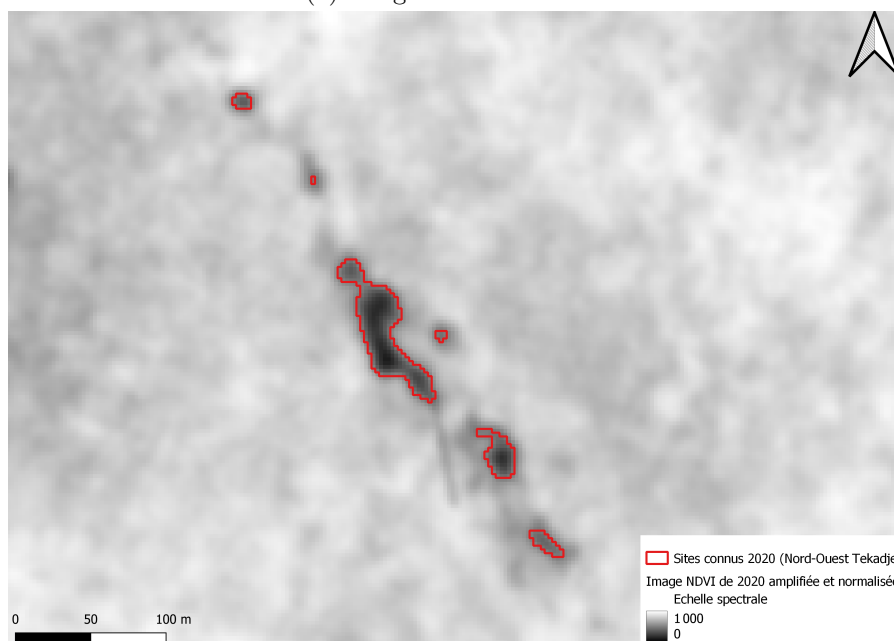
$$\sigma \sim \max(|moyenne(etendue) - moyenne(sites)|) \quad (8)$$

$$\sigma \sim \max(|moyenne(zones\ brulees) - moyenne(sites)|) \quad (9)$$

Les différents  $\sigma$  sélectionnés pour les indices spectraux des images “super-résolues ” et PlanetScope ont respectivement été synthétisés dans les Tables 23 et 24 en Annexe C.2. A titre d'exemple, la Figure 16 illustre, pour une image NDVI de 2020, la différence entre une image « brute » et une image amplifiée et normalisée sur des sites d'orpillage au Nord-Ouest de Tekadje.



(a) Image NDVI « brute »



(b) Image NDVI amplifiée et normalisée

FIGURE 16 – Différence entre une image NDVI « brute » et une image NDVI amplifiée et normalisée

Les Figures 53 et 54 en Annexe C.1 illustrent plusieurs images NDVI amplifiées et normalisées sous plusieurs échelles gaussiennes  $\sigma$  dans la région de « Gbere ». L'Annexe C.3 illustre les échelles gaussiennes sélectionnées pour chaque indice selon les deux types d'images pour des sites connus au nord ouest du village Gbere C.3.

## 2.7 Entraînement du modèle

La figure 17 illustre l’organigramme synthétisant les étapes de la phase d’entraînement du modèle sur des sites connus. Les informations recherchées lors de cette phase d’entraînement sont les quantiles sur les valeurs spectrales, sur les formes des polygones délimitant les sites et sur les statistiques descriptives qui les caractérisent. Pour ce faire, 75 % des données de terrain serviront à alimenter cette phase d’entraînement afin de garder 25 % de ces données pour valider le modèle. Ainsi, pour la zone de Takadje/Gbere 153 points seront utilisés, 50 pour Sambia nord et 2237 points pour Sambia sud.

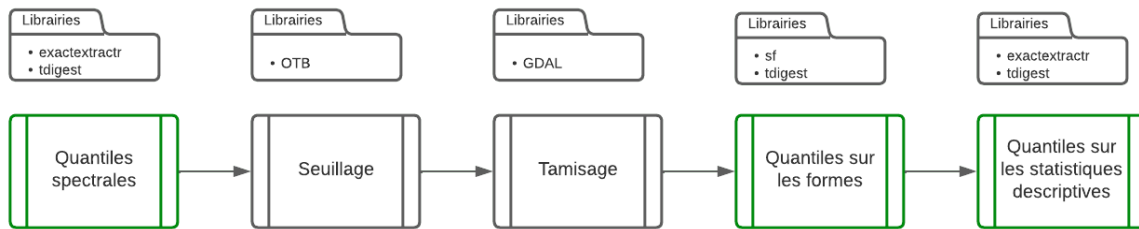


FIGURE 17 – Organigramme représentant les étapes d’entraînement du modèle

Pour la zone Tekadje/Gbere, l’entraînement s’est basé sur des images datant de 2020, tandis que pour les deux zones de Sambia, les images utilisées datent de 2022. Une date antérieure à l’étude a été choisie pour la zone de Tekadje car les données images “super-résolues” étaient de meilleure qualité à cette période. Ainsi, les informations recensées lors de la phase de terrain ont tenu compte de cette particularité.

### 2.7.1 Quantiles spectraux

Afin de créer les quantiles sur les valeurs des indices spectraux amplifiés et normalisés caractérisant un site d’orpillage, l’information spectrale a été extraite grâce à la librairie « exactextractr » pour chaque indice. Cette étape a été réalisée sur des tampons de 1 mètre des points GPS recensés lors de la phase de terrain. Les quantiles ont été calculés sur base de ces informations grâce à la librairie « tdigest ». La Figure 18 illustre les étapes menant à la création des quantiles spectraux. Ces derniers sont enregistrés dans un fichier csv. afin de pouvoir être utilisés à posteriori.

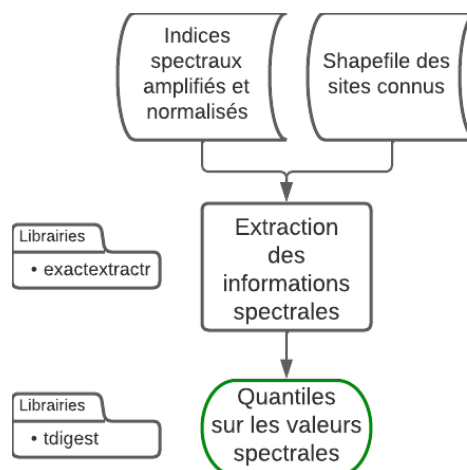


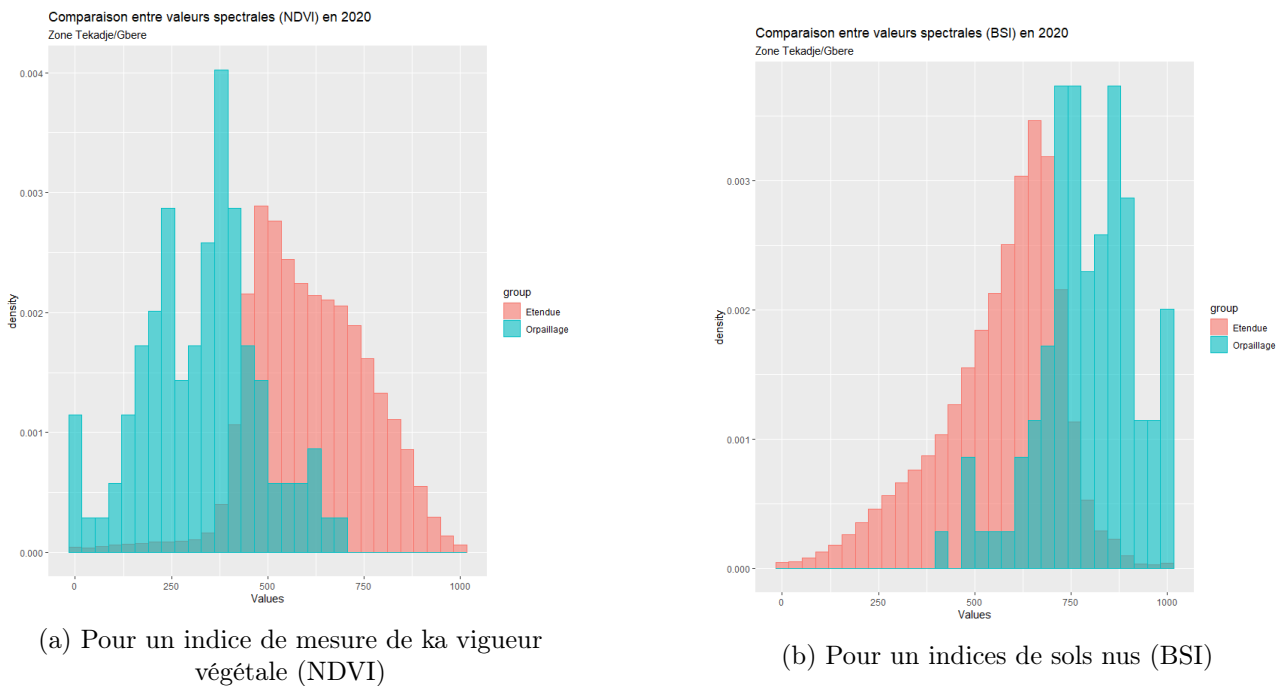
FIGURE 18 – Diagramme de classe de la définition des quantiles spectraux



## 2.7.2 Seuillage

Deux seuillages sont appliqués sur les indices selon les informations spectrales acquises précédemment grâce à la librairie « GDAL ». Un premier seuillage, dit « minimum », sert à discriminer avec plus de certitude des potentiels sites d'orpillage. De plus, ce premier filtre distingue mieux les sites d'extraction des autres types de sols ayant une signature spectrale similaire. Cependant, en ayant restreint la gamme de la couverture spectrale, moins de sites potentiels sont détectés, menant à plus de faux négatifs. Afin de pallier cette contrainte, un deuxième seuillage, dit « maximum », est appliqué. La gamme spectrale recouverte par ce second filtre étant plus large, il permet d'expliquer les éventuels sites non définis précédemment. La Figure 19 illustre les différences des valeurs spectrales pour différents indices entre les sites d'orpillage et l'ensemble de l'étendue.

FIGURE 19 – Histogramme représentant la différence des valeurs spectrales entre les sites d'orpillage et la zone d'étude en 2020



Lors des différents seuillages, on distingue les indices de mesure de la vigueur végétale (BAI, EVI, GNDVI, MSAVI2, NBRI, NDMI, NDVI, OSAVI, SAVI et SR), des indices de sols nus (BSI, DBSI et MBI), d'eau libre (NDWI) et de zones brûlées amplifiées selon les terres brûlées ( $NBRI_{burn-soil}$ ,  $BAI_{burn-soil}$ ). Dans le premier cas, les valeurs spectrales doivent être inférieures au percentile maximum, alors que pour le deuxième cas, les valeurs spectrales doivent être supérieures au percentile minimum. À terme, deux masques sont créés délimitant des éventuelles zones d'extraction. La Figure 20 illustre le diagramme de classe menant à la création de ces premiers masques.

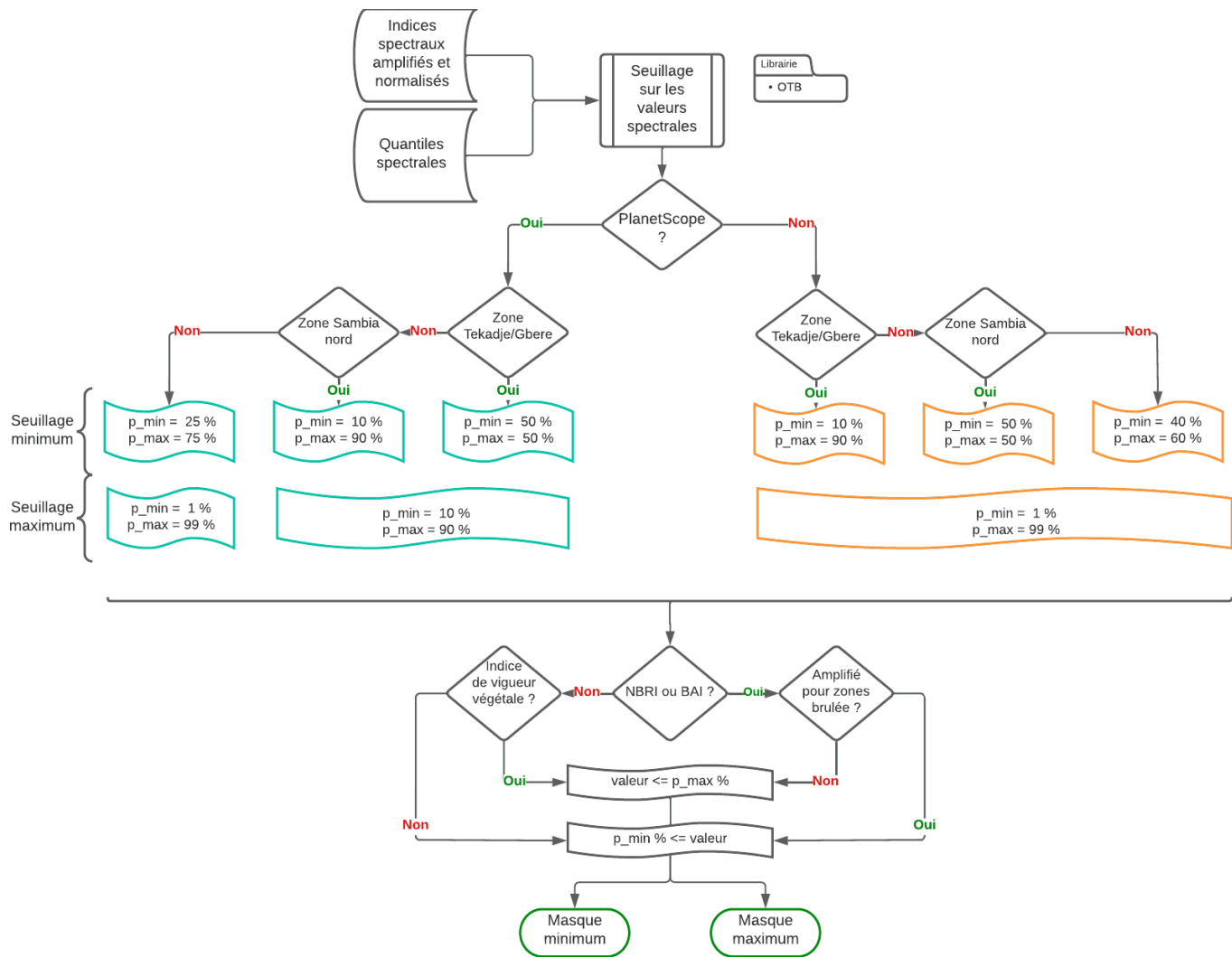


FIGURE 20 – Diagramme de classe de la création des masques minimums et maximums

Le Tableau 2 distingue les différents seuillages appliqués pour cette phase d’entraînement selon les images et les zones étudiées. Ces différentes valeurs ont été sélectionnées afin d’expliquer un maximum de sites connus après une analyse visuelle minutieuse (photo-interprétation).

TABLE 2 – Valeurs de seuillage retenues selon les images et les sites d’études

		Zone Tekadje/Gbere	Zone Sambia nord	Zone Sambia sud
<b>Sentinel-2/ PlanetScope</b>	Seuillage minimum	90 %	50 %	60 %
	Seuillage maximum	99 %	99 %	99 %
<b>PlanetScope</b>	Seuillage minimum	50 %	90 %	75 %
	Seuillage maximum	90 %	99 %	99 %

### 2.7.3 Tamisage

Le tamisage permet d'éliminer certains faux positifs en supprimant les groupes de pixels de petites tailles. La Figure 21 explique les différentes étapes appliquées lors de cette opération grâce à la librairie « GDAL ».

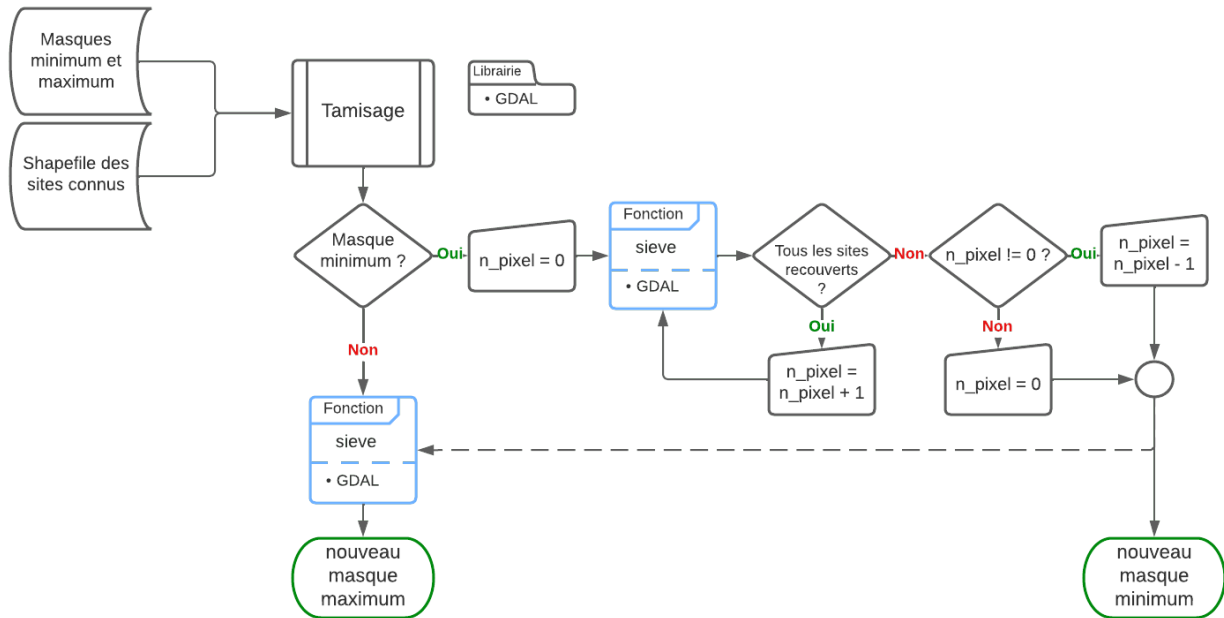


FIGURE 21 – Diagramme de classe du tamisage

Les tailles de groupes de pixels minimum sont choisies selon les masques « minimum », où les amas de pixels sont plus petits. Une fois les tailles choisies, celles-ci sont appliquées aux seuillages « maximum ». Le Tableau 3 synthétise les différentes tailles de groupes de pixels minimum choisies selon les images et les zones étudiées.

TABLE 3 – Tailles de groupes de pixels minimums

Tailles de groupes de pixel minimums			
	Zone Tekadje/Gbere	Zone Sambia nord	Zone Sambia sud
Sentinel-2/ PlanetScope	1	2	2
PlanetScope	1	2	2

## 2.7.4 Quantiles sur les formes et sur les statistiques descriptives

Une fois les masques créés, les groupes de pixels sont polygonisés afin de calculer les indices de formes et les statistiques descriptives définissant les sites d'orpailage. La Figure 22 présente la méthodologie permettant d'arriver à ces résultats.

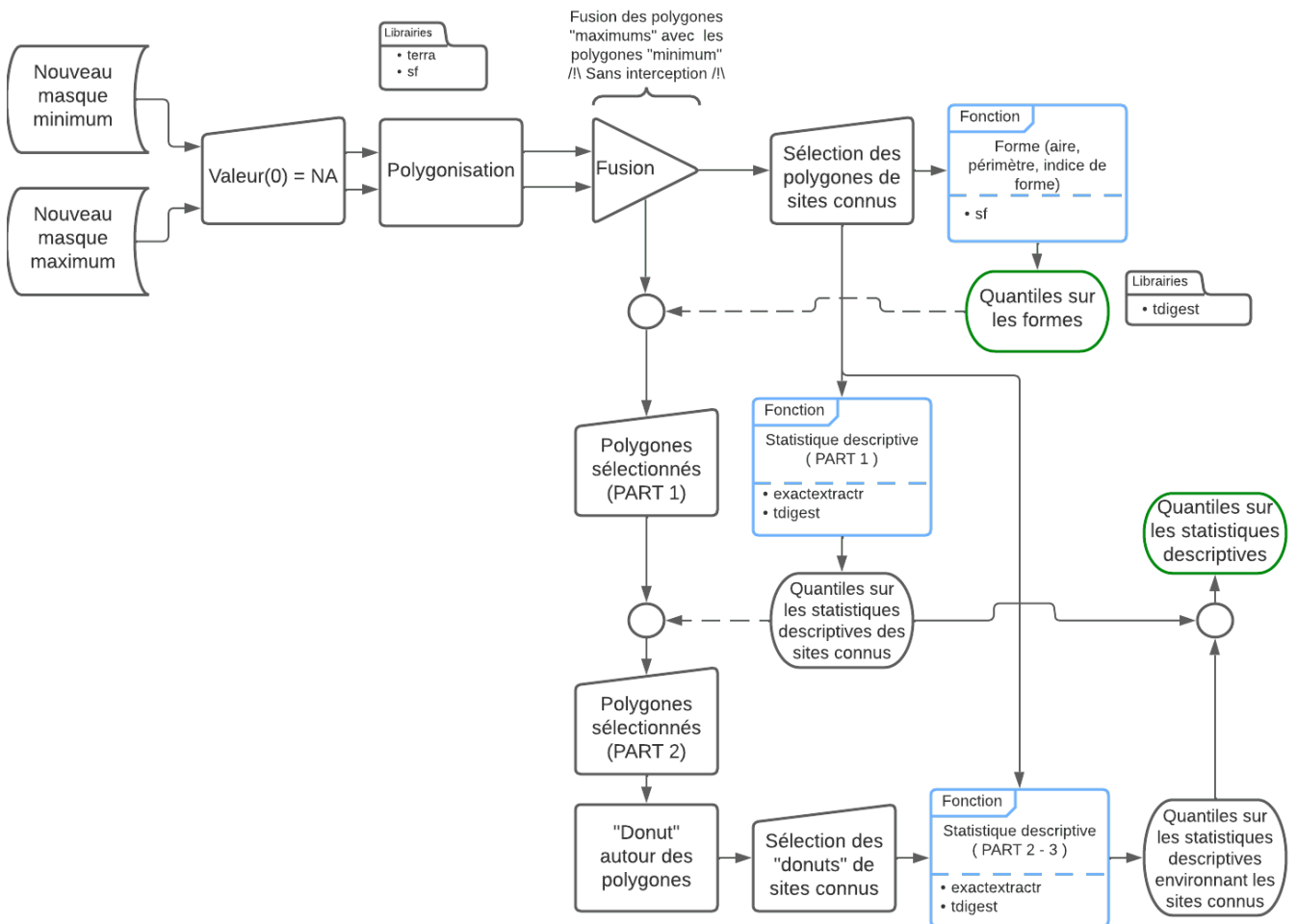


FIGURE 22 – Diagramme de classe de la définition des quantiles de forme et de statistiques descriptives

Avant la polygonisation, les valeurs des rasters égales à 0 sont définies comme « NA ». Après avoir polygonisé séparément les masques « minimums » et « maximums », ceux-ci sont assemblés. Lors de cette étape, les polygones créés par le masque « maximum » n'interceptant pas les polygones issus du masque « minimum » sont ajoutés à ces derniers. Ces informations sont conservées pour la suite de l'entraînement.

Une fois cette étape terminée, les polygones délimitant les sites connus sont sélectionnés afin d'extraire les informations sur leur forme. Celles-ci sont l'aire, le périmètre et l'indice de forme ( $\frac{\sqrt{\text{aire}}}{\text{perimetre}}$ ). Les quantiles sur ces valeurs sont créés grâce à la librairie « tdigest » et sont stockés dans un fichier csv. . Dans ces mêmes polygones, les premières statistiques descriptives sont appliquées sur les indices grâce à la librairie « exactextractr » pour capter la diversité de résultats obtenus des sites d'orpailage.

Les mêmes opérations sont appliquées aux polygones fusionnés précédemment. Ceux répondant aux critères définis par les quantiles de formes et de statistiques zonales sont gardés pour les étapes suivantes.

Un anneau de 16 mètres est créé autour de chaque polygone restant. Les anneaux associés aux sites connus sont gardés pour calculer les statistiques descriptives des indices spectraux sur l'environnement qui les entoure.

La dernière étape calcule la différence entre les statistiques intra sites de celles extérieures aux sites. A termes, les différentes statistiques descriptives sont également rassemblées sous forme de quantiles et sont enregistrées dans un fichier csv. Le Tableau 4 reprend les différentes statistiques calculées lors de cette étape.

TABLE 4 – Statistiques descriptives appliquées aux indices spectraux amplifiés et normalisés sur les sites d'orpaillage et leur environnement

<b>Statistiques descriptives dérivées des indices</b>	
mean	Moyenne
stdev	Ecart-type
var	Variance
sum	Somme
major	Majorité
minor	Minorité
cv	Coefficient de variation
ss	Somme de carrés
count	Somme des fractions de cellules raster avec des non - "NA" valeurs couvertes par le polygone
variety	Nombre de valeurs distinctes dans les cellules entièrement ou partiellement couvertes par le polygone
X0	Minimum
X50	Médiane
X100	Maximum

## 2.8 Application du modèle

Le modèle final se base sur les quantiles créés lors de la phase d'entraînement, à savoir les quantiles sur les valeurs des indices spectraux amplifiés et normalisés, sur les formes des sites et sur les statistiques descriptives dérivées des indices caractérisant les zones d'extraction. La Figure 23 illustre les étapes appliquées dans le modèle final.

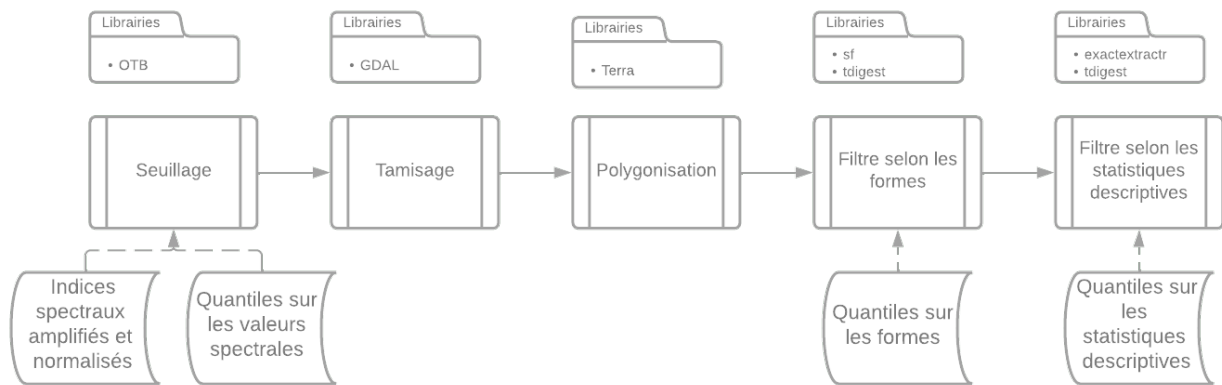


FIGURE 23 – Organigramme représentant les étapes d'application du modèle

Lors de cette étape, il est possible de dessiner une zone précise sur laquelle un contrôle est désiré. Cette option est rendue possible grâce à la bibliothèque « mapview ».

### 2.8.1 Seuillage sur les valeurs spectrales des indices spectraux amplifiés et normalisés

La démarche est similaire à celle appliquée lors de la phase d’entraînement (cfr. Figure 20). Les données d’entrée sont les indices spectraux amplifiés et normalisés. Ces derniers vont être seuillés selon les quantiles spectraux de référence. Cependant, bien que les différents indices aient été normalisés, leur signature spectrale entre les années peuvent différer. Dès lors, il est conseillé d’élargir la gamme spectrale couverte lors du seuillage minimum. Cette étape nécessite une analyse visuelle par photo-interprétation afin de choisir le pourcentage de la gamme spectrale couverte optimale. Le Tableau 5 reprend les différents pourcentages sélectionnés selon les images et les zones pour différentes années. Il est à noter que aucun suivi temporel n’a pu être réalisé dans la région de Sambia nord. Les images PlanetScope n’ont pas pu donner de résultats sur les années différentes de celle de référence pour la région Tekadje/Gbere. Aucun résultat n’a pu être obtenu en 2020 dans la région de Sambia sud sur base des images “super-résolues ”.

TABLE 5 – Valeurs de seuillage minimum retenues selon les images et les sites d’études sur différentes années

Valeurs de seuillage minimums retenues selon les images et les sites d’études				
		Tekadje/Gbere	Sambia nord	Sambia sud
<b>images “super-résolues ”</b>	2019	92 %	/	90 %
	2020	90 %	/	/
	2021	95 %	/	90 %
	2022	98 %	50 %	60 %
<b>PlanetScope</b>	Avril 2019	/	/	90 %
	Avril 2020	50 %	/	90 %
	Mars 2021	/	/	90 %
	Mars 2022	/	50 %	75 %
	Avril 2022	/	/	90 %

## 2.8.2 Tamisage

Un tamisage est appliqué sur les masques créés en définissant une taille minimum pour les groupes de pixels. La Figure 24 illustre cette étape réalisée grâce à la librairie « GDAL ». Les différentes tailles appliquées sont synthétisées dans le Tableau 3.

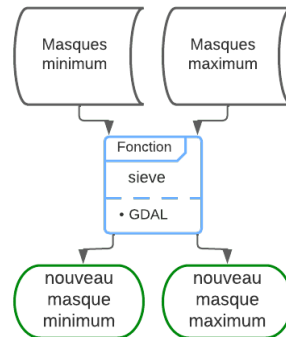


FIGURE 24 – Tamisage des masques

## 2.8.3 Filtre sur les formes et les statistiques descriptives

Les dernières étapes du modèle sont expliquées à la Figure 25. Un premier filtre est appliqué sur les formes des polygones. Les trois autres filtres comparent les statistiques descriptives de ces polygones sur les indices spectraux amplifiés et normalisés avec les quantiles calculés lors de la phase d'entraînement. Lors de chaque étape, les polygones ne répondant pas aux conditions sont supprimés afin d'accélérer la procédure des étapes suivantes. Les résultats finaux reprennent les polygones ayant la plus grande probabilité d'être des sites d'orpillage. Ceux-ci sont enregistrés dans un shapefile afin d'être analysés dans un logiciel SIG.

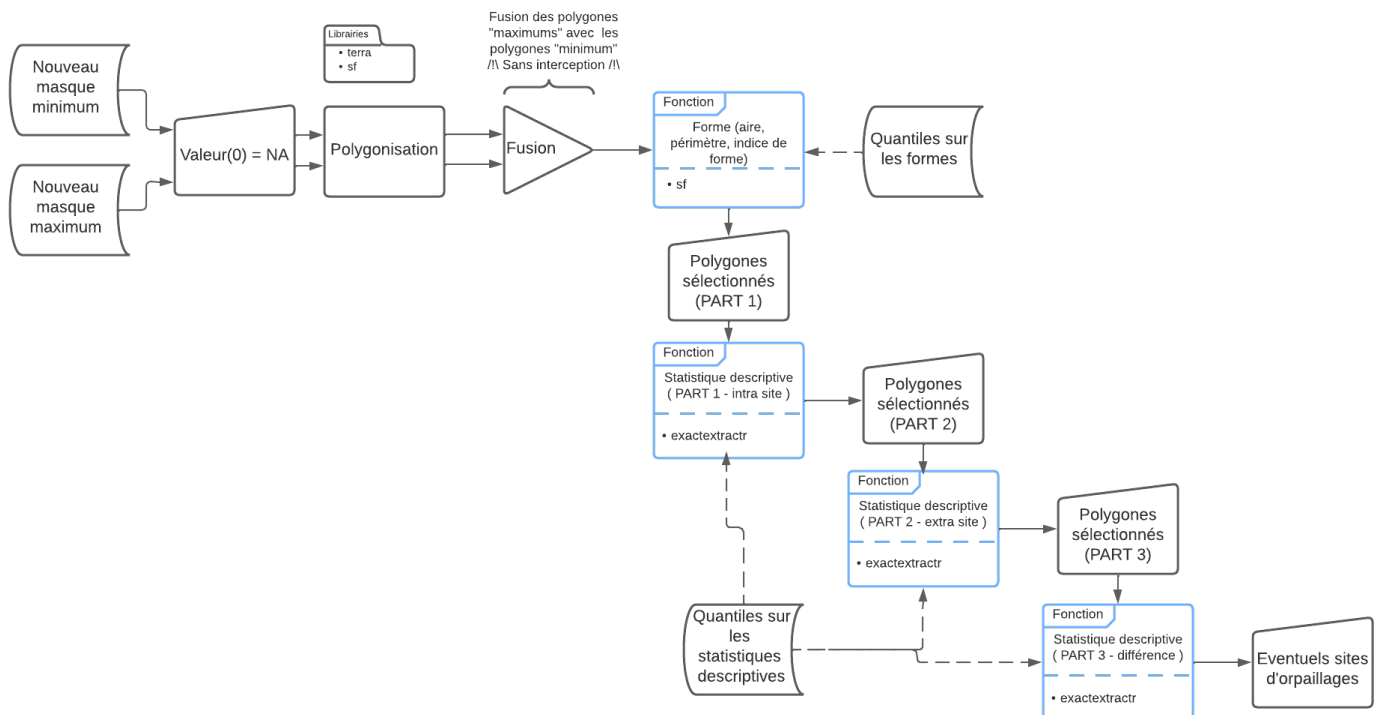


FIGURE 25 – Diagramme de classe de la filtration selon les formes et les statistiques descriptives



## 2.9 Suivi temporel

Une fois que le modèle a créé des polygones correspondant à de potentiels sites d'orpaillage pour différentes dates, celles-ci peuvent être comparées. Cette étape permet d'observer les éventuelles perturbations entre deux moments différents, de détecter l'apparition de nouveaux sites ou de déceler l'élargissement de sites existants. Afin de réaliser cette étape, une différence entre la date la plus récente et la plus ancienne sur les géométries des polygones permet de repérer les nouvelles terres converties en sites d'orpaillage.

## 2.10 Contrôle des prédictions par survol aérien

Après avoir détecté de potentiels sites avec le modèle, il est intéressant de pouvoir valider l'existence de ces derniers. Pour ce faire, le parc de la Garamba possède un capteur aéroporté, le TK9, capable d'acquérir des images multi-spectrales de haute résolution à 16-bit. Le TK9 est composé d'une caméra « Sony Pregius GS-CMOS » dont les caractéristiques sont reprises dans la Table 6.

TABLE 6 – Caractéristiques d'une caméra Sony Pregius GS-CMOS

<b>Caractéristiques d'une caméra Sony Pregius GS-CMOS</b>	
Capteurs de lumière	12 MP (4096 x 3000)
Lentilles couleur / NIR	50 mm prime, f/2.0
Lentille à faible luminosité	50 mm prime, f/0.95
Capteurs LWIR	Étalonnage double FLIR Tau2 (1088 x 512)
Objectifs LWIR	75 mm prime, f/1.1

L'altitude de vol a un impact sur l'aire couverte et la résolution des images acquises. Plus l'avion vole bas, meilleure sera la résolution spectrale. Cependant, la couverture photographiée sera plus petite. Pour notre cas d'étude, il est conseillé d'avoir la résolution la plus fine possible afin de pouvoir détecter les sites d'orpaillage qui peuvent être de petite taille ( $6m^2$ ). Ainsi, pour une large zone, un grand nombre d'images peuvent être produites.

Afin de faciliter l'interprétation de ces images, pour autant qu'il y ait un recouvrement latéral, celles-ci sont traitées dans le logiciel « Metashape ». Cette opération permet de créer une seule ortho-image pour une large zone.

---

### 3 Résultats

Afin de définir les performances du modèle, une matrice de confusion est calculée pour chaque cas. Pour faciliter la compréhension du tableau de contingence, plusieurs métriques sont utilisées :

- **La précision** représente le nombre de classes prédites correctement parmi les classes positives et négatives (cfr. équation 10).
- **Le kappa** mesure la précision du modèle en ajoutant la part de hasard (cfr. équation 11).
- **La sensibilité** est le pourcentage de vrais positifs (cfr. équation 12).
- **La spécificité** d'un test (également appelée taux de vrais négatifs) est la proportion des vrais négatifs sur l'ensemble des valeurs négatives (cfr. équation 13).
- **Valeurs prédites positives (PREC)** est le nombre de prédictions positives correctes divisé par le nombre total de prédictions positives (cfr. équation 14).

$$Precision = \frac{Vrai\ positif + Vrai\ negatif}{Total} \quad (10)$$

$$Kappa = \frac{Pr(a) + Pr(e)}{1 - Pr(e)} \quad (11)$$

où  $Pr(a)$  est la proportion de l'accord entre codeurs et  $Pr(e)$  la probabilité d'un accord aléatoire.

$$Sensibilite = \frac{Vrai\ positif}{Vrai\ positif + Faux\ negatif} \quad (12)$$

$$Specificite = \frac{Vrai\ negatif}{Vrai\ negatif + Faux\ positif} \quad (13)$$

$$PREC = \frac{Vrai\ Positif}{Vrai\ positif + Faux\ positif} \quad (14)$$

### 3.1 Images super-résolues

#### 3.1.1 Zone Tekadje/Gbere

Afin de pouvoir analyser les données, 24 zones de 100 ha ont été tracées autour de sites connus. 1 999 015 points aléatoires ont été créés dans ces dernières pour pouvoir créer les matrices de confusion et évaluer les performances du modèle.

#### Année de référence - 2020

Les résultats obtenus par le modèle en 2020 dans les zones de référence de la région Tekadje/Gbere sont illustrés en Annexe D.1. La Table 7 synthétise la matrice de confusion et les performances du modèle pour l'année de référence, sur les zones connues.

TABLE 7 – Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Tekadje/Gbere pour l'année 2020 ( images “super-résolues ”)

Matrice de confusion			
		Référence	
		Négatif	Positif
Prédiction	Négatif	1996444	422
	Positif	419	1730
Précision		0.9996	
Kappa		0.8043	
sensibilité		0.8039	
Spécificité		0.9998	
PREC		0.8050	

L'analyse de la matrice de confusion donne une bonne performance du modèle. Ce dernier est fiable sur les zones entourant les sites connus pour l'année de référence. De plus, concernant les 19 sites réservés pour la validation, 15 d'entre eux ont bien été détectés (78,9 %). Ainsi, le modèle a détecté que la surface occupée par les sites d'orpaillage dans les zones connues s'apparentait à 2,5625 ha en 2020.

Lorsque le modèle est appliqué sur l'ensemble de la région Tekadje/Gbere, celui-ci détecte 329 sites (7.82 ha), c'est-à-dire 250 sites supplémentaires aux 79 recensés. On peut observer sur la Figure 26 que la plupart des sites détectés se concentrent autour des rivières, des routes ou des villages.

# Sites détectés par le modèle avec des images "super-résolues"

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Google map

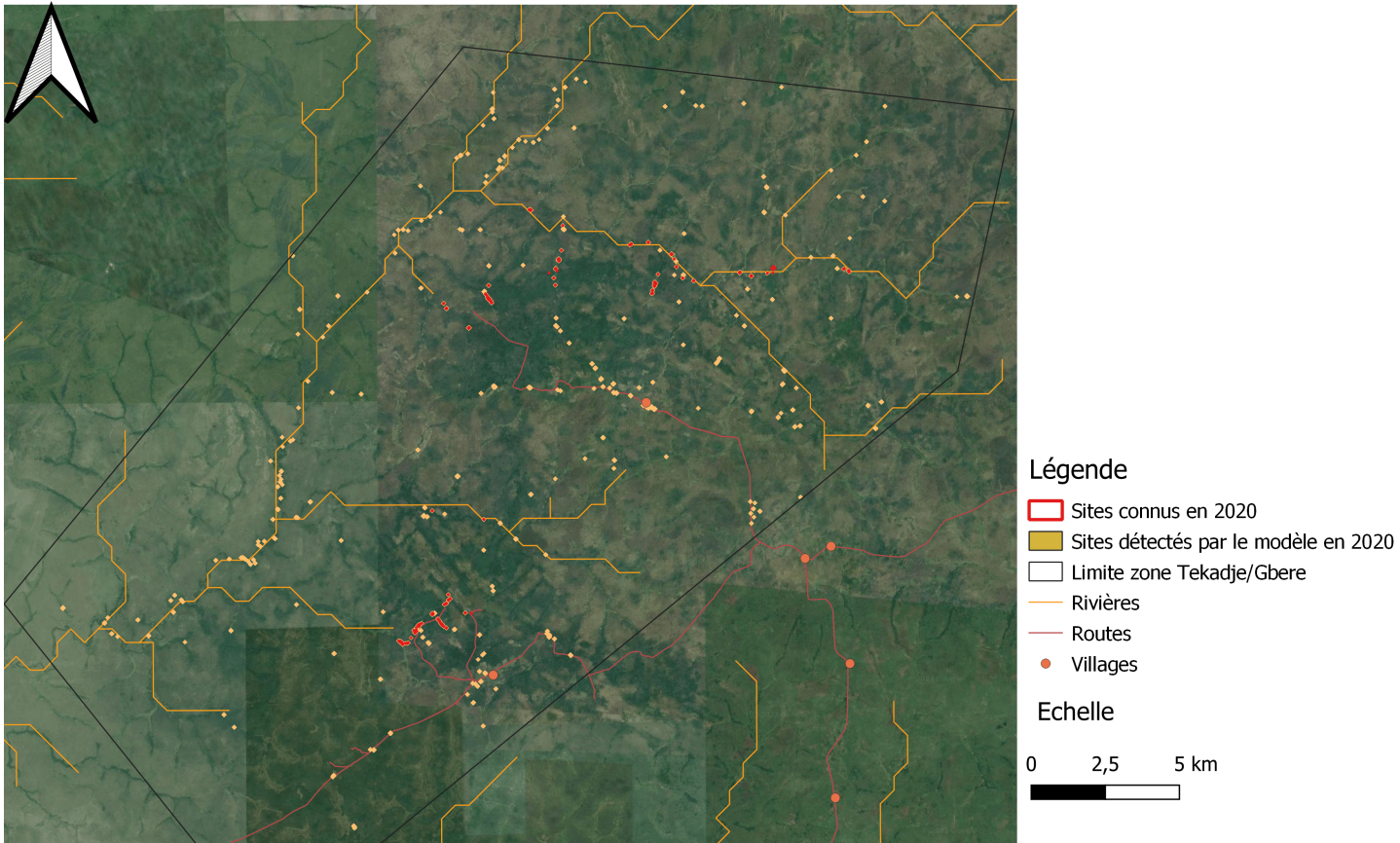


FIGURE 26 – Sites détectés par le modèle avec des images "super-résolues" dans la région Tekadje/Gbere pour l'année 2020

## Autres années

Pour les années différentes de celle de référence, des sites ont été définis par photo-interprétation pour chaque date dans les 24 zones « connues » afin de pouvoir analyser les résultats donnés par le modèle.

### *Année 2019*

TABLE 8 – Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Tekadje/Gbere pour l’année 2019 ( images “super-résolues ”)

<b>Matrice de confusion</b>			
		<b>Référence</b>	
		Négatif	Positif
<b>Prédiction</b>	Néfatif	1998169	522
	Positif	76	248
Précision		0.9997	
Kappa		0.4533	
sensibilité		0.3221	
Spécificité		0.9999	
PREC		0.7654	

### *Année 2021*

TABLE 9 – Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Tekadje/Gbere pour l’année 2021 ( images “super-résolues ”)

<b>Matrice de confusion</b>			
		<b>Référence</b>	
		Négatif	Positif
<b>Prédiction</b>	Néfatif	1997898	699
	Positif	0	418
Précision		0.9997	
Kappa		0.5445	
sensibilité		0.3742	
Spécificité		1.0000	
PREC		1.0000	

TABLE 10 – Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Tekadje/Gbere pour l’année 2022 ( images “super-résolues ”)

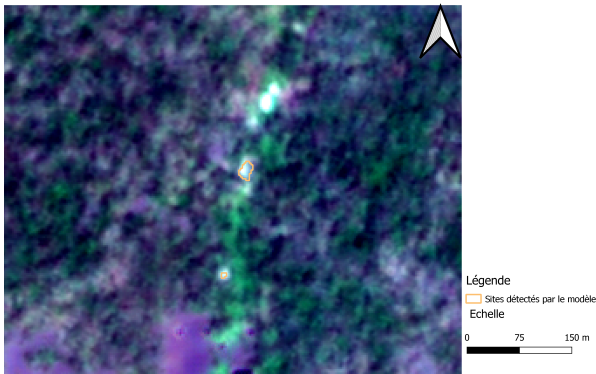
<b>Matrice de confusion</b>			
		<b>Référence</b>	
		Négatif	Positif
<b>Prédiction</b>	Néfatif	1997513	1201
	Positif	98	203
Précision		0.9994	
Kappa		0.2379	
sensibilité		0.1446	
Spécificité		0.9999	
PREC		1.0000	

Bien que les précisions, les spécificités et les PREC du modèle obtiennent de très bons résultats pour chaque année, les kappas et les sensibilités restent très médiocres. La certitude des sites détectés par le modèle sur les différentes années est de 100 % , hormis pour 2019 où cette certitude est de 76,5 % . Cependant, la sensibilité nous informe que le modèle n’arrive pas à détecter toutes les zones d’orpillage. La Figure 27 illustre la différence de sites détectés entre les années pour une zone connue au nord de Tekadje.

FIGURE 27 – Exemples de sites détectés par le modèle avec des images “super-résolues ” sur les quatre années étudiées au nord de Tekadje

Exemples de sites détectés par le modèle avec des images "super-résolues" en 2019

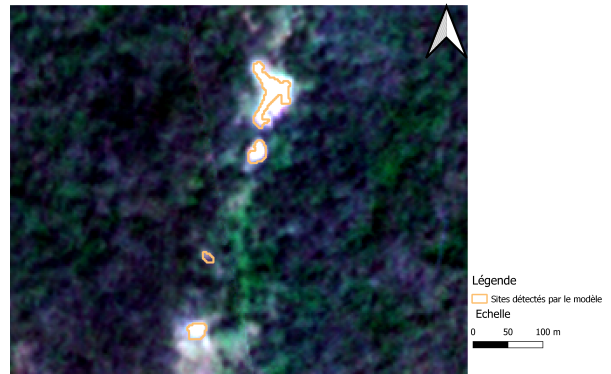
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région Nord Tekadje  
Année 2019  
Fond : Image "super-résolue" de 2019



(a) Année 2019

Exemples de sites détectés par le modèle avec des images "super-résolues" en 2020

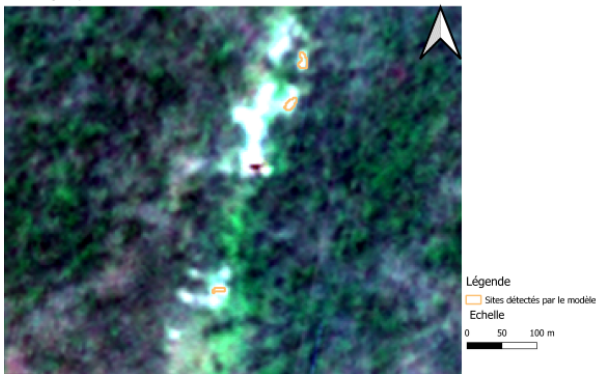
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région Nord Tekadje  
Année 2020  
Fond : Image "super-résolue" de 2020



(b) Année 2020

Exemples de sites détectés par le modèle avec des images "super-résolues" en 2021

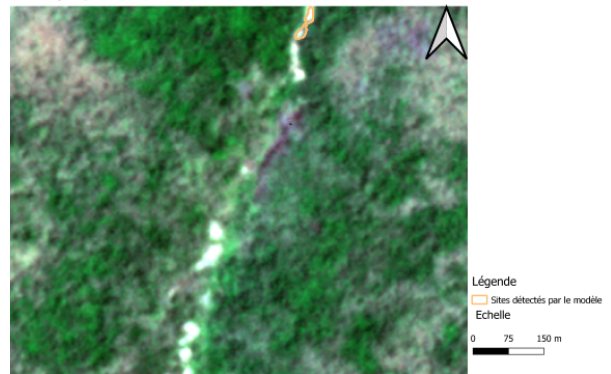
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région Nord Tekadje  
Année 2021  
Fond : Image "super-résolue" de 2021



(c) Année 2021

Exemples de sites détectés par le modèle avec des images "super-résolues" en 2022

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région Nord Tekadje  
Année 2022  
Fond : Image "super-résolue" de 2022



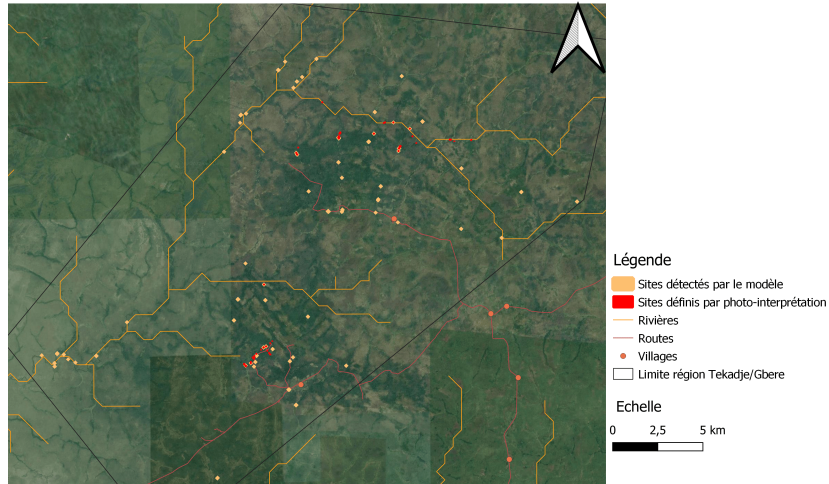
(d) Année 2022

Pour les années 2019, 2021 et 2022, le modèle a respectivement détecté 71, 66 et 48 sites potentiels sur l'ensemble de l'étendue. En observant la Figure 28 on peut remarquer que, comme pour l'année de référence, le modèle détecte de potentiels sites aux abords des villages, le long des rivières et des routes.

FIGURE 28 – Sites détectés par le modèle avec des images “super-résolues ” sur les années 2019, 2021 et 2022 dans la région Tekadje/Gbere

Sites détectés par le modèle avec des images "super-résolues" en 2019

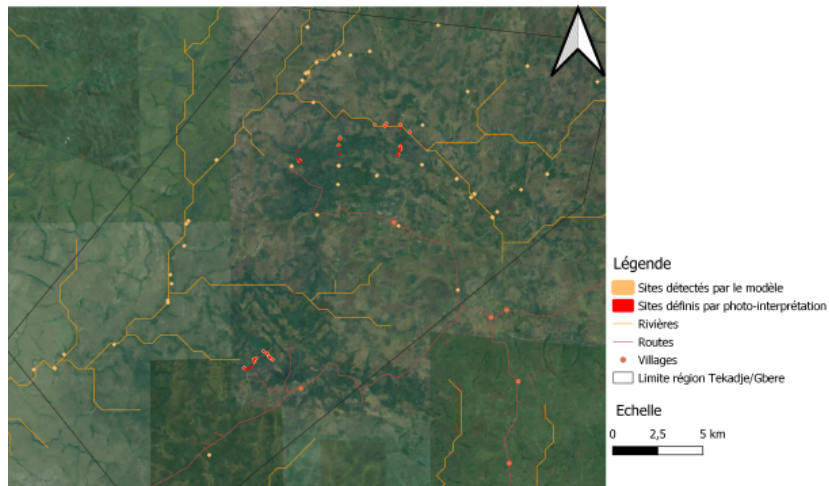
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
 Région : Tekadje/Gbere  
 Année 2019  
 Fond : Google map



(a) Année 2019

Sites détectés par le modèle avec des images "super-résolues" en 2021

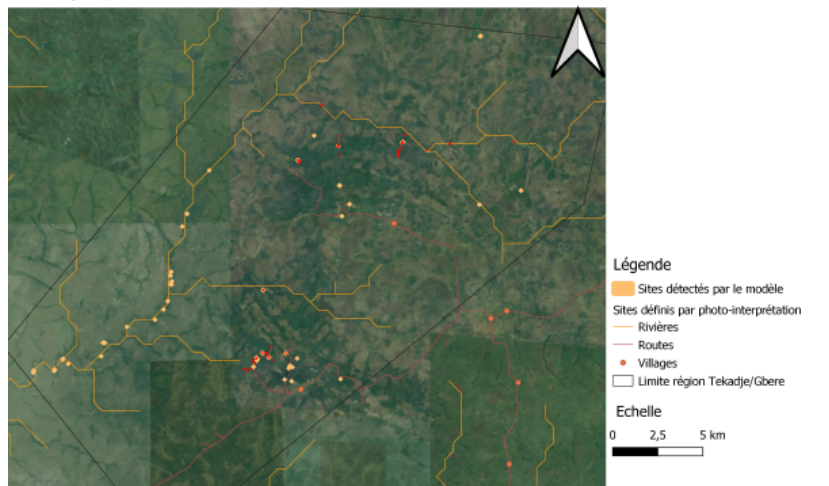
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
 Région : Tekadje/Gbere  
 Année 2021  
 Fond : Google map



(b) Année 2021

Sites détectés par le modèle avec des images "super-résolues" en 2022

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
 Région : Tekadje/Gbere  
 Année 2022  
 Fond : Google map



(c) Année 2022



### 3.1.2 Zone Sambia nord

Afin d'analyser les données, 12 zones de 100 ha ont été tracées autour des sites connus. 194 373 points aléatoires ont été créés dans ces zones dans le but de créer les matrices de confusion et évaluer les performances du modèle.

#### Année de référence - 2022

Les résultats obtenus par le modèle en 2022 dans les zones de référence de la région Sambia nord sont illustrés en Annexe D.2. La Table 11 synthétise la matrice de confusion et les performances du modèle pour l'année de référence, sur les zones connues.

TABLE 11 – Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Sambia nord pour l'année 2022 ( images “super-résolues ”)

Matrice de confusion			
		Référence	
		Négatif	Positif
Prédiction	Néfatif	194123	184
	Positif	6	60
Précision		0.999	
Kappa		0.3868	
sensibilité		0.2459	
Spécificité		0.9999	
PREC		0.9091	

Bien que le modèle donne une précision de 99,71 % et que 90 % des aires détectées sont des sites confirmés, ce dernier présente de mauvaises performances. En effet, 9 sites sur les 25 recensés sont détectés. De plus, sur les 6 sites conservés pour la validation du modèle, 1 seul a été détecté (16,6 %) . Enfin, les sites trouvés par le modèle n'ont pas un recouvrement optimal (cfr. Figure 29).

### Zone 3/12 - Région Sambia Nord

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Fond : Image "super-résolue" 2022

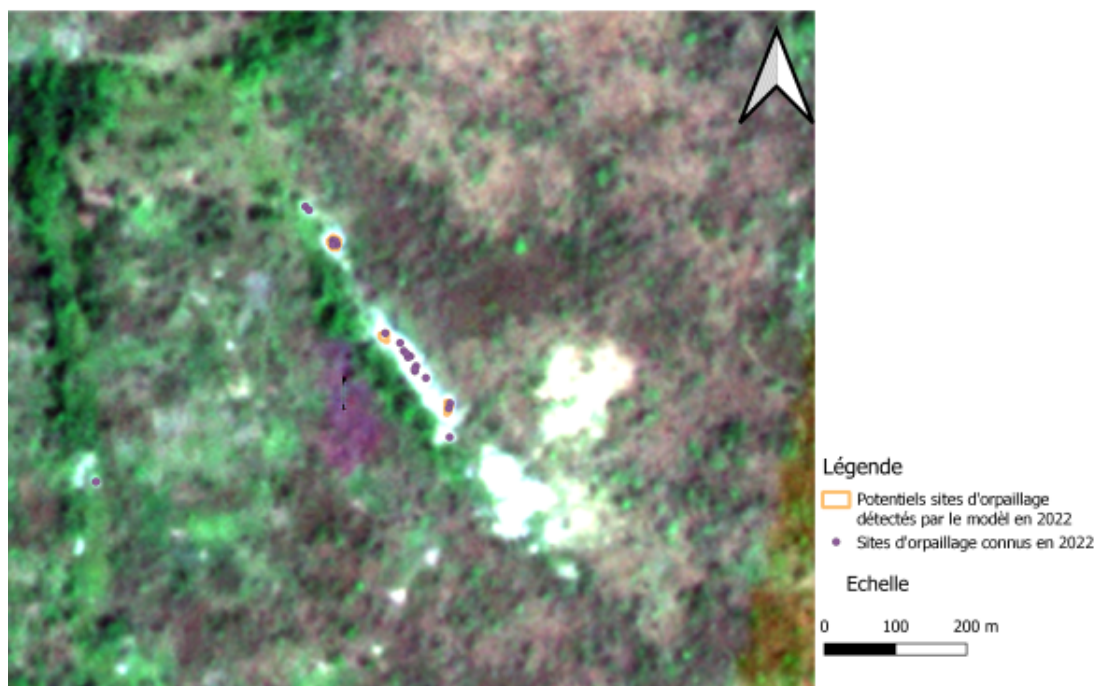


FIGURE 29 – Exemple du recouvrement d'un site d'orpaillage détecté par le modèle dans la région de Sambia nord grâce à des images "super-résolues" en 2022

Le 9 sites connus détectés par le modèle sont les seuls décelés sur l'ensemble de la zone. Ceux-ci représentent une empreinte au sol de 0,3637 ha.

De part ces résultats, le modèle n'a pas fonctionné sur les autres années sur base des images "super-résolues" pour la région de Sambia nord.

### 3.1.3 Zone Sambia sud

Afin d'analyser les données sur cette région, 63 zones de 100 ha ont été tracées autour des sites connus. 1 490 265 points aléatoires ont été créés dans ces zones pour pouvoir créer les matrices de confusion et évaluer les performances du modèle.

#### Année de référence - 2022

La Table 12 synthétise la matrice de confusion et les performances du modèle pour l'année de référence, sur les zones connues de la région Sambia sud.

TABLE 12 – Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Sambia sud pour l'année 2022 ( images “super-résolues ”)

Matrice de confusion			
		Référence	
		Négatif	Positif
Prédiction	Néfatif	1451037	7398
	Positif	26749	5081
Précision		0.9771	
Kappa		0.2200	
sensibilité		0.4072	
Spécificité		0.9819	
PREC		0.1596	

Les performances illustrées par la matrice de confusion ne reflètent pas un fonctionnement du modèle optimal. La sensibilité nous informe que le modèle n'a pas réussi à détecter tous les sites connus et les PREC nous apprennent que beaucoup de faux positifs »ont été créés par le modèle. Cependant, ces deux derniers indices méritent d'être interprétés et discutés. La Figure 30 illustre les réponses apportées par le modèle pour une région à l'Ouest de village Sambia.

Exemple de sites d'orpaillage détectés dans la région Sambia sud

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Ouest du village Sambia  
Fond : Image "super-résolue" 2022

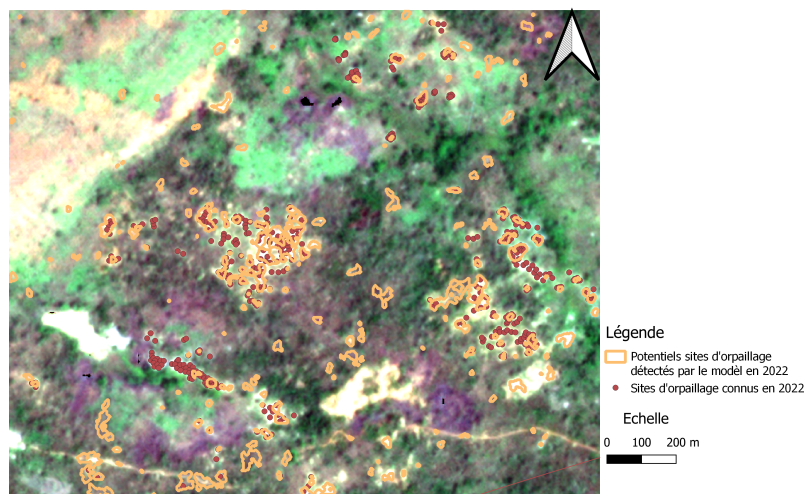


FIGURE 30 – Exemple de sites d'orpaillage détectés grâce à des images “super-résolues ” à l'Ouest du village Sambia en 2022

Parmi les sites réservés pour la validation du modèle dans la région de Sambia sud, 55,26 % ont été détectés. La surface occupée par les sites d'orpaillage dans les zones connues est estimée à environ 102 ha pour cette région et à 350,68 ha sur l'ensemble de l'étendue. La Figure 31 illustre les résultats obtenus par le modèle étendu sur l'ensemble de la région Sambia sud. Beaucoup de potentiels sites sont décelés.

### Sites détectés par le modèle grâce à des images "super-résolues"

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région Sambia Sud  
Année 2022  
Fond : Google map

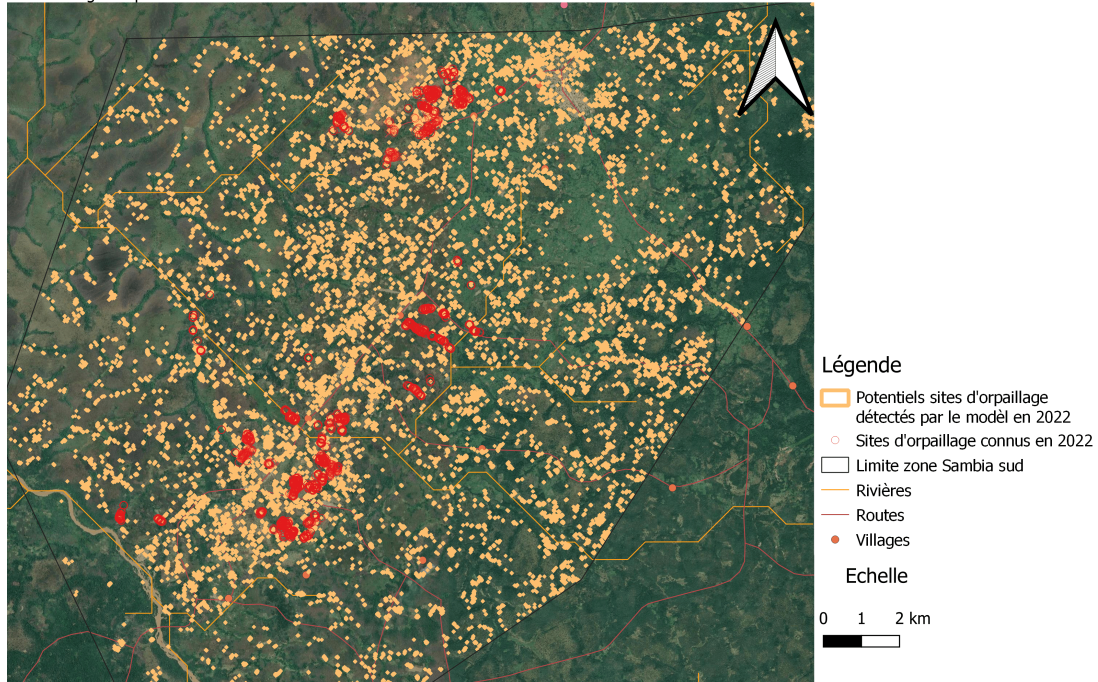


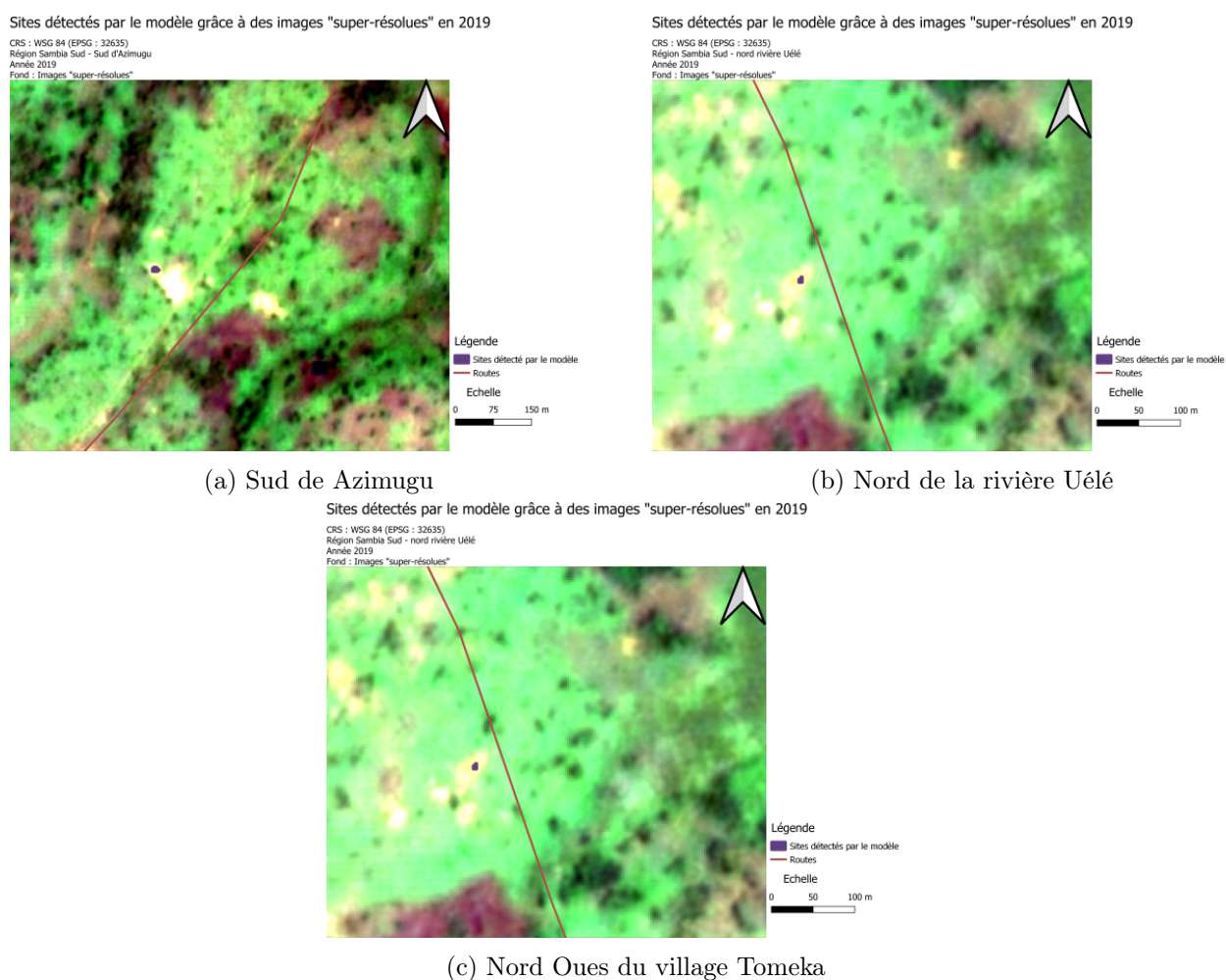
FIGURE 31 – Sites détectés par le modèle avec des images images “super-résolues ” dans la région Sambia sud pour l’année 2022

## Autres années

### Année 2019

Pour l'année 2019, 3 sites sont détectés par le modèle. Ceux-ci ont été confirmés comme sites d'orpaillage par photo-interprétation (cfr Figure 32). Cependant, aucun autre site de prospection n'a été détecté malgré la présence évidente de plusieurs sites dans cette région.

FIGURE 32 – Sites d'orpaillage détectés par le modèle dans la région Sambia sud en 2019



### Année 2020

Le modèle n'a pas donné de résultats pour cette année avec les images "super-résolues".

## Année 2021

Pour l'année 2021, le modèle a détecté 158 sites grâce aux images "super-résolues" pour une superficie de 5,9731 ha. Il est difficile de recenser tous les sites réels pour cette année. Cependant, suite à une photo-interprétation minutieuse, on peut confirmer que l'ensemble des sites décelés dans les zones connues représentent bien des sites d'orpaillage. Certains faux positifs se retrouvent dans des villages (cfr. Figure 33).

Sites détectés par le modèle grâce à des images "super-résolues" en 2021  
(Confondus avec village)

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région Sambia Sud - Village de Sambia  
Année 2021  
Fond : Images "super-résolues" 2021

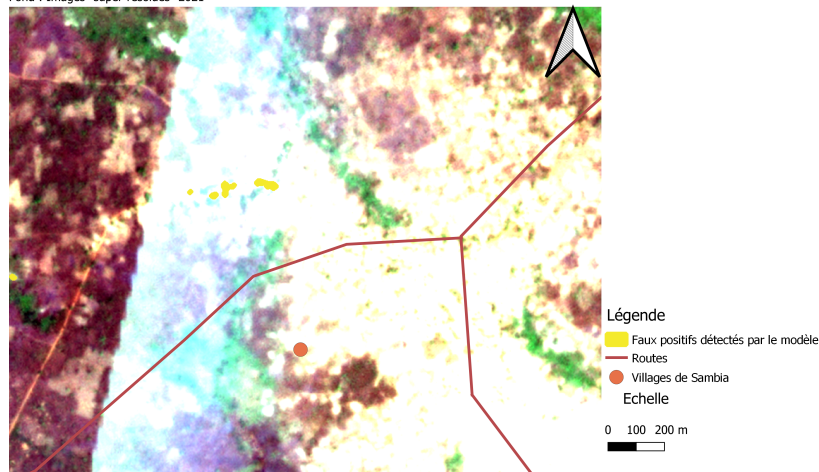


FIGURE 33 – Faux positifs créés par le modèle dans la région Sambia sud sur base d'images "super-résolues"

La Figure 34 représente l'ensemble des sites détectés pour l'année 2021 grâce à des images "super-résolues" dans la région de Sambia sud.

Sites détectés par le modèle grâce à des images "super-résolues" en 2021

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Sambia Sud  
Année 2021  
Fond : Images "super-résolues" 2021

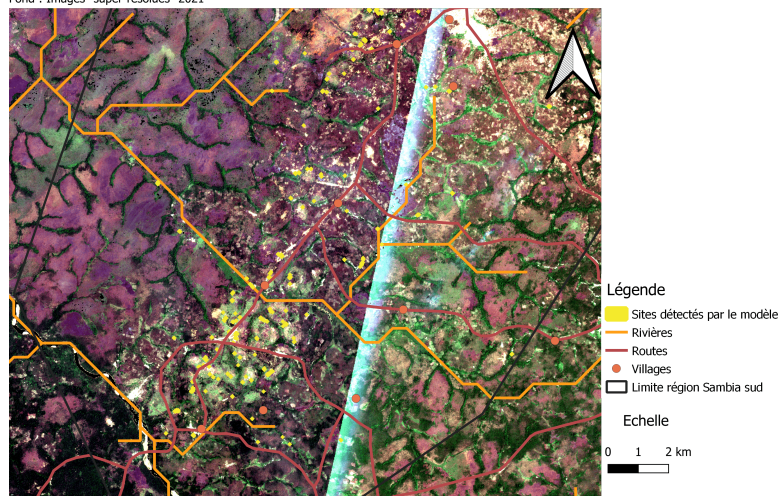


FIGURE 34 – Sites détectés par le modèle avec des images "super-résolues" sur l'année 2021 dans la région Sambia sud

## 3.2 Images PlanetScope

Les mêmes points aléatoires créés dans les zones connues pour les images “super-résolues ” sont repris pour cette partie afin d’analyser les performances du modèle.

### 3.2.1 Zone Tekadje/Gbere

#### Année de référence - 2020

Les résultats obtenus sur base des images PlanetScope dans la région de Tekadje/Gbere sont illustrés en Annexe E.1. La Table 13 synthétise la matrice de confusion et les performances du modèle pour l’année 2020 dans les zones connues de la région Tekadje/Gbere avec des images PlanetScope.

TABLE 13 – Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Tekadje/Gbere pour l’année 2020 (images « PlanetScope »)

Matrice de confusion			
		Référence	
		Négatif	Positif
Prédiction	Néfatif	1994680	1036
	Positif	1424	1875
Précision		0.9988	
Kappa		0.6033	
sensibilité		0.6441	
Spécificité		0.9993	
PREC		0.5683	

Les performances du modèle restent mitigées. En effet, 60 % des données de validation ont été détectées. De plus, les sites connus ont été identifiés à 64,4 % mais représentent 56,8 % de l’ensemble des sites trouvés par le modèle dans les zones connues. Ce résultat indique que le modèle détecte de potentiels faux positifs qu’il est nécessaire d’analyser par photo-interprétation. La surface totale couverte par ces différents sites représente 4,0842 ha.

Sur l’ensemble de l’étendue, le modèle a détecté 209 sites pour une superficie de 12,18 ha. On peut observer sur la Figure 35 que quelques sites détectés se retrouvent le long des rivières et des routes. Cependant, certains d’entre-eux sont détectés au milieu de la matrice paysagère.

## Sites détectés par le modèle grâce à des images PlanetScope

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Google map

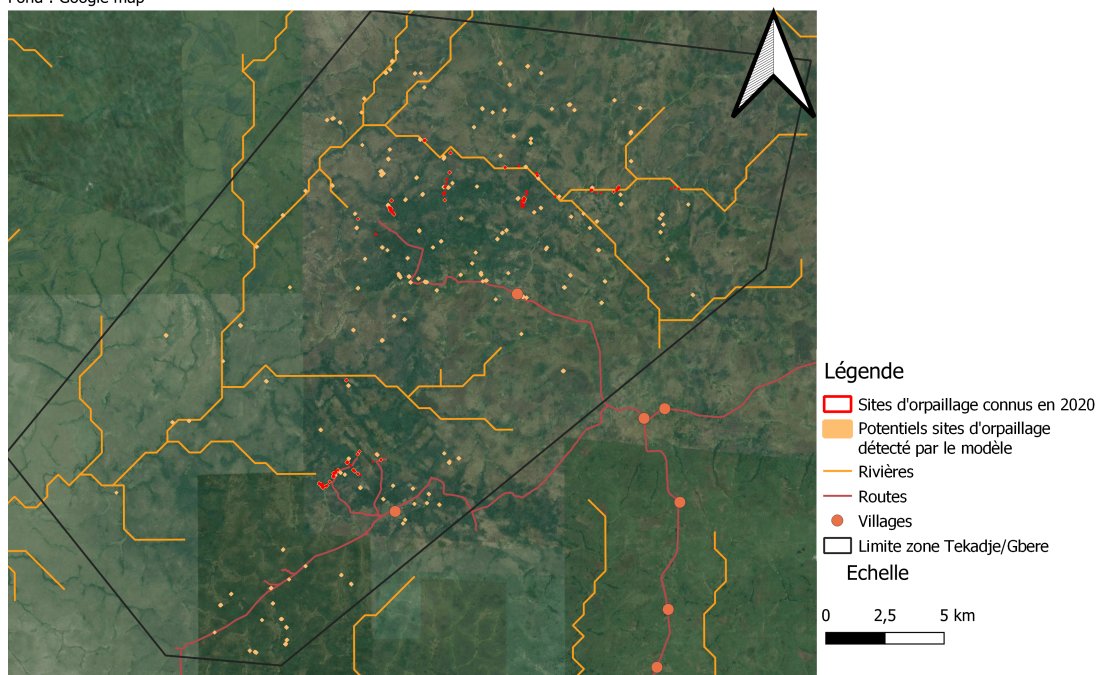


FIGURE 35 – Sites détectés par le modèle avec des images PlanetScope dans la région Tekadje/Gbere pour l'année 2020

### Autres années

Le modèle n'a pas donné de résultats dans la région Tekadje/Gbere sur les autres années sur base des images PlanetScope.



### 3.2.2 Zone Sambia nord

#### Année de référence - 2022

Les résultats obtenus par le modèle grâce aux images PlanetScope en 2022 dans les zones de références de la région Sambia nord sont illustrés en Annexe E.2. La Table 14 synthétise la matrice de confusion et les performances du modèle dans la région Sambia nord en 2022 grâce aux images PlanetScope.

TABLE 14 – Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Sambia nord pour l’année 2022 (images « PlanetScope »)

<b>Matrice de confusion</b>			
		<b>Référence</b>	
		Négatif	Positif
<b>Prédiction</b>	Néfatif	193960	118
	Positif	169	126
Précision		0.9985	
Kappa		0.4668	
sensibilité		0.5164	
Spécificité		0.9991	
PREC		0.4271	

La sensibilité nous informe que tous les sites connus n’ont pas été trouvés par le modèle. De plus, les PREC nous indiquent qu’un nombre non négligeable de potentiels faux positifs sont créés. 13 sites sur 25 recensés ont été décelés. De plus, sur les 6 sites conservés pour la validation du modèle, 2 ont été détectés (33,3 %). Enfin, les sites trouvés par le modèle ont un recouvrement appréciable (cfr. Figure 36).

## Zones 1 et 2 / 12 - Région Sambia Nord

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Fond : Image PlanetScope 2022

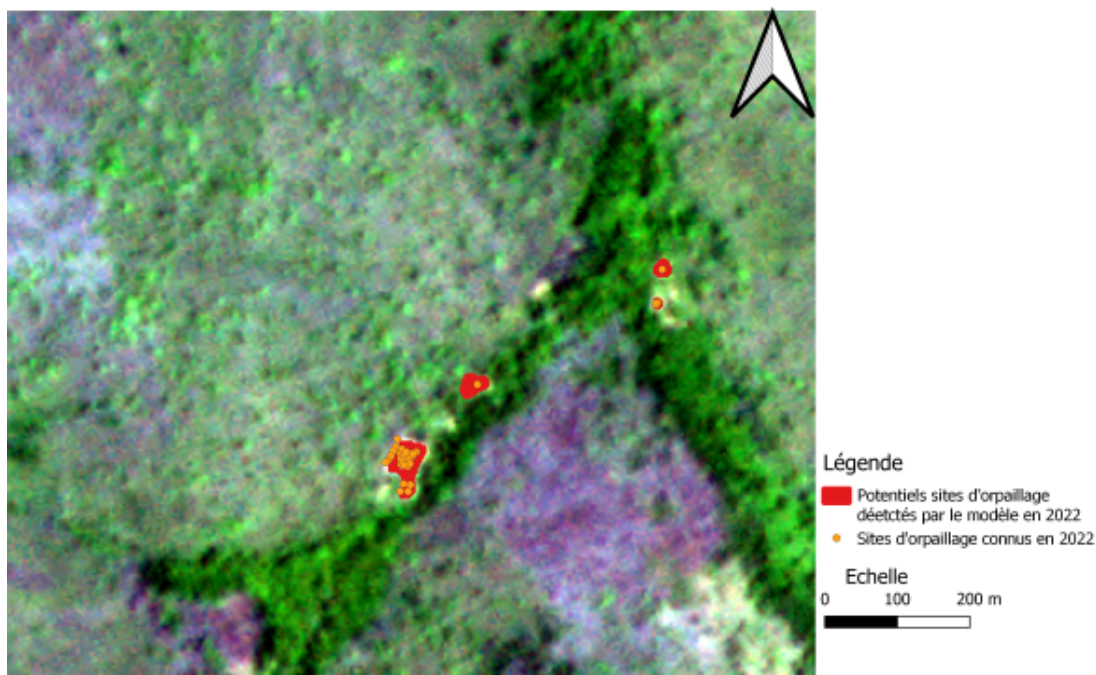


FIGURE 36 – Exemple du recouvrement d'un site d'orpaillage détecté par le modèle dans la région de Sambia nord grâce à des images PlanetScope en 2022

Les 22 sites détectés par le modèle dans les zones connues sont les seuls décelés sur l'ensemble de l'étendue. Ceux-ci recouvrent une surface totale de 1,7271 ha.

Le modèle n'a pas donné de résultats pour les autres années sur base des images PlanetScope dans la région Sambia nord.

### 3.2.3 Zone Sambia sud

Année de référence - Mai 2022

La Table 15 synthétise la matrice de confusion et les performances du modèle dans les zones connues de la région Sambia sud grâce aux images PlanetScope en 2022.

TABLE 15 – Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Sambia sud pour l’année 2022 (Mars) (images « PlanetScope »)

Matrice de confusion			
		Référence	
		Négatif	Positif
Prédiction	Néfatif	1458286	6513
	Positif	19500	5966
Précision		0.9825	
Kappa		0.3067	
sensibilité		0.4781	
Spécificité		0.9868	
PREC		0.2343	

Le Tableau 15 reflète une mauvaise performance du modèle. Les sites connus ne sont pas bien détectés et beaucoup de faux positifs ont été créés. Malgré ces résultats peu encourageants, ceux-ci méritent d’être discutés après photo-interprétation. La Figure 37 illustre les réponses apportées par le modèle pour une région à l’Ouest de village Sambia.

Exemple de sites d’orpillage détectés dans la région Sambia sud

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Ouest du village Sambia  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2022

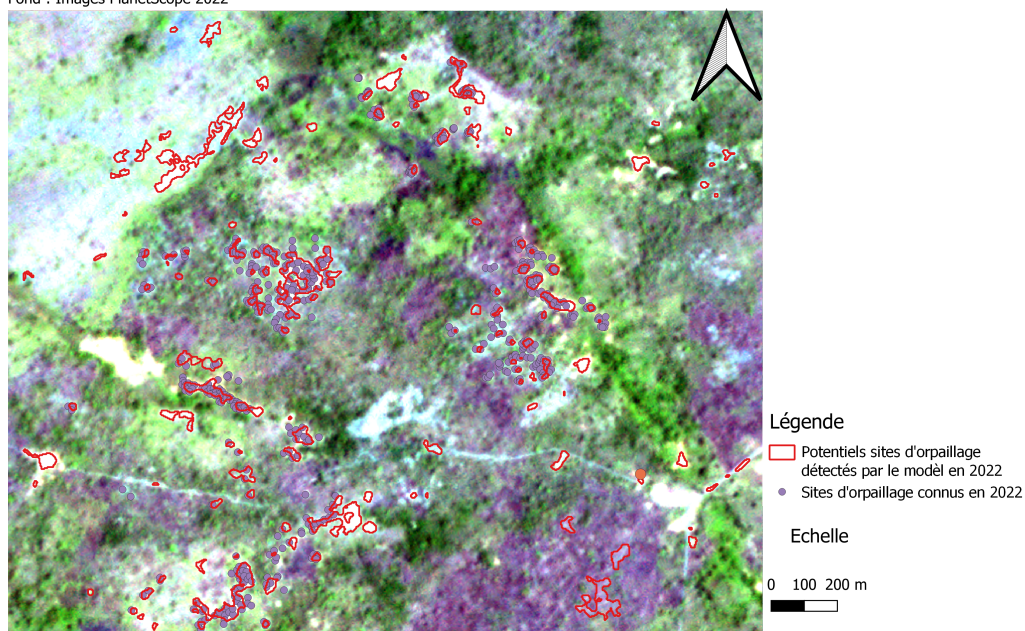


FIGURE 37 – Exemple de sites d’orpillage détectés grâce à des images PlanetScope à l’Ouest du village Sambia en 2022

Parmi les sites réservés pour la validation du modèle dans la région de Sambia sud, 48,68 % ont été détectés. La surface occupée par les sites d'orpaillage dans les zones connues est estimée à environ 81 ha pour cette région. La Figure 38 illustre les résultats obtenus par le modèle, grâce aux images PlanetScope, étendu sur l'ensemble de la région Sambia sud.

### Sites détectés par le modèle grâce à des images PlanetScope

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région Sambia sud  
Année 2022  
Fond : Google map

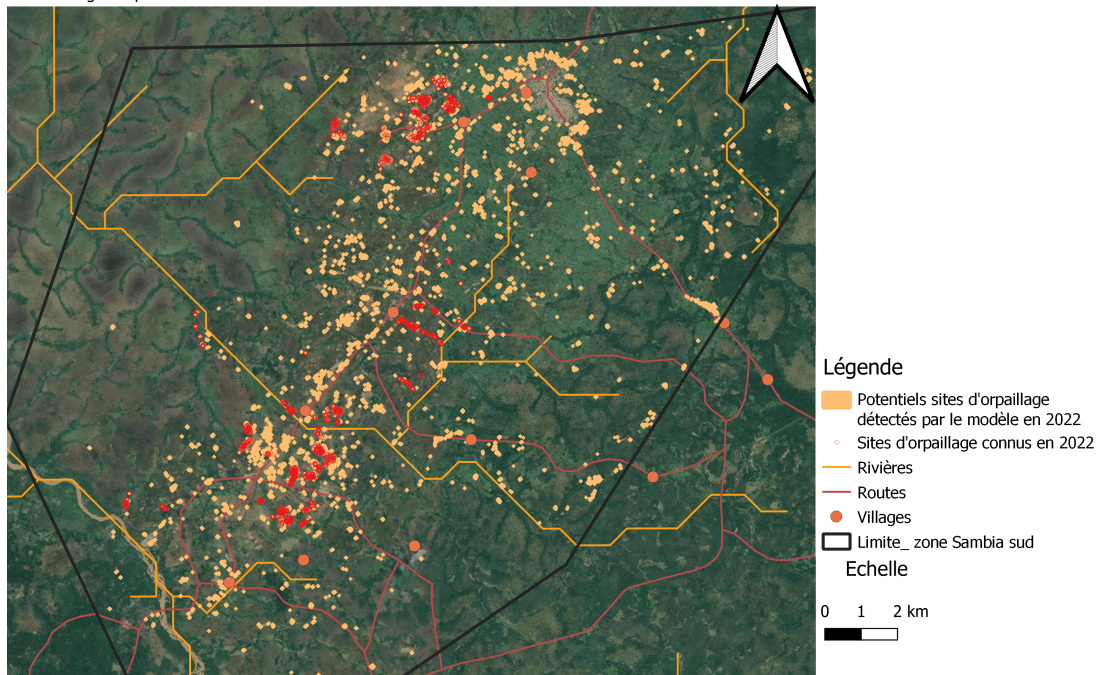


FIGURE 38 – Sites détectés par le modèle avec des images images PlanetScope dans la région Sambia sud pour l'année 2022

## Autres années

### *Année 2019*

Le modèle n'a pas donné de résultats pour cette année à l'aide des images PlanetScope.

### *Année 2020*

Pour l'année 2020, le modèle a détecté 605 sites grâce aux images PlanetScope pour une superficie totale de 34,5 ha, dont 17,4 ha dans les zones connues. Suite à une photo-interprétation minutieuse, l'ensemble des sites détectés représentent bien des sites d'orpaillage. Les faux positifs créés sont pour la plupart confondus avec des villages (cfr. Figure 39)

#### Sites détectés par le modèle grâce à des images PlanetScope en 2020 (Confondu avec village)

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région Sambia sud  
Année 2020  
Fond : Google map

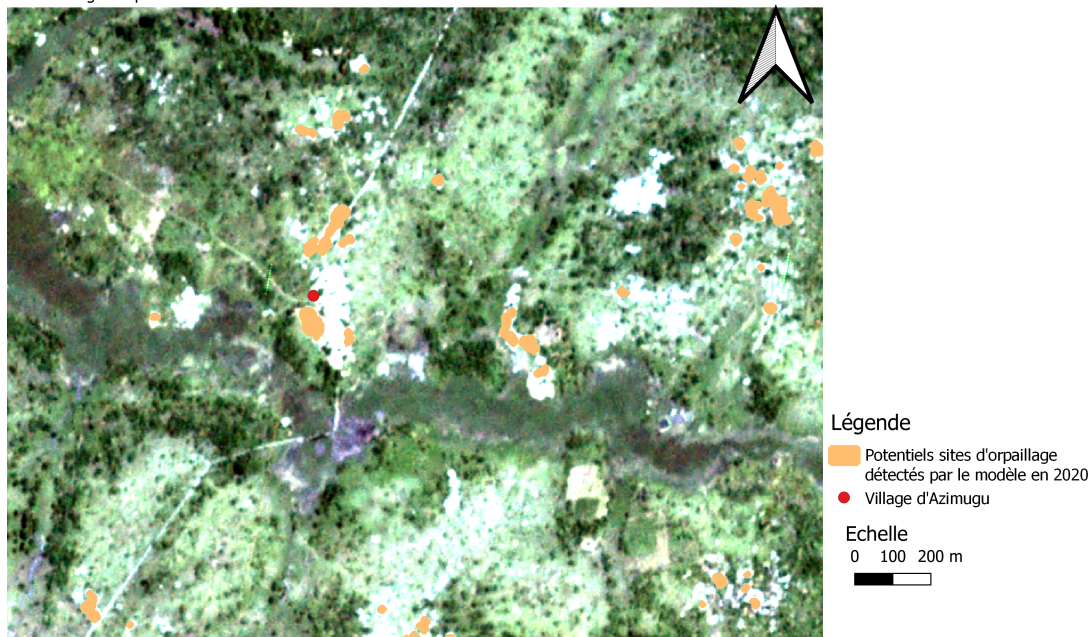


FIGURE 39 – Faux positifs créés par le modèle dans la région Sambia sud sur base d'images PlanetScope

La Figure 40 représente l'ensemble des sites détectés pour l'année 2020 grâce à des images PlanetScope dans la région de Sambia sud.

### Sites détectés par le modèle grâce à des images PlanetScope en 2020

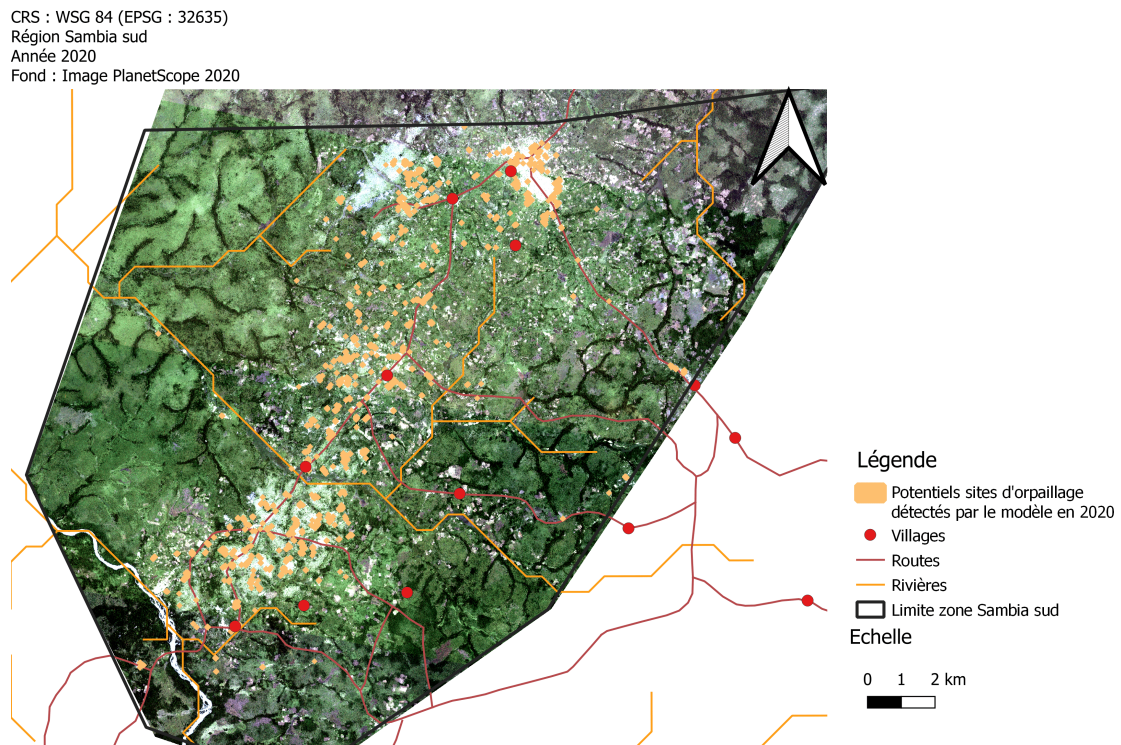


FIGURE 40 – Sites détectés par le modèle avec des images PlanetScope sur l'année 2020 dans la région Sambia sud

## Année 2021

Pour l'année 2021, le modèle a détecté 1057 sites pour une superficie de 112,8 ha, dont 50,63 ha dans les zones connues. Après photo-interprétation, les sites détectés s'apparentent globalement bien à de réels sites d'orpaillage. Cependant, tous les sites d'orpaillage définis par photo-interprétation ne sont pas détectés. Les faux positifs créés se confondent avec des villages ou des champs de cultures.

La Figure 41 représente l'ensemble des sites détectés pour l'année 2021 grâce à des images PlanetScope dans la région de Sambia sud.

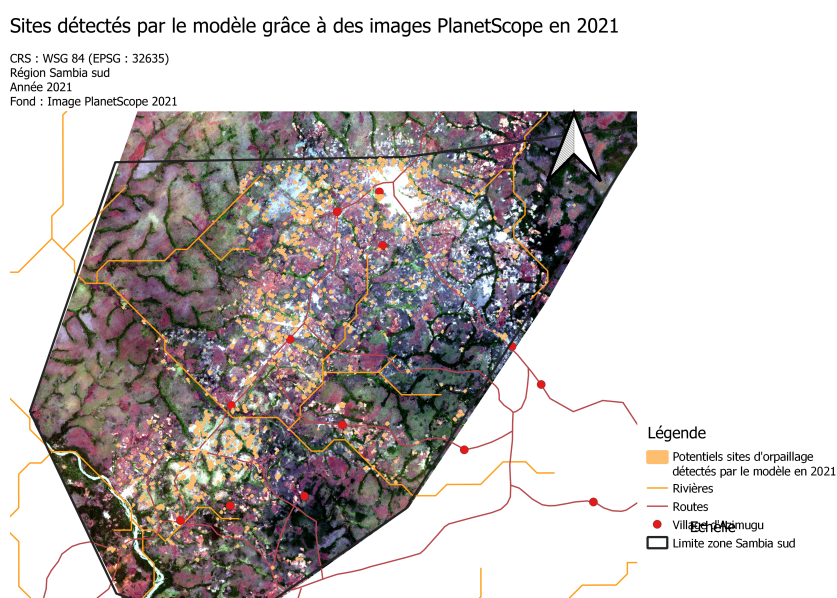


FIGURE 41 – Sites détectés par le modèle avec des images PlanetScope sur l'année 2021 dans la région Sambia sud

La Figure 42 illustre un exemple de potentiels sites d'orpaillage détectés par le modèle en 2021 grâce à des images PlanetScope au sud du village Canon.

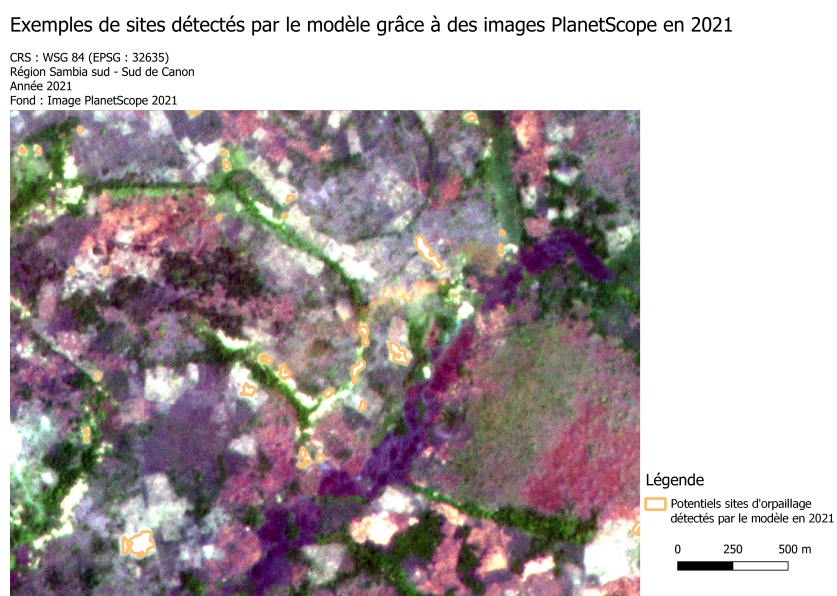


FIGURE 42 – Exemple de sites détectés par le modèle avec des images PlanetScope sur l'année 2021 dans la région Sambia sud au nord du village Canon

Le modèle a été appliqué sur des images PlanetScope d'Avril 2022 afin d'illustrer un suivi mensuel. En effet, de nouvelles images PlanetScope sont créées chaque jour, rendant possible un suivi plus régulier. Ainsi, le modèle a détecté 390 aires attribuées à l'orpaillage pour une superficie de 27,57 ha (7,04 en zones connues) en avril 2022. La matrice de confusion interprétant les résultats obtenus est reprise dans la Table 16.

TABLE 16 – Matrice de confusion et performances du modèle sur les zones connues de la région Sambia sud pour l'année 2022 (Avril) (images « PlanetScope »)

Matrice de confusion			
		Référence	
		Négatif	Positif
Prédiction	Néfatif	1476214	11890
	Positif	1572	589
Précision		0.991	
Kappa		0.0782	
sensibilité		0.0472	
Spécificité		0.9989	
PREC		0.2725	

Les métriques calculées informent une mauvaise performance du modèle. Les sites connus ne sont pas détectés et beaucoup de faux positifs sont générés. La Figure 43 montre les sites détectés par le modèle en Avril 2022.

Exemples de sites détectés par le modèle grâce à des images PlanetScope en Avril 2022

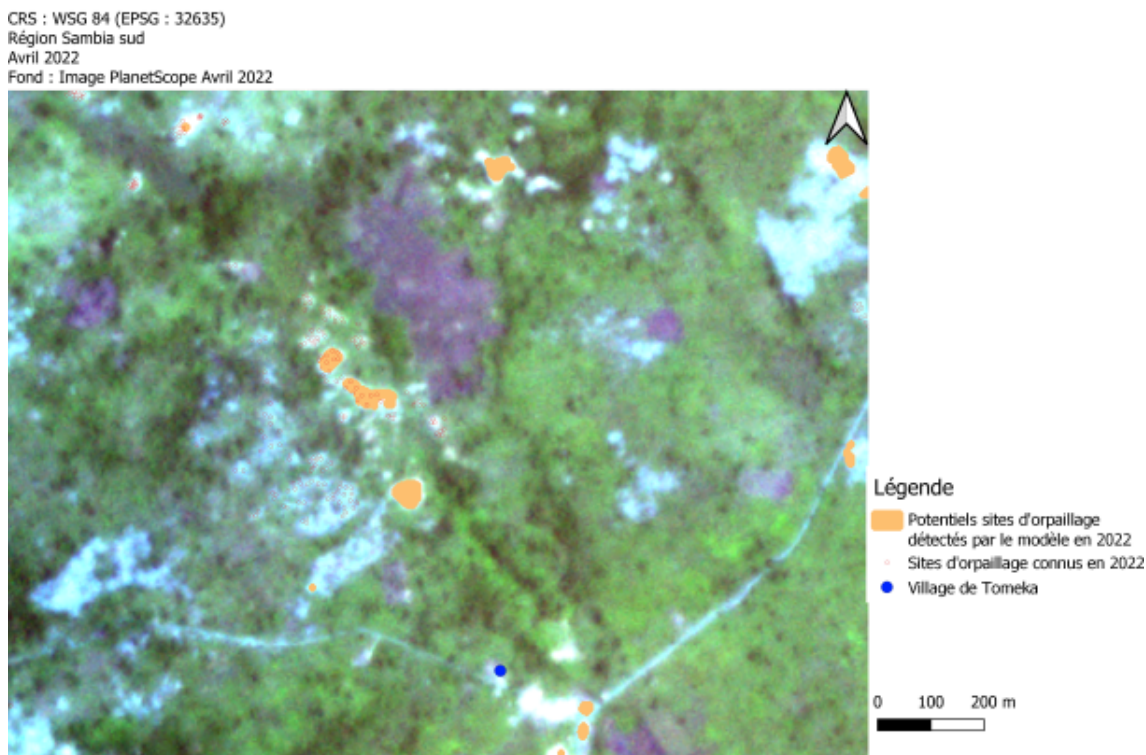


FIGURE 43 – Exemple de sites détectés par le modèle avec des images PlanetScope en Avril 2022 dans la région Sambia sud autour du village Tomeka



### 3.3 Comparaison des images Sentinel-2/PlanetScope

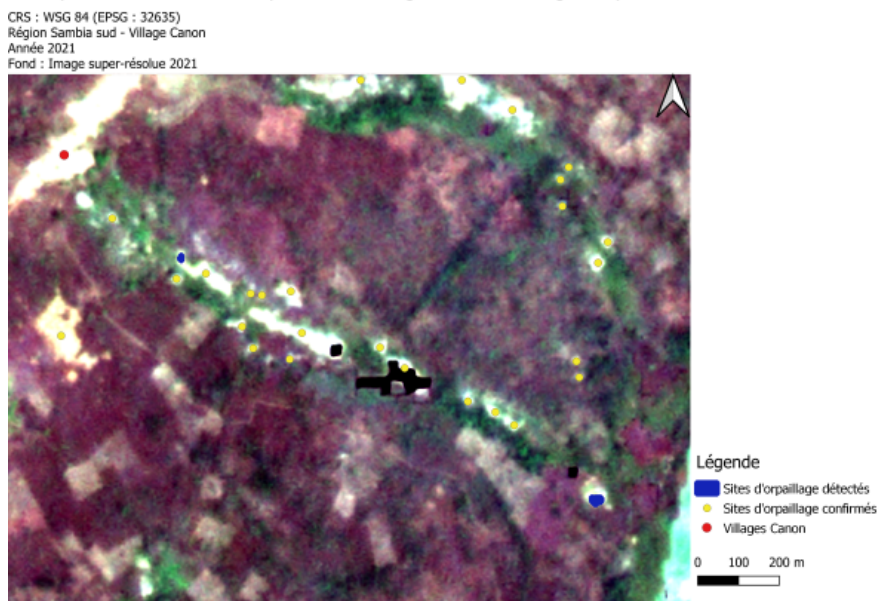
TABLE 17 – Comparaison des différents résultats donnés par le modèle selon les images, les zones et les années

		Images super-résolues					Images PlanetScope														
		Précision	Kappa	Sensibilité	Spécificité	PREC	Précision	Kappa	Sensibilité	Spécificité	PREC										
Tekadje	2019	0.999	0.453	0.322	0.999	0.765															
	2020	0.996	0.8043	0.804	0.999	0.905															
	2021	0.999	0.544	0.374	1.000	1.000															
	2022	0.999	0.238	0.144	0.999	1.000															
Sambia nord	2019																				
	2020																				
	2021																				
	2022											0.999	0.387	0.246	0.999	0.909	0.998	0.467	0.516	0.999	0.427
Sambia sud	2019	+++	---	---	+++	++															
	2020											+++	-	-	+++	-					
	2021											+++	--	--	+++	++	+++	-	-	+++	-
	Mai 2022											0.977	0.220	0.407	0.982	0.160	0.982	0.307	0.478	0.987	0.234
	Avril 2022																0.991	0.078	0.047	0.999	0.272

Les années de références pour les régions Tekadje/Gbere et Sambia sont respectivement 2020 et 2022. Pour les cases rouges, le modèle n'a pas pu fonctionner sur les dates en question. Pour les dates différentes de celle de référence dans la région Sambia sud, l'analyse de performance a été faite par photo-interprétation. Ceci due à l'absence donnés précises antérieur à cette étude.

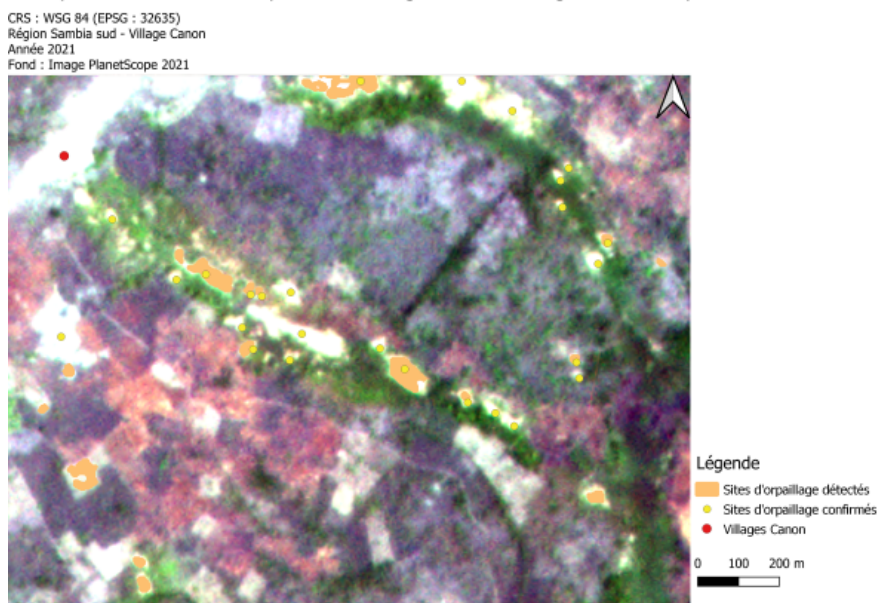
Pour la région de Sambia sud, les années différentes de celle de référence ont été photo-interprétées. La Figure 44 compare les deux types d'images pour des sites confirmés par photo-interprétation aux alentours du village canon dans la région Sambia sud en 2021.

#### Exemples de sites détectés par le modèle grâce à des images super-résolues en 2021



(a) Image super-résolue 2021

#### Exemples de sites détectés par le modèle grâce à des images PlanetScope en 2021



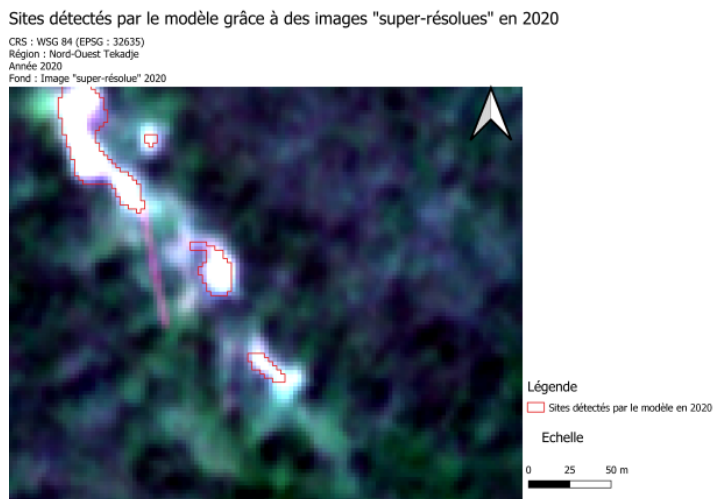
(b) Image PlanetScope 2021

FIGURE 44 – Comparaison entre les deux types d'images dans la région Sambia sud pour des sites d'orpaillage près du village Canon en 2021

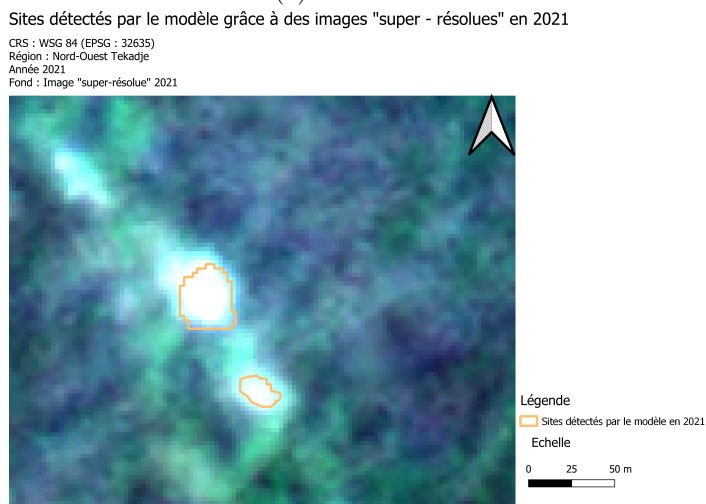
### 3.3.1 Suivi temporel

La Figure 45 illustre le suivi temporel entre l'année 2020 et 2021 sur des images "super-résolues" pour un site d'orpaillage au nord de Tekadje. Le site en question se serait élargi de  $681m^2$  entre les deux années.

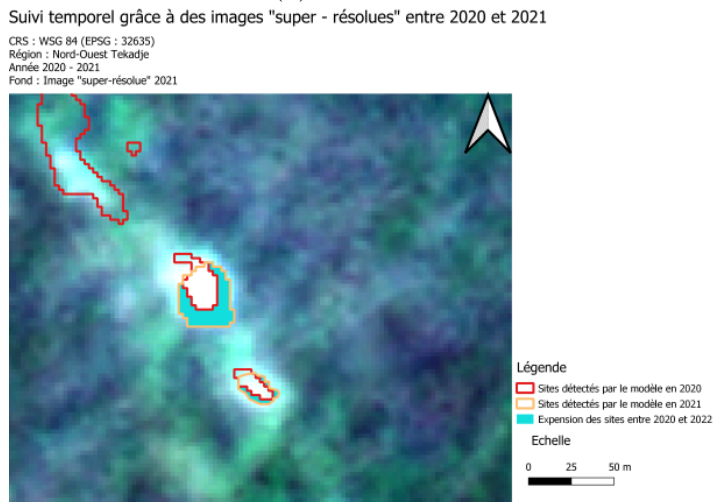
FIGURE 45 – Suivi temporel pour un site au nord de Tekadje entre les années 2020 et 2021



(a) Année 2020



(b) Année 2021



(c) Suivi temporel entre 2020 et 2021

### 3.4 Ortho-images acquises lors des survols aériens

La Figure 46 illustre un exemple d'une ortho-image créée par le programme métashape. Cette mosaïque orthorectifiée est le résultat de la fusion d'images acquises par un vol aérien au nord du village Tekadje en Avril 2022.

#### Exemple d'ortho-image créée par le programme métashape

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord du village Tekadje  
Année 2022

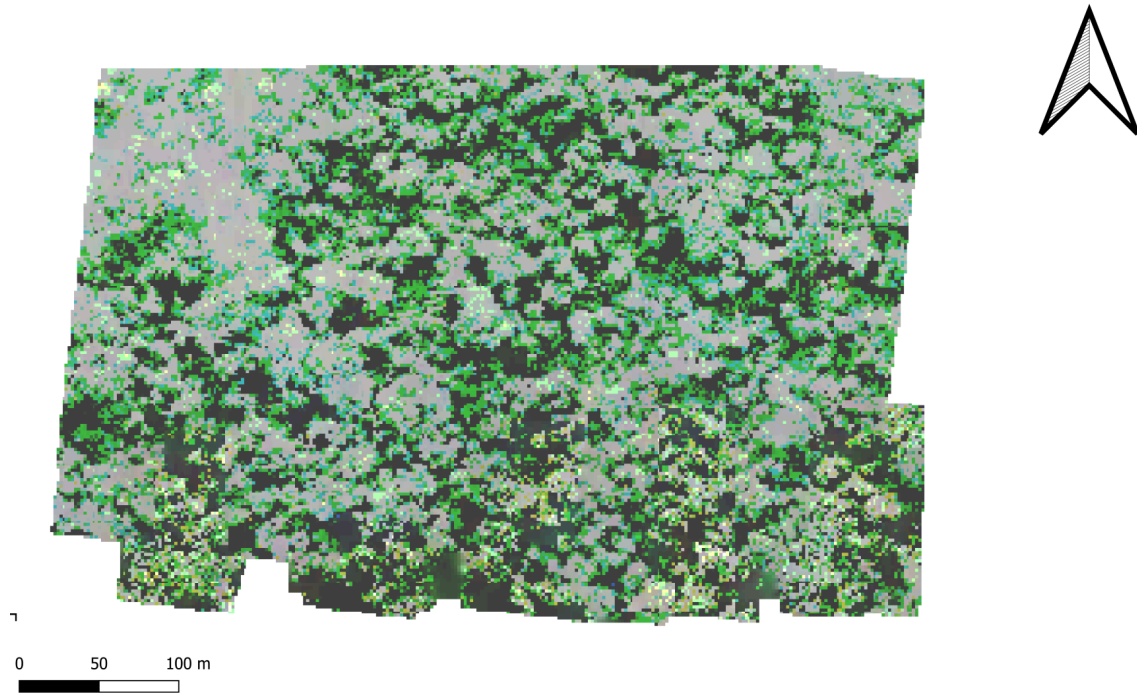


FIGURE 46 – Exemple d'ortho-image créée par le programme métashape

## 4 Discussion

La principale difficulté dans l'élaboration du présent travail a été de séparer la signature spectrale qui définit les sites d'orpillage des autres occupations de sols. Afin de faciliter cette tâche, différents indices spectraux ont été utilisés selon les images (cfr. Annexe B). Dans l'optique de distinguer au maximum les objets recherchés, ces indices ont été amplifiés (GOND & BROGNOLI, 2005). Ces pré-traitements ont permis d'isoler les sites d'orpillage des gammes spectrales des différents indices par rapport à l'ensemble des étendues étudiées. Les Figures 47 et 48 illustrent les histogrammes représentant les résultats de ces pré-traitements pour les deux types d'images sur la région Tekadje/Gbere. Les histogrammes pour les autres régions, Sambia nord et sud, sont repris en Annexe F.

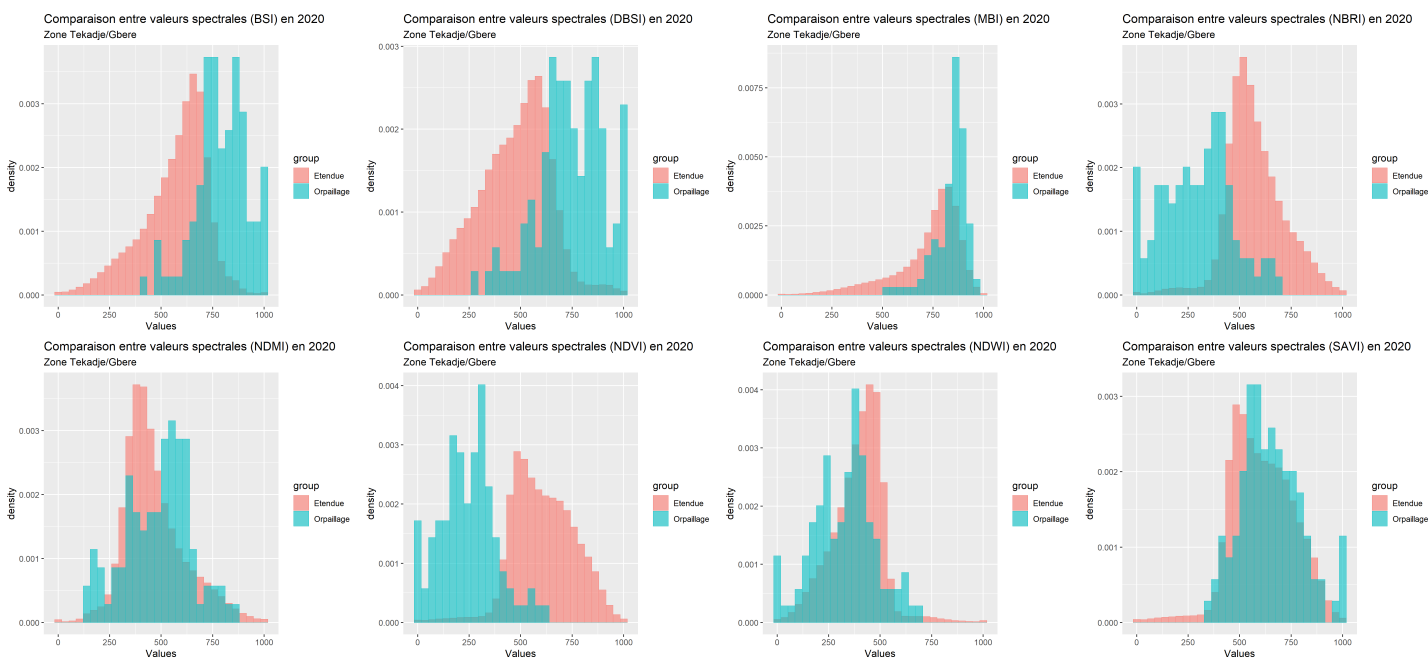


FIGURE 47 – Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d'orpillage et l'ensemble de l'étendue Tekadje/Gbere en 2020 sur base d'images super-résolues

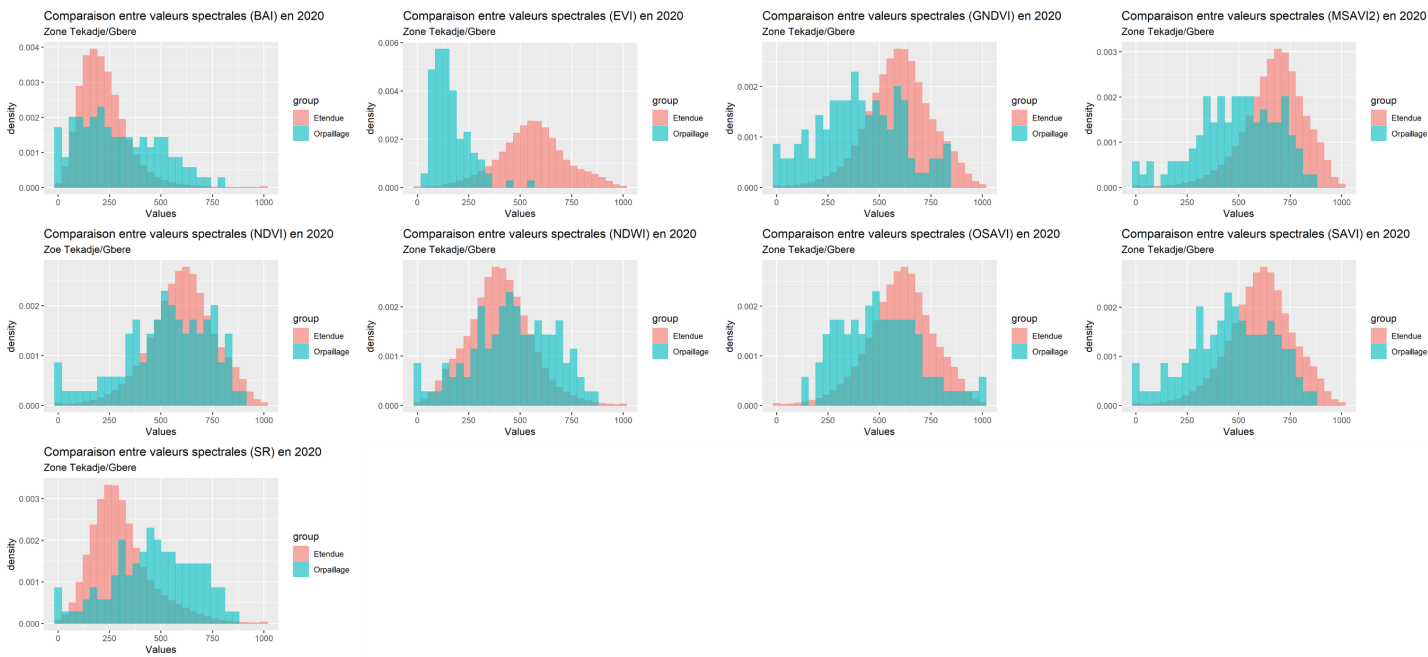


FIGURE 48 – Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d’orpillage et l’ensemble de l’étendue Tekadje/Gbere en 2020 sur base d’images PlanetScope

Grâce aux Figures 47 et 47 et à l’Annexe F, on peut observer que les indices amplifiés et normalisés de sols nus (BSI, DBSI et MBI), l’indice de terres brûlées (NBRI), l’indice de vigueur végétale (EVI) et le ratio du proche infrarouge sur le rouge (SR) sont les indices qui isolent le mieux les sites d’orpillage dans les différents spectres. Les quatre premiers utilisent tous les bandes SWIR1 et/ou SWIR2, ce qui justifie le choix de maximiser l’utilisation de ces bandes. En effet, NGOM et al., 2020 avaient déjà observé cette particularité au Sénégal afin de séparer les sols nus de leur environnement.

Cependant, des similitudes spectrales peuvent persister entre les sols nus des sites d’orpillage et les terres brûlées (ISIDRO et al., 2017; NGOM et al., 2020; MYINT et al., 2011). Afin de différencier un maximum ces deux types de sols, un traitement supplémentaire a été appliqué aux indices de zones brûlées (NBRI et BAI) en amplifiant leurs contrastes sur base des aires brûlées définies par photo-interprétation. Une représentation des résultats obtenus par ces amplifications est reprise en Annexe sous forme d’histogramme.

Les différents groupes de pixels formés par les seuillages ont servi de délimitation pour extraire des statistiques descriptives zonales sur bases des indices spectraux. Les groupes de pixels sélectionnés comme potentiels sites d’orpillage devaient répondre aux exigences calculées dans les délimitations et l’environnement des sites connus.

## 4.1 Années de référence

### 4.1.1 Zone Tekadje/Gbere - 2020

Les meilleurs résultats apportés par le modèle sont sur la zone Tekadje/Gbere pour l'année 2020, année de référence pour cette étendue. Ces performances sont expliquées par les histogrammes en Annexe F représentant la séparabilité des sites par rapport aux autres occupations de sol selon les différents indices spectraux. De plus, l'indice PREC calculé sur base des matrices de confusion nous explique la quantité de sites d'orpaillage, confirmés, détectés par le modèle sur l'ensemble des potentiels sites identifiés par ce dernier. Le PREC nous informe indirectement sur la quantité de faux positifs détectés et ainsi, sur les performances de séparabilité du modèle avec les autres types de sols. Plus l'indice PREC sera bas, plus le modèle aura détecté de faux positifs. En analysant la Table 17, cet indice est le plus élevé pour la zone Tekadje/Gbere, témoignant de la performance du modèle pour isoler les sites d'orpaillage des autres types de sol. Néanmoins, en comparant cet indice entre les types d'images, les super-résolues obtiennent de meilleures performances. De plus, en observant les sensibilités, les images "super-résolues" détectent mieux les sites connus que les PlanetScopes.

Pour les deux types d'images, lorsque le modèle est étendu à l'ensemble de la région, certaines zones détectées se retrouvent le long des rivières, des routes ou des villages. Ces sites sont facilement analysables par photo-interprétation grâce à leur disposition dans le paysage. De plus, dans le passé, des sites connus se retrouvaient le long des rivières. Il a donc été décidé de ne pas supprimer ces sites d'extraction dans le modèle. Les images "super-résolues" ont détecté plus de potentiels sites (329) comparés aux images PlanetScope (209).

### 4.1.2 Zone Sambia nord - 2022

Les résultats pour la région de Sambia nord sont mitigés. D'une part, les sites distinguent bien les sites des autres occupations de sols ( $PREC = 0.909$ ). D'autre part, les sites connus ne sont pas bien décelés (sensibilité = 0.246). Bien que détectant mieux les sites connus (sensibilité = 0.516), les images PlanetScope ne différencient pas bien les sites d'orpaillage des autres types de sol ( $PREC = 0.427$ ). Ces observations sont les conséquences des choix appliqués lors de la définition du seuillage minimum (cfr. § 2.7.2). Pour les images "super-résolues", ce dernier avait été fixé à 50 %, tandis que pour les PlanetScope, le seuillage était de 90 %. Ces décisions ont été prises sur base des analyses des histogrammes pour cette région (cfr. Figures 88 et 91).

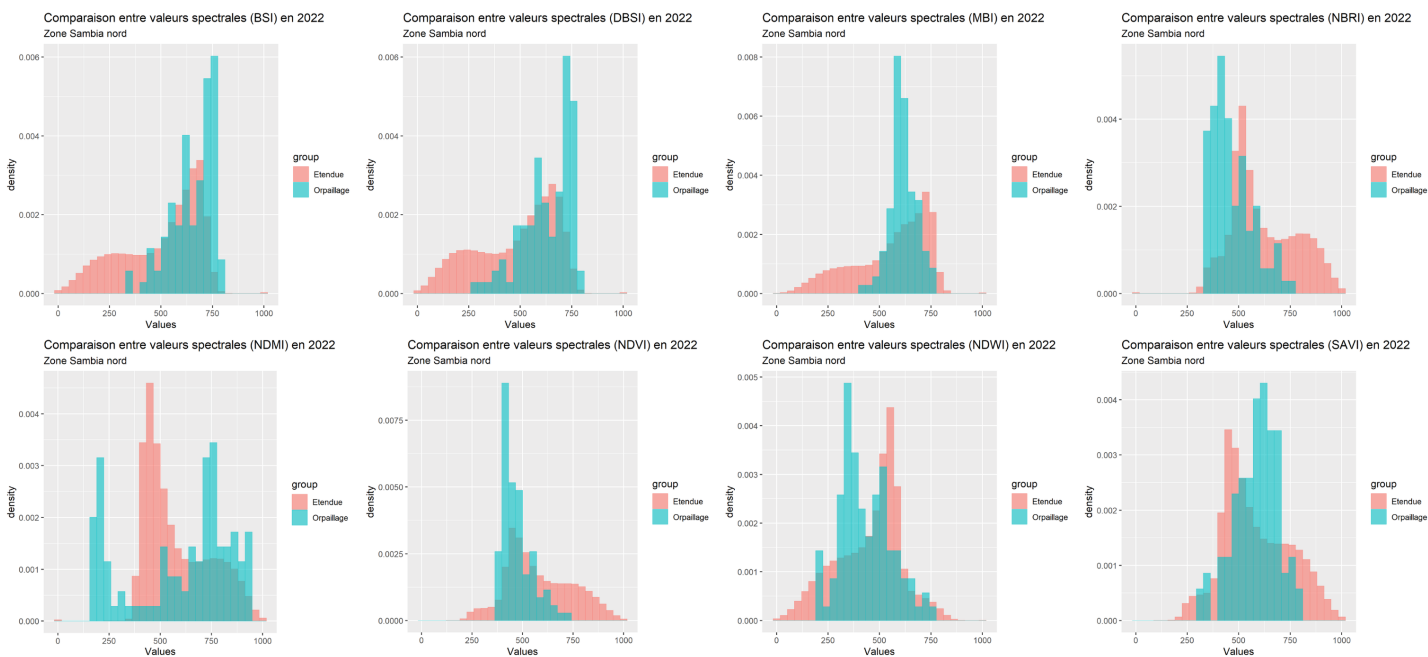


FIGURE 49 – Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d'orpaillage et l'ensemble de l'étendue Sambia nord en 2022 sur base d'images super-résolues



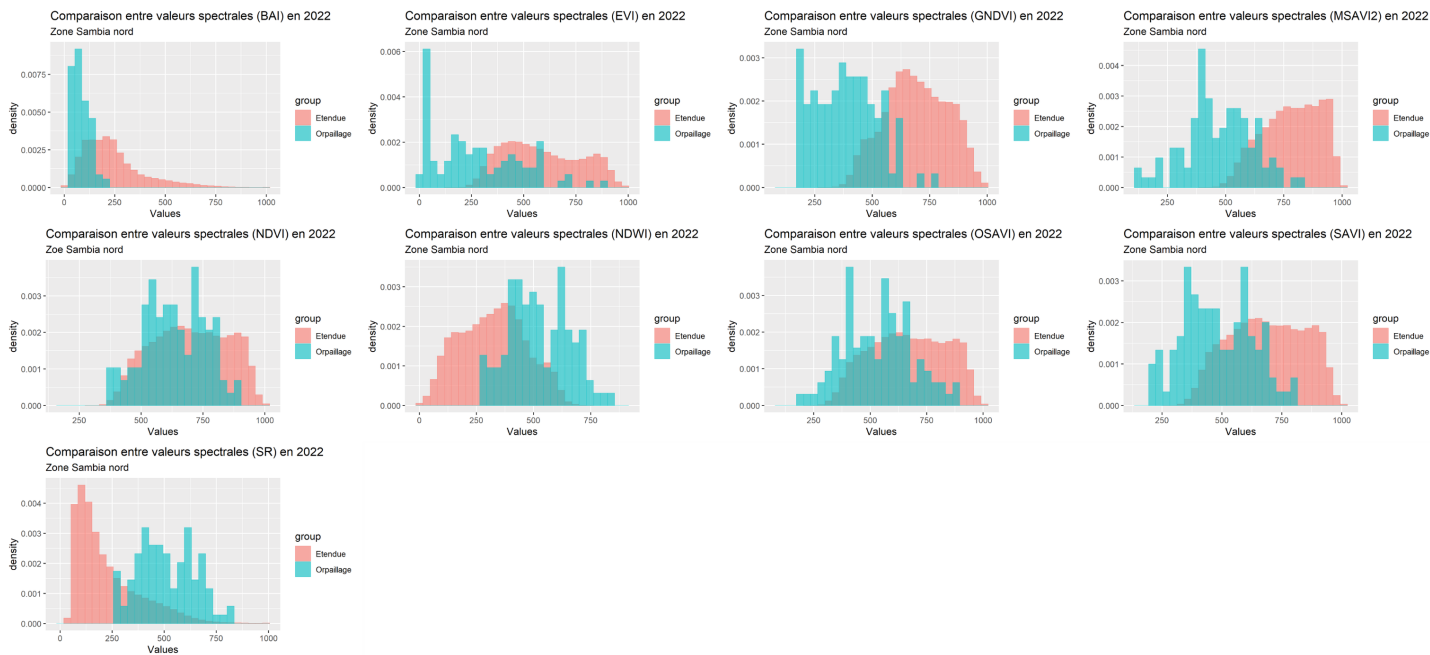


FIGURE 50 – Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d’orpaillage et l’ensemble de l’étendue Sambia nord en 2022 sur base d’images PlanetScope

La valeur du PREC (0.909) pour les images “super-résolues ” est si élevée grâce au seuillage minimum appliqué de 50 %. Il a fallu appliquer certains choix pour cette région : soit être certain de détecter uniquement des sites d’orpaillage en maximisant le PREC (diminuer le seuillage), soit détecter tous les sites d’orpaillage en acceptant d’obtenir des faux positifs dans les résultats qui pourront être analysés par photo-interprétation (augmenter seuillage). Ces résultats peuvent être expliqués par les particularités du milieu étudié, recouvert de larges savanes avec une faible végétation victime de feux réguliers. Ces caractéristiques ont des signatures spectrales qui se confondent avec les sols nus des sites d’orpaillage.

De plus, les sites détectés dans les zones connues sont les seuls que le modèle a identifié sur l’ensemble de l’étendue. Ceci peut être expliqué par le manque de données d’entraînement du modèle pour cette région (19 sites connus), le rendant surajusté. En d’autres termes, le modèle a simplement mémorisé des patterns spécifiques dans les données d’entraînement, mais il n’est pas suffisamment flexible pour construire des prédictions sur l’ensemble de l’étendue. Une solution pour pallier ce problème serait de réduire la complexité du modèle, soit en utilisant moins d’indices spectraux, soit en réduisant les tests statistiques sur les polygones candidats <sup>12</sup>.

Il est à noter que, dans cette région, certains sites se retrouvent le long de rivières sous la canopée. N’étant pas à ciel ouvert, ces derniers n’ont pas pu être détectés.

12. <https://docs.microsoft.com/fr-fr/azure/machine-learning/concept-manage-ml-pitfalls1>

### 4.1.3 Sambia sud - 2022

En observant la Table 17, les performances du modèle dans la région de Sambia sud reflètent un mauvais fonctionnement du modèle pour les deux types d'images. Cependant, ces résultats sont à discuter. En effet, les sites d'orpaillage "connus" ont été définis par photo-interprétation pouvant mener à des erreurs d'identification. De plus, les analyses de performance ont été calculées sur des sites définis manuellement, ne reprenant pas l'entièreté des sites existant. En effet, la région étant tellement impactée par les activités d'orpaillage, tous les sites n'ont pas pu être recensés manuellement. Ainsi, bien que la sensibilité devrait être réaliste si la photo-interprétation s'est faite correctement, les PREC ne reflètent pas les performances réelles du modèle. Certains sites identifiés comme faux positifs peuvent être de réelles zones d'extraction non recensées par la phase de photo-interprétation. Les Figures 51 et 52 illustrent ces affirmations pour les deux types d'images.

#### Exemples de sites d'orpaillage détectés dans la région de Sambia sud

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Sambia sud - Ouest du village Sambia  
Année 2022  
Fond : Images super-résolue 2022

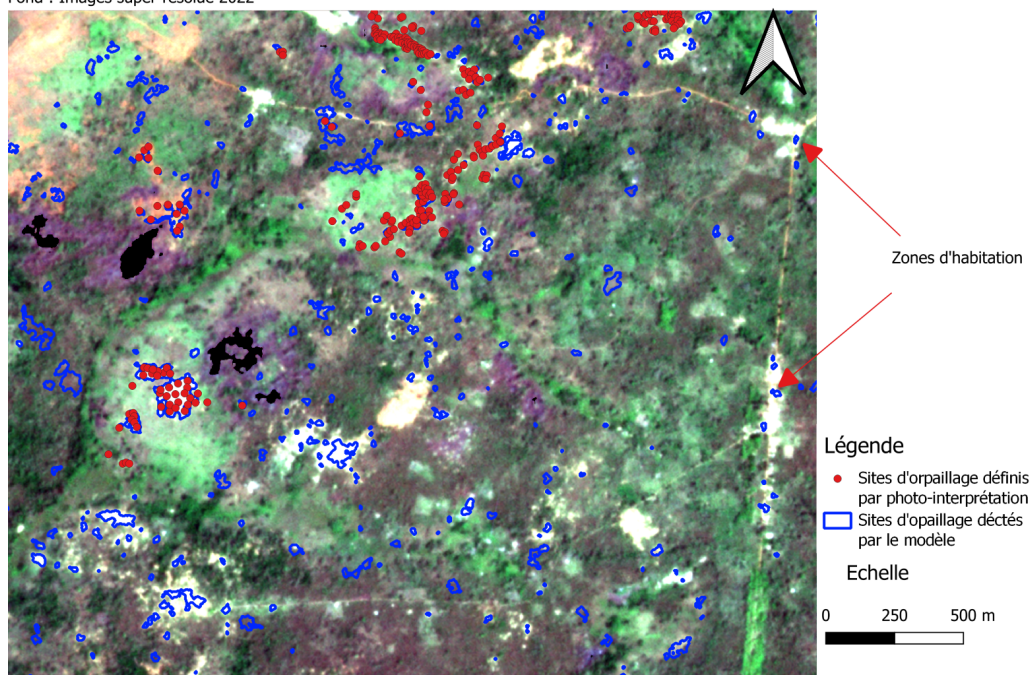


FIGURE 51 – Exemples de sites détectés par le modèle grâce à des images “super-résolues ” dans la région Sambia sud

## Exemples de sites d'orpaillage détectés dans la région de Sambia sud

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Sambia sud - Ouest du village Sambia  
Année 2022  
Fond : Images PlanetScope 2022

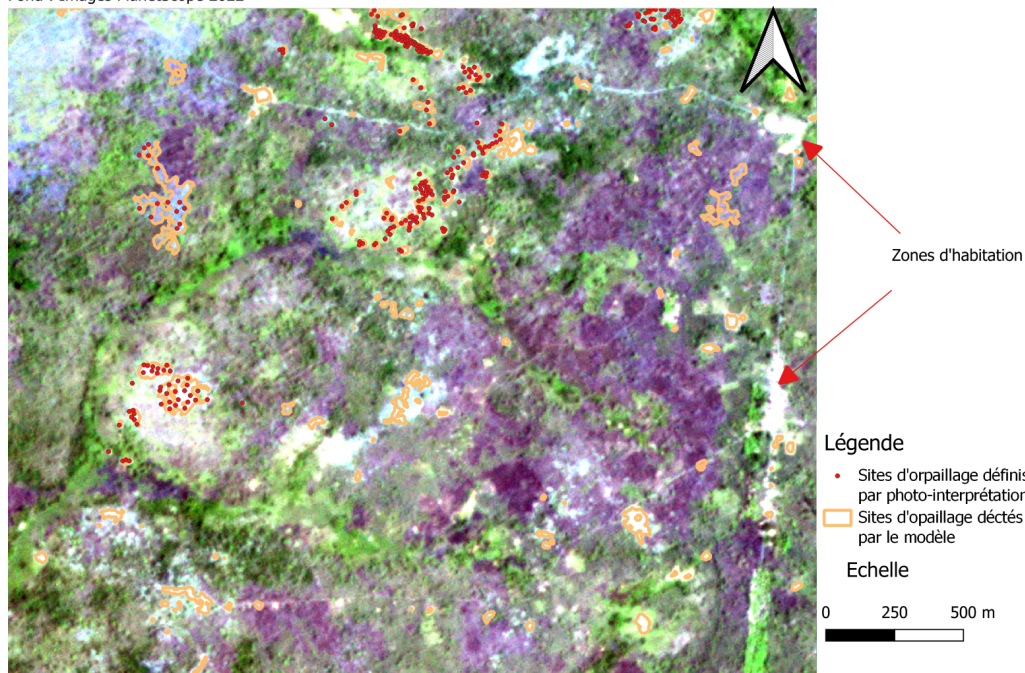


FIGURE 52 – Exemples de sites détectés par le modèle grâce à des images PlanetScope dans la région Sambia sud

Les zones fortement claires sur les images raster des Figures 51 et 52 représentent des sites d'orpaillage ou des habitations. On peut observer que des sites identifiés comme faux positifs correspondent en réalité à de véritables sites d'orpaillage.

En observant, les histogrammes en Annexe F, les indices BSI, DBSI, NBRI et NDVI isolent relativement bien les sites d'orpaillage pour les images "super-résolues". Tandis que pour les images PlanetScope, les indices EVI, GNDVI, MSAVI2, NDWI, OSAVI, SAVI et SR séparent correctement les signatures spectrales des sites de celles de l'étendue. En effet, pour cette région, les images PlanetScope distinguent mieux les sites d'orpaillage des autres occupations de sols (cfr. Table 17).

## 4.2 Suivi temporel

L'un des objectifs de cette étude est de pouvoir suivre l'évolution temporelle des sites d'orpaillage afin de stopper les activités qui y sont liées au sein du parc National de la Garamba.

A cette fin, le modèle a été appliqué sur plusieurs années antérieures à cette étude afin d'évaluer l'évolution de ces activités d'orpaillage en détectant les nouvelles aires créées par ces activités.

La fonction créée à cette fin donne des résultats satisfaisants illustrés dans la Figure 45. Cependant, afin de pouvoir appliquer un suivi temporel, les images représentatives des différentes années doivent être comparables. Pour ce faire, les indices spectraux amplifiés ont été normalisés. Bien que le modèle ait donné des résultats sur différentes années pour les régions de Tekadje/Gbere et Sambia sud, les signatures spectrales ne sont pas comparables d'une année à l'autre. Pour la région Sambia nord, aucune autre année n'a pu être comparée à l'année de référence. L'illustration des différences spectrales entre les années pour les différentes bandes utilisées dans les équations des indices spectraux est ajoutée en Annexe sous forme de boxplot et de matrices de corrélation. Après comparaison de la Table 17 et de l'Annexe , les performances du modèle selon les années sont proportionnelles au niveau de corrélation entre celles-ci.

Les différents résultats obtenus par le modèle ne sont donc pas exploitables pour obtenir un suivi précis des nouvelles aires allouées aux activités d'orpaillage. Cependant, les informations apportées restent exploitables. En effet, sur base des images "super-résolues " dans la région de Tekadje/Gbere, bien que le modèle n'arrive pas à détecter tous les sites d'orpaillage, ceux qui sont décelés le sont avec certitude. La fonction créée pour le suivi temporel peut donc être utilisée afin de récolter une idée de l'évolution et/ou de l'apparition de site d'orpaillage. Les images PlanetScope n'ont quant à elles donné aucun résultat sur les autres années dans la région de Tekadje/Gbere.

Pour la région de Sambia nord le modèle n'a donné aucun résultat sur les autres années pour les deux sortes d'images. Comme dit précédemment, le modèle a été surajusté pour cette région. Ainsi, il n'a pas pu être appliqué sur des images ayant des signatures spectrales différentes.

L'analyse temporelle dans la région de Sambia sud a été réalisée par photo-interprétation et les performances ont été jugées par appréciation. Comme pour la région Tekadje/Gbere, les images "super-résolues " différencient bien les sites d'orpaillage des autres occupations de sol. Cependant, beaucoup de sites confirmés ne sont pas identifiés, surtout pour l'année 2019 où seulement 3 sites ont été décelés. Ceci peut être expliqué par la Table 18 représentant les corrélations des différentes bandes spectrales entre les différentes dates et l'année de référence. L'année 2019 est effectivement celle où les signatures spectrales des différentes bandes sont le moins corrélées avec l'année de référence.

TABLE 18 – Comparaison des corrélations des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2022) des images “super-résolues ” dans la zone Sambia sud

<b>Matrice de corrélation - Année de référence 2022</b>						
<b>Zone Sambia sud- Image super-résolue</b>						
	<b>Red</b>	<b>Green</b>	<b>Blue</b>	<b>NIR</b>	<b>SWIR1</b>	<b>SWIR2</b>
<b>2019</b>	0.7145697	0.5865614	0.4576563	0.7037648	0.6013721	0.7273502
<b>2020</b>	0.7376082	0.6185187	0.6163514	0.7572089	0.6135173	0.7842414
<b>2021</b>	0.7264075	0.5691648	0.5838284	0.7465337	0.6123166	0.7821455

Les images PlanetScope ont tendance à mieux détecter les sites d’opailage sur les différentes années. Cependant, celles-ci créent plus de faux négatifs.

### 4.3 Contrôle des prédictions par survol aérien

Pour ce post-traitement, il est conseillé de commencer l’acquisition des photos lorsque l’avion se trouve au-dessus de la zone d’intérêt. De cette manière, des images inutiles ne viendront pas polluer le jeu de données.

De plus, il est nécessaire que les images acquises par le survol aérien se recouvrent bien latéralement afin que metashape puisse aligner correctement ces différentes images.

---

## 5 Perspectives

Cette étude a permis , en grande partie, d'isoler les sites d'orpaillage des autres occupations de sol dans des savanes herbeuses ou boisées, entrecoupées de forêts-galeries. A partir de ce travail de fond, plusieurs perspectives peuvent être envisagées.

Comme expliqué précédemment, la région de Sambia sud a fait l'objet d'une analyse exclusivement par photo-interprétation. Il serait dès lors judicieux de confirmer les sites utilisés pour l'entraînement afin d'ajuster le modèle.

Concernant la région de Sambia nord , en raison de la faible densité de données d'entraînement, le modèle a été surajusté. Ceci rend ce dernier peu flexible et l'empêche de fonctionner correctement sur l'ensemble de l'étendue. Ainsi, afin de pouvoir surveiller cette région, il serait judicieux de diminuer l'exigence des critères du modèle. Pour ce faire, les statistiques descriptives pourraient être revues à la baisse.

Plus globalement, afin de mieux isoler les sites d'orpaillage et ainsi diminuer la quantité de faux négatifs, les valeurs de seuillages retenus pourraient être différenciées selon les indices spectraux. Le choix de ces valeurs peut être réalisé en observant les histogrammes représentant la séparabilité d'un site d'extraction par rapport au reste de l'étendue (cfr Annexe F).

A propos du suivi temporel, il serait intéressant de pouvoir comparer plus précisément les années entre elles afin de mieux quantifier les nouvelles aires allouées aux activités d'orpaillage. Pour y parvenir, un étalonnage radiométrique permettrait de faciliter la comparaison entre les années (ISIDRO et al., 2017).

Enfin, l'un des objectifs de cette étude était de détecter facilement de nouveaux sites et/ou l'expansion de sites existants. Afin de faciliter cette tâche pour les gestionnaires du PNG qui n'ont pas de connaissances en codage, il serait intéressant de créer une application interactive. Cette dernière permettrait à un utilisateur lambda d'utiliser le modèle sans rentrer dans les complexités du codage.

---

## 6 Conclusion

Les activités liées à l’orpaillage se développent principalement dans les pays pauvres à travers le monde. Ces zones d’extraction se créent essentiellement dans des environnements naturels, riches en biodiversité. Malheureusement, les dégâts engendrés par les sites d’orpaillage dégradent considérablement leur environnement et peuvent créer des tensions sociales. La République Démocratique du Congo, regorgeant de sols riches en minerais, n’est pas épargnée par ce type d’activité. Plus particulièrement, la Province du Haut-Uélé, dans laquelle se trouve le PNG, est réputé pour ses sols riches en gisements aurifères. Les régions couvertes par la Garamba sont ainsi fort impactées par l’orpaillage. Afin d’éradiquer ces zones de prospection, des lois ont été érigées par les instances gouvernementales. Afin de veiller à la bonne application de celles-ci, les gestionnaires du PNG ont besoin de disposer d’un outil permettant d’établir un suivi des activités liées à l’orpaillage. Grâce à la disponibilité croissante d’images satellites à haute résolution, la télédétection peut être rentable et efficace pour ce type d’application.

Dans ce travail, des images optiques à haute résolution issues de la fusion d’images Sentinel-2 et PlanetScope ont été utilisées (LATTE & LEJEUNE, 2020). Celles-ci ont été comparées à des images délivrées par l’entreprise américaine Planet Labs, déjà utilisées par les gestionnaires du PNG. Les analyses issues de ce travail se sont concentrées sur la fin des saisons sèches, en début d’année, cette période étant la plus propice pour discriminer les zones d’orpaillage des autres types de terre (NGOM et al., 2020). Le modèle se base sur une approche basée sur les pixels par le biais de la segmentation sémantique.

L’étude s’est focalisée sur trois zones distinctes au sein des domaines de chasses de Mondo Missa et de Gangala entourant le PNG.

Lorsque la quantité de données d’entraînement du modèle était suffisante et confirmée par une phase de terrain, le modèle obtient de très bons résultats sur l’année de référence (2020) grâce aux images “super-résolues”. En effet, pour la première zone d’étude entourant les villages de Tekadje et de Gbere (domaines de chasses de Mondo Missa), le modèle a détecté 80,4 % des sites connus et 90,5 % des sites identifiés dans les zones connues sont certains d’être des zones d’extraction. Ainsi, 7,82 hectares liés aux activités d’orpaillage ont été détectés sur l’ensemble de cette région. Les faux positifs créés sont facilement identifiables par photo-interprétation puisque se retrouvant le long de rivières, de routes et/ou de villages.

Pour la région au nord du village Sambia dans le domaine de Gangala, le modèle a donné des résultats moins performants sur l’année de référence (2022), du fait du manque de données d’entraînement et aux similitudes de signatures spectrales entre les sites et leur environnement. Sur base des images “super-résolues”, le modèle a détecté 0.364 ha alloués aux sites d’orpaillage, dont 90,9 % sont sans conteste des sites de prospection. 24,6 % des sites connus ont été identifiés.

Concernant la région au sud de Sambia, le modèle a détecté 40,7 % des sites identifiés par photo-interprétation sur l’année de référence (2022) grâce aux images “super-résolues”. La discrimination

des zones d'orpaillage avec les autres types d'occupation de sols n'est pas optimale pour cette région. Ceci peut provenir d'une mauvaise photo-interprétation lors de la création des données d'entraînement et/ou aux similitudes de signatures spectrales entre les sites et leur environnement.

Bien que détectant mieux les sites connus, les images PlanetScope sont globalement moins performantes que les images "super-résolues" pour séparer les sites d'orpaillage des autres occupations de sol. Pour la région Tekadje/Gbere 64,4 % des sites connus ont été décelés, représentant 56,8 % de l'ensemble des sites identifiés pour une superficie totale de 12.18 ha. Dans la région de Sambia nord, le modèle a identifié 51,6 % des sites connus, représentant 42,7 % de l'ensemble des sites détectés pour une superficie totale de 1.73 ha.

Cependant, dans la région de Sambia sud, le modèle a mieux isolé les sites d'orpaillage des autres occupations de sol grâce aux images PlanetScope. De plus, 47,8 % des sites connus ont été identifiés, ce qui est mieux que les images "super-résolues".

Ce travail propose une fonction pour observer l'expansion et/ou la création de nouvelles aires liées aux activités d'orpaillage. Cette fonction a donné des résultats exploitables dans la région de Tekadje/Gbere et pour certaines dates dans la région de Sambia sud. Cependant, bien que les images aient été normalisées, celles-ci présentent des signatures spectrales différentes entre les dates. Ainsi, un étalonnage radiométrique permettrait d'améliorer la détection des sites pour des dates différentes de celles de références et ainsi obtenir un suivi temporel plus précis.

Enfin, le modèle créé lors de ce travail peut être étendu et/ou adapté pour différentes zones d'étude. Des images optiques provenant de sources différentes peuvent également être utilisées, pour autant qu'elles proposent les bandes Red, Green, Blue, NIR, SWIR1 et SWIR2. Cependant, les performances du modèle resteront tributaires de leur de leur résolution spatiale.



## Références

- AREENDRAN G et al., s. d. « Land use/land cover change dynamics analysis in mining areas of Singrauli district in Madhya Pradesh, India ». In : p. 12.
- ARIAS ESPANA Victor Andres et al., 2018. « Contaminated land in Colombia : A critical review of current status and future approach for the management of contaminated sites ». In : *Science of The Total Environment* **618**, p. 199-209. ISSN : 0048-9697.
- BASOMMI Prosper Laari, Qingfeng GUAN & Dandan CHENG, 2015. « Exploring Land use and Land cover change in themining areas of Wa East District, Ghana usingSatellite Imagery ». In : *Open Geosciences* **7.1**. Publisher : De Gruyter Open Access. ISSN : 2391-5447.
- CAMPBELL James B. & Randolph H. WYNNE, 2011. *Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition*. Google-Books-ID : NkLmDjSS8TsC. Guilford Press. 717 p. ISBN : 978-1-60918-177-2.
- CARMOUZE Jean-Pierre, Marc LUCOTTE & Alain BOUDOU, 2001. *Le mercure en Amazonie : Rôle de l'homme et de l'environnement, risques sanitaires*. Google-Books-ID : d5TSZoMdPBUC. IRD Editions. 506 p. ISBN : 978-2-7099-1467-3.
- CHUVIECO E., M. P. MARTÍN & A. PALACIOS, 2002. « Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination ». In : *International Journal of Remote Sensing* **23.23**, p. 5103-5110. ISSN : 0143-1161, 1366-5901.
- CORDY Paul et al., 2011. « Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia : The world's highest per capita mercury pollution ». In : *Science of The Total Environment* **410-411**, p. 154-160. ISSN : 0048-9697.
- DEKA Jyotishman, Om Prakash TRIPATHI & Mohamed Latif KHAN, 2013. « Implementation of Forest Canopy Density Model to Monitor Tropical Deforestation ». In : *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* **41.2**, p. 469-475. ISSN : 0974-3006.
- DUDKA Stanislaw & Domy C. ADRIANO, 1997. « Environmental Impacts of Metal Ore Mining and Processing : A Review ». In : *Journal of Environmental Quality* **26.3**. \_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/jeq1997.00472425002600030003x>, p. 590-602. ISSN : 1537-2537.
- ELMES Arthur et al., 2014. « Mapping licit and illicit mining activity in the Madre de Dios region of Peru ». In : *Remote Sensing Letters* **5.10**. Publisher : Taylor & Francis, p. 882-891. ISSN : 2150-704X.
- FERNÁNDEZ-MANSO Alfonso, Carmen QUINTANO & Dar ROBERTS, 2012. « Evaluation of potential of multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) for surface coal mining affected area mapping in different world forest ecosystems ». In : *Remote Sensing of Environment* **127**, p. 181-193. ISSN : 0034-4257.
- GAO Bo-cai, 1996. « NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space ». In : *Remote Sensing of Environment* **58.3**, p. 257-266. ISSN : 00344257.
- GARCÍA M.J. López & V. CASELLES, 1991. « Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data ». In : *Geocarto International* **6.1**, p. 31-37. ISSN : 1010-6049, 1752-0762.
- GITELSON Anatoly A., Yoram J. KAUFMAN & Mark N. MERZLYAK, 1996. « Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS ». In : *Remote Sensing of Environment* **58.3**, p. 289-298. ISSN : 0034-4257.
- GODARD Eric et al., 2006. « LE MERCURE EN GUYANE ». In : p. 10.
- GOND Valéry & Christine BROGNOLI, 2005. « Télédétection et aménagement du territoire : localisation et identification des sites d'orpaillage en Guyane Française ». In.

- HEREDIA África et al., 2003. « Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes LANDSAT ETM+ ». In : *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* 3. Number : 3, p. 216-234. ISSN : 1578-5157.
- HUETE A, K DIDAN et al., 2002. « Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices ». In : *Remote Sensing of Environment*. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) : a new generation of Land Surface Monitoring **83.1**, p. 195-213. ISSN : 0034-4257.
- HUETE A, C JUSTICE & H LIU, 1994. « Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS ». In : *Remote Sensing of Environment* **49.3**, p. 224-234. ISSN : 0034-4257.
- HUETE A. R., 1988. « A soil-adjusted vegetation index (SAVI) ». In : *Remote Sensing of Environment* **25.3**, p. 295-309. ISSN : 0034-4257.
- HUETE A. R. et al., 1997. « A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS ». In : *Remote Sensing of Environment* **59.3**, p. 440-451. ISSN : 0034-4257.
- IBRAHIM Elsy et al., 2020. « Small-scale surface mining of gold placers : Detection, mapping, and temporal analysis through the use of free satellite imagery ». In : *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **93**, p. 102194. ISSN : 1569-8432.
- IRM - Nébulosité, 2022. KMI. URL : <https://www.meteo.be/fr/infos/dico-meteo/nebulosite>, visité le 20/06/2022.
- ISIDRO Celso M. et al., 2017. « Applicability of Earth Observation for Identifying Small-Scale Mining Footprints in a Wet Tropical Region ». In : *Remote Sensing* **9.9**. Number : 9 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 945. ISSN : 2072-4292.
- JORDAN Carl F., 1969. « Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor ». In : *Ecology* **50.4**. eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2307/1936256>, p. 663-666. ISSN : 1939-9170.
- KONG Hui, Hatice Cinar AKAKIN & Sanjay E. SARMA, 2013. « A Generalized Laplacian of Gaussian Filter for Blob Detection and Its Applications ». In : *IEEE Transactions on Cybernetics* **43.6**. Conference Name : IEEE Transactions on Cybernetics, p. 1719-1733. ISSN : 2168-2275.
- KORUYAN K. et al., 2012. « Remote sensing in management of mining land and proximate habitat ». In : *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* **112.7**. Publisher : The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, p. 667-672. ISSN : 2225-6253.
- KOUASSI Kouakou Hervé et al., 2011. « Apport Des Images Alos/Palsar, Envisat/Asar Et Landsat/Tm a La Cartographie Des Zones Humides Tropicales De Grand-Lahou, Côte D'ivoire/Contribution of Alos/Palsar, Envisat/Asar and Landsat/Tm Images to the Tropical Wetlands Mapping of Grand-Lahou, Côte D'ivoire ». In : *Photo Interprétation European Journal of Applied Remote Sensing* **47.4**. Num Pages : 9 Place : Paris, France Publisher : Editions ESKA, p. 100-108. ISSN : 2105665X.
- LAJEUNESSE CONNETTE Katherine J. et al., 2016. « Assessment of Mining Extent and Expansion in Myanmar Based on Freely-Available Satellite Imagery ». In : *Remote Sensing* **8.11**. Number : 11 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 912. ISSN : 2072-4292.
- LARA-RODRÍGUEZ Juan Sebastián, 2018. « All that glitters is not gold or platinum : Institutions and the use of mercury in mining in Chocó, Colombia ». In : *The Extractive Industries and Society* **5.3**, p. 308-318. ISSN : 2214-790X.
- LAROUSSE Éditions, 2022. *Définitions : orpailage - Dictionnaire de français Larousse*. URL : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/orpailage/56560>, visité le 16/06/2022.

- LATTE Nicolas & Philippe LEJEUNE, 2020. « PlanetScope Radiometric Normalization and Sentinel-2 Super-Resolution (2.5 m) : A Straightforward Spectral-Spatial Fusion of Multi-Satellite Multi-Sensor Images Using Residual Convolutional Neural Networks ». In : *Remote Sensing* **12.15**. Number : 15 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 2366. ISSN : 2072-4292.
- LI Jing et al., 2015. « Reconstructing disturbance history for an intensively mined region by time-series analysis of Landsat imagery ». In : *Environmental Monitoring and Assessment* **187.9**, p. 557. ISSN : 1573-2959.
- LINDEBERG Tony, 1998. « Feature Detection with Automatic Scale Selection ». In : *International Journal of Computer Vision* **30.2**, p. 79-116. ISSN : 1573-1405.
- LIU Desheng & Fan XIA, 2010. « Assessing object-based classification : advantages and limitations ». In : *Remote Sensing Letters* **1.4**. Publisher : Taylor & Francis, p. 187-194. ISSN : 2150-704X.
- MAÏGA Bintou Aliou & Konan Emmanuel KOUADIO, 2020. « Évaluation de la dynamique de l'occupation du sol engendrée par l'orpaillage dans le bassin de Banankoro, Région de Koulikoro, Sud-Ouest du Mali ». In : p. 12.
- MALAVIYA Sumedha et al., 2010. « Landscape approach for quantifying land use land cover change (1972–2006) and habitat diversity in a mining area in Central India (Bokaro, Jharkhand) ». In : *Environmental Monitoring and Assessment* **170.1**, p. 215-229. ISSN : 1573-2959.
- MANU A., Y.A. TWUMASI & T.L. COLEMAN, 2004. « Application of remote sensing and GIS technologies to assess the impact of surface mining at Tarkwa, Ghana ». In : *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. T. 1, p. 574.
- MARTINEZ Jean-Michel & Thuy LE TOAN, 2007. « Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data ». In : *Remote Sensing of Environment* **108.3**, p. 209-223. ISSN : 0034-4257.
- MCFEETERS S. K., 1996. « The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features ». In : *International Journal of Remote Sensing* **17.7**. Publisher : Taylor & Francis \_eprint : <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>, p. 1425-1432. ISSN : 0143-1161.
- MYINT Soe W. et al., 2011. « Per-pixel vs. object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery ». In : *Remote Sensing of Environment* **115.5**, p. 1145-1161. ISSN : 0034-4257.
- NDIAYE K, s. d. « LE DEVELOPPEMENT DE L'ORPAILLAGE, SON IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SANITAIRE DANS LE SUD-EST DU SENEGAL : EXEMPLE DU SITE AURIFERE DE BANTAKO ». In : p. 82.
- NGOM N. M. et al., 2020. « Mapping Artisanal and Small-Scale Gold Mining in Senegal Using Sentinel 2 Data ». In : *GeoHealth* **4.12**. \_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2020GH000310>, e2020GH000310. ISSN : 2471-1403.
- NGUYEN Can Trong et al., 2021. « A Modified Bare Soil Index to Identify Bare Land Features during Agricultural Fallow-Period in Southeast Asia Using Landsat 8 ». In : *Land* **10.3**. Number : 3 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 231. ISSN : 2073-445X.
- NIANE Birane, 2014. « Impacts environnementaux liés à l'utilisation du mercure lors de l'exploitation artisanale de l'or dans la région de Kédougou (Sénégal oriental) ». Thèse de doct. University of Geneva.

- NKUBA Bossissi, Franck ZAHINDA MUGISHO & Gabriel MUHANZI AGANZE, 2021. « Technologies (ir)responsables dans l'orpillage : quels risques pour l'environnement et la santé? Cas de Kamituga et Misisi, RDC ». In : ISSN : 2294-8643.
- OBODAI Josephine et al., 2019. « Land use/land cover dynamics using landsat data in a gold mining basin-the Ankobra, Ghana ». In : *Remote Sensing Applications : Society and Environment* **13**, p. 247-256. ISSN : 2352-9385.
- PRAKASH A. & R. P. GUPTA, 1998. « Land-use mapping and change detection in a coal mining area - a case study in the Jharia coalfield, India ». In : *International Journal of Remote Sensing* **19.3**. Publisher : Taylor & Francis \_eprint : <https://doi.org/10.1080/014311698216053>, p. 391-410. ISSN : 0143-1161.
- PRÉSIDENT DE LA RÉPUBLIQUE Cabinet du, 2022. *Loi n° 14/003 du 11 février 2014 relative à la conservation de la nature*. URL : <https://www.leganet.cd/Legislation/Droit%5C%20administratif/Environnement/Loi14003.11.02.2014.htm>, visité le 16/06/2022.
- RASUL Azad et al., 2018. « Applying Built-Up and Bare-Soil Indices from Landsat 8 to Cities in Dry Climates ». In : *Land* **7.3**. Number : 3 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 81. ISSN : 2073-445X.
- RICHARDSON A J, s. d. « Distinguishing Vegetation from Soil Background Information ». In : p. 12.
- RIKIMARU A., P. S. ROY & S. MIYATAKE, 2002. « Tropical forest cover density mapping ». In : *Tropical Ecology (India)*. ISSN : 0564-3295.
- RONDEAUX Geneviève, Michael STEVEN & Frédéric BARET, 1996. « Optimization of soil-adjusted vegetation indices ». In : *Remote Sensing of Environment* **55.2**, p. 95-107. ISSN : 0034-4257.
- ROUSE J. W. et al., 1974. *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation*. E75-10354. NTRS Author Affiliations : Texas A&M Univ. NTRS Document ID : 19750020419 NTRS Research Center : Headquarters (HQ).
- SNAPIR B., D. M. SIMMS & T. W. WAINE, 2017. « Mapping the expansion of galamsey gold mines in the cocoa growing area of Ghana using optical remote sensing ». In : *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **58**, p. 225-233. ISSN : 1569-8432.
- SONG M., D. L. CIVCO & J. D. HURD, 2005. « A competitive pixel-object approach for land cover classification ». In : *International Journal of Remote Sensing* **26.22**. Publisher : Taylor & Francis \_eprint : <https://doi.org/10.1080/01431160500213912>, p. 4981-4997. ISSN : 0143-1161.
- WANG Gang, Carlos LOPEZ-MOLINA & Bernard DE BAETS, 2020. « Automated blob detection using iterative Laplacian of Gaussian filtering and unilateral second-order Gaussian kernels ». In : *Digital Signal Processing* **96**, p. 102592. ISSN : 1051-2004.
- XUE Jinru & Baofeng SU, 2017. « Significant Remote Sensing Vegetation Indices : A Review of Developments and Applications ». In : *Journal of Sensors* **2017**. Publisher : Hindawi, e1353691. ISSN : 1687-725X.

---

## A Caractéristiques des données

### A.1 Sentinel-2/PlanetScope

TABLE 19 – Caractéristiques des données Sentinel-2/PlanetScope

Sentinel-2/PlanetScope				
Bandes spectrales	Longueurs d'ondes ( $\mu m$ )	Résolution spatiale ( $m/px$ )	Résolution temporelle ( <i>jour</i> )	Temps de création ( <i>h</i> )
1 - Red	0.665			
2 - Green	0.560			
3 - Blue	0.490			
4 - NIR	0.842			
5 - Vegetation Red Edge	0.705	2.5	365	18
6 - Vegetation Red Edge	0.740			
7 - Vegetation Red Edge	0.783			
8 - Vegetation Red Edge	0.865			
9 - SWIR1	1.610			
10 - SWIR2	2.190			

### A.2 PlanetScope

TABLE 20 – Caractéristiques des données PlanetScope

PlanetScope				
Bandes spectrales	Longueurs d'ondes ( $\mu m$ )	Résolution spatiale ( $m/px$ )	Résolution temporelle ( <i>jour</i> )	Temps de création ( <i>h</i> )
1 - Blue	0.455 - 0.515			
2 - Green	0.500 - 0.590	3	1	0.5
3 - Red	0.590 - 0.670			
4 - NIR	0.780 - 0.860			

## B Indices spectraux

### B.1 Sentinel-2/PlanetScope

TABLE 21 – Indices spectraux pour les images “super-résolues ”

Indices spectraux (Sentinel-2/PlanetScope)		
BSI	Bare Soil Index (RIKIMARU et al., 2002 )	$\frac{(SWIR1 + R) - (NIR + B)}{(SWIR1 + R) + (NIR + B)}$ (15)
DBSI	Dry Bare-Soil Index (RASUL et al., 2018)	$\frac{SWIR1 - G}{SWIR1 + G} - NDVI$ (16)
MBI	Modified Bare Soil Index (NGUYEN et al., 2021)	$\frac{SWIR1 - SWIR2 - NIR}{SWIR1 + SWIR2 + NIR} * f$ (17)
NBRI	Normalized Burned Ratio Index (GARCÍA & CASELLES, 1991 ; HEREDIA et al., 2003)	$\frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$ (18)
NDMI	Normalized Difference Moisture Index (GAO, 1996)	$\frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$ (19)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (ROUSE et al., 1974)	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$ (20)
NDWI	Normalized Difference Water Index (McFEETERS, 1996)	$\frac{G - NIR}{G + NIR}$ (21)
SAVI	Soil-Adjusted Vegetation Index (A. R HUETE, 1988)	$\frac{NIR - R}{NIR + R + L} * (1 + L)$ (22) où $L = 0.5$

Où L est un facteur d’ajustement

## B.2 PlanetScope

TABLE 22 – Indices spectraux pour les images PlanetScope

Indices spectraux (PlanetScope)		
BAI	Burned Area Index (CHUVIECO et al., 2002)	$\frac{1}{(Cr - R)^2 + (Cnir - NIR)^2}$ (23) où $Cr = 0.1$ et $Cnir = 0.06$
EVI	Enhanced Vegetation Index (A. HUETE, JUSTICE et al., 1994; A. R. HUETE et al., 1997; A. HUETE, DIDAN et al., 2002)	$\frac{NIR - R}{NIR + C_1 * R - C_2 * B + X} * G$ (24) où $C_1 = 6$ , $C_2 = 7.5$ , $X = 1$ et $G = 2.5$
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index (GITELSON et al., 1996)	$\frac{NIR - G}{NIR + G}$ (25)
MSAVI2	Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (RICHARDSON, s. d.)	$0.5 * [(2NIR + 1) - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - R)}]$ (26)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (ROUSE et al., 1974)	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$ (27)
NDWI	Normalized Difference Water Index (McFEETERS, 1996)	$\frac{G - NIR}{G + NIR}$ (28)
OSAVI	Optimised Soil-Adjusted Vegetation Index (RONDEAUX et al., 1996)	$\frac{NIR - R}{NIR + R + 0.2773} * 1.2773$ (29)
SAVI	Soil-Adjusted Vegetation Index (A. R. HUETE, 1988)	$\frac{NIR - R}{NIR + R + L} * (1 + L)$ (30) où $L = 0.5$
SR	Ratio of near infrared to red (JORDAN, 1969)	$\frac{NIR}{RED}$ (31)

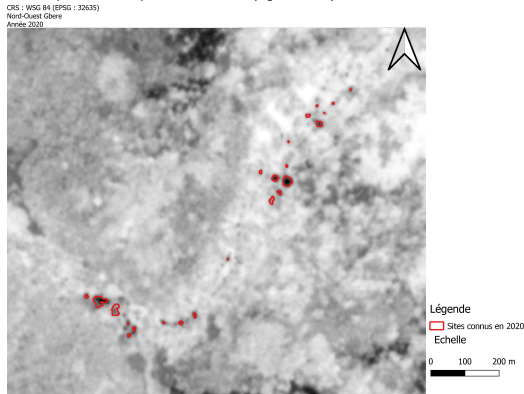
Où  $Cr$  et  $Cnir$  sont respectivement les réflectances de référence du Red et NIR,  $C_1$  et  $C_2$  les coefficients du terme de résistance aux aérosols,  $X$  l'ajustement du fond de la canopée qui traite la non-linéarité,  $G$  le facteur de gain et  $L$ , un facteur d'ajustement.

# C Images transformées amplifiées et normalisées

## C.1 Exemple de différentes échelles gaussiennes

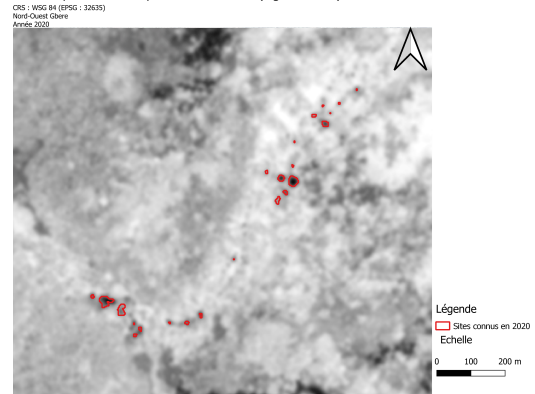
FIGURE 53 – Illustration de différentes échelles gaussiennes  $\sigma$  des images “super-résolues ” NDVI amplifiée et normalisée zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 1

NDVI super résolu amplifié et normalisé (sigma = 0.5)



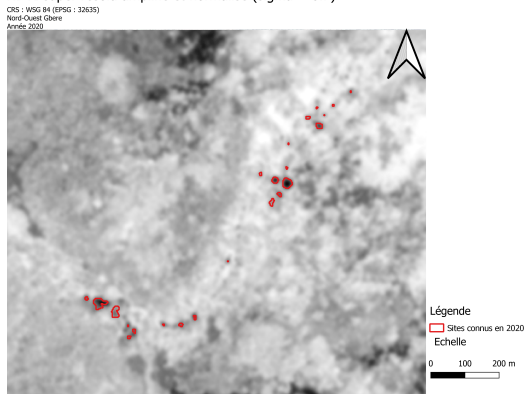
(a) Zone Gbere : Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )

NDVI super résolu amplifié et normalisé (sigma = 0.6)



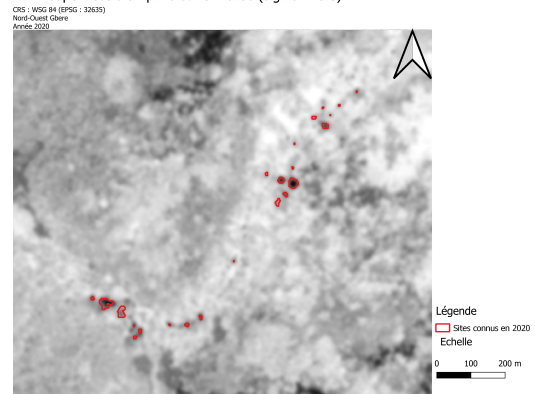
(b) Zone Gbere : Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.6$ )

NDVI super résolu amplifié et normalisé (sigma = 0.7)



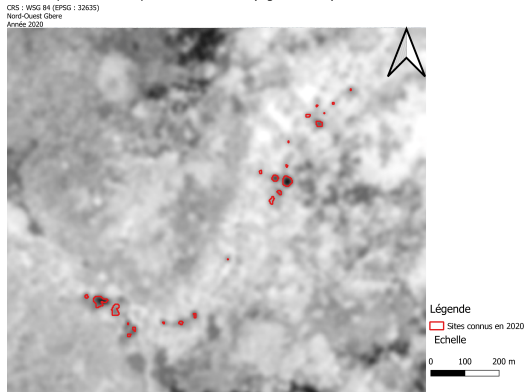
(c) Zone Gbere : Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.7$ )

NDVI super résolu amplifié et normalisé (sigma = 0.8)



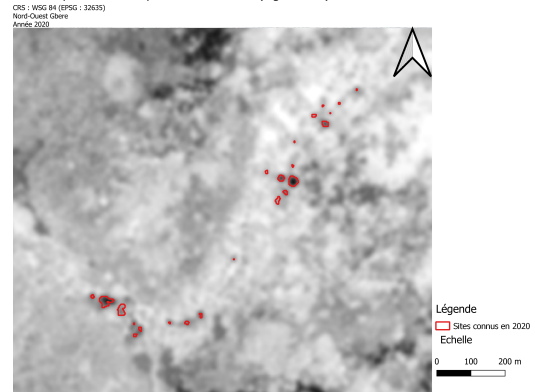
(d) Zone Gbere : Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.8$ )

NDVI super résolu amplifié et normalisé (sigma = 0.9)



(e) Zone Gbere : Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.9$ )

NDVI super résolu amplifié et normalisé (sigma = 1)

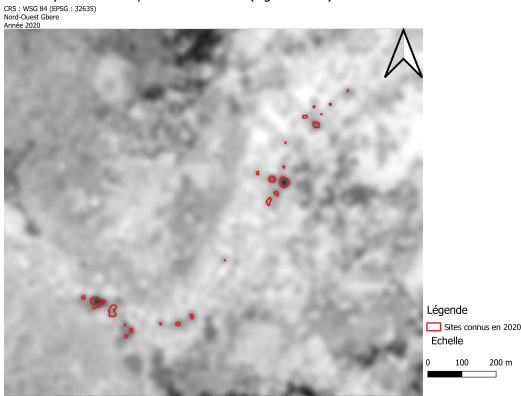


(f) Zone Gbere : Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 1$ )



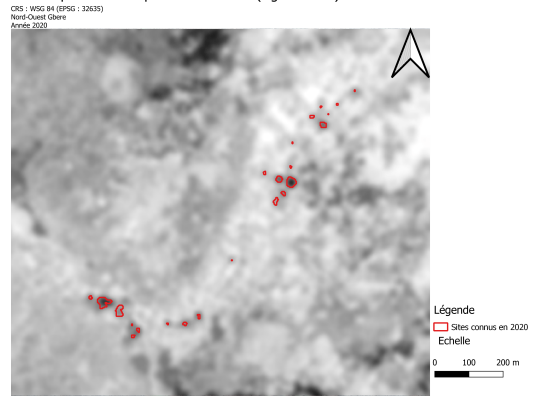
FIGURE 54 – Illustration de différentes échelles gaussiennes  $\sigma$  des images “super-résolues” NDVI amplifiée et normalisée zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 2

NDVI super résolu amplifié et normalisé (sigma = 1.1)



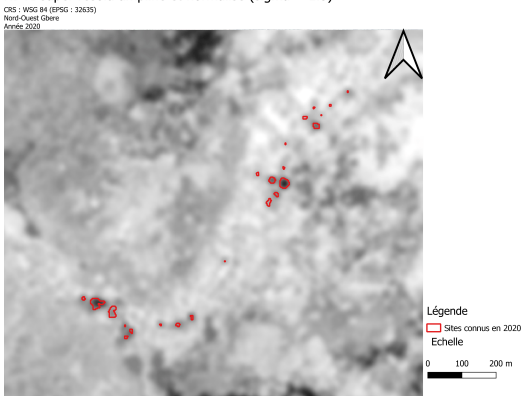
(a) Zone Gbere : Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 1.1$ )

NDVI super résolu amplifié et normalisé (sigma = 1.2)



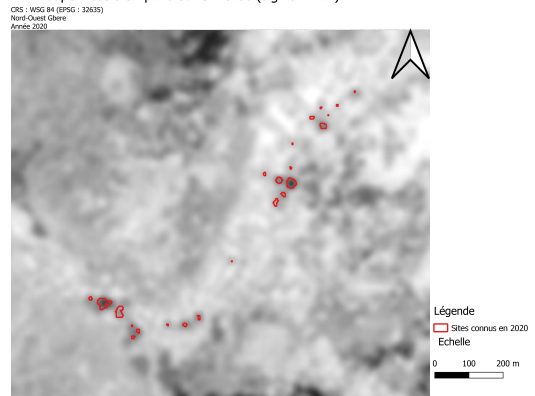
(b) Zone Gbere : Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 1.2$ )

NDVI super résolu amplifié et normalisé (sigma = 1.3)



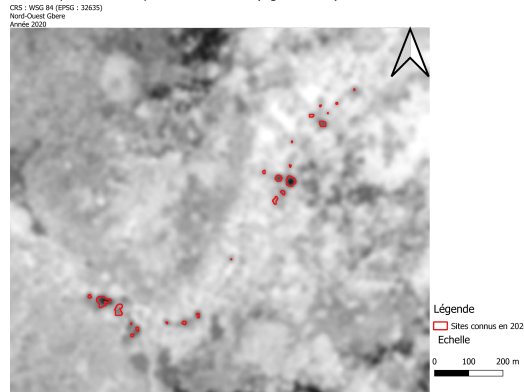
(c) Zone Gbere : Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 1.3$ )

NDVI super résolu amplifié et normalisé (sigma = 1.4)



(d) Zone Gbere : Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 1.4$ )

NDVI super résolu amplifié et normalisé (sigma = 1.5)



(e) Zone Gbere : Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 1.5$ )

## C.2 Echelles gaussiennes sélectionnées

### C.2.1 images “super-résolues ”

TABLE 23 –  $\sigma$  des images “super-résolues ”

<b>Sentinel-2/PlanetScope</b>			
<b>Indices spectraux</b>	<b>Tekadje</b>	<b>Sambia nord</b>	<b>Sambia sud</b>
BSI	0.5	0.5	0.5
DBSI	0.5	0.5	0.7
MBI	0.5	0.8	0.8
NBRI sites d’orpaillage	0.5	0.5	0.5
NBRI terres brulées	1.4	1.4	1.4
NDMI	0.5	0.5	0.5
NDVI	0.5	0.5	0.5
NDWI	0.5	0.5	0.5
SAVI	0.5	0.5	0.6

### C.2.2 Images PlanetScope

TABLE 24 –  $\sigma$  des images PlanetScope

<b>PlanetScope</b>			
<b>Indices spectraux</b>	<b>Tekadje</b>	<b>Sambia nord</b>	<b>Sambia sud</b>
BAI sites d’orpaillage	0.5	1	0.7
BAI terres brulées	1.4	1.1	1
EVI	0.5	0.5	0.9
GNDVI	0.5	0.5	0.5
MSAVI2	0.5	0.5	0.7
NDVI	0.5	0.5	1.5
NDWI	0.5	0.7	0.7
OSAVI	0.5	0.5	0.5
SAVI	0.5	0.5	0.8
SR	0.5	0.5	0.7

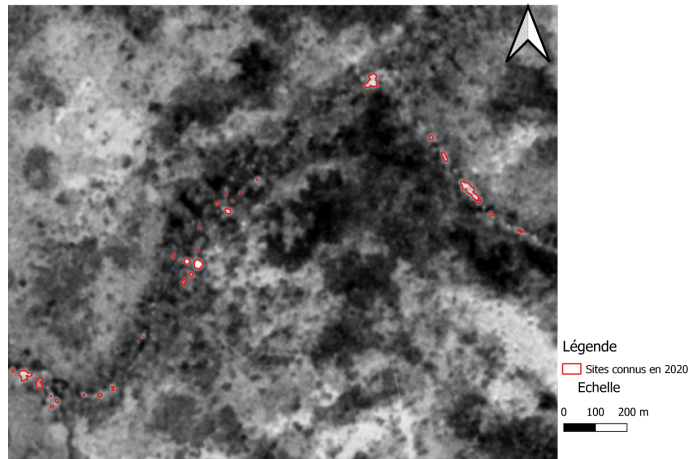


### C.3 Région Tekadje

FIGURE 55 – Illustration des échelles gaussiennes  $\sigma$  sélectionnées pour les indices spectraux amplifiée et normalisée des images “super-résolues” zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 1

Illustration du BSI amplifié et normalisé (sigma = 0,5)

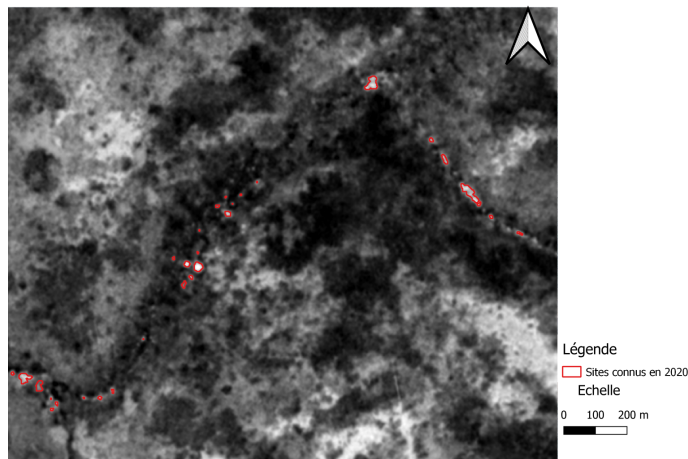
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020



(a) Illustration du BSI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )

Illustration du DBSI amplifié et normalisé (sigma = 0,5)

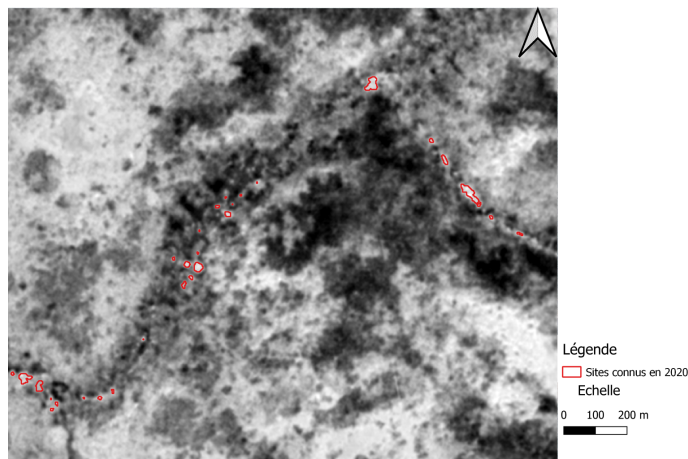
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020



(b) Illustration du DBSI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )

Illustration du MBI amplifié et normalisé (sigma = 0,5)

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020

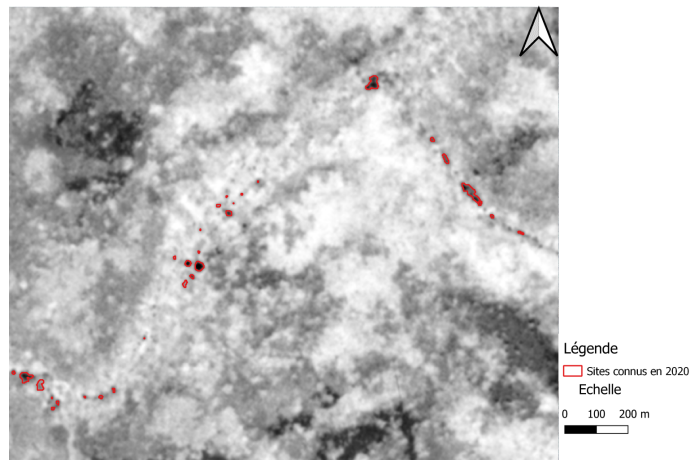


(c) Illustration du MBI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )

FIGURE 56 – Illustration des échelles gaussiennes  $\sigma$  sélectionnées pour les indices spectraux amplifiée et normalisée des images “super-résolues ” zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 2

Illustration du NBRI amplifié et normalisé pour sites d'orpaillage ( $\sigma = 0,5$ )

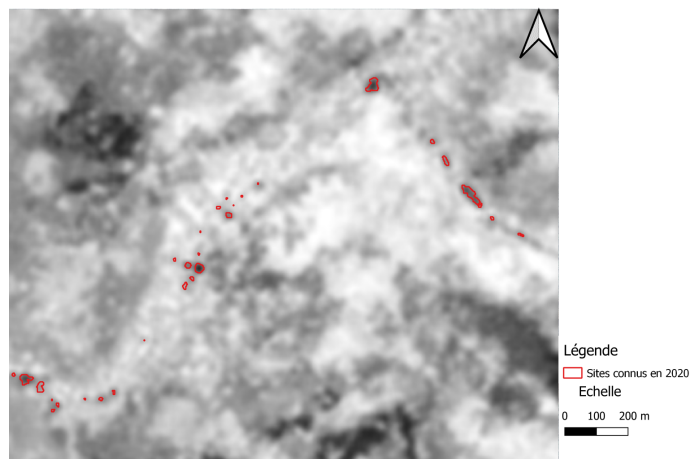
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020



(a) Illustration du NBRI amplifié et normalisé pour sites d'orpaillages ( $\sigma = 0.5$ )

Illustration du NBRI amplifié et normalisé pour terres brûlées ( $\sigma = 1,4$ )

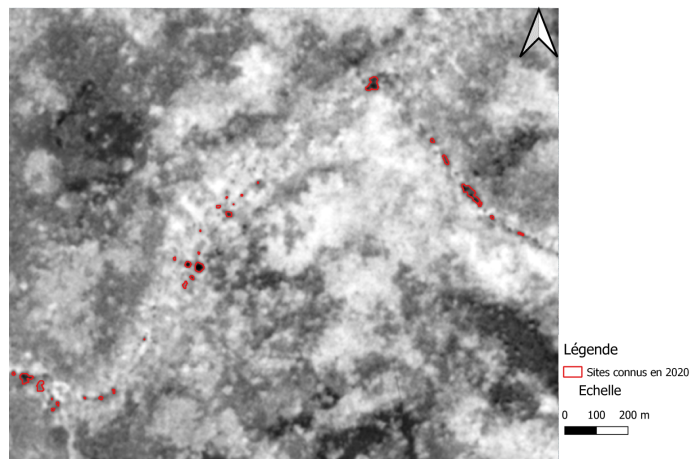
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020



(b) Illustration du NBRI amplifié et normalisé pour terres brûlées ( $\sigma = 1.4$ )

Illustration du NDMI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0,5$ )

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020

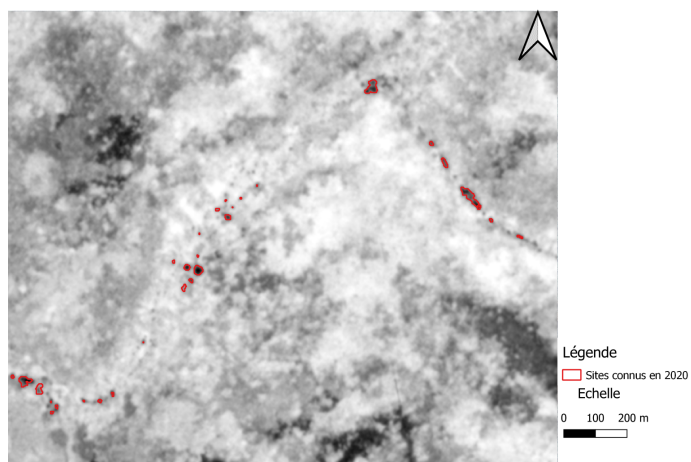


(c) Illustration du NDMI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )

FIGURE 57 – Illustration des échelles gaussiennes  $\sigma$  sélectionnées pour les indices spectraux amplifiée et normalisée des images “super-résolues ” zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 3

Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0,5$ )

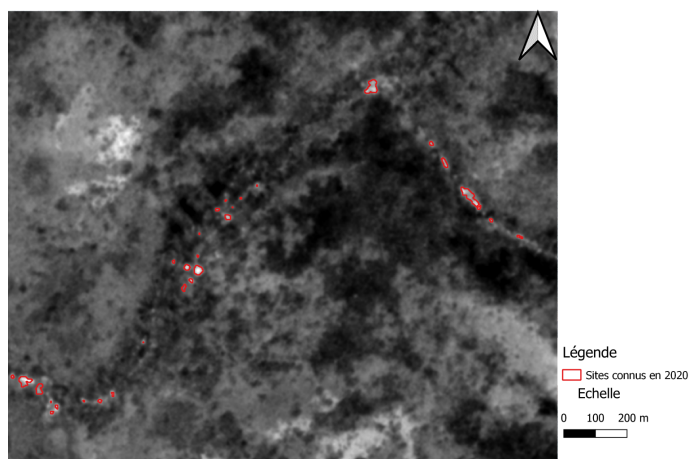
CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020



(a) Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )

Illustration du NDWI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0,5$ )

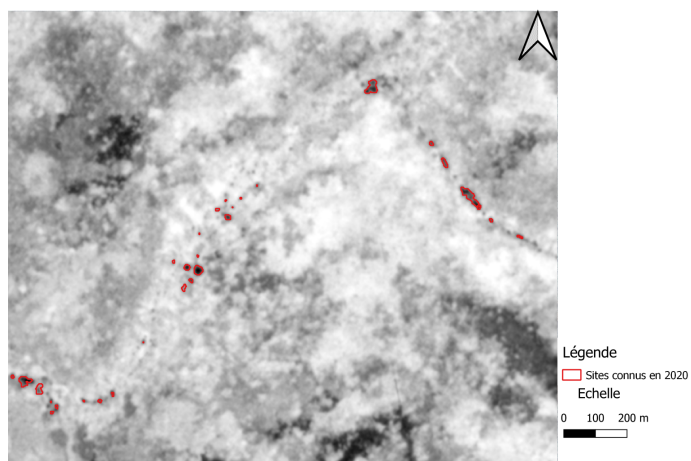
CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020



(b) Illustration du NDWI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )

Illustration du SAVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0,5$ )

CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020

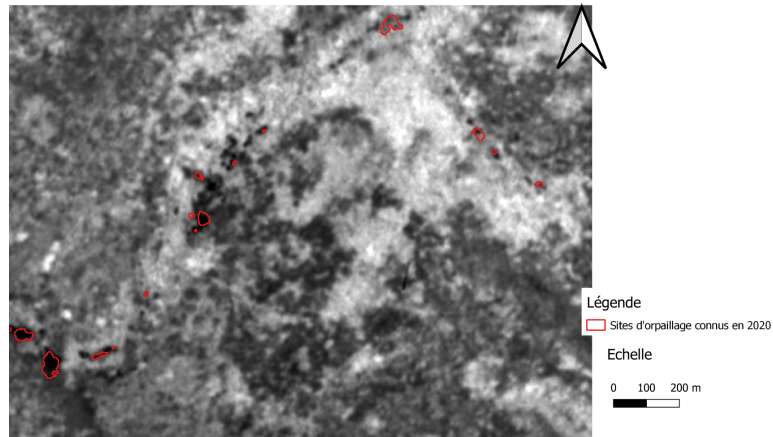


(c) Illustration du SAVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )

FIGURE 58 – Illustration des échelles gaussiennes  $\sigma$  sélectionnées pour les indices spectraux amplifiée et normalisée des images PlanetScope zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 1

Illustration du BAI amplifié et normalisé pour site d'orpaillage ( $\sigma = 0,5$ )

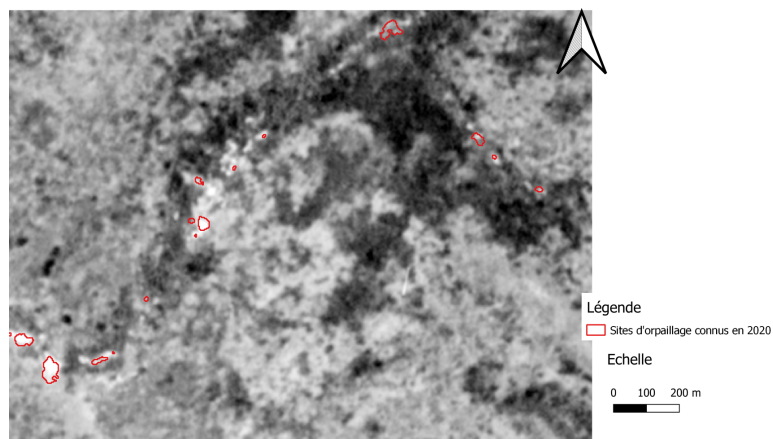
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020



(a) Illustration du BAI amplifié et normalisé pour sites d'orpaillages ( $\sigma = 0.5$ )

Illustration du BAI amplifié et normalisé pour terres brûlées ( $\sigma = 1,4$ )

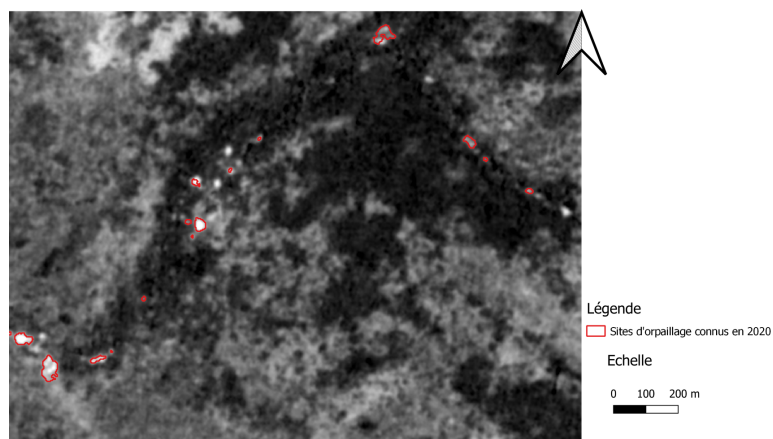
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020



(b) Illustration du BAI amplifié et normalisé pour terres brûlées ( $\sigma = 1.4$ )

Illustration du EVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0,5$ )

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020

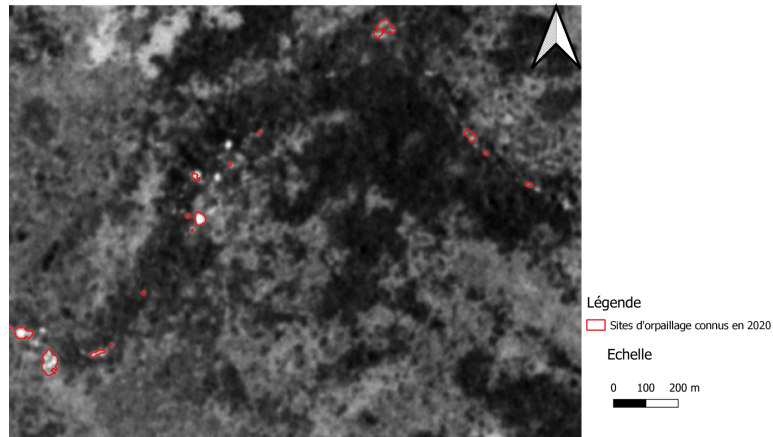


(c) Illustration du EVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )

FIGURE 59 – Illustration des échelles gaussiennes  $\sigma$  sélectionnées pour les indices spectraux amplifiée et normalisée des images PlanetScope zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 2

Illustration du GNDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0,5$ )

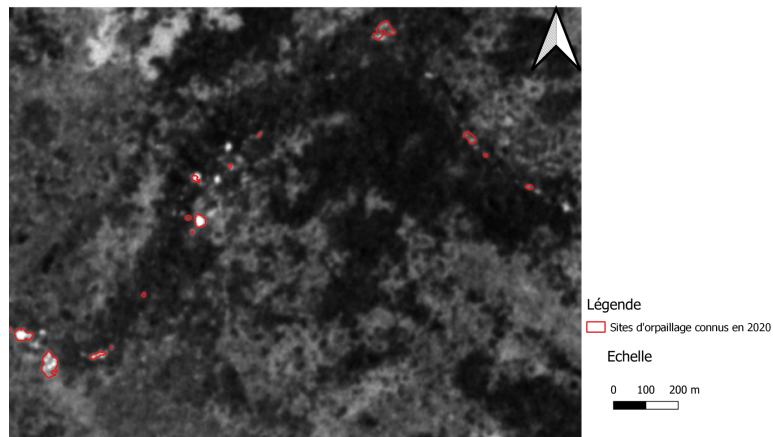
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020



(a) Illustration du GNDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )

Illustration du MSAVI2 amplifié et normalisé ( $\sigma = 0,5$ )

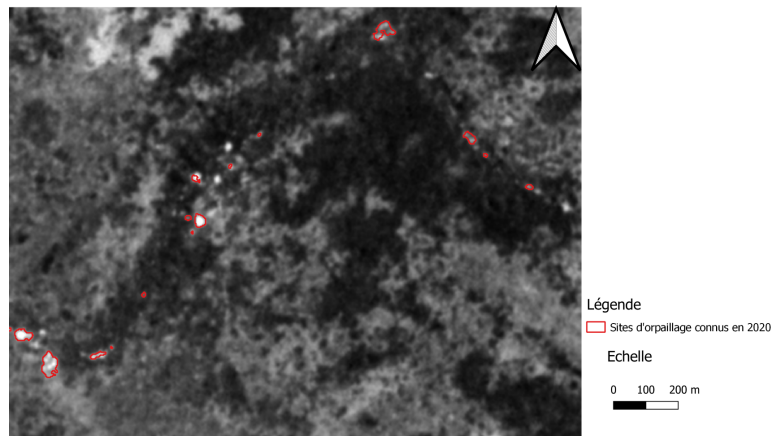
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020



(b) Illustration du MSAVI2 amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )

Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0,5$ )

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020



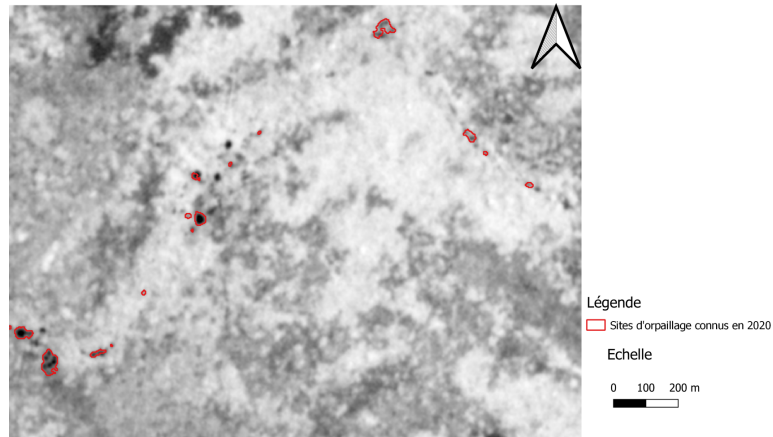
(c) Illustration du NDVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )



FIGURE 60 – Illustration des échelles gaussiennes  $\sigma$  sélectionnées pour les indices spectraux amplifiée et normalisée des images PlanetScope zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 3

Illustration du NDWI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0,5$ )

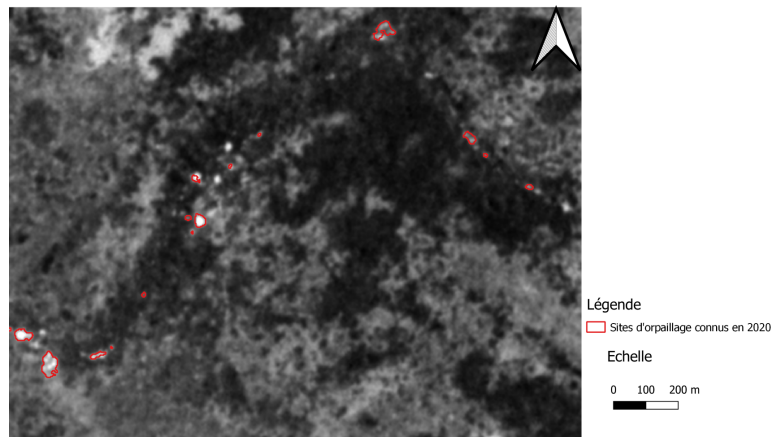
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020



(a) Illustration du NDWI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )

Illustration du OSAVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0,5$ )

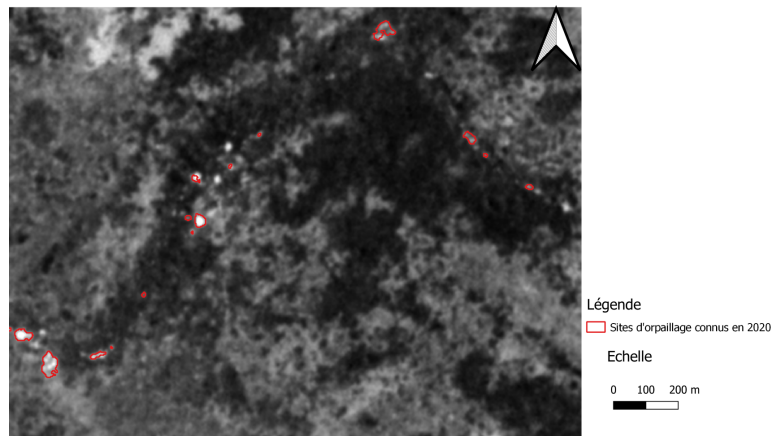
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020



(b) Illustration du OSAVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )

Illustration du SAVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0,5$ )

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020

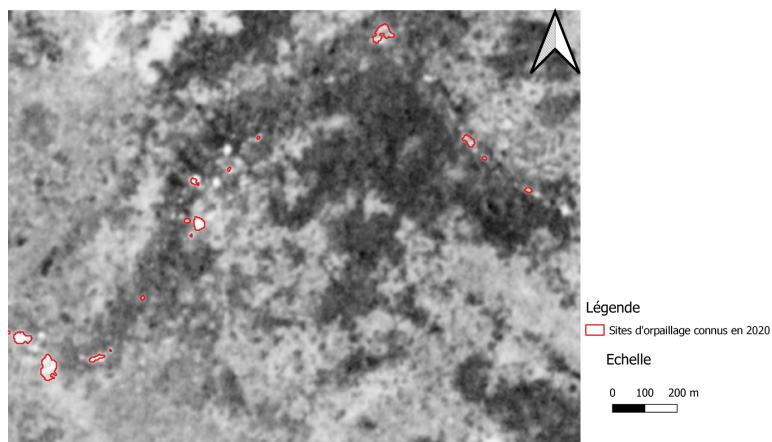


(c) Illustration du SAVI amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )

FIGURE 61 – Illustration des échelles gaussiennes  $\sigma$  sélectionnées pour les indices spectraux amplifiée et normalisée des images PlanetScope zoomées sur la région de Gbere - PARTIE 4

Illustration du SR amplifié et normalisé (sigma = 0,5)

CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere - Nord Ouest du village Gbere  
Année 2020



(a) Illustration du SR amplifié et normalisé ( $\sigma = 0.5$ )



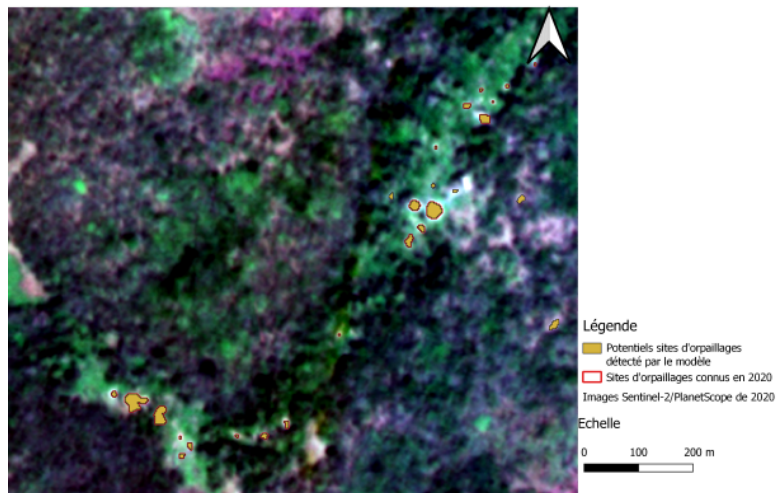
## D images “super-résolues ”

### D.1 Zones détectées par le modèle dans la Région de Tekadje/Gbere en 2020

FIGURE 62 – Sites d’orpillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 1

Zone 1/24 - Nord-Ouest Gbere

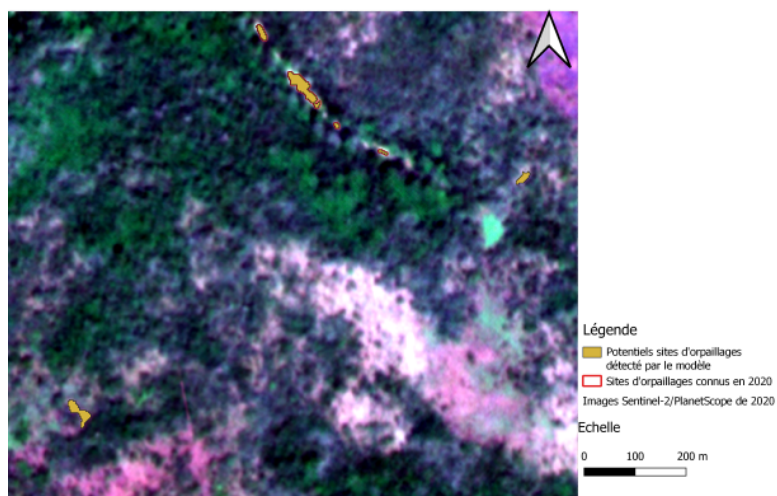
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(a) Zone 1/24 - Région Gbere

Zone 2/24 - Nord-Ouest Gbere

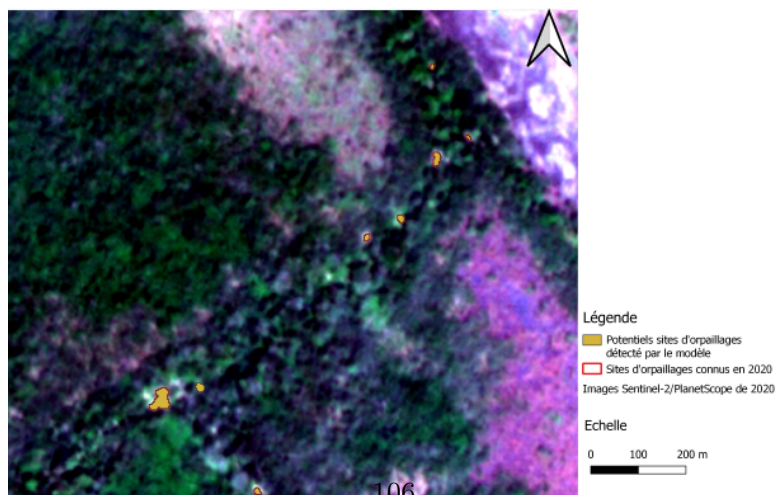
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(b) Zone 2/24 - Région Gbere

Zone 3/24 - Nord-Ouest Gbere

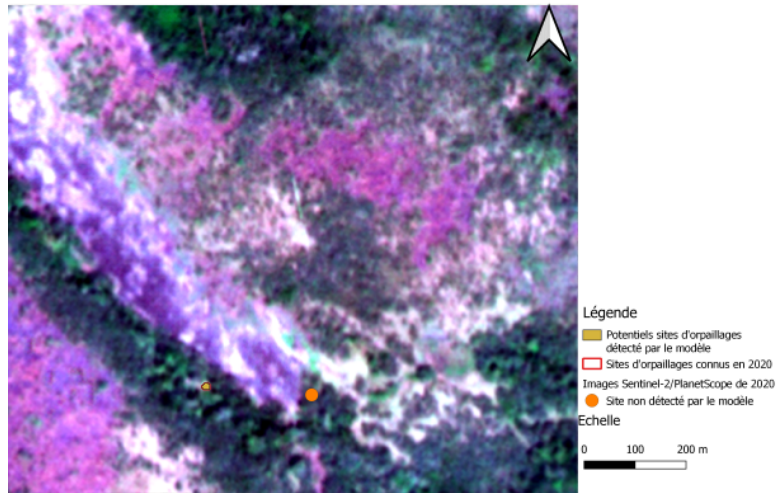
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(c) Zone 3/24 - Région Gbere

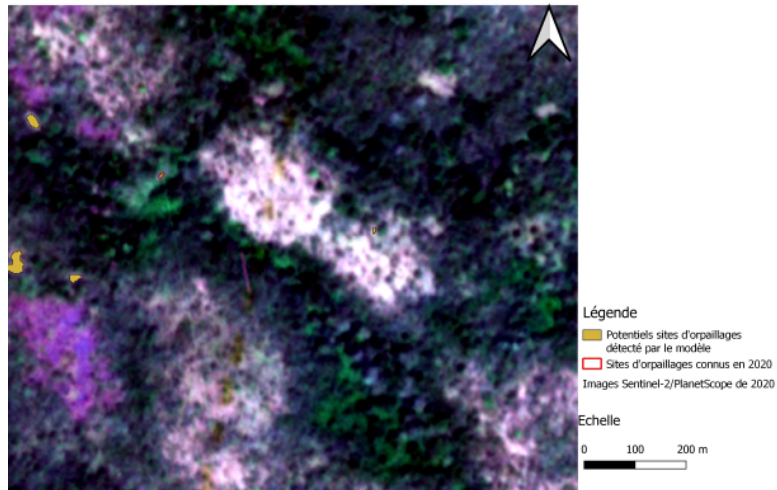
FIGURE 63 – Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 2

Zone 4/24 - Nord-Ouest Gbere  
 CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



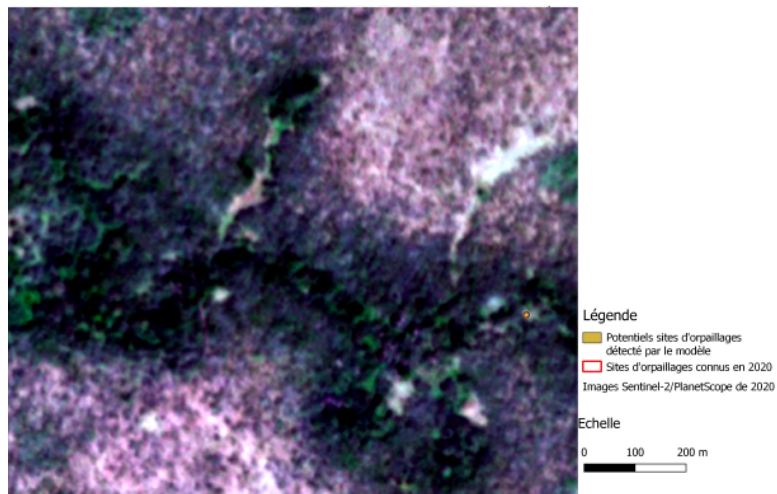
(a) Zone 4/24 - Région Gbere

Zone 5/24 - Nord Gbere  
 CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(b) Zone 5/24 - Région Gbere

Zone 6/24 - Nord Gbere  
 CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)

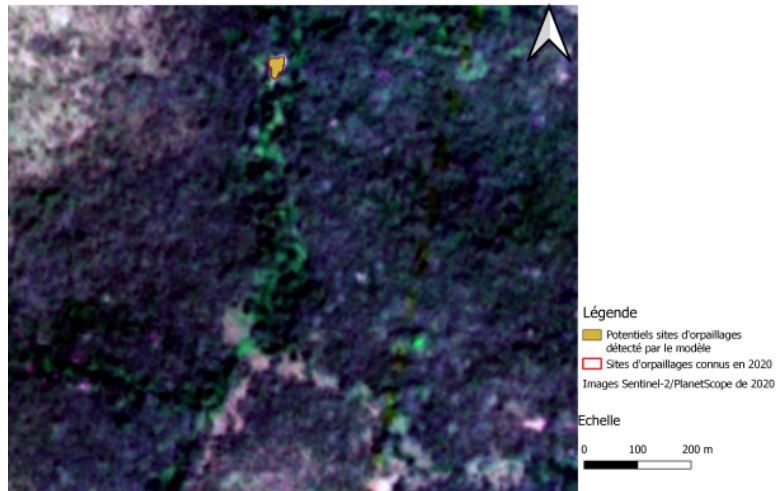


(c) Zone 6/24 - Région Gbere

FIGURE 64 – Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 3

Zone 7/24 - Nord-Ouest Tekadje

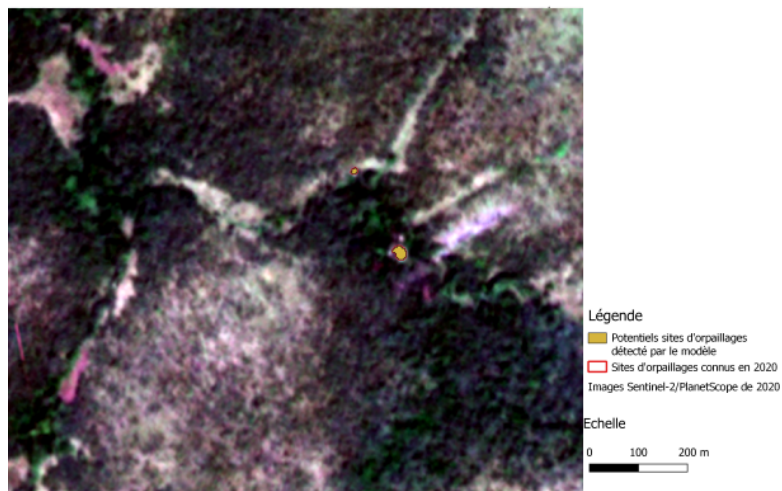
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(a) Zone 7/24 - Région Tekadje

Zone 8/24 - Nord-Ouest Tekadje

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(b) Zone 8/24 - Région Tekadje

Zone 9/24 - Nord-Ouest Tekadje

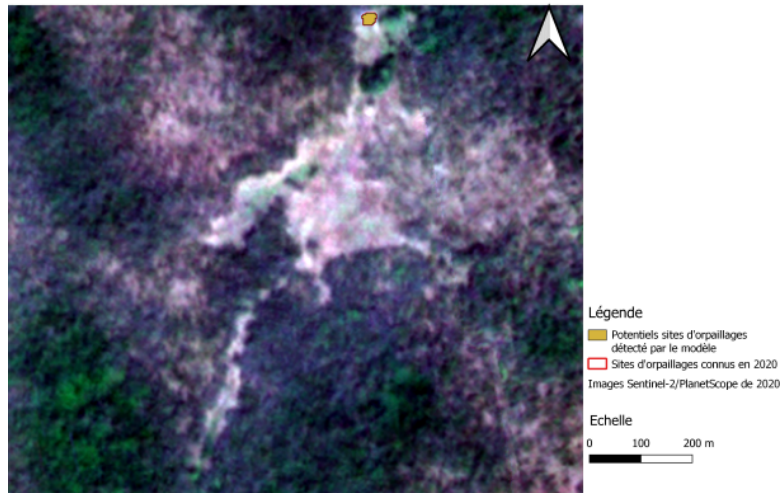
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(c) Zone 9/24 - Région Tekadje

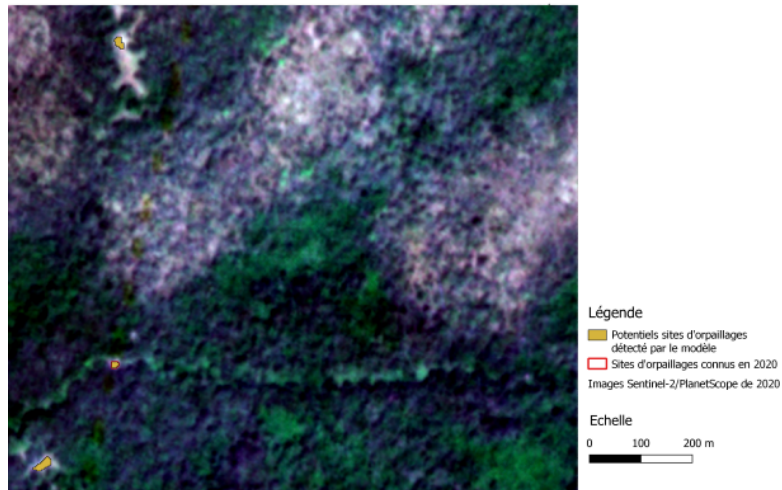
FIGURE 65 – Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 4

Zone 10/24 - Nord-Ouest Tekadje  
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



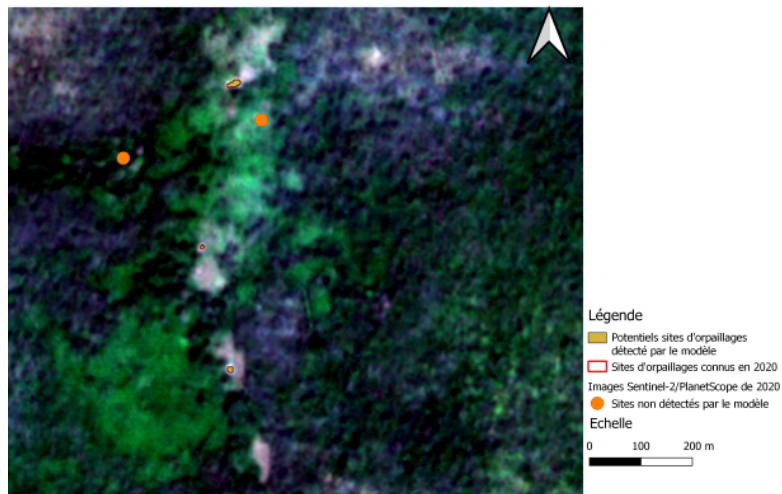
(a) Zone 10/24 - Région Tekadje

Zone 11/24 - Nord-Ouest Tekadje  
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(b) Zone 11/24 - Région Tekadje

Zone 12/24 - Nord-Ouest Tekadje  
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)

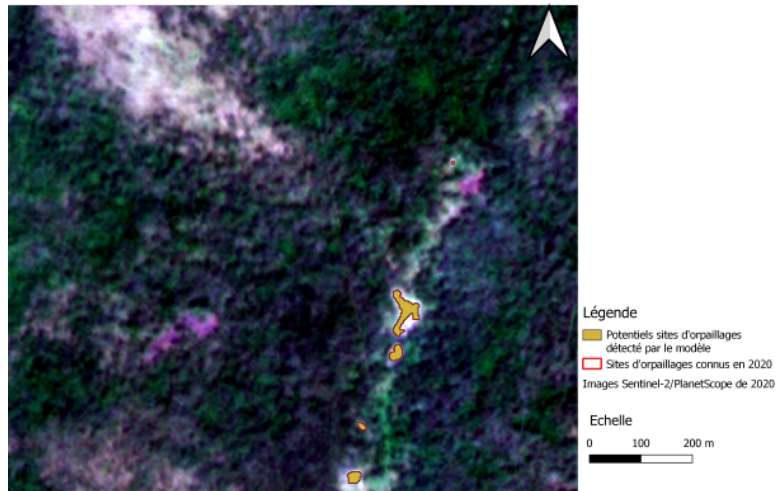


(c) Zone 12/24 - Région Tekadje

FIGURE 66 – Sites d'orpallage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images "super-résolues" - PARTIE 5

Zone 13/24 - Nord Tekadje

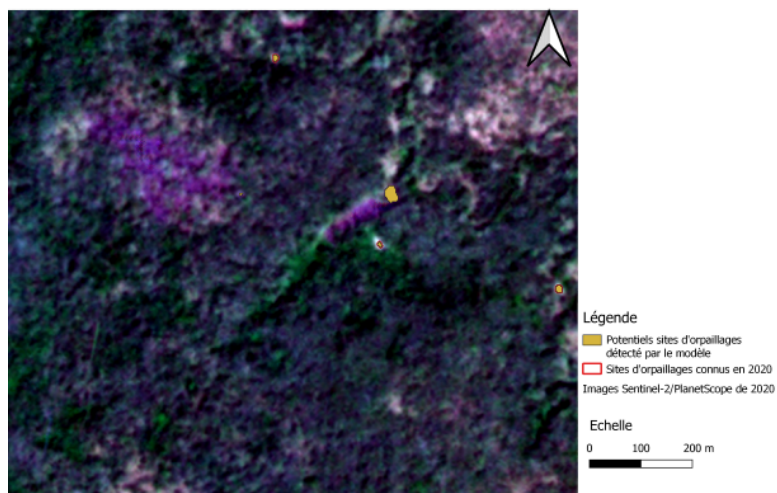
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(a) Zone 13/24 - Région Tekadje

Zone 14/24 - Nord Tekadje

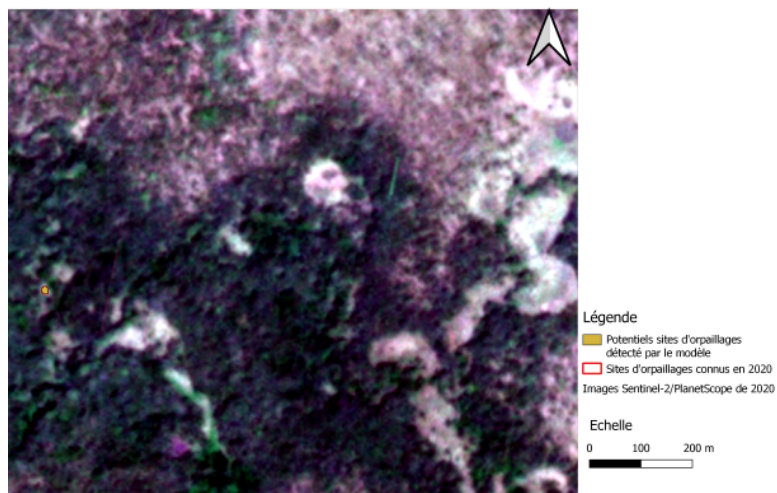
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(b) Zone 14/24 - Région Tekadje

Zone 15/24 - Nord Tekadje

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)

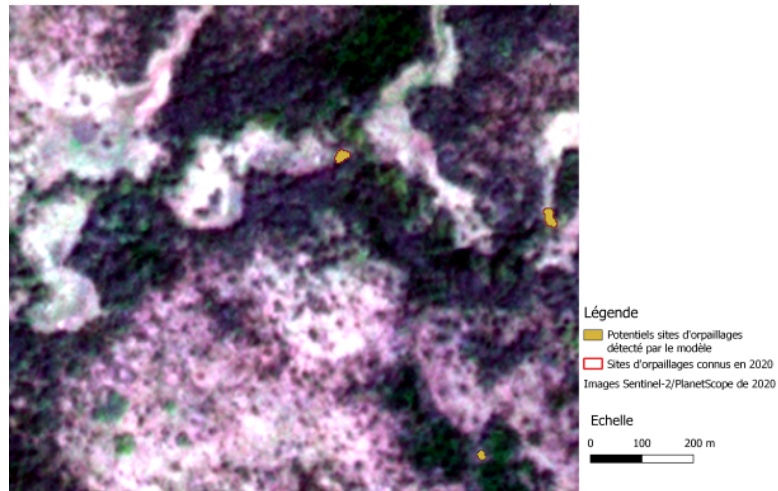


(c) Zone 15/24 - Région Tekadje



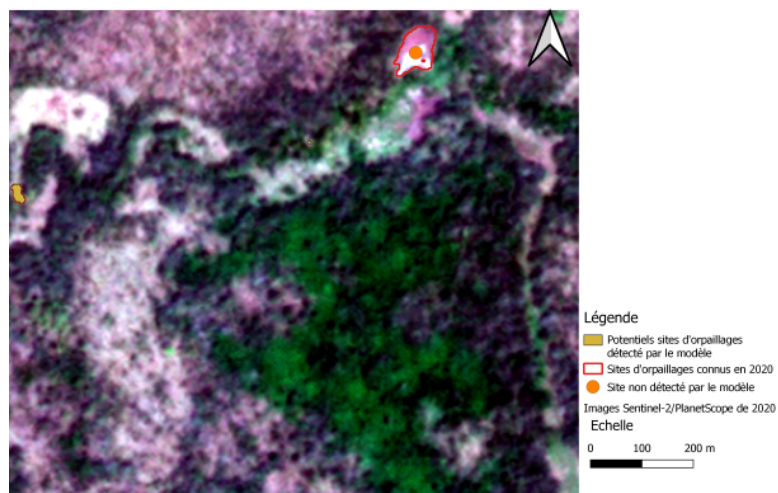
FIGURE 67 – Sites d'orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images "super-résolues" - PARTIE 6

Zone 16/24 - Nord Tekadje  
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



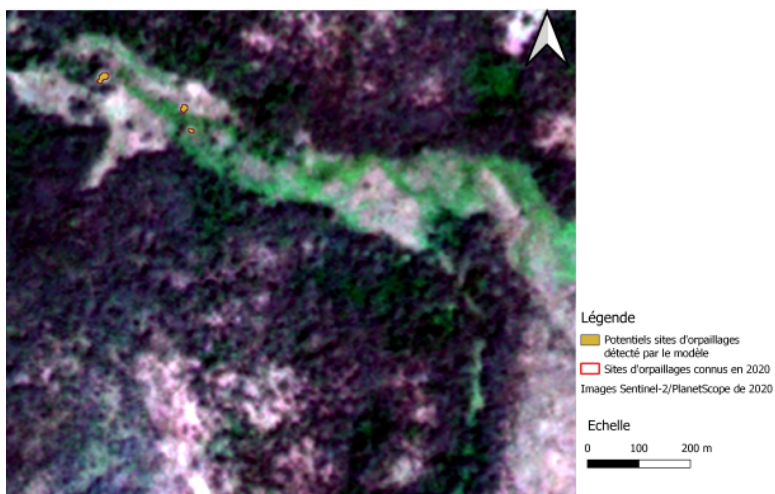
(a) Zone 16/24 - Région Tekadje

Zone 17/24 - Nord Tekadje  
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(b) Zone 17/24 - Région Tekadje

Zone 18/24 - Nord Tekadje  
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)

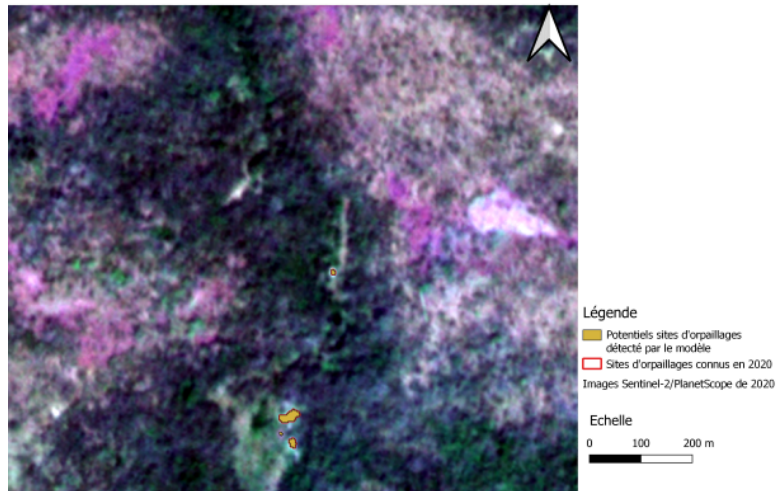


(c) Zone 18/24 - Région Tekadje

FIGURE 68 – Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 7

Zone 19/24 - Nord Tekadje

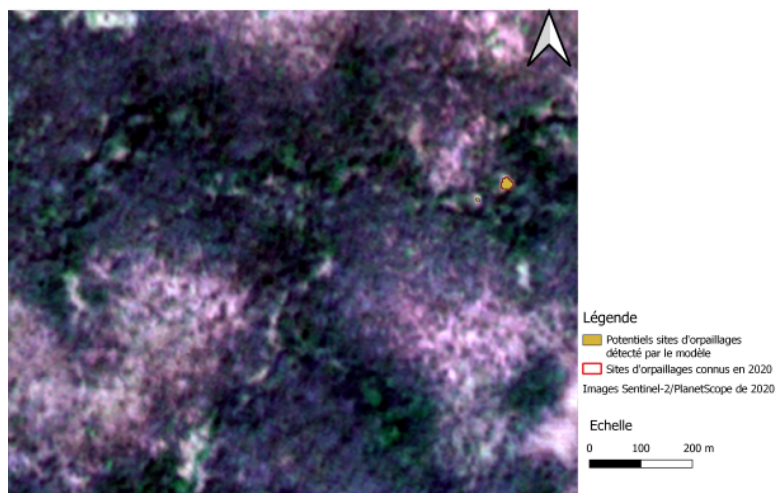
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(a) Zone 19/24 - Région Tekadje

Zone 20/24 - Nord Tekadje

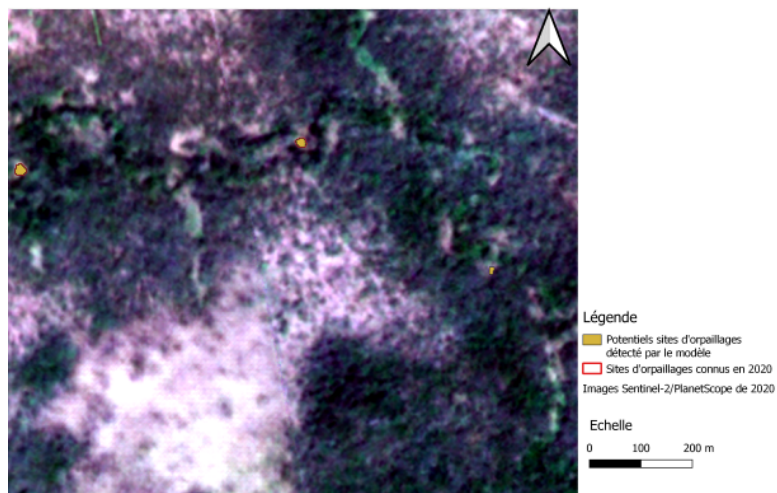
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(b) Zone 20/24 - Région Tekadje

Zone 21/24 - Nord Tekadje

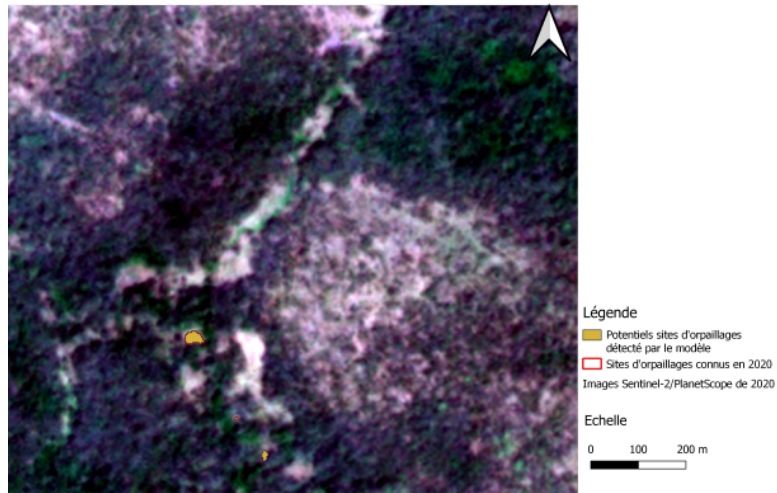
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(c) Zone 21/24 - Région Tekadje

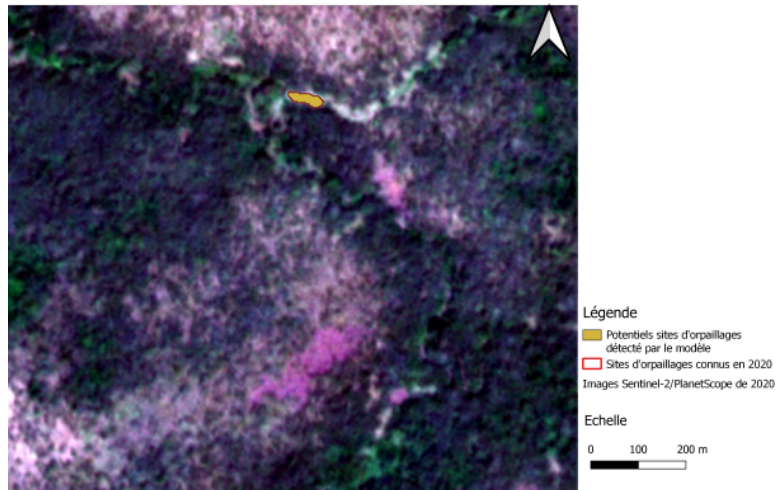
FIGURE 69 – Sites d'orpillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images "super-résolues" - PARTIE 8

Zone 22/24 - Nord Tekadje  
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



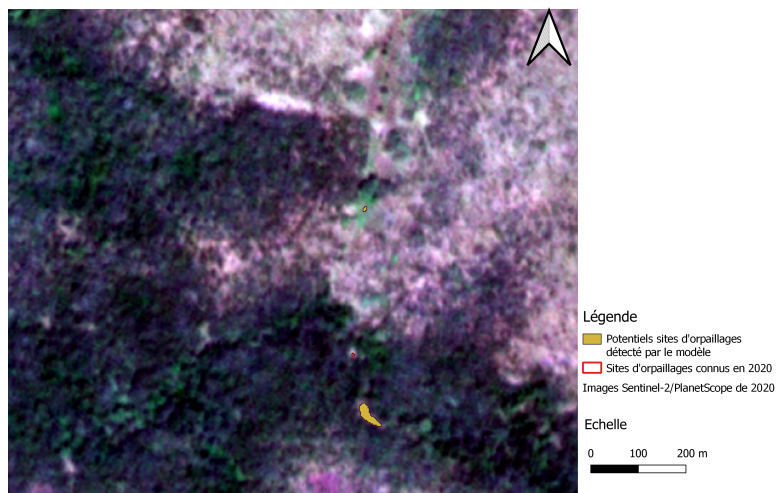
(a) Zone 22/24 - Région Tekadje

Zone 23/24 - Nord Tekadje  
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(b) Zone 23/24 - Région Tekadje

Zone 24/24 - Nord Tekadje  
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)



(c) Zone 24/24 - Région Tekadje

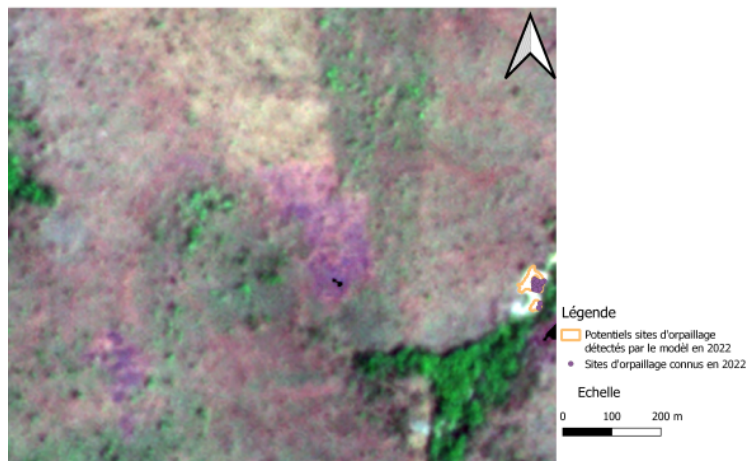


## D.2 Sites détectés par le modèle dans la Région de Sambia nord en 2022 grâce à des images “super-résolues ”

FIGURE 70 – Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Sambia nord en 2022 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 1

Zone 1/12 - Région Sambia Nord

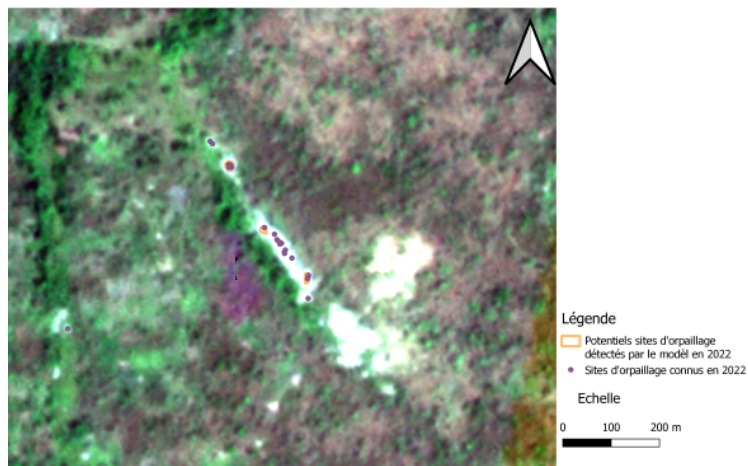
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Fond : Image "super-résolue" 2022



(a) Zone 1/12 - Région Sambia nord

Zone 3/12 - Région Sambia Nord

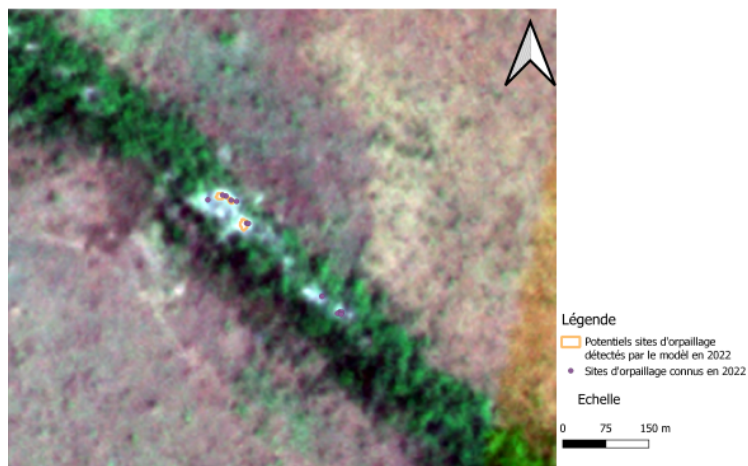
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Fond : Image "super-résolue" 2022



(b) Zone 3/12 - Région Sambia nord

Zone 6/12 - Région Sambia Nord

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Fond : Image "super-résolue" 2022

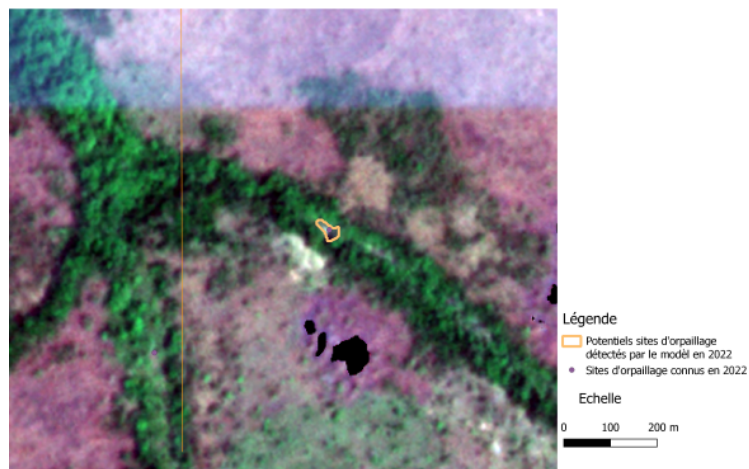


(c) Zone 6/12 - Région Sambia nord

FIGURE 71 – Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Sambia nord en 2022 grâce à des images “super-résolues ” - PARTIE 2

Zone 10/12 - Région Sambia Nord

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Fond : Image "super-résolue" 2022



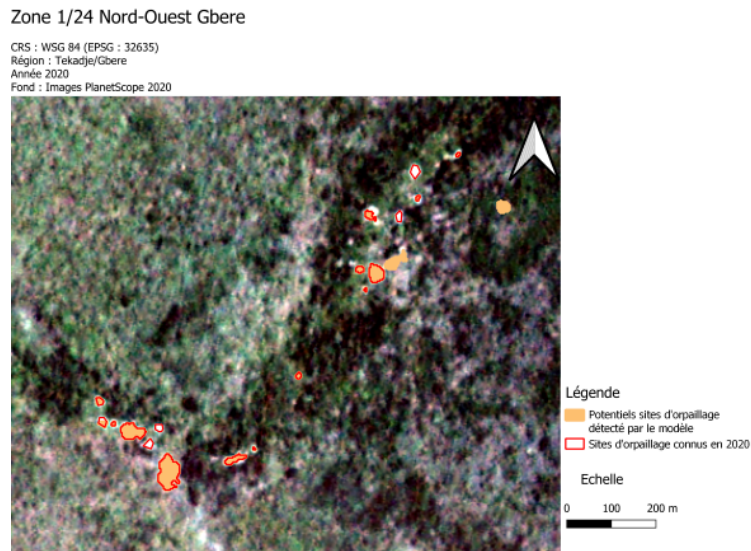
(a) Zone 10/12 - Région Sambia nord



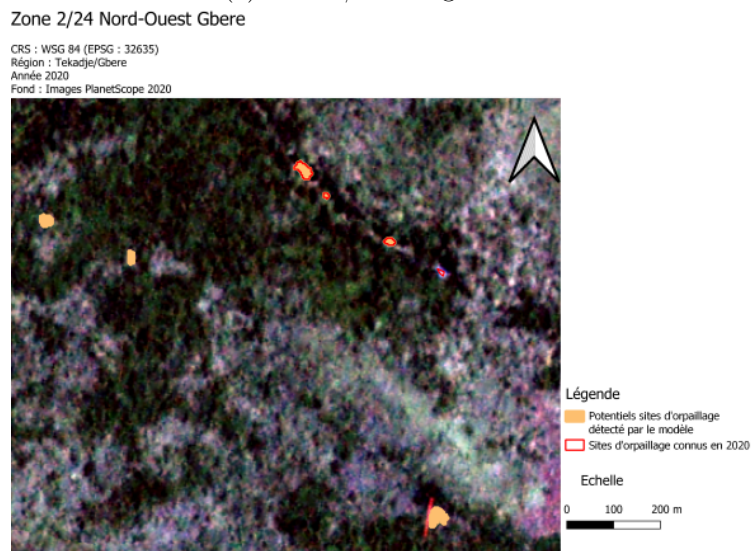
# E PlanetScope

## E.1 Zones détectées par le modèle dans la Région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images PlanetScope

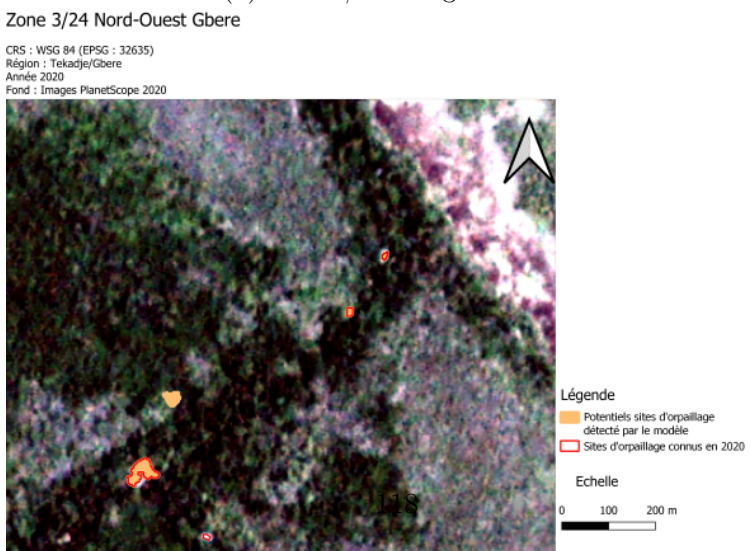
FIGURE 72 – Sites d’orpillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 1



(a) Zone 1/24 - Région Gbere



(b) Zone 2/24 - Région Gbere



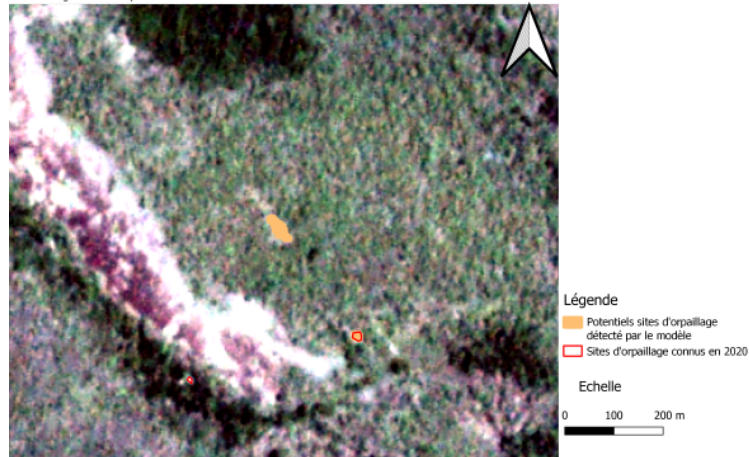
(c) Zone 3/24 - Région Gbere



FIGURE 73 – Sites d'orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 2

Zone 4/24 Nord-Ouest Gbere

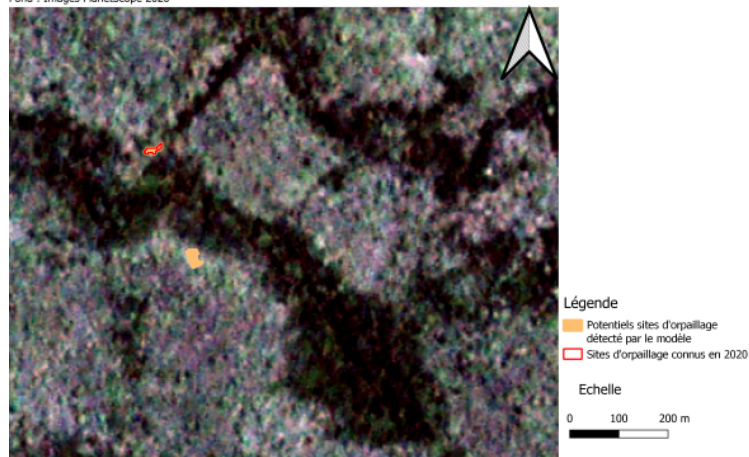
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2020



(a) Zone 4/24 - Région Gbere

Zone 5/24 Nord Gbere

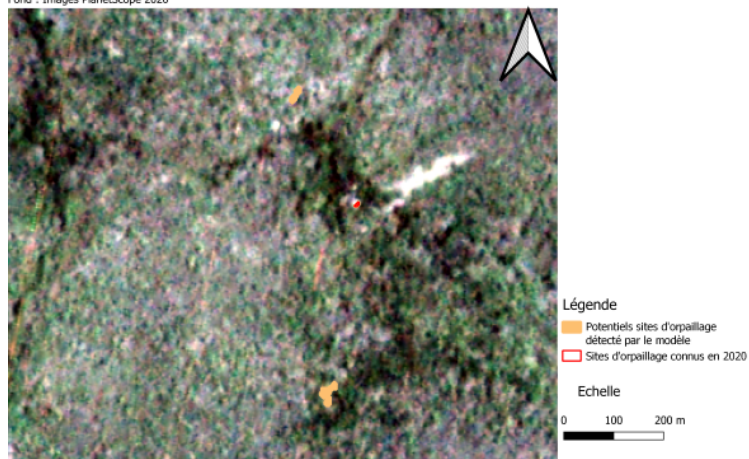
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2020



(b) Zone 5/24 - Région Gbere

Zone 8/24 Nord-Ouest Tekadje

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2020

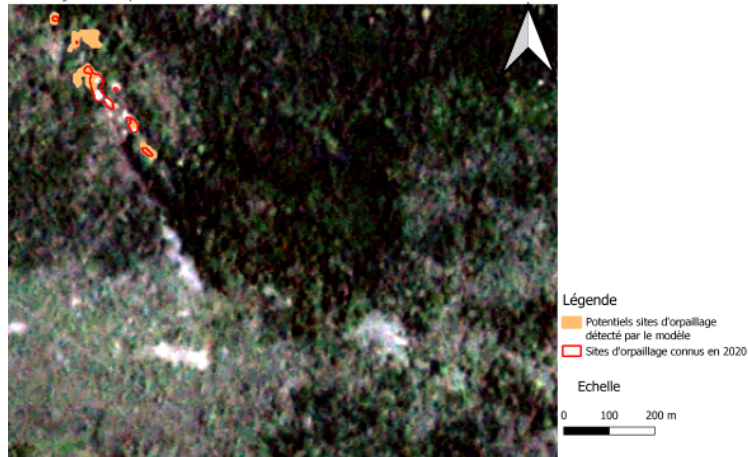


(c) Zone 8/24 - Région Tekadje

FIGURE 74 – Sites d'orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 3

Zone 9/24 Nord-Ouest Tekadje

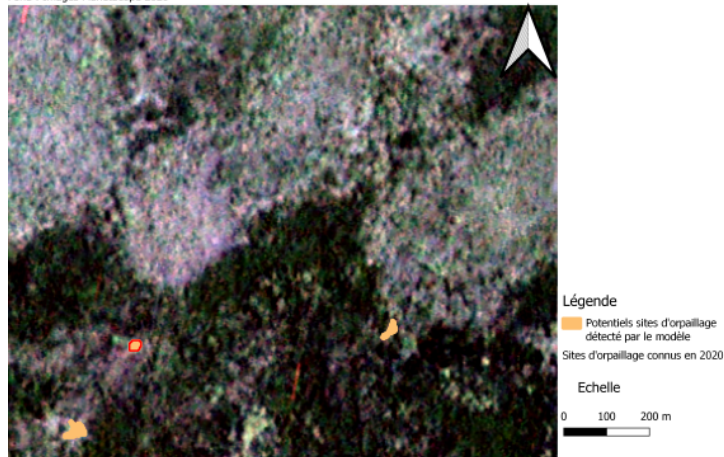
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2020



(a) Zone 9/24 - Région Tekadje

Zone 11/24 Nord-Ouest Tekadje

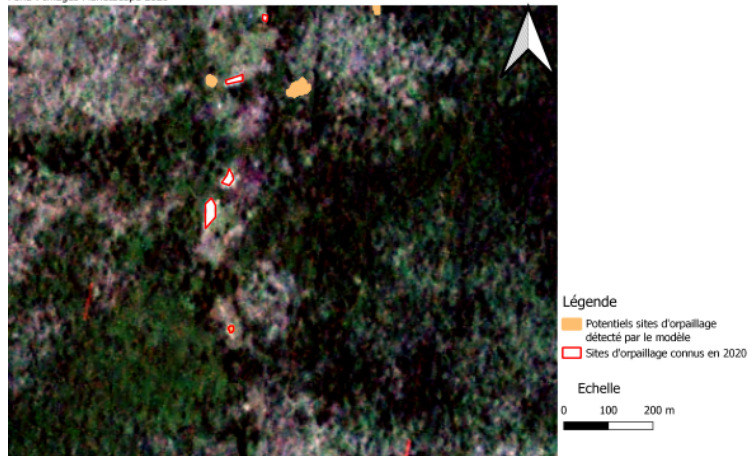
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2020



(b) Zone 11/24 - Région Tekadje

Zone 12/24 Nord-Ouest Tekadje

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2020

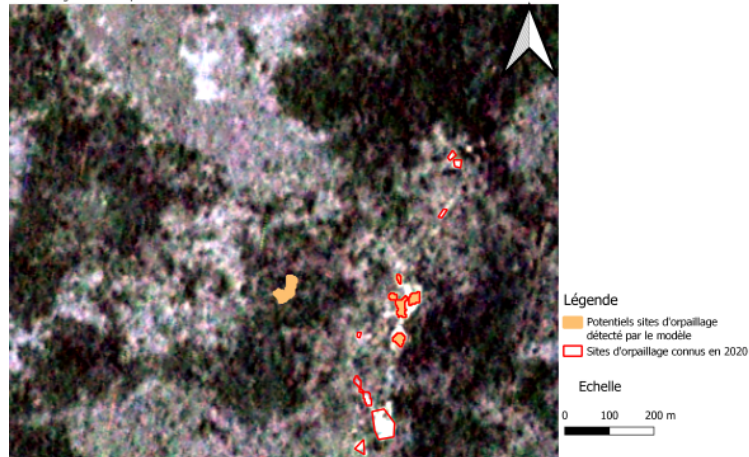


(c) Zone 12/24 - Région Tekadje

FIGURE 75 – Sites d'orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 4

Zone 13/24 Nord-Ouest Tekadje

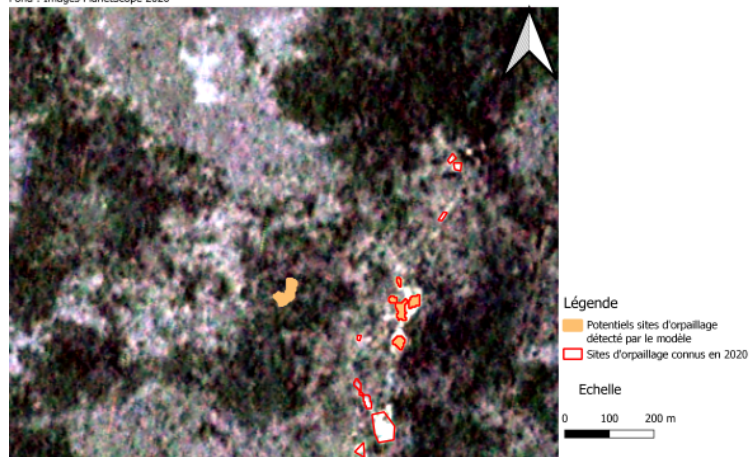
CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2020



(a) Zone 14/24 - Région Tekadje

Zone 13/24 Nord-Ouest Tekadje

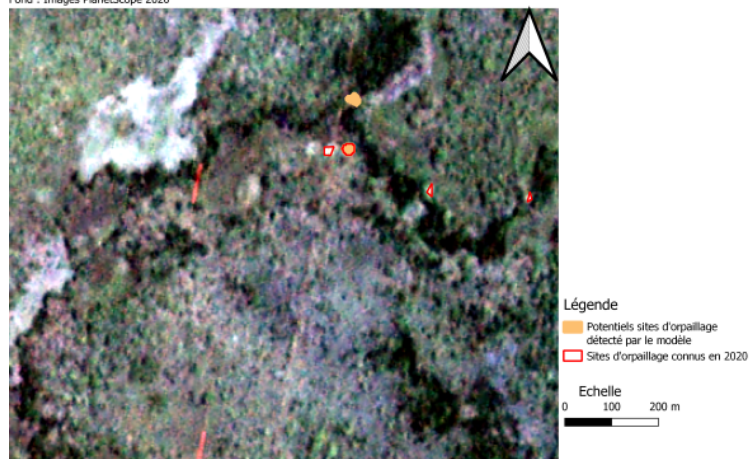
CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2020



(b) Zone 14/24 - Région Tekadje

Zone 17/24 Nord-Ouest Tekadje

CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2020

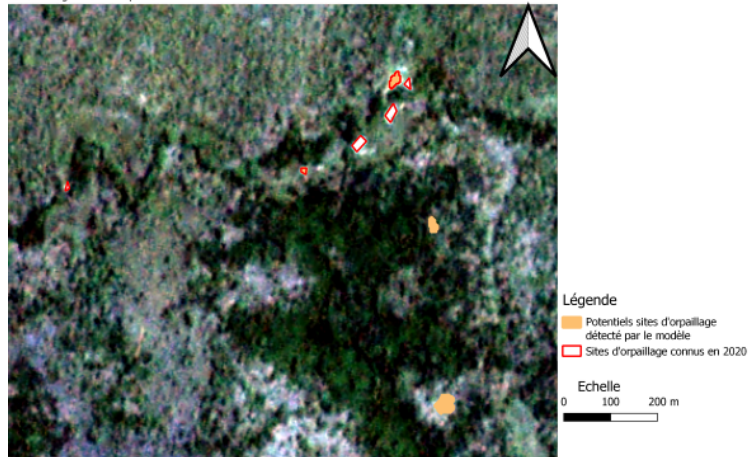


(c) Zone 17/24 - Région Tekadje

FIGURE 76 – Sites d'orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 5

Zone 18/24 Nord-Ouest Tekadje

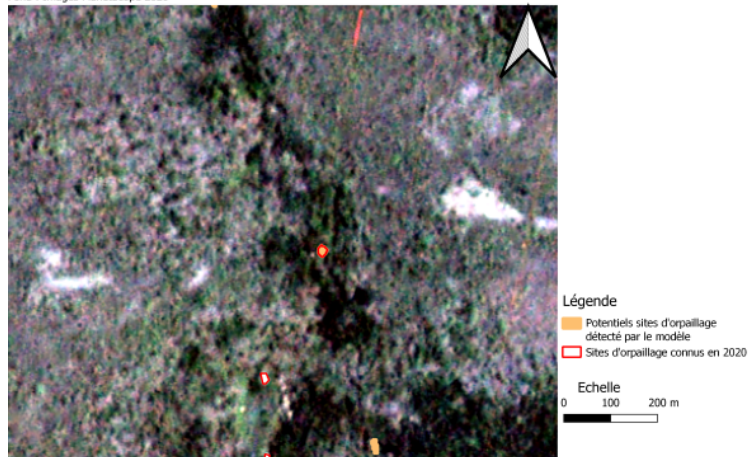
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2020



(a) Zone 18/24 - Région Tekadje

Zone 19/24 Nord-Ouest Tekadje

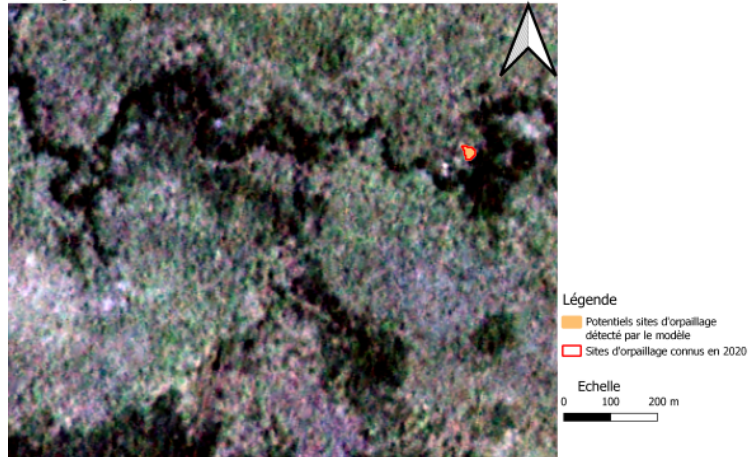
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2020



(b) Zone 19/24 - Région Tekadje

Zone 20/24 Nord-Ouest Tekadje

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2020

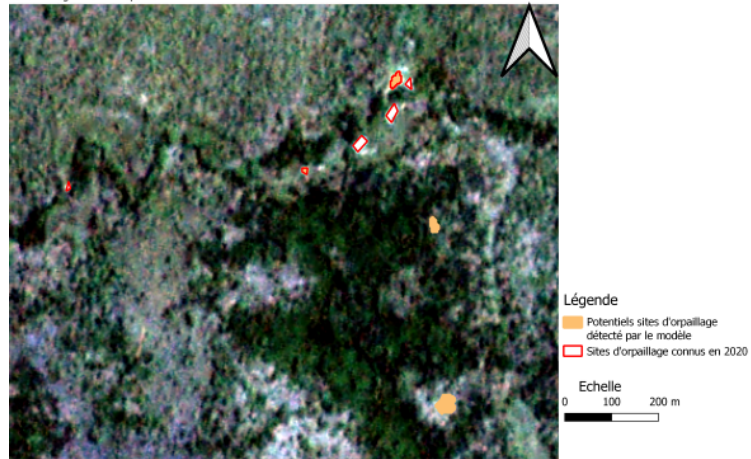


(c) Zone 20/24 - Région Tekadje

FIGURE 77 – Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Tekadje/Gbere en 2020 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 6

Zone 18/24 Nord-Ouest Tekadje

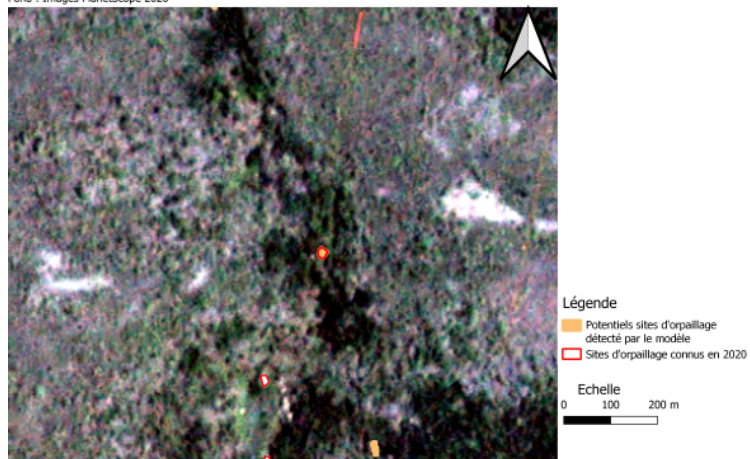
CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2020



(a) Zone 22/24 - Région Tekadje

Zone 19/24 Nord-Ouest Tekadje

CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Région : Tekadje/Gbere  
Année 2020  
Fond : Images PlanetScope 2020



(b) Zone 24/24 - Région Tekadje

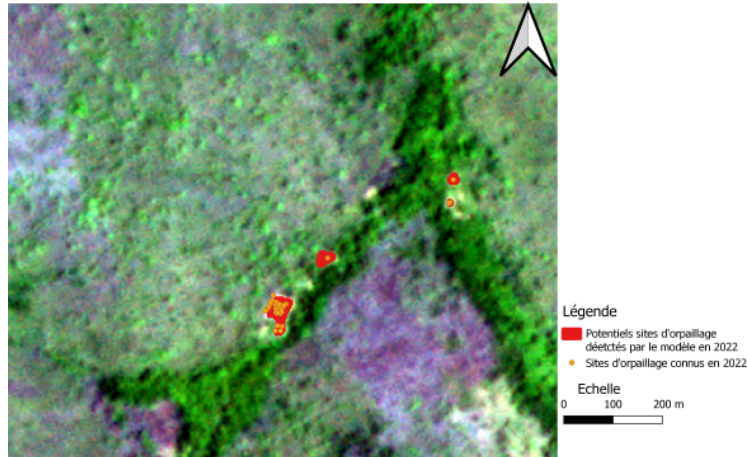


## E.2 Sites détectés par le modèle dans la Région de Sambia nord en 2022 grâce à des images PlanetScope

FIGURE 78 – Sites d’orpaillage détectés par le modèle dans la région de Sambia nord en 2022 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 1

Zones 1 et 2 / 12 - Région Sambia Nord

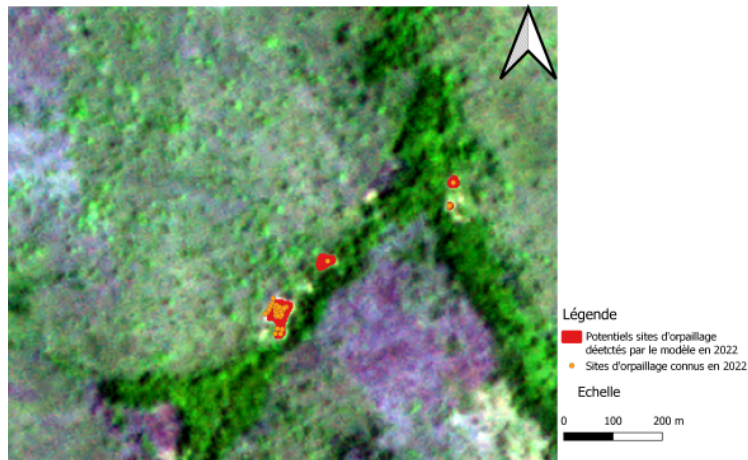
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Fond : Image PlanetScope 2022



(a) Zones 1 et 2 /12 - Région Sambia nord

Zones 3 et 4 / 12 - Région Sambia Nord

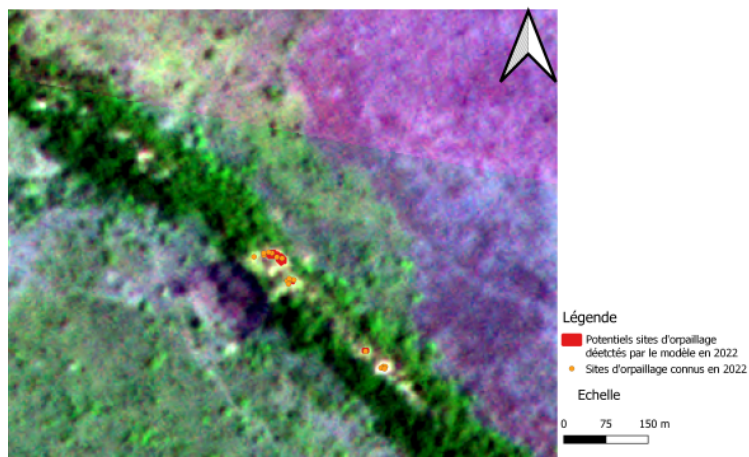
CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Fond : Image PlanetScope 2022



(b) Zone 3 et 4 /12 - Région Sambia nord

Zones 6 / 12 - Région Sambia Nord

CRS : WSG 84 (EPSG : 32635)  
Fond : Image PlanetScope 2022

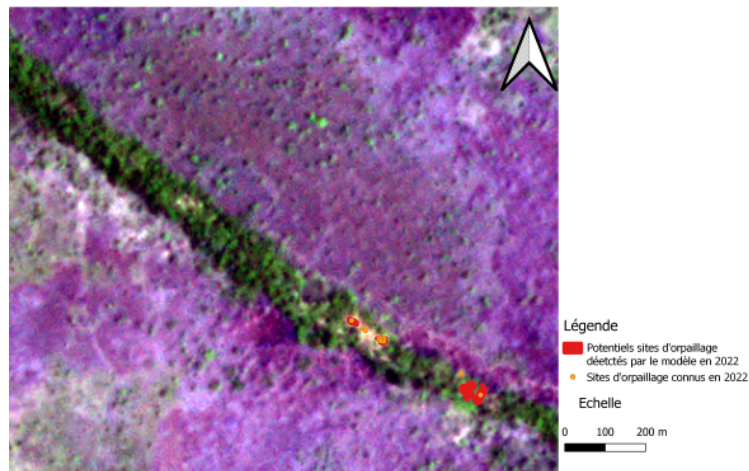


(c) Zone 6/12 - Région Sambia nord

FIGURE 79 – Sites d'orpaillage détectés par le modèle dans la région de Sambia nord en 2022 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 2

Zones 8 / 12 - Région Sambia Nord

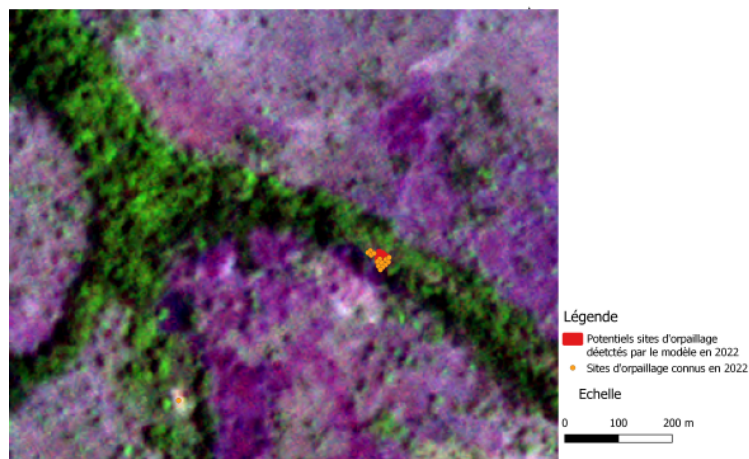
CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Fond : Image PlanetScope 2022



(a) Zone 8/12 - Région Sambia nord

Zones 10 / 12 - Région Sambia Nord

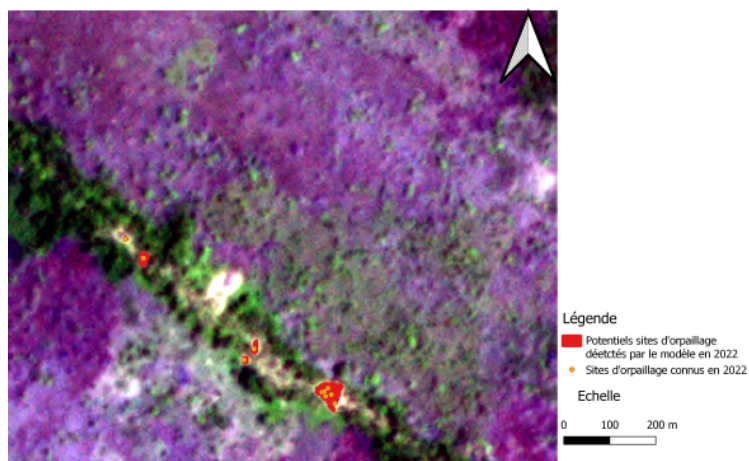
CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Fond : Image PlanetScope 2022



(b) Zone 10/12 - Région Sambia nord

Zones 11 / 12 - Région Sambia Nord

CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Fond : Image PlanetScope 2022



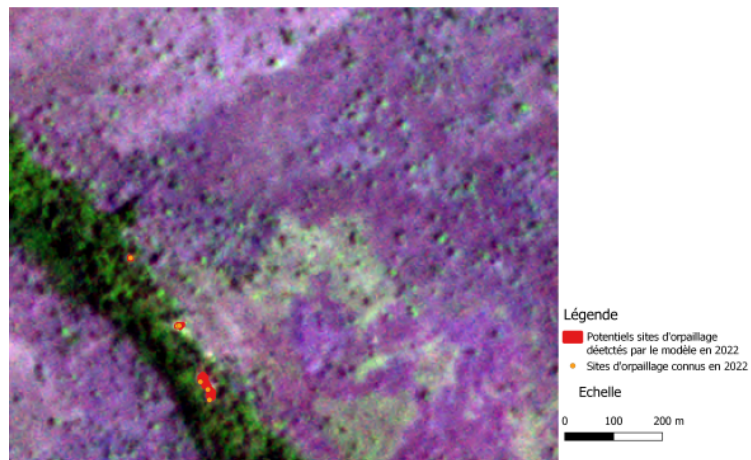
(c) Zone 11/12 - Région Sambia nord



FIGURE 80 – Sites d'orpaillage détectés par le modèle dans la région de Sambia nord en 2022 grâce à des images PlanetScope - PARTIE 3

Zones 12 / 12 - Région Sambia Nord

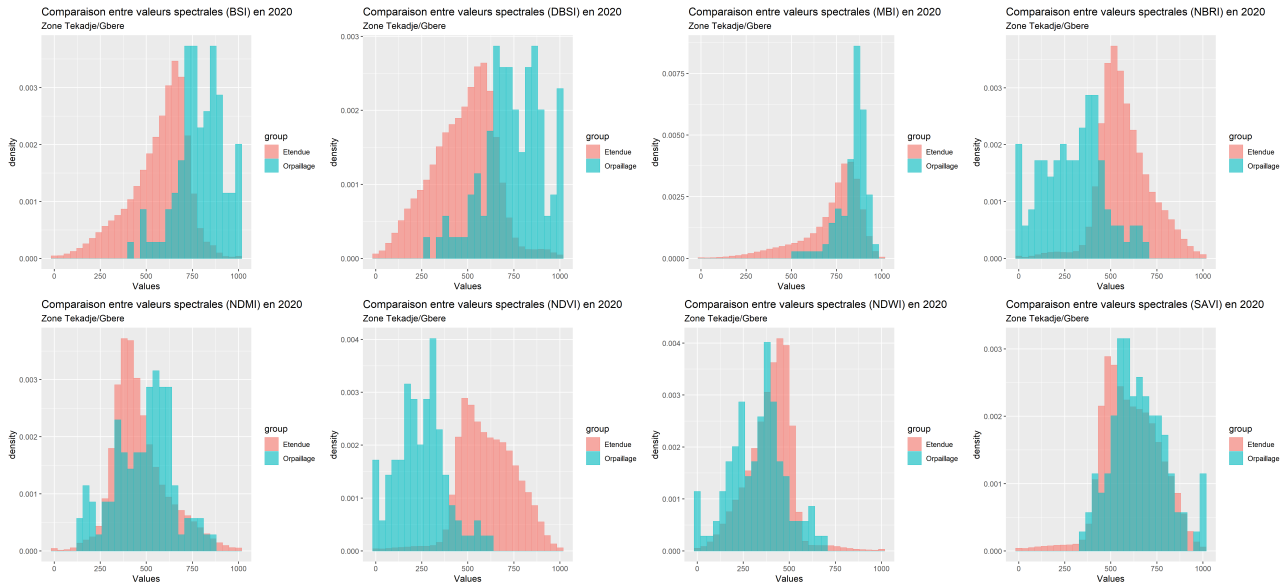
CRS : WGS 84 (EPSG : 32635)  
Fond : Image PlanetScope 2022



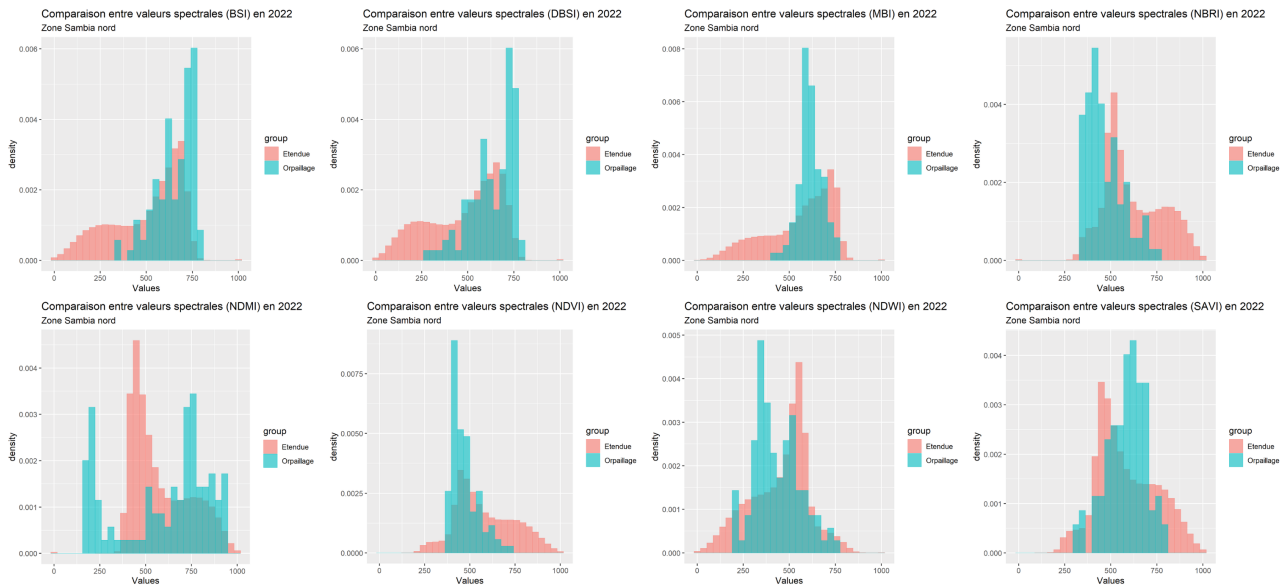
(a) Zone 12/12 - Région Sambia nord

## F Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d'orpillage et l'ensemble des étendues étudiées

FIGURE 81 – Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d'orpillage et l'ensemble des étendues étudiées sur les années de référence PARTIE - 1

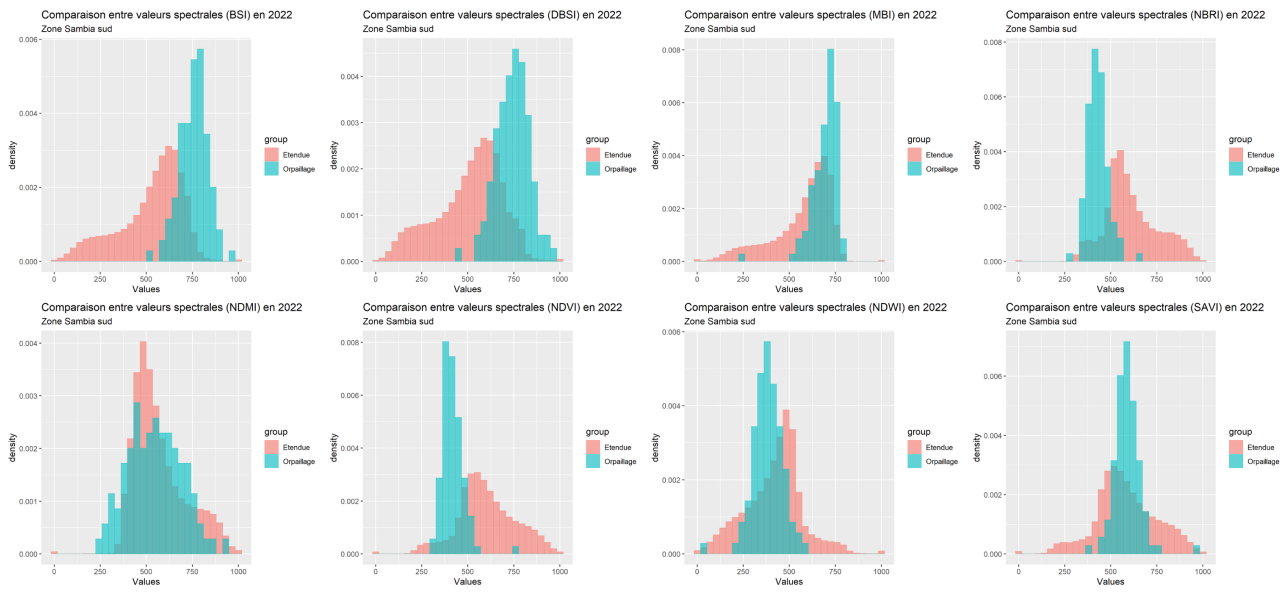


(a) Zone Tekadje/Gbere - Image super-résolue (2020)

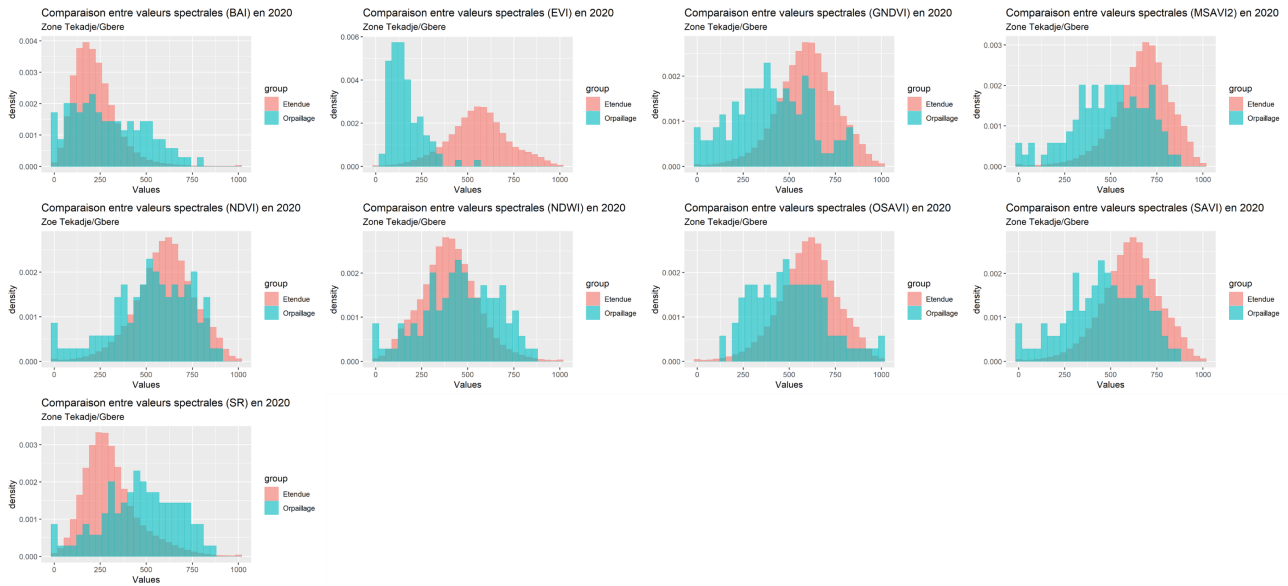


(b) Zone Sambia nord - Image super-résolue (2022)

FIGURE 82 – Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d'orpillage et l'ensemble des étendues étudiées sur les années de référence PARTIE - 2

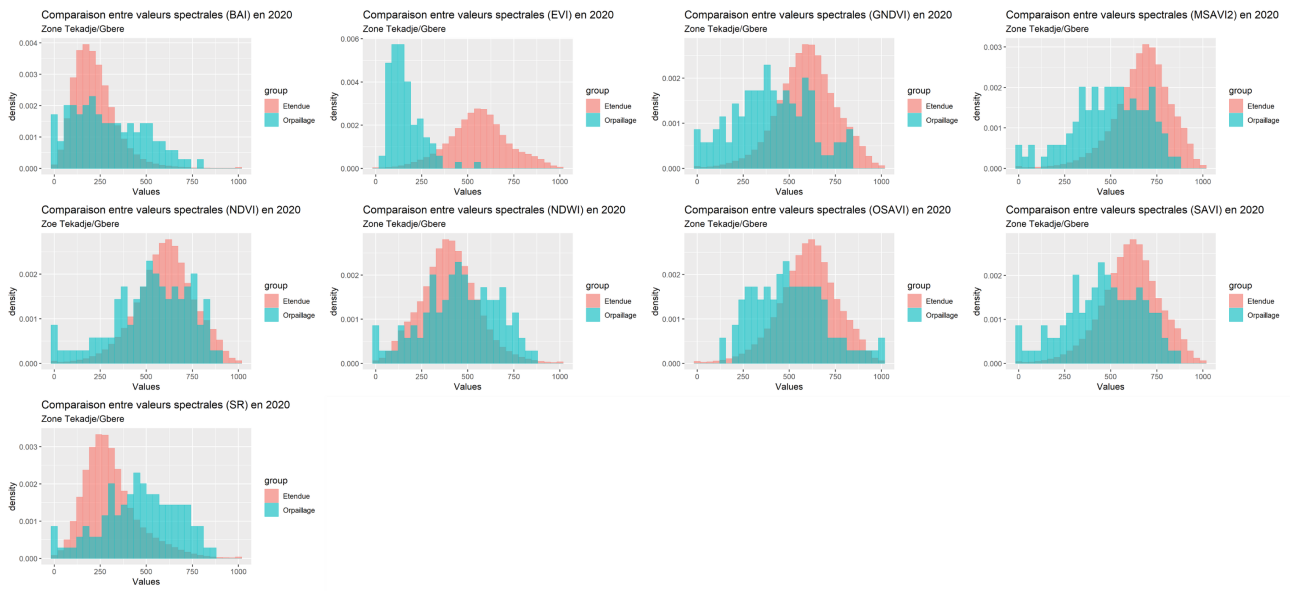


(a) Zone Sambia sud - Image super-résolue (2022)

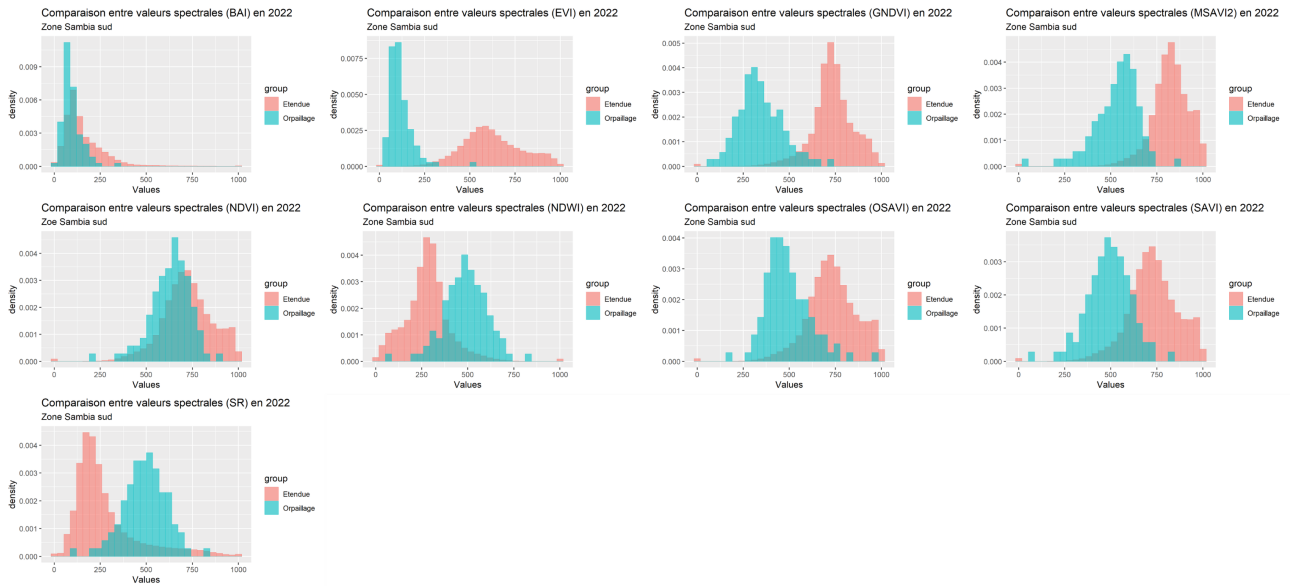


(b) Zone Tekadje/Gbere - Image PlanetScope (2020)

FIGURE 83 – Différences de signatures spectrales des indices spectraux entre les sites d'orpaillage et l'ensemble des étendues étudiées sur les années de référence PARTIE - 3



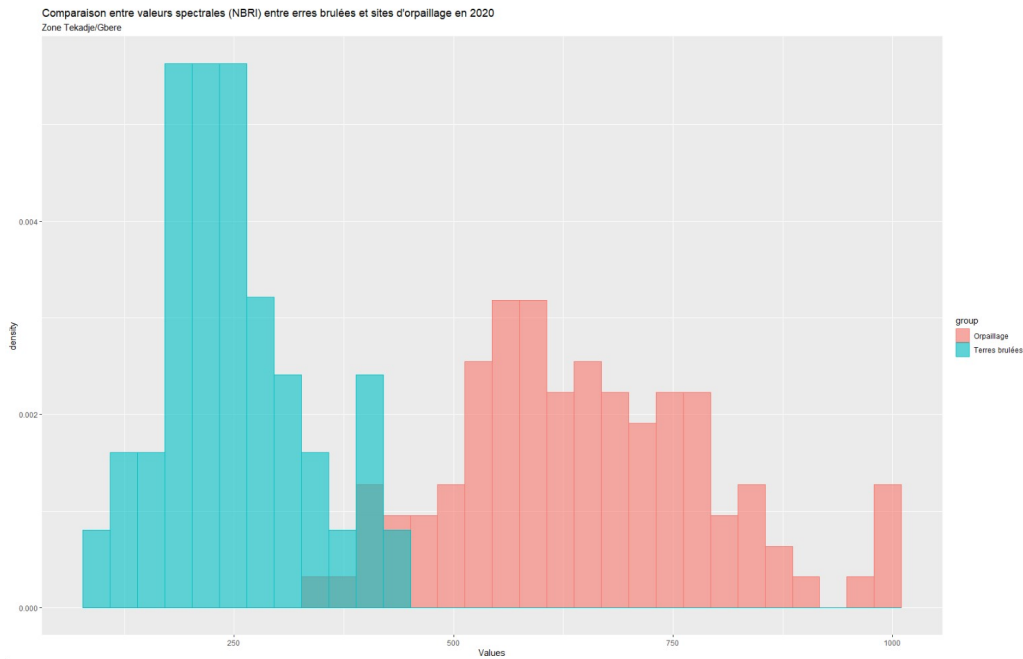
(a) Zone Sambia nord - Image PlanetScope(2022)



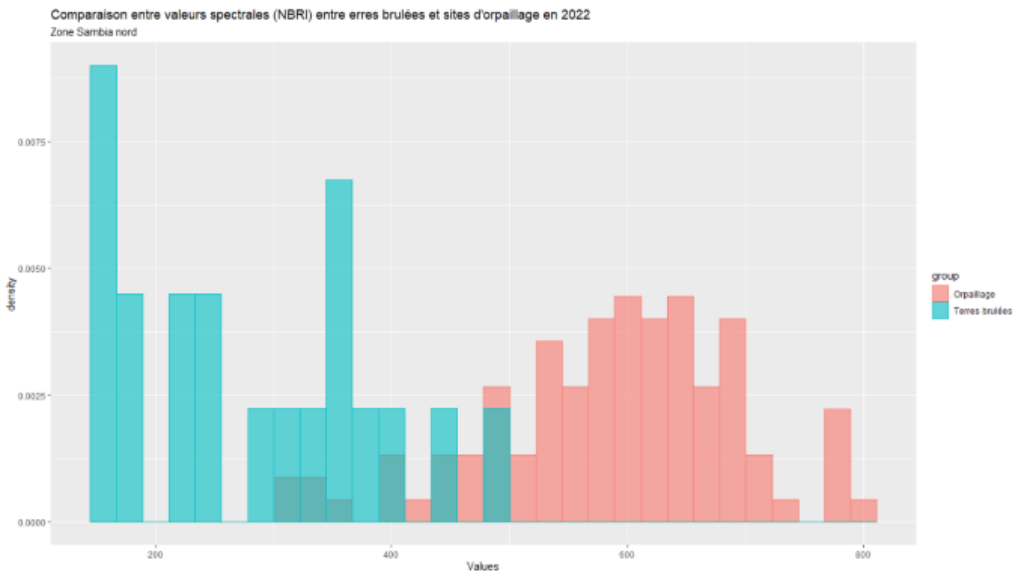
(b) Zone Sambia sud - Image PlanetScope(2022)

## G Différences de signatures spectrales entre sites d'orpillage et terres brûlées sur base des indices de terres brûlées (NBRI et BAI) amplifiés pour les zones brûlées et normalisés

FIGURE 84 – Différences de signatures spectrales entre sites d'orpillage et terres brûlées sur base des indices de terres brûlées (NBRI et BAI) amplifiés pour les zones brûlées et normalisés - PARTIE 1

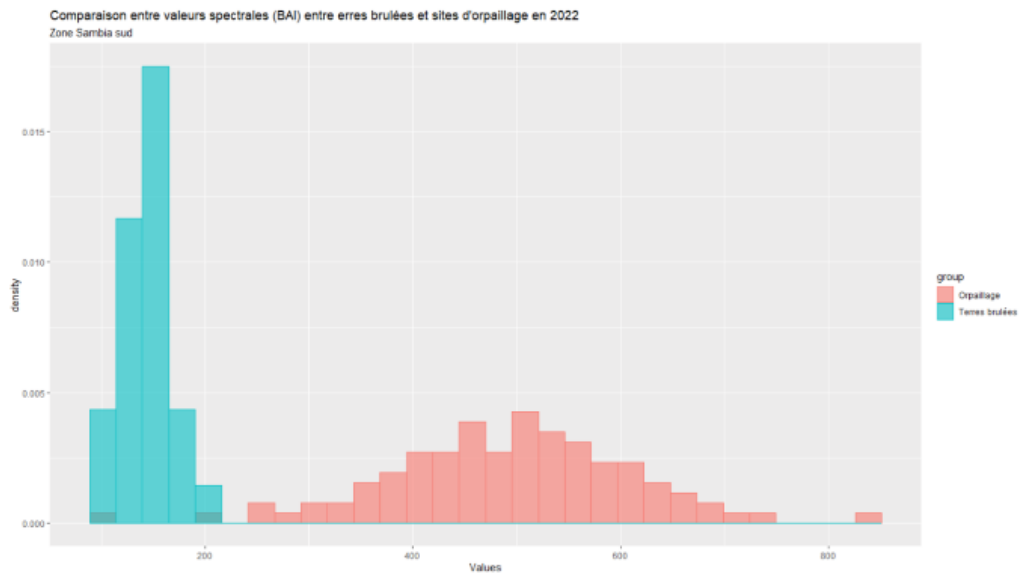


(a) Zone Tekadje/Gbere - Image super-résolue (2020)

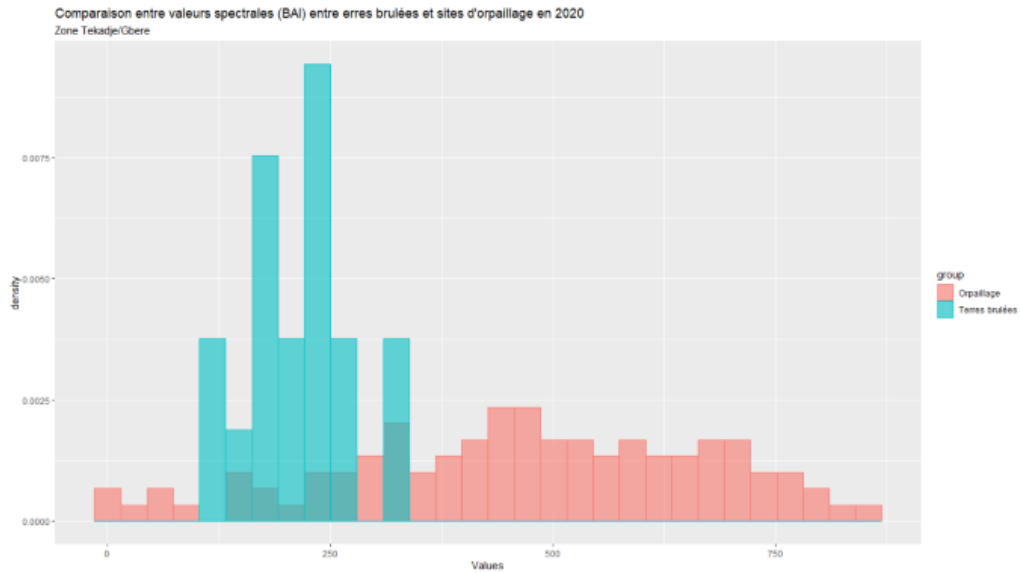


(b) Zone Sambia nord - Image super-résolue (2022)

FIGURE 85 – Différences de signatures spectrales entre sites d’orpaillage et terres brûlées sur base des indices de terres brûlées (NBRI et BAI) amplifiés pour les zones brûlées et normalisés - PARTIE 1

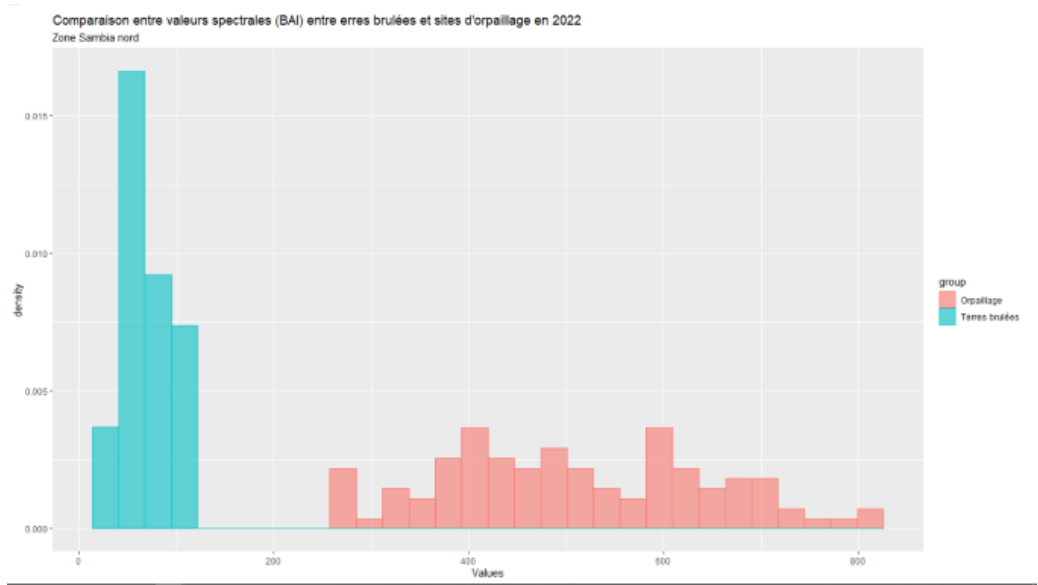


(a) Zone Sambia sud - Image super-résolue (2022)

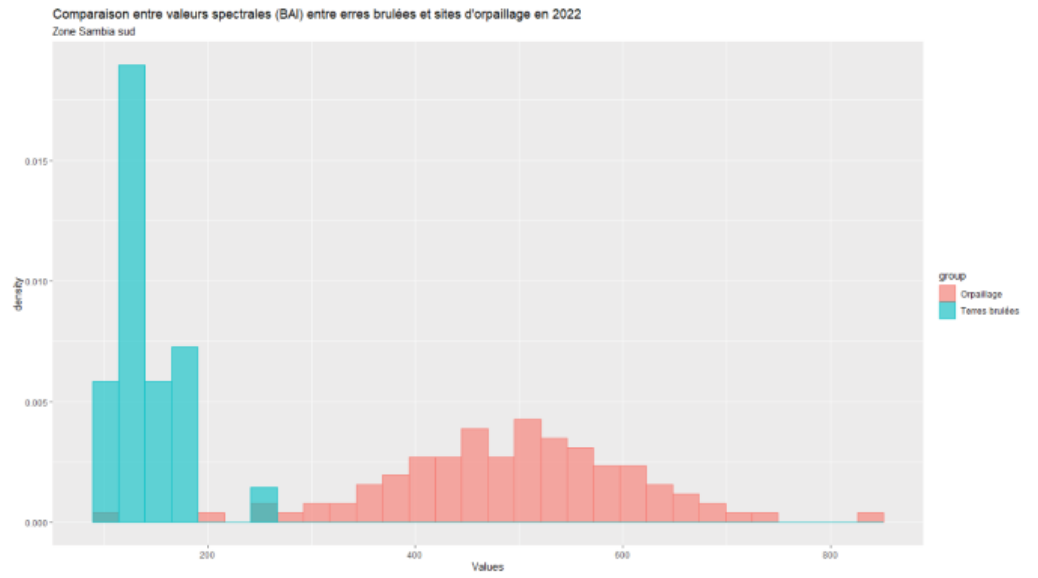


(b) Zone Tekadje/Gbere - Image PlanetScope (2020)

FIGURE 86 – Différences de signatures spectrales entre sites d’orpillage et terres brûlées sur base des indices de terres brûlées (NBRI et BAI) amplifiés pour les zones brûlées et normalisés - PARTIE 1



(a) Zone Sambia nord - Image PlanetScope(2022)



(b) Zone Sambia sud - Image PlanetScope(2022)

## H Comparaison des différentes bandes spectrales utilisées lors des calculs des indices spectraux selon différentes dates

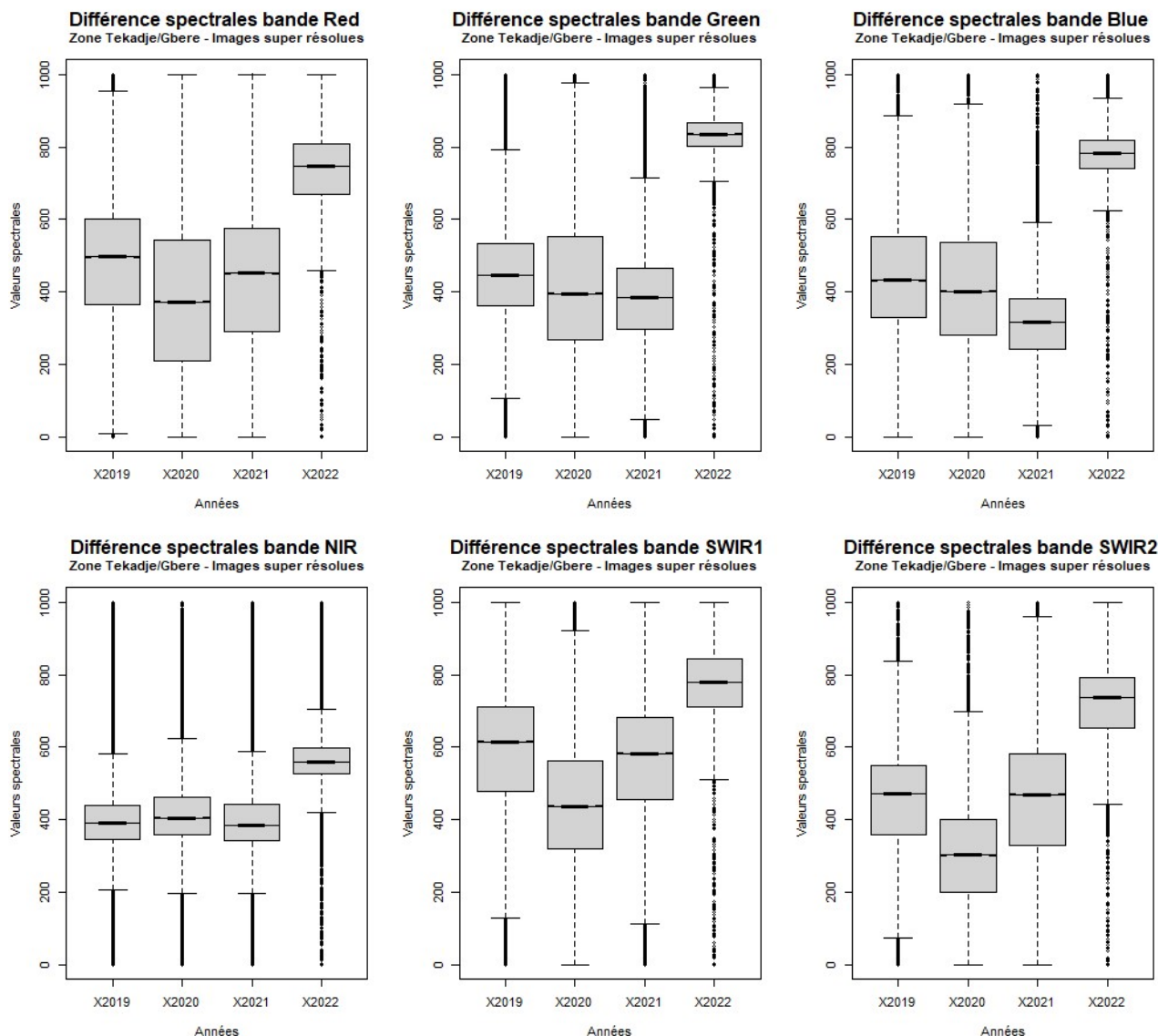


FIGURE 87 – Comparaison des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2020) des images “super-résolues ” dans la zone Tekadje/Gbere

TABLE 25 – Comparaison des corrélations des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2020) des images “super-résolues ” dans la zone Tekadje/Gbere

Matrice de corrélation - Année de référence 2020						
Zone Tekadje/Gbere - Image super-résolue						
	Red	Green	Blue	NIR	SWIR1	SWIR2
2019	0.7411689	0.5583798	0.5217243	0.5377278	0.4263525	0.6841671
2021	0.8607288	0.6897719	0.7210560	0.6289263	0.7063786	0.8135215
2022	0.6681296	0.4788084	0.5895853	0.5225892	0.4672202	0.6840943



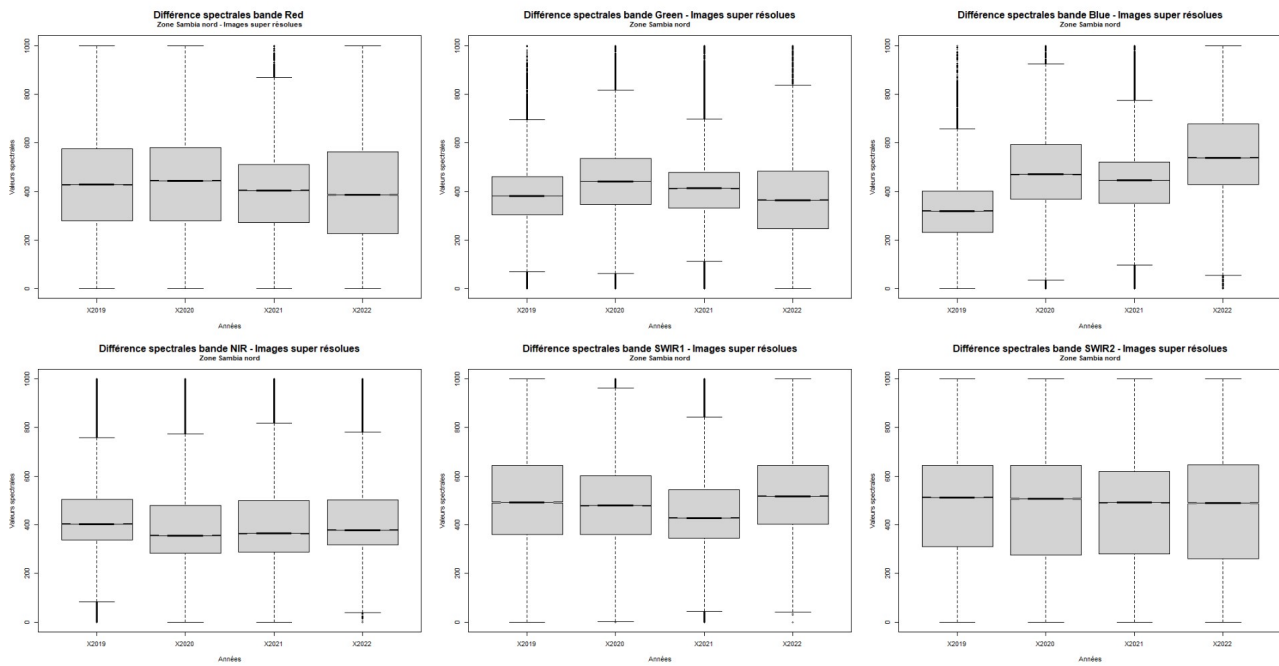


FIGURE 88 – Comparaison des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2022) des images “super-résolues ” dans la zone Sambia nord

TABLE 26 – Comparaison des corrélations des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2022) des images “super-résolues ” dans la zone Sambia nord

Matrice de corrélation - Année de référence 2022						
Zone Sambia nord - Image super-résolue						
	Red	Green	Blue	NIR	SWIR1	SWIR2
2019	0.8062311	0.5629686	0.4528263	0.7611367	0.5913334	0.8294510
2020	0.8377558	0.6708587	0.8158814	0.8160022	0.5272357	0.8777173
2021	0.7795660	0.5329113	0.7473068	0.8114583	0.4640808	0.8613963

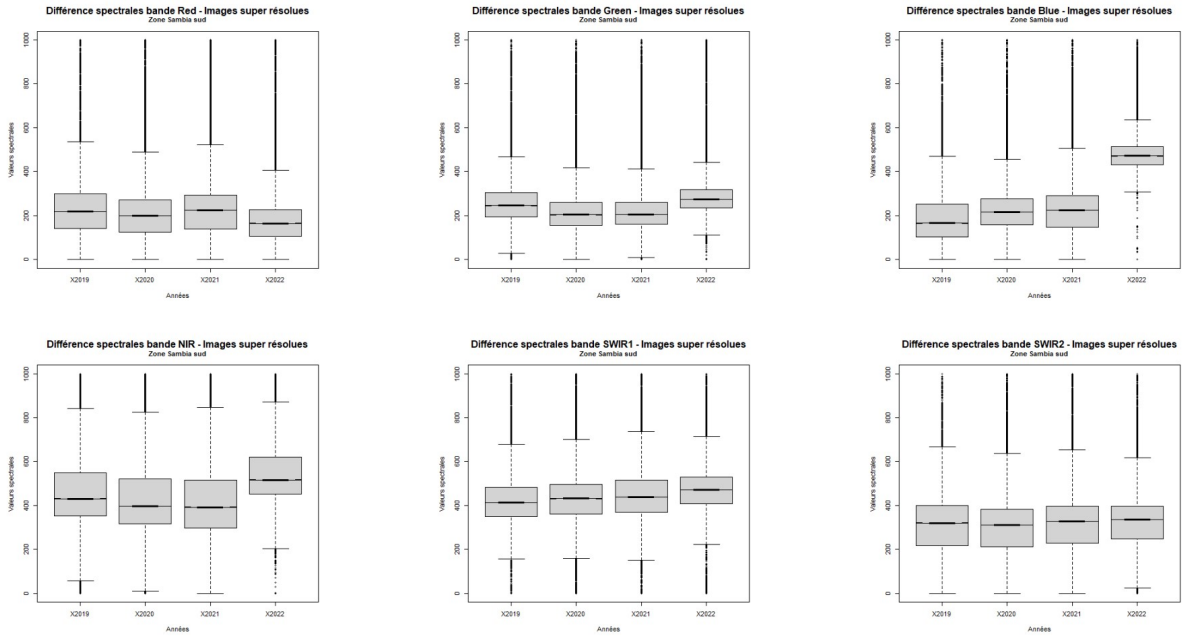


FIGURE 89 – Comparaison des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2022) des images “super-résolues ” dans la zone Sambia sud

TABLE 27 – Comparaison des corrélations des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2022) des images “super-résolues ” dans la zone Sambia sud

Matrice de corrélation - Année de référence 2022						
Zone Sambia sud- Image super-résolue						
	Red	Green	Blue	NIR	SWIR1	SWIR2
<b>2019</b>	0.7145697	0.5865614	0.4576563	0.7037648	0.6013721	0.7273502
<b>2020</b>	0.7376082	0.6185187	0.6163514	0.7572089	0.6135173	0.7842414
<b>2021</b>	0.7264075	0.5691648	0.5838284	0.7465337	0.6123166	0.7821455

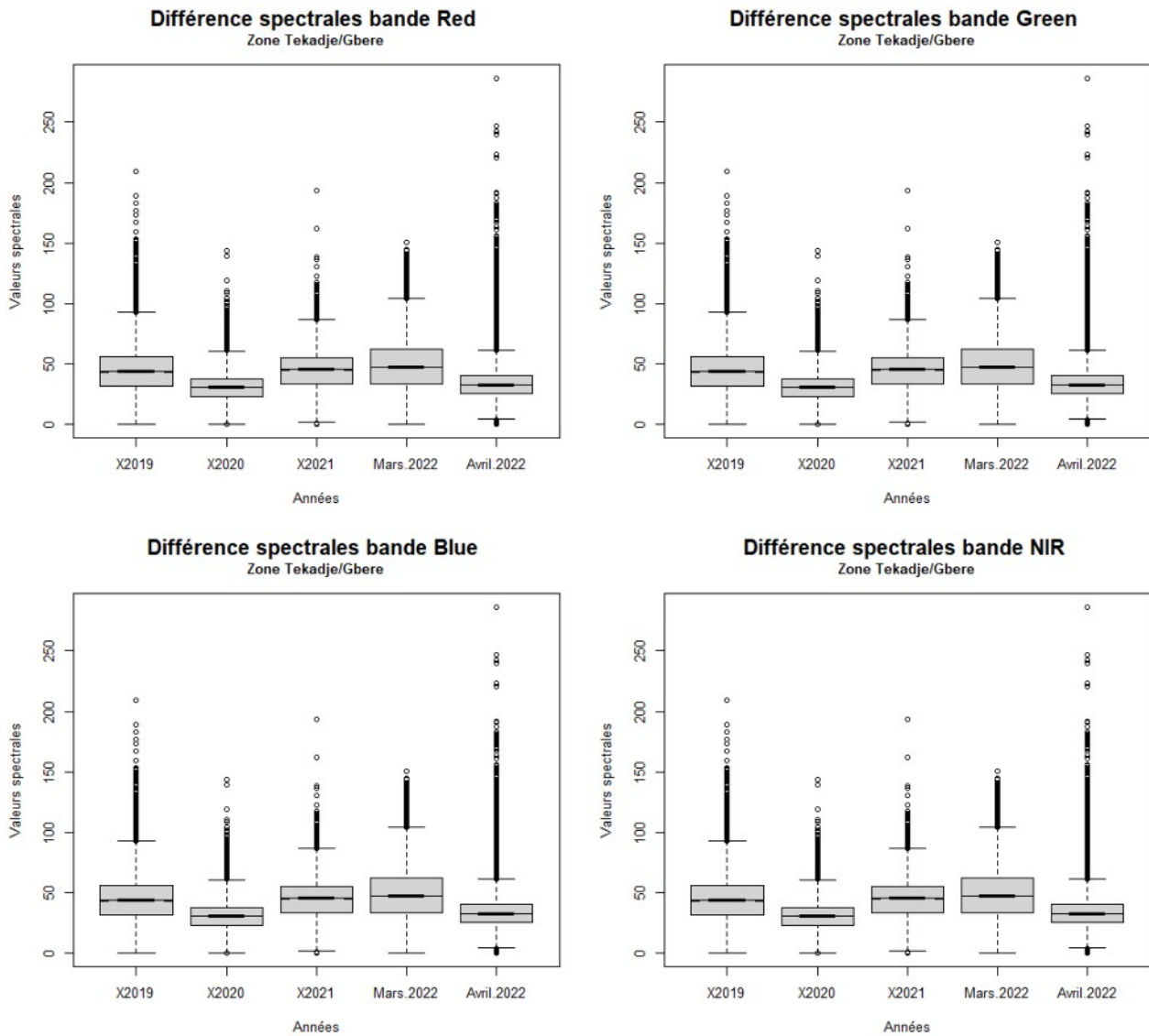


FIGURE 90 – Comparaison des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2020) des images PlanetScope dans la zone Tekadje/Gbere

TABLE 28 – Comparaison des corrélations des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2020) des images PlanetScope dans la zone Tekadje/Gbere

Matrice de corrélation - Année de référence 2020				
Zone Tekadje/Gbere - Image PlanetScope				
	Red	Green	Blue	NIR
2019	0.7490634	0.7269372	0.6211730	0.5892779
2021	0.6661897	0.6570623	0.6454960	0.5294741
2022	0.7158572	0.6729319	0.4641791	0.5797539

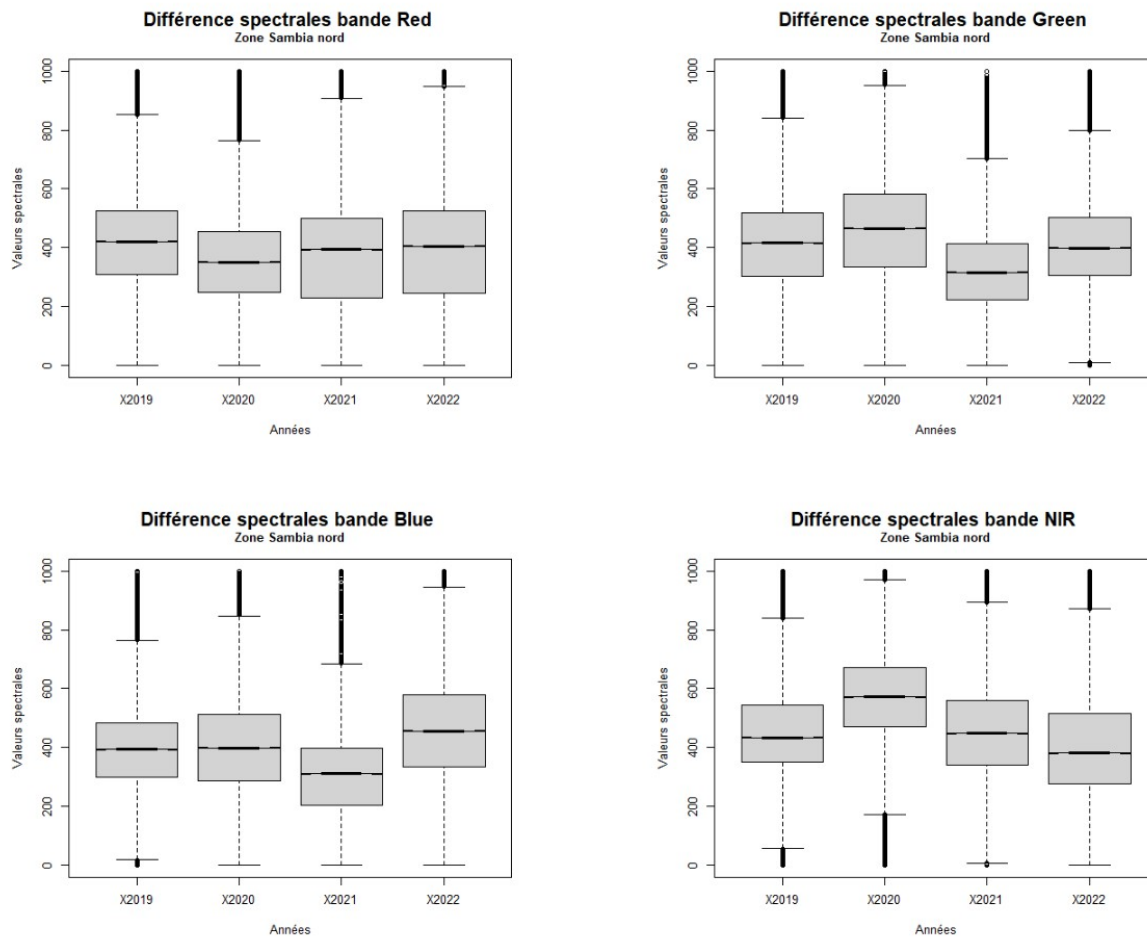


FIGURE 91 – Comparaison des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l'année de référence (2022) des images PlanetScope dans la zone Sambia nord

TABLE 29 – Comparaison des corrélations des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l'année de référence (2022) des images PlanetScope dans la zone Sambia nord

Matrice de corrélation - Année de référence 2022				
Zone Sambia nord - Image PlanetScope				
	Red	Green	Blue	NIR
2019	0.6120777	0.5560096	0.5667453	0.5639383
2020	0.6424554	0.5722055	0.6357205	0.5383590
2021	0.7856150	0.5997136	0.7421659	0.6193337

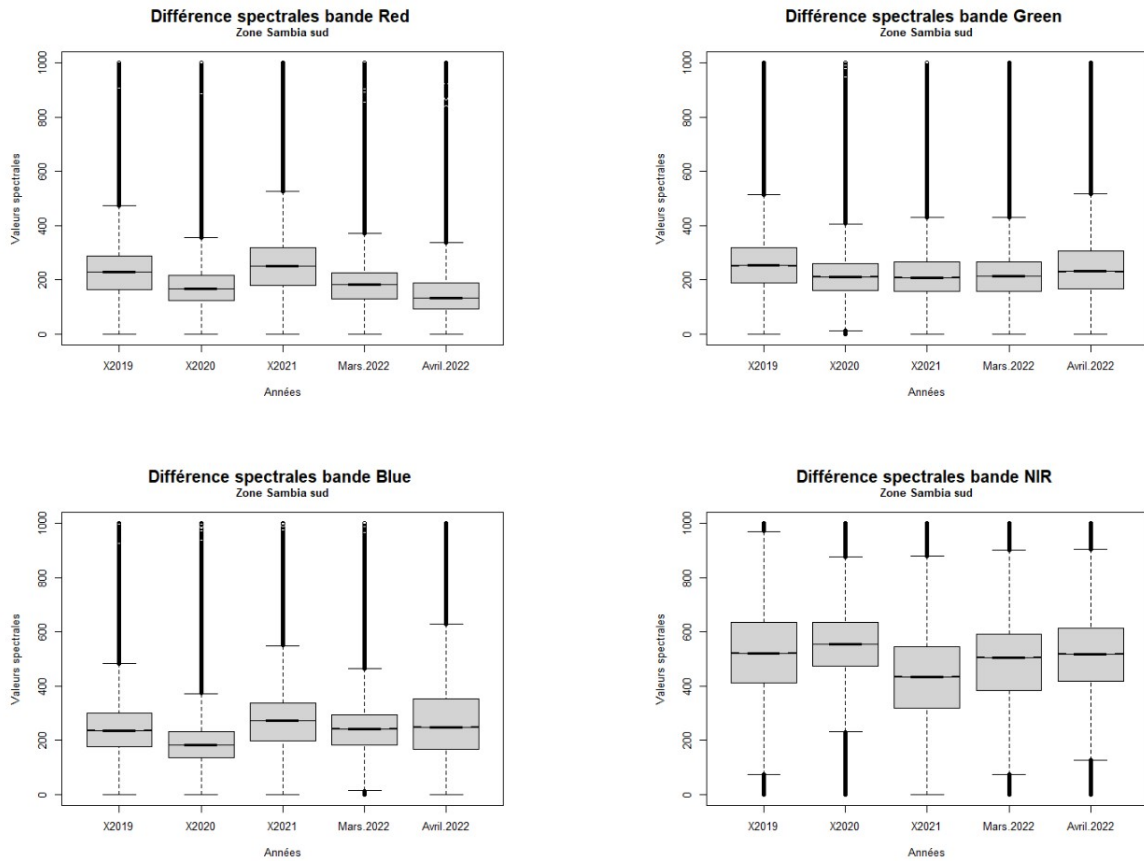


FIGURE 92 – Comparaison des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2022) des images PlanetScope dans la zone Sambia sud

TABLE 30 – Comparaison des corrélations des différentes bandes spectrales selon différentes dates avec l’année de référence (2022) des images PlanetScope dans la zone Sambia sud

Matrice de corrélation - Année de référence Mars 2022				
Zone Sambia sud- Image PlanetScope				
	Red	Green	Blue	NIR
2019	0.6207354	0.5357084	0.5217052	0.3535793
2020	0.6620817	0.6378192	0.6303622	0.2424183
2021	0.7320608	0.6703329	0.7009360	0.4852707
Avril 2022	0.7302143	0.5914290	0.4028439	0.3594678