



HAL
open science

Les apports de la télédétection pour le suivi de la végétation autour des ouvrages de restauration des terres au Sahel

Jean Lebrun

► **To cite this version:**

Jean Lebrun. Les apports de la télédétection pour le suivi de la végétation autour des ouvrages de restauration des terres au Sahel. Géographie. 2022. dumas-03792465

HAL Id: dumas-03792465

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03792465>

Submitted on 30 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Remerciements

Je tiens, en tout premier lieu, à remercier chaleureusement Pauline Dusseux qui m'a proposé ce stage et qui m'a accompagné en me fournissant de précieux conseils et des pistes à explorer afin d'améliorer mes résultats. Merci aussi d'avoir pris le temps de relire ce mémoire en lui apportant de nettes améliorations.

Un grand merci à Salek Seidi Ousseini de l'Université de Niamey et à son maître de stage le Dr. Bahari Ibrahim Mahamadou pour avoir fait tout le travail de terrain indispensable à la validation des résultats par satellite. Merci pour les relevés, les enquêtes et les photographies qui m'ont permis de mieux me représenter les ouvrages et la végétation nigérienne.

Je remercie également Jean-Martial Cohard pour l'autonomie et la confiance qu'il m'a accordées.

J'adresse aussi tous mes remerciements à Sylvain Bigot qui a relu ce mémoire et a accepté de faire partie de mon jury de soutenance.

Merci à Philipp Schoeneich de m'avoir prêté ses livres et ses documents personnels sur la désertification au Sahel et de m'avoir raconté ses aventures professionnelles au Niger à la fin des années 1980.

Pour finir, merci aussi à mes camarades de Master GEOÏDES Andréa, Arthur et Mathis qui m'ont soutenu par leur bonne humeur, y compris lors des journées caniculaires de cet été 2022.

Sommaire

Remerciements	1
Sommaire	2
1. Introduction	3
1.1. La désertification au Sahel	3
1.2. L'apport de la télédétection	3
1.3. Les causes probables du reverdissement	4
1.4. Objectifs et questionnement	5
2. Matériel et méthode	6
2.1. Contexte et situation des sites d'étude	6
2.2. Contexte climatique	6
2.3. Type de végétation	8
2.4. Données mobilisées et produites	8
2.5. Méthodologie appliquée aux images SPOT	9
2.6. Méthodologie appliquée aux images Sentinel-2	11
3. Résultats	13
3.1. Comparaison des classifications SPOT et Sentinel-2	13
3.2. Suivi du développement de la végétation de 2018 à 2021	13
3.3. Mise en perspective avec les observations terrain	18
3.4. Quantification et évolutions diachroniques du couvert végétal	20
3.4.1. Cartes d'évolution des classes de couvert végétal	20
3.4.2. Compilation des classifications du couvert végétal dans des graphiques	25
3.5. Bilan des évolutions de l'ensemble des zones de végétation (Niamey)	26
3.6. Bilan des évolutions de l'ensemble des zones de végétation (Guileyni)	29
3.7. Bilan des évolutions de l'ensemble des zones de végétation (Tahoua)	29
Conclusion, limites et perspectives	31
Bibliographie	33
Annexes	36

1. Introduction

1.1. La désertification au Sahel

De 1968 à la fin des années 1980, le Sahel d'Afrique de l'Ouest a connu une période de déficit pluviométrique exceptionnellement longue qui marque une nette rupture avec les excédents hydriques des années 1950. Les quantités de précipitations ont diminué de 15 à 25% par rapport à la moyenne long terme (Descroix 2021). Cette sécheresse a entraîné une dégradation des sols et de la végétation, y compris les espèces très résistantes au climat aride. La disparition progressive de la végétation entraîne un tassement et un encroûtement des sols, qui, en empêchant l'infiltration de l'eau, favorise le ruissellement de surface, ce qui entrave à son tour le développement de la végétation et ainsi de suite. Ce cercle vicieux définit le processus de désertification qui cause, au Sahel, la perte de plus de 17000 km² de couvert forestier par an selon la FAO (2005).

La sécheresse a bouleversé le cycle de l'eau et les mesures effectuées pendant cette période rendent compte de résultats paradoxaux comme décrit par Descroix et al. (2018) : alors que les précipitations ont diminué, les débits des cours d'eau ont augmenté. C'est le premier paradoxe sahélien qui montre à quel point les sols ne permettent plus à l'eau de s'infiltrer. Mais malgré la fin de la sécheresse, les terres dégradées ne retrouvent pas pour autant leur pouvoir d'infiltration (c'est le deuxième paradoxe sahélien). Autrement dit, la sécheresse climatique a produit une sécheresse édaphique qui s'est prolongée pendant les décennies suivantes).

Dans le même temps, la désertification au Sahel a été amplifiée par de grands changements démographiques. En 2021, sur les 20 pays qui enregistrent la plus forte croissance de population, 18 sont des Etats africains dont 8 pays sahéliens. Plus particulièrement, le Niger, correspondant au territoire étudié dans ce mémoire, enregistre en 2021 le plus haut taux de fécondité au monde (6,7 enfants par femme). Selon la Banque Mondiale, sa population a été multipliée par trois depuis 1990, passant de 8 à 25 millions d'habitants en 30 ans.

La pression anthropique qui en résulte engendre une extension des terres agricoles, de l'urbanisation et du surpâturage au détriment de la végétation naturelle. Est également observé un phénomène de déboisement pour l'utilisation du bois de chauffe ainsi qu'une pression accentuée sur la ressource en eau. Selon Descroix, le défrichement nécessaire pour soutenir cette croissance démographique a eu un impact plus important sur le bilan hydrique terrestre que l'épisode de la Grande Sécheresse.

En conséquence, les sociétés sahéliennes sont fragilisées et plongées régulièrement dans des situations d'insécurité alimentaire, dans des pays où une grande partie des habitants dépend de l'agriculture pour leur subsistance. L'actualité récente témoigne du défi qui se dresse devant ces populations : le 4 octobre 2021, l'ONU estime que près de 600 000 nigériens sont exposés à une insécurité alimentaire dans la région de Tillabéry (Niamey) et l'organisation craint une prochaine crise alimentaire d'envergure.

1.2. L'apport de la télédétection

Pourtant, les études basées sur la télédétection viennent nuancer l'ampleur de la désertification. La télédétection consiste à mesurer à distance le rayonnement réfléchi par le soleil d'une surface, afin de déterminer la nature de cette surface. Chaque satellite de télédétection a ses propres caractéristiques techniques qui conditionnent son utilisation : la durée de vie du satellite, la résolution spatiale (finesse de l'image), la résolution temporelle (le temps de retour du satellite) et les propriétés spectrales du capteur (longueurs d'onde mesurées).

Pour distinguer la végétation des autres occupations du sol, il faut s'intéresser à la signature spectrale de la surface foliaire des plantes. La végétation reflète une part importante des longueurs d'ondes du proche-infrarouge et absorbe le rouge, ce qui la différencie des autres types de surface (eau, sol, neige). Le premier satellite à mesurer ces longueurs d'onde est le Landsat-1 en 1972 avec une résolution de 80m. La combinaison et la standardisation des bandes du rouge et du proche-infrarouge se calculent à l'aide d'indices qui mettent en valeur la végétation. Par exemple, l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est créé dès 1974 (Rouse et al. 1974) et sera

largement utilisé pour quantifier l'avancée et le recul du désert sur la végétation. Depuis, la résolution spatiale des satellites s'est affinée et de nouveaux indices sont apparus ce qui réduit toujours un peu plus les biais et les approximations inhérentes aux indices et images satellites.

A l'échelle du Sahel, les premières études qui remettent en question l'avancée du désert en utilisant des outils de télédétection remontent aux années 1990. Le radiomètre avancé à très haute résolution (AVHRR) de l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA) met en évidence les fluctuations interannuelles de la limite sud du Sahara de 1980 à 1997. Les limites changent mais il n'y a ni tendance à l'augmentation, ni à la baisse de la superficie du désert (Tucker et Nicholson 1999). Dans les années 2000, d'autres études vont plus loin et affirment que le Sahel n'est pas dans un état de désertification mais qu'au contraire, il reverdit.

La tendance au reverdissement à l'échelle du Sahel est confirmée par une étude portant sur des données satellites et des relevés de terrain sur trois décennies (1981-2011) avec une forte significativité (Dardel et al. 2014). Certaines zones sont toutefois caractérisées par des tendances négatives notamment à l'Ouest du Niger. D'un point de vue phénologique, l'augmentation du signal NDVI serait dû principalement à l'extension du couvert herbacée. L'évolution des ligneux est plus difficile à mesurer car ce type de végétation est plus isolé (environ 5% seulement de la totalité du couvert végétal au Sahel), ce qui le rend plus sensible aux biais liés à la résolution spatiale des capteurs satellitaires. Certaines études mesurent une régénération du couvert ligneux depuis la sécheresse (Gardelle et al. 2010, Descroix 2018), d'autres une diminution (Tarchiani et al. 2008, Gonzalez et al. 2012).

1.3. Les causes probables du reverdissement

Les cumuls annuels de précipitations qui tendent à nouveau vers la normale de la période 1900-2015 sont le principal facteur qui explique ce retour de la végétation. A noter que l'intensité des pluies est plus forte qu'avant (Descroix et al. 2018).

Par ailleurs, les agriculteurs nigériens ont développé des stratégies d'adaptation à leur milieu qui ont prouvé leur efficacité. Le couvert arboré se densifie et s'étend grâce à l'émergence d'agro-systèmes qui favorisent les variétés d'arbres sélectionnées pour leur résistance à la sécheresse, leur rôle dans la restauration de l'écosystème et leur utilité pour les populations locales (Hänke et al. 2016). Cependant, certaines zones sont plus difficiles à restaurer que d'autres, notamment les plateaux latéritiques cuirassés fréquents au Sahel car leurs sols sont pauvres et peu perméables (Ambouta et al. 1996). Deux types d'ouvrages y sont alors construits en priorité : les banquettes et les demi-lunes auxquelles nous allons particulièrement nous intéresser dans cette étude.

Les banquettes sont des ouvrages anti-érosifs d'une soixantaine de mètres de long construits en quinconce en suivant les courbes de niveau. Elles sont constituées d'une tranchée de deux mètres de large et profonde de 20 à 40cm. Aux extrémités, deux bras d'une dizaine de mètres complètent l'ouvrage (Laminou Manzo et al. 2022). L'objectif est d'intercepter les eaux de ruissellement pour limiter l'érosion, retenir l'eau pour augmenter l'infiltration et améliorer la qualité des sols et tendre vers un redéveloppement de la végétation. De cette manière, les terres dégradées peuvent être récupérées, ce qui permet de planter dans des zones désertifiées.

Les premiers essais de banquettes semblent commencer en 1925 en Afrique du Nord, mais c'est surtout à partir de 1950 que de grandes surfaces sont restaurées avec un bilan mitigé. Certaines études attestent d'une amélioration du rendement et une baisse significative de l'érosion (Delwaille 1973), tandis que d'autres signalent que les banquettes produisent l'exact inverse de l'effet recherché, une baisse de la production et une augmentation de l'érosion (Heusch 1986). Plus récemment, l'efficacité des banquettes sur la restauration du couvert végétal a été démontrée sur le plateau de Sini Bangou au Niger (Laminou Manzo et al. 2022). Dans le même temps, l'intensité des processus d'érosion lors de la dernière décennie dans certains bassins versants justifie la construction d'ouvrages anti-érosifs (Ibrahim et al. 2020).

Les demi-lunes sont des tranchées de moins de 5 mètres qui recueillent l'eau grâce à leur disposition en quinconce dans le sens de la pente et avec l'aide d'un bourrelet en forme de croissant parfois recouvert de pierres. Un gradin est construit au centre pour accueillir le plant et éviter son

asphyxie lorsque la tranchée est remplie d'eau. Les demi-lunes sont distantes les unes des autres d'environ 3 mètres et en principe, la quasi-totalité des eaux qui ruissellent sur le versant sont retenues dans les tranchées.

Les banquettes et les demi-lunes ne sont pas des ouvrages avec une construction, une forme et une utilisation parfaitement identiques d'une région à l'autre, ce sont des modes de production qui changent et s'améliorent selon le matériel à disposition et la perception des agriculteurs. Par exemple, l'utilisation d'un tracteur permet d'aménager des demi-lunes plus profondes, plus rapidement et avec moins de main d'oeuvre (FAO 2022). L'hybridation entre différentes techniques est courante. Par exemple, les demi-lunes multifonctionnelles combinent la technique conventionnelle des demi-lunes avec la technique du zaï (creusement de trous pour capter les eaux de ruissellement dans lesquels sont enfouis des matières organiques) et permet d'obtenir un rendement de 3 à 4 fois supérieur aux demi-lunes conventionnelles. (Nassirou Ado et al. 2021).

Aujourd'hui, les initiatives dont l'objectif est de restaurer les terres dégradées sont rassemblées au sein du programme de la Grande Muraille Verte. Mis en place par les états africains en 2007, il prévoit de relier le Sénégal à l'Ethiopie par une barrière forestière de 15 kilomètres de large qui vise à bloquer, voire inverser le processus de désertification. Au Niger, c'est le tiers du pays qui est concerné par le programme, soit 47 millions d'hectares. Les objectifs intermédiaires que sont l'amélioration de la gestion forestière, la conservation et la valorisation de la biodiversité, la restauration des terres dégradées et la diversification des systèmes de production convergent vers l'objectif principal : assurer la sécurité alimentaire des nigériens (République du Niger 2011). Dans ce sens, les Organisations de la Société Civile (OSC) implantent des ouvrages dans de multiples lieux, cependant, il n'y a pas ou peu d'information sur leur localisation et leur organisation. Ainsi, il est encore difficile d'évaluer leur efficacité sur le développement de la végétation.

Le suivi et l'évaluation à distance de la végétation grâce aux images satellites dans les lieux d'implantation des ouvrages peut être pertinente pour comparer et mesurer l'efficacité des techniques employées. D'autre part, si la végétation s'implante durablement sur ces terres dégradées, les phénomènes de ruissellement, d'infiltration, d'évapotranspiration et d'érosion ne seront plus les mêmes et le cycle de l'eau sera bouleversé. Le nombre d'ouvrages construits s'accroît comme le besoin de mesurer leurs impacts sur l'écosystème.

1.4. Objectifs et questionnement

Dans ce mémoire, nous cherchons à savoir si les outils de télédétection permettent le suivi et l'identification de la végétation qui se développe autour des ouvrages de restauration des terres comme les banquettes et les demi-lunes. A l'aide d'images à haute résolution spatiale (SPOT 6/7 et Sentinel-2), nous devons fournir le meilleur suivi possible de la végétation en explorant les outils de la géomatique.

L'objectif principal est de fournir une méthodologie permettant de discerner et de suivre les types de végétation recouvrant les ouvrages. Dans un second temps, nous appliquons cette méthodologie dans trois zones du Niger qui se distinguent par le type, l'ancienneté et l'usage de leurs ouvrages : la première à proximité de Niamey, une seconde au nord de Guileyni et une troisième à l'est de Tahoua.

Ce stage a été réalisé dans deux laboratoires partenaires, l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) et le laboratoire de sciences sociales PACTE (**Annexe 1**) en collaboration avec l'Université de Niamey et Salek Seidi Ousseini, stagiaire en charge de réaliser des enquêtes de terrain pour enrichir et confirmer les résultats obtenus par télédétection.

Dans un premier temps, nous décrivons les sites étudiés, les outils et données mobilisées, la méthodologie élaborée lors de ce stage, puis nous présentons les résultats obtenus en les analysant.

2. Matériel et méthode

2.1. Contexte et situation des sites d'étude

Les sites étudiés ont été choisis car ils présentent une multitude d'ouvrages dans des lieux où les images satellites sont disponibles (**Fig. 1**) et sont incluses dans la bande d'emprise du projet de la Grande Muraille Verte. Les trois sites retenus sont décomposés en zones qui détournent précisément les groupes d'ouvrages et qui distinguent les banquettes des demi-lunes. Un identifiant est attribué à chacune des zones.

Le premier site se trouve à quelques kilomètres au sud-ouest de la capitale et plus grande ville du Niger, Niamey. Il est composé de 25 zones de banquettes et demi-lunes majoritairement implantées sur des plateaux gréseux à proximité des villages de Ganguel, Dyongaré et Bibia. Limité par le fleuve Niger au nord-est, ce site est bordé par une formation naturelle de brousse tigrée au sud-ouest. L'altitude moyenne des zones de Niamey est de 265m avec très peu de variations et de pente (point le plus haut : 283m, point le plus bas : 244m).

A une soixantaine de kilomètres à l'est de Niamey et à trois kilomètres au nord de Guileyni se trouve le deuxième site. Celui-ci est composé de six zones dont quatre recouvertes de demi-lunes et deux de banquettes. L'altitude est la même que celle du site de Niamey. Ces deux premiers sites ont l'avantage d'avoir pu être enquêtés lors de sorties de terrain par notre correspondant de l'Université de Niamey.

En revanche, la localisation du troisième site (**Annexe 2**) n'aura pas permis la récolte de données de terrain car sa localisation impliquait des déplacements trop éloignés de Niamey. Il se situe à l'est de Tahoua et est délimité par les contours du bassin versant d'un oued dont l'exutoire est à Lilingo. La superficie de cette zone et le nombre d'ouvrages sont nettement supérieurs aux autres : 150 zones avec présence d'ouvrages délimités sur 2234km² avec une altitude moyenne de 483 mètres pour un point culminant à 614 mètres et un point bas à 388 mètres.

2.2. Contexte climatique

De part leur proximité et leur latitude similaire, nous admettons ici que le climat des sites de Niamey et Guileyni sont semblables. Selon la typologie simplifiée des climats tropicaux (Demangeot 1976), nous sommes en climat tropical sec avec des cumuls annuels de précipitations toujours inférieurs à 1000mm (631mm par an en moyenne pour la période 1991-2020) et une saison sèche cumulée de 7 à 8 mois. La saison des pluies s'étend de la fin du mois de juin à fin du mois de septembre avec des précipitations concentrées en juillet-août (**Fig. 2**). Les températures sont en moyenne de 30°C avec une faible amplitude saisonnière : 35°C en mai contre 25°C en janvier (moyenne 1991-2020). En revanche, l'amplitude thermique journalière peut être forte (il arrive que les températures dépassent les 40°C le jour et soient inférieures à 20°C la nuit).

Plus au nord, le site de Tahoua se situe à la limite entre le climat steppique (BSh) qui caractérise la région de Niamey et le climat désertique (BWh) (Köppen 1900).

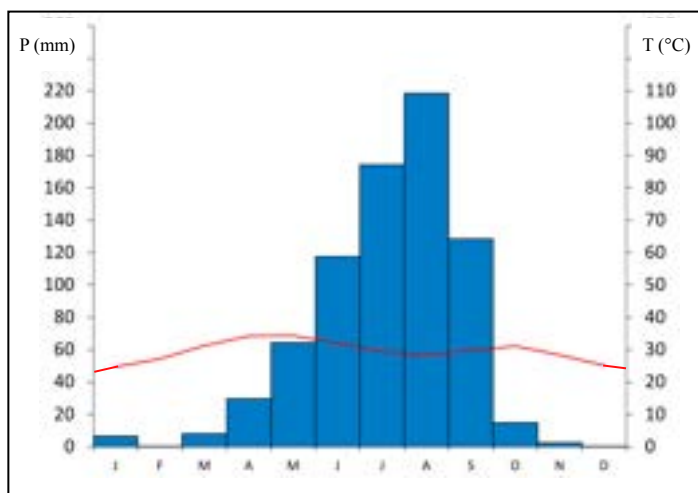
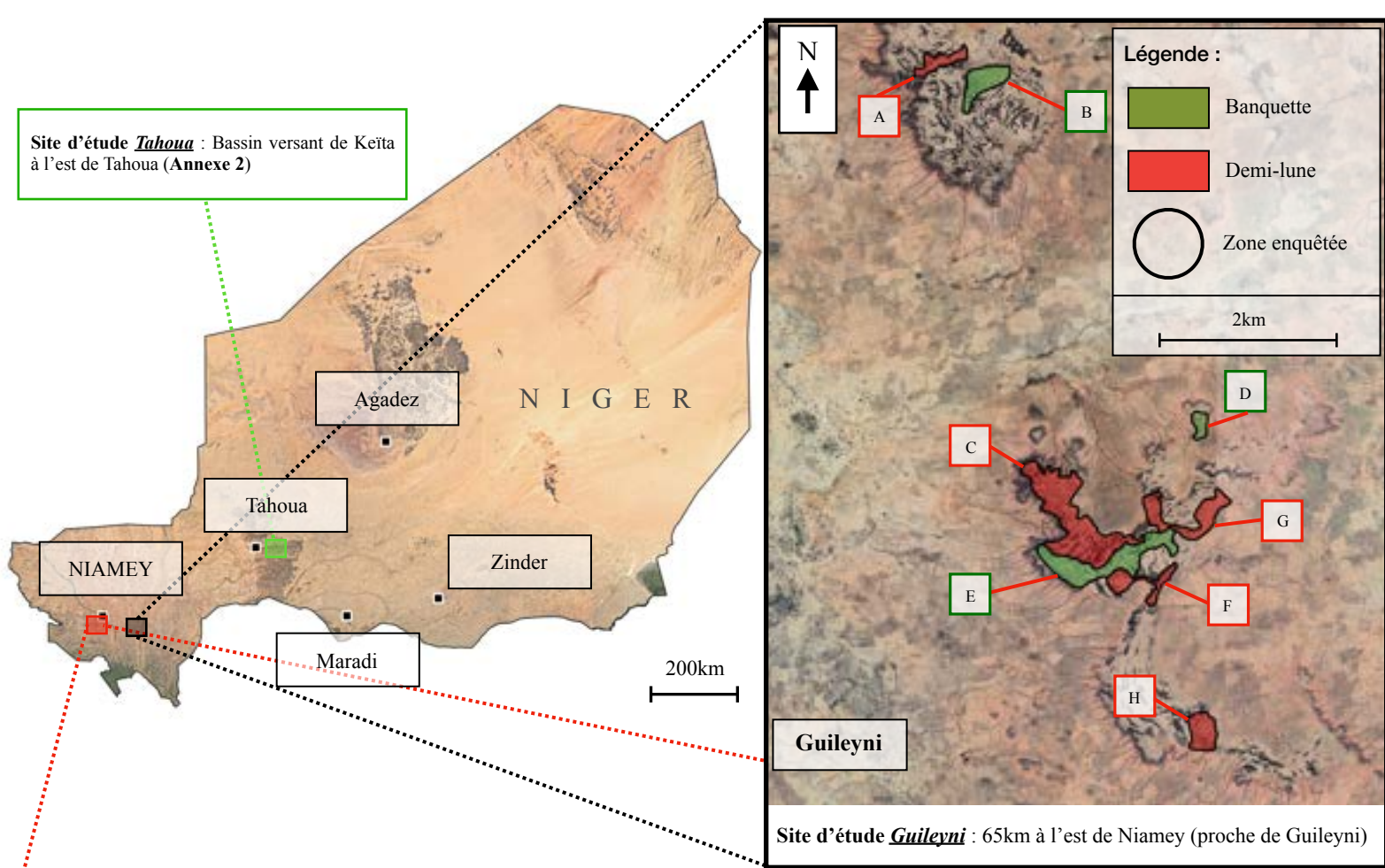


Fig. 2. Précipitations et températures mensuelles moyennes (période 1971-2000) à Niamey (Niger).
Source : *infoclimat.fr* (2022).



Site d'étude *Niamey* : sud-ouest de Niamey

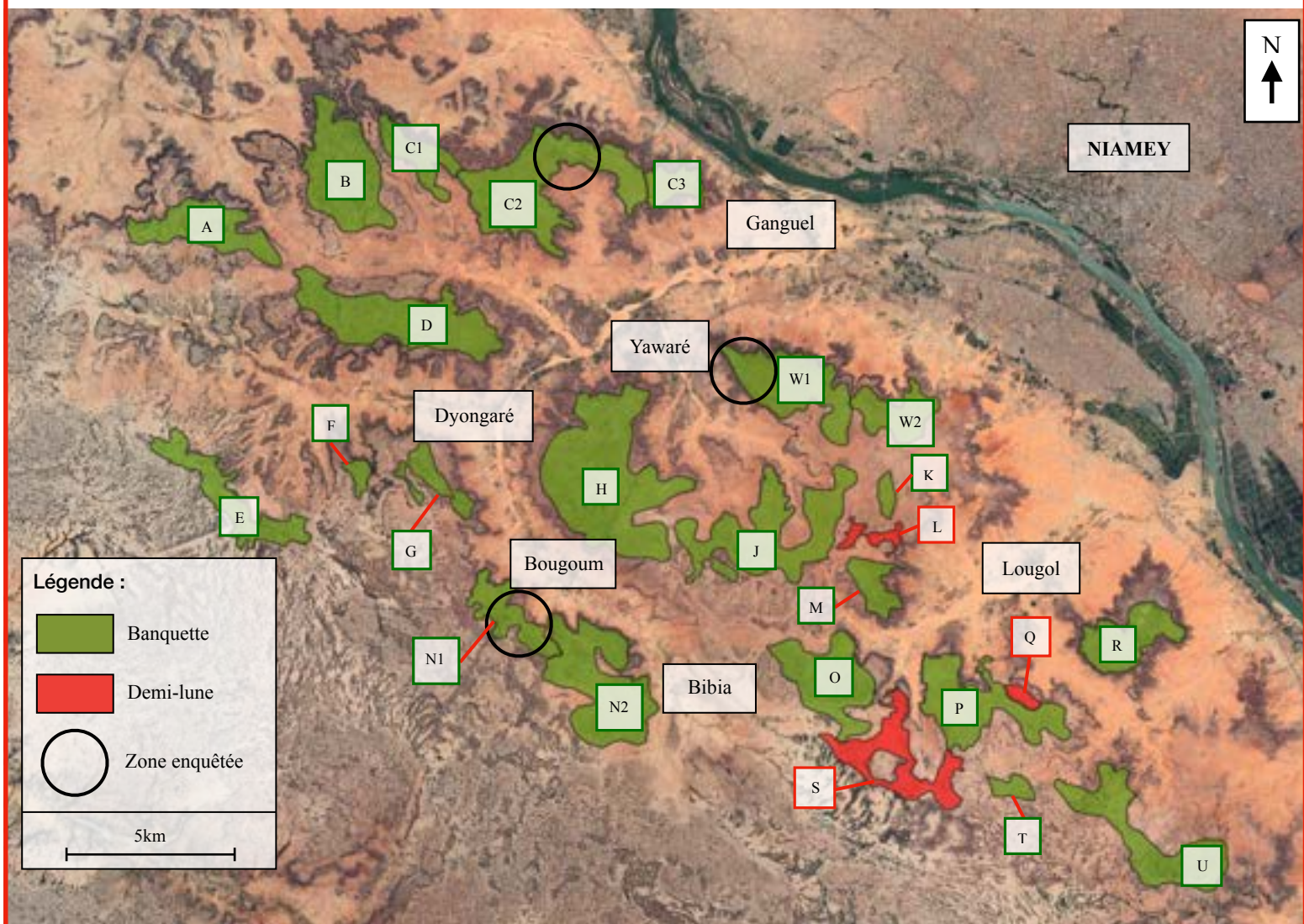


Fig. 1. Localisation des sites d'étude *Niamey* et *Guileyni* au Niger et situation des zones d'ouvrages étudiées.

2.3. Type de végétation

Les conditions climatiques particulières conduisent à la prédominance d'une formation végétale naturelle, la brousse tigrée. Sur les plateaux cuirassés à faible pente, la végétation a tendance à se contracter en alternant des bandes végétales plus ou moins denses avec des bandes de sol nu de manière régulière et resserrée sur d'importantes surfaces, comme nous pouvons le constater à l'ouest de la **Fig. 2**. La brousse tigrée ne résulte pas de variations géologiques ou pédologiques particulières mais résulte de mécanismes hydrologiques et biologiques. Son fonctionnement est basé sur le ruissellement des eaux de pluies des bandes nues vers les bandes végétales. La quantité d'eau annuelle qui ruisselle dans ce sens est estimée à 50% (Galle et al. 1997). L'infiltration est plus profonde sous les bandes boisées avec un front d'humectation de 560cm contre 40cm dans un sol nu (Ambouta 2004). La croissance des plantes et la production forestière dans les zones de brousse tigrée sont supérieures aux zones moins structurées et doit donc être favorisée lorsque les conditions le permettent (Herbès et al. 1997). Au Niger, la brousse s'implante sur un sol peu épais sablo-limoneux en surface et argileux plus en profondeur. Quatre espèces principales composent naturellement les bandes boisées, deux espèces ligneuses (*Combretum micranthum* et *Guiera senegalensis*) et deux espèces herbacées (*Microchloa indica* et *Cyanotis lanata*). Les espèces ligneuses sont menacées par la coupe du bois de feu et comme les espèces herbacées, elles subissent une pression anthropique importante (extension des zones de culture, surpâturage) (Ambouta 2004).

Dans notre étude, nous avons remarqué grâce aux images satellites d'archives que sur de nombreuses zones du site de Niamey, la brousse tigrée était encore en excellent état au début des années 2000 puis a en grande partie été détruite dans les années suivantes pour finalement laisser la place à des ouvrages anti-érosifs (**Annexe 3**). Concernant le site de Guileyni, la brousse tigrée a subi moins de dommages et des ouvrages ont été construits dans les alternance de bandes végétales (**Annexe 4**).

2.4. Données mobilisées et produites

Les caractéristiques techniques des capteurs et les outils utilisés sont décrits en **Annexe 5**.

Deux images SPOT acquises par la plateforme Geosud-Dinamis (<https://dinamis.data-terra.org/>) ont été utilisées dans cette étude. La première est une image SPOT-6 acquise le 7 juillet 2016 qui recouvre le site d'étude 1. Même si la végétation n'est pas encore tout à fait développée à cette période, elle apparaît nettement lors de la réalisation de compositions fausse-couleur. La seconde est une image SPOT-7 du 18 octobre 2020 qui couvre une portion du bassin versant de Keïta à l'est de Tahoua à la fin de la saison des pluies.

Les données Sentinel ont été acquises sur le site theia.cnes.fr en prenant le même satellite (Sentinel 2) ainsi que le même niveau de correction (level-2A) pour toutes les images collectées. L'objectif est d'avoir des images équivalentes à des dates différentes pour appliquer une classification et pour pouvoir les comparer. Le niveau de correction choisi est le niveau 2A (BOA), c'est-à-dire que les images ont une correction atmosphérique et un masque de nuages appliqués aux images de niveau 1C (TOA). Les dates ont été choisies afin d'obtenir une image par mois, de janvier 2018 à décembre 2021. Au total, sur les 48 dates nécessaires, seulement deux étaient manquantes pour la tuile de Niamey et une seule pour la tuile de Guileyni. Lorsque les images sont inexploitable, nous calculons l'interpolation linéaire avec le mois précédent et le suivant.

Dans un premier temps, nous avons choisi de quantifier la végétation avec les images à la plus fine résolution spatiale SPOT pour valider dans un deuxième temps la classification des images Sentinel. Nous cherchons à identifier les données les plus pertinentes et à comparer la capacité d'images satellites acquises à des résolutions spatiales différentes à suivre la dynamique de la végétation. Nous souhaitons aussi évaluer la fréquence d'acquisition temporelle pour distinguer différents types de végétation. Est-ce que Sentinel-2 suffit pour identifier la végétation ou alors faut-il absolument de la très haute résolution spatiale comme SPOT ? Est-ce que les différences de résolution temporelle apportent une information intéressante (acquisition mensuelle intra-annuelle avec Sentinel par rapport à une à trois acquisitions par an certaines années avec SPOT) ?

2.5. Méthodologie appliquée aux images SPOT

La méthodologie développée pour le traitement des images SPOT (**Fig. 3.**) est composée d'étapes indispensables et d'étapes optionnelles (en pointillés) car elles sont longues et n'apportent pas beaucoup de précision.

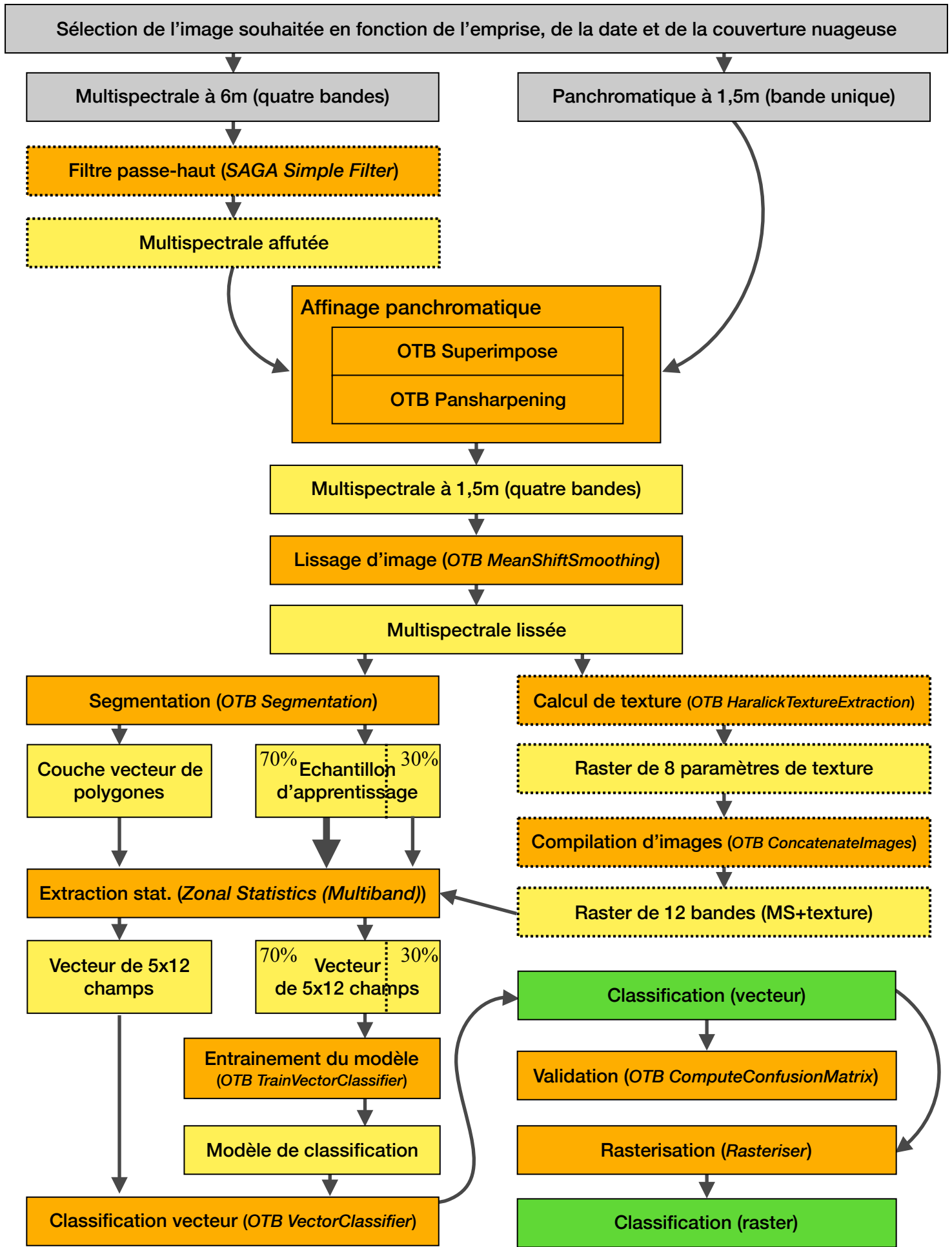
Les images SPOT ont été traitées de manière à mettre la végétation des banquettes et demi-lunes en valeur. La distinction entre le sol nu et le couvert végétal est la principale difficulté de classification des images satellites en zone aride. Pour y parvenir, nous commençons par exacerber les ruptures de pixels avec un filtre passe-haut sur les quatre bandes multispectrales. Ensuite, nous nous servons de l'image panchromatique à 1,5m pour affiner la résolutions des bandes multispectrales de 6 à 1,5m (méthode du pansharpening) (**Annexe 6**). Plusieurs algorithmes ont été explorés pour finalement choisir la méthode bayésienne qui apparaît visuellement comme la plus précise (**Annexe 7**). La comparaison est effectuée sur une composition fausse couleur qui met en évidence la végétation en rouge.

En télédétection, il existe deux types de classification pour discerner les différentes occupation du sol : la classification-pixel et la classification-objet. La première est une analyse spectrale de la signature de chaque pixel de l'image choisie. Les structures spatiales de l'image ne sont pas prises en compte ce qui les rend moins adaptées aux hautes résolutions spatiales. La seconde fonctionne de la même manière mais une étape de segmentation est ajoutée en amont pour former des grappes de pixels homogènes ayant une signature spectrale similaire. Nous choisissons d'appliquer cette dernière à notre image SPOT.

La segmentation implique de choisir les caractéristiques les plus pertinentes pour faire ressortir les banquettes de notre image (rayon de recherche, taille minimale et maximale de nos grappes de pixels homogènes). Après la segmentation, nous obtenons une image vecteur composée de polygones à classer selon leurs valeurs dans les bandes multispectrales. Les deux opérations choisies pour extraire les statistiques des bandes sont la moyenne et l'écart-type. Nous avons tenté d'ajouter à nos quatre bandes des indices ainsi que des paramètres de texture Haralick (Haralick et al. 1973) dans le but d'apporter des précisions supplémentaires à l'image (Ota et al. 2011). Les indices calculés ne nous ont pas permis d'améliorer notre classification. Les paramètres de texture Haralick comme le contraste, l'énergie, ou l'entropie calculés à partir de la bande du proche infrarouge ne procurent pas de précision qui justifient leur utilisation sur de vastes zones (les temps de traitements sont bien plus longs surtout si l'ensemble des douze paramètres sont inclus dans la segmentation).

Nous créons des régions d'intérêt (ROI) qui correspondent à nos trois classes d'occupation du sol (sol clair/sol foncé/végétation). Un échantillon d'apprentissage de 177 zones est créé puis divisé en deux groupes. Le premier, qui représente 70% des zones sert d'apprentissage à l'algorithme tandis que le second (30%) est utilisé pour valider notre classification. C'est lors de cette étape que nous choisissons l'algorithme qui va être chargé de classer les polygones de l'image. L'ensemble des algorithmes proposés par l'outil OTB TrainVectorClassifier ont été essayés et nous avons finalement choisi l'algorithme ANN (Artificial Neural Network) qui nous a donné les meilleurs résultats de classification. Outre l'aspect visuel de cette classification et sa mise en perspective avec la composition fausse-couleur, la validation nécessite le calcul d'une matrice de confusion avec les 30% de polygones de l'échantillon d'apprentissage. Pour évaluer la justesse du résultat, nous calculons l'indice Kappa et nous obtenons 0.89, ce qui indique une classification d'une très bonne précision (Monserud et al. 1992).

Enfin, nous convertissons la couche vecteur obtenue en raster, puis nous calculons le pourcentage de superficie totale que recouvre la végétation (**Annexe 11**). Ce résultat va nous servir de base pour élaborer la classification des images Sentinel-2 dans laquelle nous essayons de nous rapprocher le plus possible du résultat SPOT avec une résolution spatiale qui passe de 1,5 à 10m.



Légende :

- Etape optionnelle
- Traitement SIG
- Résultat final
- Donnée brute
- Résultat intermédiaire

Fig. 3. Vue d'ensemble de la méthodologie mise en œuvre pour la classification-objet des données Spot.

2.6. Méthodologie appliquée aux images Sentinel-2

La méthodologie développée pour le traitement des images Sentinel-2 aboutit à l'ensemble de nos résultats détaillés en partie 3 (**Fig. 4.**).

Avec le satellite Sentinel-2, nous disposons d'une meilleure résolution temporelle mais d'une moins bonne résolution spatiale. Nous passons de bandes à 1,5 et 6m avec SPOT à 10 ou 20m avec Sentinel-2. La dégradation de la résolution nous oriente vers une classification pixel.

Nous avons essayé de multiples algorithmes de classification supervisée et non supervisée sur l'ensemble des 10 bandes de l'image. Notre hypothèse de départ envisageait de prendre toutes les bandes pour être le plus précis possible, chaque bande apportant une information différente. Mais les essais avec toutes les bandes n'étaient pas satisfaisants, même lorsque les images de texture Haralick étaient ajoutées (Chairet et al. 2019). Nous avons donc fait le choix de calculer des indices de végétation NDVI (Rouse et al. 2014) et TSAVI (Baret et al. 1989) avec les bandes du rouge et du proche-infrarouge ainsi que l'indice IRECI (Frampton et al. 2013) avec les bandes du moyen-infrarouge (**Table 1.**). Finalement, les indices IRECI n'apportent pas plus d'informations que les deux autres indices et ont plutôt tendance à diminuer la précision du tracé de la végétation à proximité des banquettes.

Indice	Formule
NDVI	$(\text{PIR}-\text{Red})/(\text{PIR}+\text{Red})$
TSAVI	$(b * (\text{NIR} - b * \text{Red} - a)) / (a * \text{NIR} + \text{Red} - a * b + 0.08 * (1 + b^2))$
IRECI (abandonné)	$(\text{NIR} - \text{R})/(\text{RedEdge1}/\text{RedEdge2})$

Table 1. Formules des indices utilisés pour la classification Sentinel-2.

L'indice NDVI utilise le rapport normalisé entre les bandes du proche infrarouge et du rouge. Le calcul est le même pour toutes les dates des images Sentinel-2. En revanche, l'indice TSAVI qui a pour objectif d'améliorer les indices de végétation en limitant l'influence de la lumière réfléchiée par le sol varie d'un mois à l'autre. Il nécessite le calcul de deux variables, la pente de la ligne de sol (a) et l'intersection de la ligne de sol (b). Pour calculer ces variables, nous analysons la droite de régression linéaire d'un échantillon de sol sur un graphique qui établit le rapport entre les bandes du proche-infrarouge et du rouge (**Annexe 8**). Les variables retenues sont indiquées pour chaque mois et sont restées les mêmes d'une année à l'autre (**Annexe 9A**).

Une fois les indices obtenus, nous choisissons de les classer à l'aide d'un seuillage multibande (car réalisé sur plusieurs indices) (**Annexe 9B**). Nous aurions pu choisir de réaliser des classifications supervisées avec différents algorithmes, mais il aurait fallu définir pour chaque date un nouvel échantillon d'apprentissage. L'avantage du seuillage est que la formule, une fois fixée, s'applique uniformément à l'ensemble des bandes et facilite les comparaisons (**Annexe 10**).

Lors de la réalisation du seuillage, le choix des classes est une étape décisive car celles-ci doivent refléter la réalité pour tous les mois et pour l'ensemble de nos zones. Pour définir les bornes, une astuce consiste à jouer avec la symbologie des couches rasters des indices NDVI et TSAVI avec une image à plus haute résolution spatiale en arrière plan en saison des pluies (notre classification SPOT ou un fond de carte de type GoogleSatellite). Lorsque les indices des mois pluvieux sont parfaitement calibrés et coïncident avec le fond de carte, les bornes sont utilisées sur des mois très secs. La difficulté est de trouver le juste milieu pour bien afficher la végétation résiduelle en période sèche, sans exacerber l'étendue du couvert végétal en période humide.

La première classe créée distingue les zones de végétation des zones sans végétation à l'aide de l'indice NDVI. Puis, nous poursuivons notre classification en distinguant la *végétation à proximité des ouvrages* de la végétation de *brousse tigrée*. Cette dernière se distingue par sa plus forte densité de végétation et son empreinte qui dure après la saison des pluies. L'indice TSAVI est particulièrement adapté pour la capturer tandis que l'indice NDVI nous sert plutôt à appréhender la végétation moins dense et plus éphémère. Entre les deux, nous choisissons de créer une classe intermédiaire, moins dense que la brousse tigrée mais plus que la végétation à proximité des ouvrages. Nous la nommons *brousse tigrée en formation*.

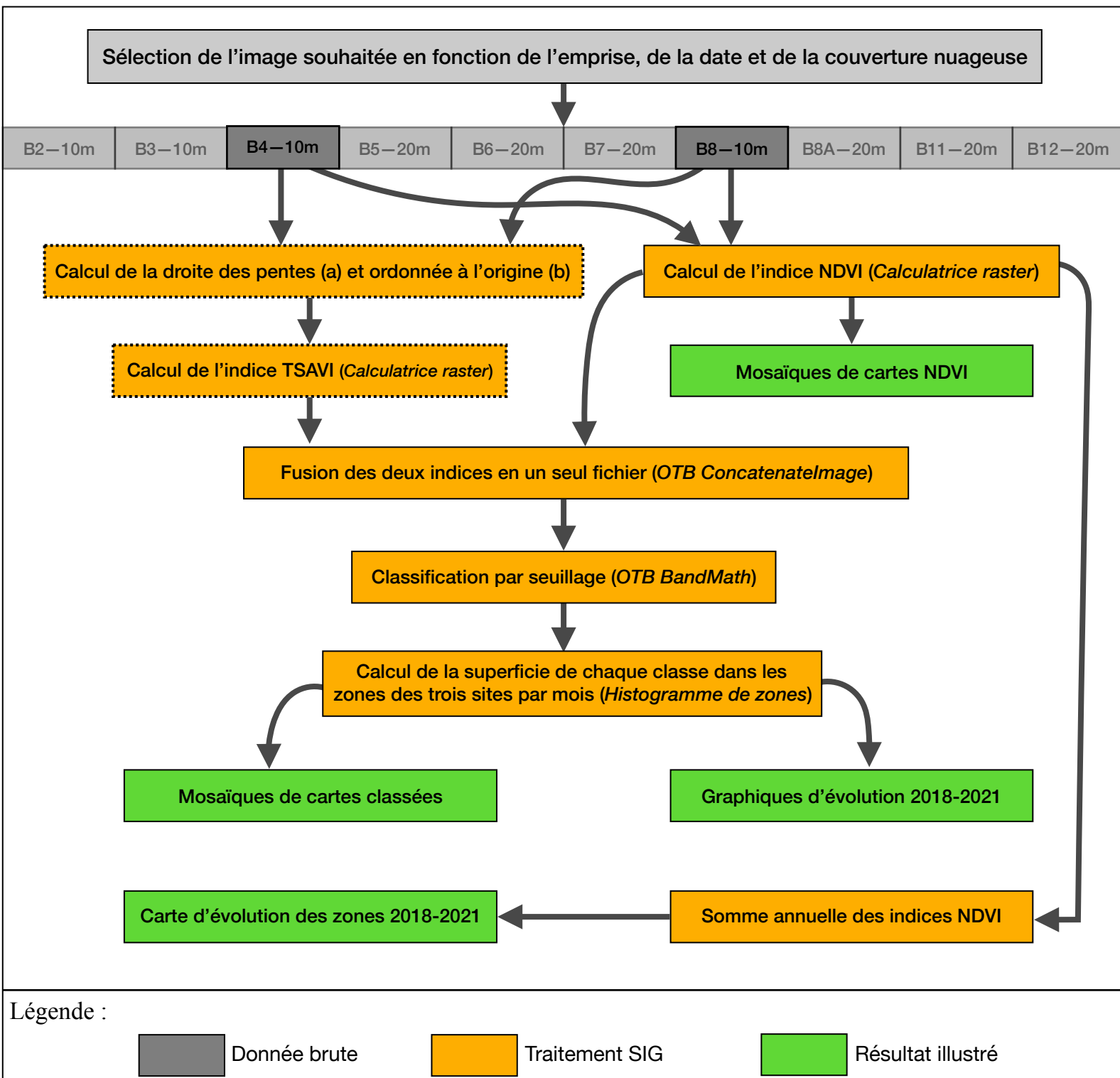


Fig. 4. Vue d'ensemble de la méthodologie mise en œuvre pour la classification-pixel des données Sentinel-2.

3. Résultats

3.1. Comparaison des classifications SPOT et Sentinel-2

Une fois les classifications effectuées, nous avons comparé le résultat issu de l'image SPOT6 à celui de l'image Sentinel-2 (**Annexe 11**). Le calcul a été effectué sur la zone B (site de Niamey) avec des images de juillet 2016 (SPOT-6) et des images de juillet 2018 (Sentinel-2). Comme nous pouvons le constater, les pourcentages de superficie de végétation entre les deux satellites sont comparables (27,8% pour SPOT contre 29,6% pour Sentinel). Visuellement, les classifications correspondent relativement bien à l'échelle de la zone. En revanche, lorsque nous augmentons l'échelle, nous remarquons que le tracé des banquettes est plus précis sur la classification SPOT et coïncide mieux avec les images à très haute résolution spatiale (Google Earth).

Néanmoins, l'importante durée des traitements, la disponibilité limitée des images SPOT et le résultat comparable obtenu entre les deux classifications nous conduit à utiliser les images Sentinel-2 dont les avantages (meilleure résolution temporelle, disponibilité sur nos trois sites et résultat satisfaisant de la classification) sont supérieurs aux inconvénients (résolution spatiale inférieure et moins bonne prise en compte des contours des ouvrages). C'est pourquoi les résultats qui vont suivre ont tous été réalisés à partir des images Sentinel-2.

3.2. Suivi du développement de la végétation de 2018 à 2021

Le calcul de l'indice NDVI (résultat intermédiaire) est illustré pour les zones C2 (**Fig. 5.**), W1 (**Fig. 6.**) et N1 (**Fig. 7.**) du site de Niamey et C du site de Guileyni (**Fig. 8.**) de janvier à décembre 2021. La sélection des zones à illustrer a été définie en fonction des lieux où notre correspondant nigérien a réalisé ses enquêtes de terrain. Ces zones se trouvent à proximité de villages : la zone C est proche du village de Ganguel, la zone W1 est proche de Yawaré et le site N1 de Bougoum (**Fig. 2.**). Cette précision est importante car une grande partie de la population de ces villages pratiquent l'agropastoralisme comme activité principale et leur proximité avec les ouvrages peut avoir une influence sur leur état. Les zones C2 et N1 sont recouvertes de banquettes. La zone W1 combine des banquettes et des demi-lunes récentes. Comme il n'y a pas de zone assez vaste exclusivement recouverte de demi-lunes sur le site de Niamey, nous avons aussi illustré la zone C du site de Guileyni.

Chaque page de mosaïque de cartes présente le déploiement de la végétation à une date par mois. L'intérêt de ces illustrations est de prouver la pertinence de l'indice NDVI pour le suivi de la végétation et de rendre compte de l'évolution de l'intensité du signal au long de l'année. Les cumuls mensuels de précipitations apportent une précision supplémentaire.

Sans surprise, la végétation est d'autant plus développée que les précipitations sont importantes, c'est-à-dire qu'elle atteint son stade de développement maximal en août-septembre en pleine saison des pluies, puis décroît constamment jusqu'en mai-juin de l'année suivante. A cette date, la surface foliaire est très restreinte, puis elle se développe à nouveau avec l'arrivée des pluies. Ce qui est intéressant de noter, c'est la diversité spatiale de l'indice de végétation, y compris lorsque celle-ci est à son développement maximal. En août, la grande majorité des trois zones sont recouvertes de végétation mais le contraste entre végétation très dense (vert foncé) et dense (vert clair) est visible. Les endroits où l'indice est le plus proche de 1 sont les endroits où l'indice reste supérieur à 0,5 toute l'année et dont la végétation perdure même pendant les mois les plus secs (inertie importante). A l'inverse, les espaces avec un indice plus faible en août connaissent une chute rapide de leur indice dès le mois d'octobre (inertie faible). Il s'agit sans doute de deux types distincts de végétation, comme nous allons le voir par la suite.

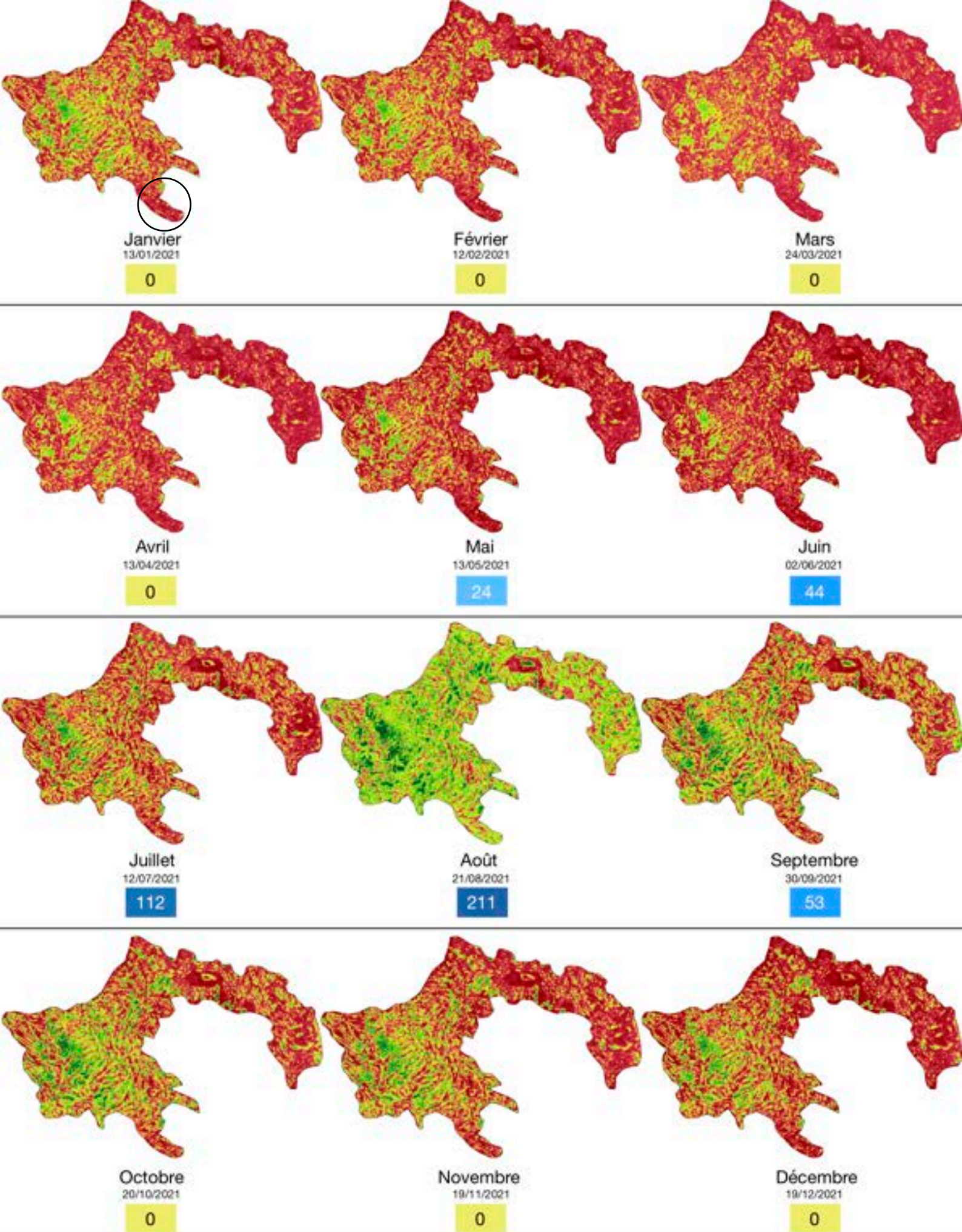
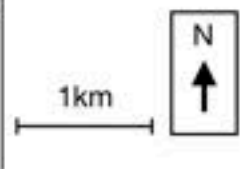
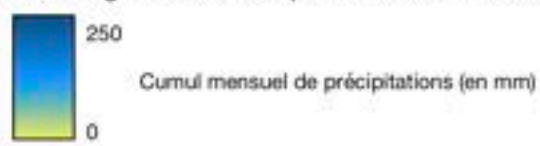
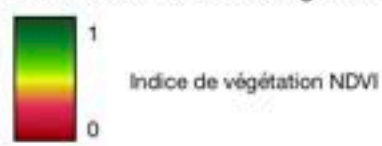


Fig. 5. Evolution de l'indice de végétation NDVI calculé à partir d'images Sentinel-2 pour la zone C2 en 2021 :



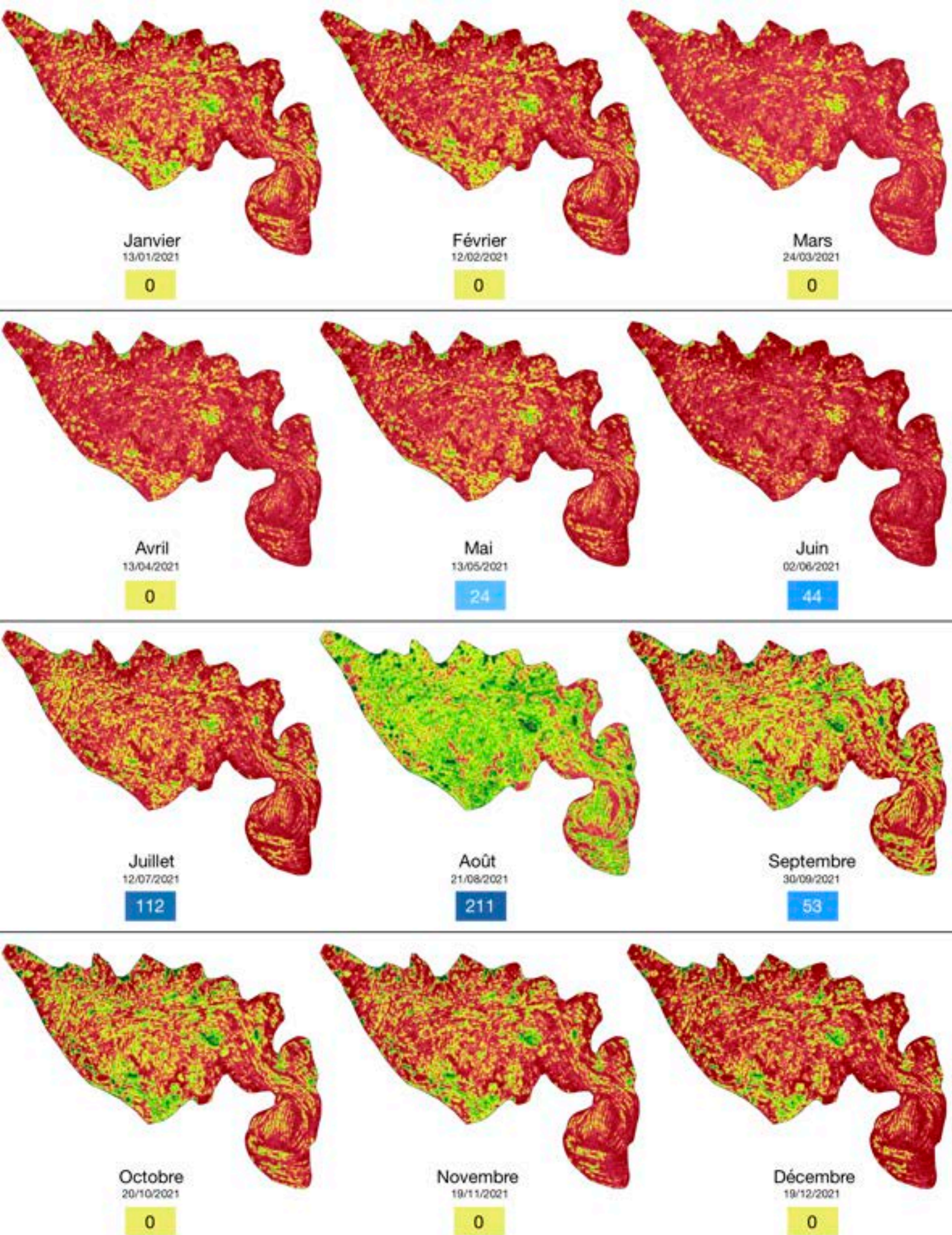
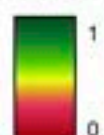


Fig. 6. Evolution de l'indice de végétation NDVI calculé à partir d'images Sentinel-2 pour la zone W1 en 2021 :



Indice de végétation NDVI



Cumul mensuel de précipitations (en mm)

500m



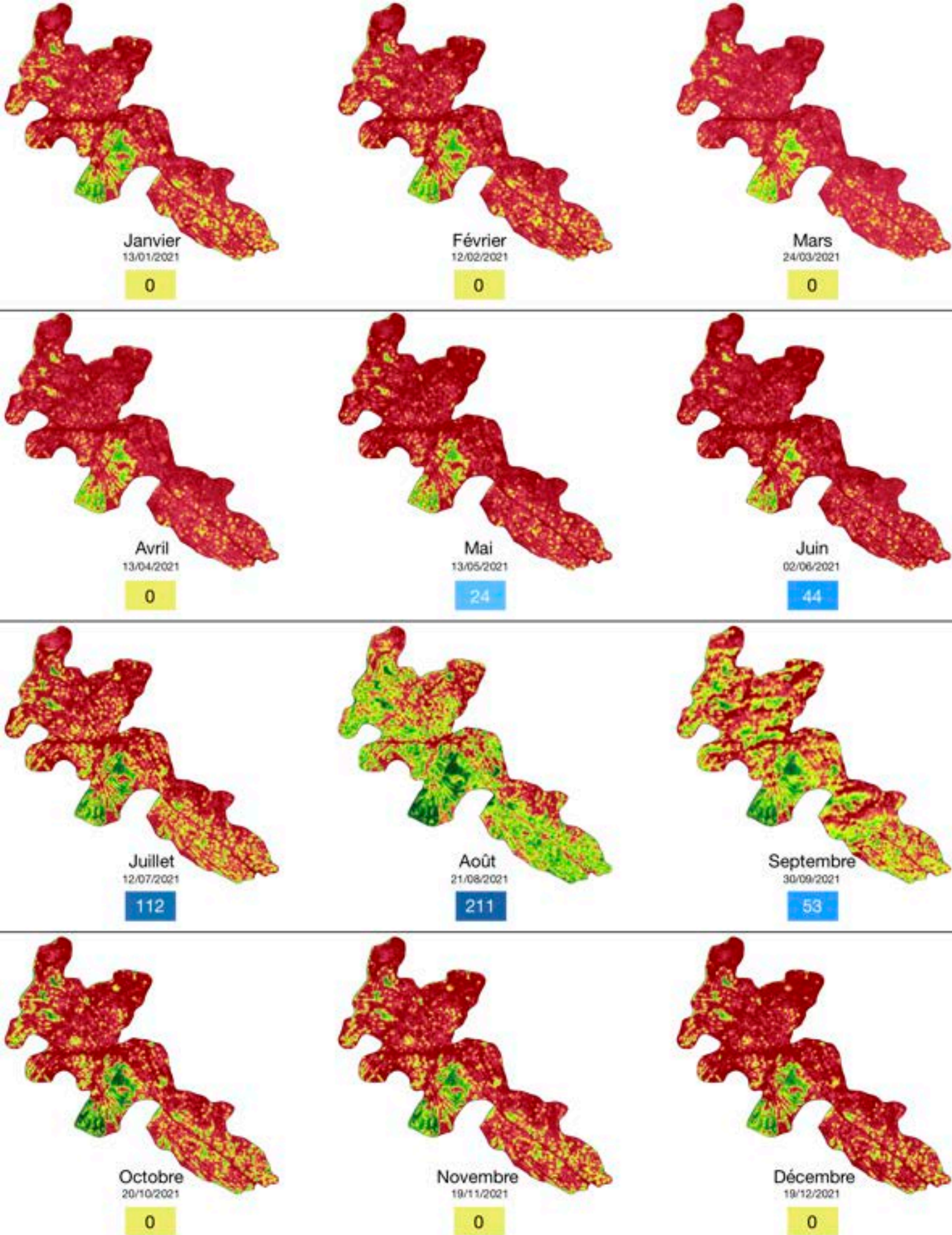
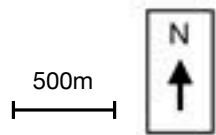
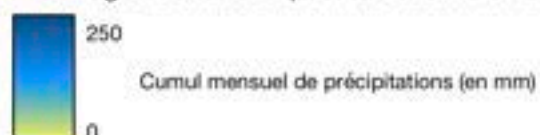


Fig. 7. Evolution de l'indice de végétation NDVI calculé à partir d'images Sentinel-2 pour la zone N1 en 2021 :



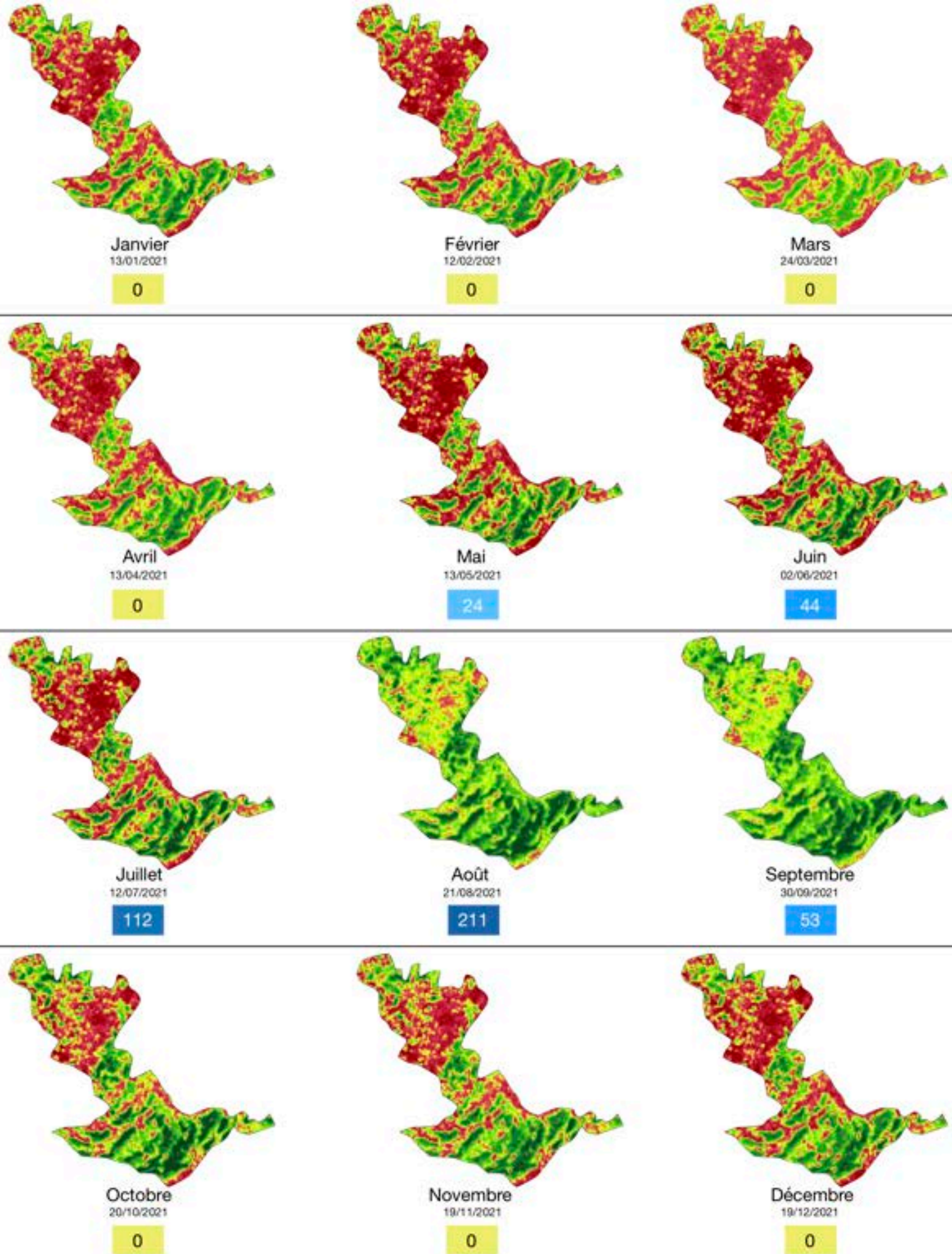
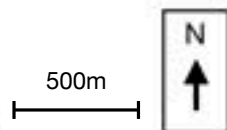
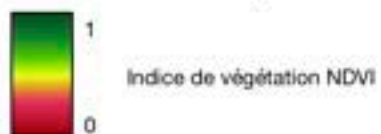


Fig. 8. Evolution de l'indice de végétation NDVI calculé à partir d'images Sentinel-2 pour la zone C (Guilleyni) en 2021 :



Pour nos trois zones, les banquettes ressortent nettement à la fin de la saison des pluies (septembre) avec des indices NDVI qui tendent vers 1, ce qui témoigne de la présence de végétation. L'est de la zone W1 l'illustre bien avec un tracé des banquettes bien visible en septembre qui disparaît peu à peu les mois suivants, puis complètement en juin (**Fig. 6.**).

En ce qui concerne les demi-lunes, celles-ci ne sont pas assez grandes pour être discernées sur une image d'une résolution de 10m. En tenant compte de l'espacement entre les bourrelets, un pixel de l'image Sentinel-2 regroupe 4 demi-lunes. Toutefois, le signal reflété peut nous permettre de mesurer les évolutions globales du couvert végétal. C'est ce que l'on remarque sur la zone C du site de Guileyni (**Fig. 8.**). La moitié sud de cette zone est composée de bandes de brousse tigrée entre lesquelles ont été implantées des demi-lunes tandis que la moitié nord est constituée uniquement de demi-lunes. Ici, la brousse tigrée garde un indice haut toute l'année alors que la végétation sur les demi-lunes ne se développent que pendant la saison des pluies.

3.3. Mise en perspective avec les observations terrain

Complétons à présent les résultats obtenus par image satellite et le résultat des enquêtes de terrain. Salek Seidi Ousseini a réalisé une première campagne de terrain en mai pour le site de Niamey à la période où la végétation est la moins développée. Lors de ses enquêtes, il est muni d'un questionnaire à destination des agriculteurs locaux, d'un GPS et d'un appareil photo. Le questionnaire (guide d'entretien) permet de collecter toutes les informations qui peuvent avoir une influence sur la végétation comme le type, l'âge et l'état des ouvrages, ainsi que le type et l'état de la végétation qui pousse à proximité ou sur les ouvrages (**Annexe 12**).

Concernant la zone C2, les banquettes ont été réalisées en 2008 lors du Programme de Lutte Contre l'Ensamblage dans le bassin du fleuve Niger (PLCE/BN). Quatorze ans plus tard, les ouvrages sont majoritairement (de 70 à 80%) en bon état. L'installation des banquettes s'est faite sur un plateau dépourvu de végétation et en mai 2022, la végétation est présente sur les ouvrages (**Fig. 9.**). Au premier plan, il s'agit d'une herbacée grimpante (*Leptadenia hastata*) connue pour sa tolérance à la sécheresse qui a la particularité d'avoir un feuillage persistant. Cette caractéristique permet de pouvoir s'en servir comme aliment de famine lors des périodes pendant lesquelles les



Fig. 9. Banquette et état de la végétation sur le plateau de la zone C2 (site Niamey).
Source : Salek Seidi Ousseini (mai 2022).

autres plantes sont sèches ou mortes. En temps normal, elle est surtout utilisée comme fourrage pour le bétail. Au second plan, le buisson qui se dresse est un *Guiera senegalensis* de la famille des Combrétacées, très répandu en Afrique de l'Ouest et utilisé comme plante médicinale. Ce sont probablement les espèces qui composent les grappes de pixels résiduels à proximité des banquettes sur la carte des NDVI en période sèche (**Fig. 5.**).

D'après les entretiens réalisés, les ouvrages n'ont pas été entretenus et ont donc plutôt bien résisté depuis 2006. Nuançons toutefois ce constat avec d'autres relevés effectués plus à l'est de la zone où des signes de vieillissement, des dégradations liées aux événements pluvieux intenses et des coupes de bois ont été observés (**Annexe 13A**). Lors d'un échange avec notre correspondant nigérien, nous avons appris que les banquettes situées tout au sud de la zone C2 n'étaient pas entretenues et en très mauvais état. Les résultats des cartes NDVI confirment ces observations de terrain car en effet, très peu de végétation semble avoir poussé dans cette zone (la zone en question est entourée d'un cercle noir en janvier, **Fig. 5.**).

A l'est de Yawaré, les banquettes réalisées sur la zone W1 par le PLCE/BN de 2005 à 2011 sont en meilleur état. La végétation composée de graminées et d'arbustes s'est développée sur les ouvrages. La présence de *Leptadenia hastata* est confirmée mais plusieurs plants présentent des traces de broutage. Parmi les arbustes observés, l'*Acacia seyal* est l'espèce la plus représentée. Outre ses intérêts écologiques (freine l'érosion et fertilise les sols) et agricole (fourrage), c'est un arbuste qui contribue à l'économie rurale car il produit de la gomme arabique. D'après les enquêtes réalisées et la largeur des troncs observés, ceux-ci datent très probablement d'une dizaine d'années. Comme c'est une espèce qui était régulièrement introduite lors de la réalisation des ouvrages, il est très probable que les plants d'acacias repiqués en 2005 aient survécu. Toutefois, plusieurs arbustes ont subi des coupes (**Annexe 13C**) car le bois est une ressource rare dans la région et est souvent utilisé comme bois de chauffe.

Les demi-lunes de la zone W1 disposées en quinconce ne présentent ni dégât, ni végétation. Elles sont bien plus récentes que les banquettes et apparaissent sur les images satellites à partir du début de l'année 2022. La première session de culture aura probablement lieu lors de la saison des pluies de cette année.

Les banquettes n'ont pas été entretenues depuis leur construction mais un agriculteur a révélé qu'il y avait eu un système de surveillance mis en place de 2013 à 2017 en lien avec une coopérative. Un gardien était chargé de surveiller que les plants n'étaient pas broutés par le bétail et que le bois n'était pas prélevé par les habitants. Il semble que le gardiennage ait pris fin à la suite d'un conflit entre le gardien et les agriculteurs, ces derniers ayant besoin de faire paître leurs bêtes.

Enfin, la zone N1 située à proximité de Bougoum est composée de banquettes en bon état, sans brèches ni ravines. Globalement, le réseau de banquettes a été réalisé avant 2004, puis il s'est densifié en 2006. Les bourrelets des ouvrages sont recouverts de *Leptadenia hastata* et de *Senna occidentalis*, une espèce de la famille des Fabacées parfois utilisée comme plante médicinale ou comme substitut au café. De très jeunes arbustes ont été observés.

Les mosaïques de cartes NDVI mises en perspective avec les relevés de terrain confirment que le suivi de la végétation avec une résolution à 10m fonctionne sur les banquettes et, dans une moindre mesure, sur les demi-lunes. La combinaison des résultats des cartes NDVI, des relevés de terrain et des calculs de l'indice TSAVI nous ont permis d'ajuster nos seuils de classification pour se rapprocher de la réalité. Nous allons désormais présenter les résultats des classifications réalisées sur quatre années.

3.4. Quantification et évolutions diachroniques du couvert végétal

3.4.1. Cartes d'évolution des classes de couvert végétal

La classification permet d'aller plus loin en quantifiant les évolutions intra-annuelles et inter-annuelles et elle apporte une précision supplémentaire grâce à la combinaison des indices NDVI et TSAVI. De cette manière, nous allons pouvoir comprendre les changements de couvert végétal en se basant sur des cartes, puis nous calculons les superficies des différentes classes pour construire des graphiques et différencier les zones où la végétation progresse des zones où elle diminue. La méthodologie de classification Sentinel a été appliquée aux sites de Niamey, Guileyni et Tahoua de janvier 2018 à juillet 2022 et illustrée pour les zones C2 (**Fig. 10, 11, 12, 13**) W1 (**Annexes 14, 15, 16, 17**), N1 (**Annexes 18, 19, 20, 21**) du site de Niamey et C (**Annexes 22, 23, 24, 25**) du site de Guileyni.

Tout d'abord, la classification quantifie la considérable variabilité saisonnière de la végétation. Par exemple, 94% de la zone C2 (site Niamey) n'est pas recouverte de végétation en juin 2021 contre 44% en août de la même année (**Fig. 13**). Il en est de même pour la zone W1 (Yawaré) pourtant recouverte avec des ouvrages en excellent état : la végétation disparaît presque totalement en juin (98%) alors qu'elle recouvre 60% de la zone en août 2021 (**Annexe 17**). La végétation diverse à proximité des ouvrages est une classe particulièrement intéressante car c'est elle qui peut nous donner la tendance sur la croissance des plants aux abords des banquettes et des demi-lunes. La végétation à proximité des banquettes, bien visible lors de la saison des pluies sur la zone C2, atteint son développement maximal en août 2021 en recouvrant près de 24% de la zone. Ce développement concorde avec des précipitations importantes lors de ce mois (211mm) ainsi que lors du mois précédent (112mm). Par contre, cette végétation ne dure que quelques mois et décline à partir du mois de septembre à mesure que les pluies s'estompent. La disparition du couvert végétal à proximité des ouvrages s'explique probablement par le fait qu'il s'agit d'espèces herbacées annuelles qui meurent en saison sèche, peut-être de la famille des Graminées. Il est aussi probable qu'il s'agisse d'espèces vivaces qui perdent simplement leur feuillage et qui continuent de vivre jusqu'à la prochaine saison des pluies. Ces plantes peuvent aussi disparaître suite au pâturage du bétail ou être simplement récoltées par les populations rurales. Rappelons que nous sommes ici à quelques kilomètres de plusieurs villages d'éleveurs et que les troupeaux paissent souvent à cet endroit. Pour trancher cette question, une deuxième enquête de terrain avec des photos juste après la saison des pluies serait très bénéfique.

Les autres zones de Niamey présentent le même cycle de la végétation à proximité des ouvrages. Il est même davantage prononcé à l'est de la zone W1 où les banquettes apparaissent en août et dès septembre, la végétation se dégrade (**Annexe 17**). C'est aussi le cas pour la zone N1 à proximité immédiate avec le village de Bougoum (**Annexe 21**) qui a la particularité d'être un espace « tampon » entre le village et un paysage de brousse tigrée (**Fig. 2**). La part de cette formation végétale qui représente moins de 10% du lieu est suffisante pour suivre son évolution au cours de l'année. C'est la classe qui résiste le mieux à la saison sèche et l'on remarque que son empreinte (qui oscille entre la classe brousse tigrée et brousse tigrée en formation) reste visible toute l'année. La persistance de la brousse tigrée est encore plus manifeste pour la zone C à Guileyni qui est en partie composée de cette formation végétale naturelle. Celle-ci résiste parfaitement aux six mois consécutifs sans précipitations (de novembre 2020 à avril 2021) et recouvre encore 16% de la zone en juin contre 34% en septembre (**Annexe 25**).

Comme nous le constatons, les mosaïques de cartes ont l'avantage de spatialiser les classes de végétation et de quantifier leurs évolutions. En les faisant défiler sur plusieurs années, elle permettent de comparer les mois d'une année à l'autre et de reconstituer d'historique du couvert végétal.

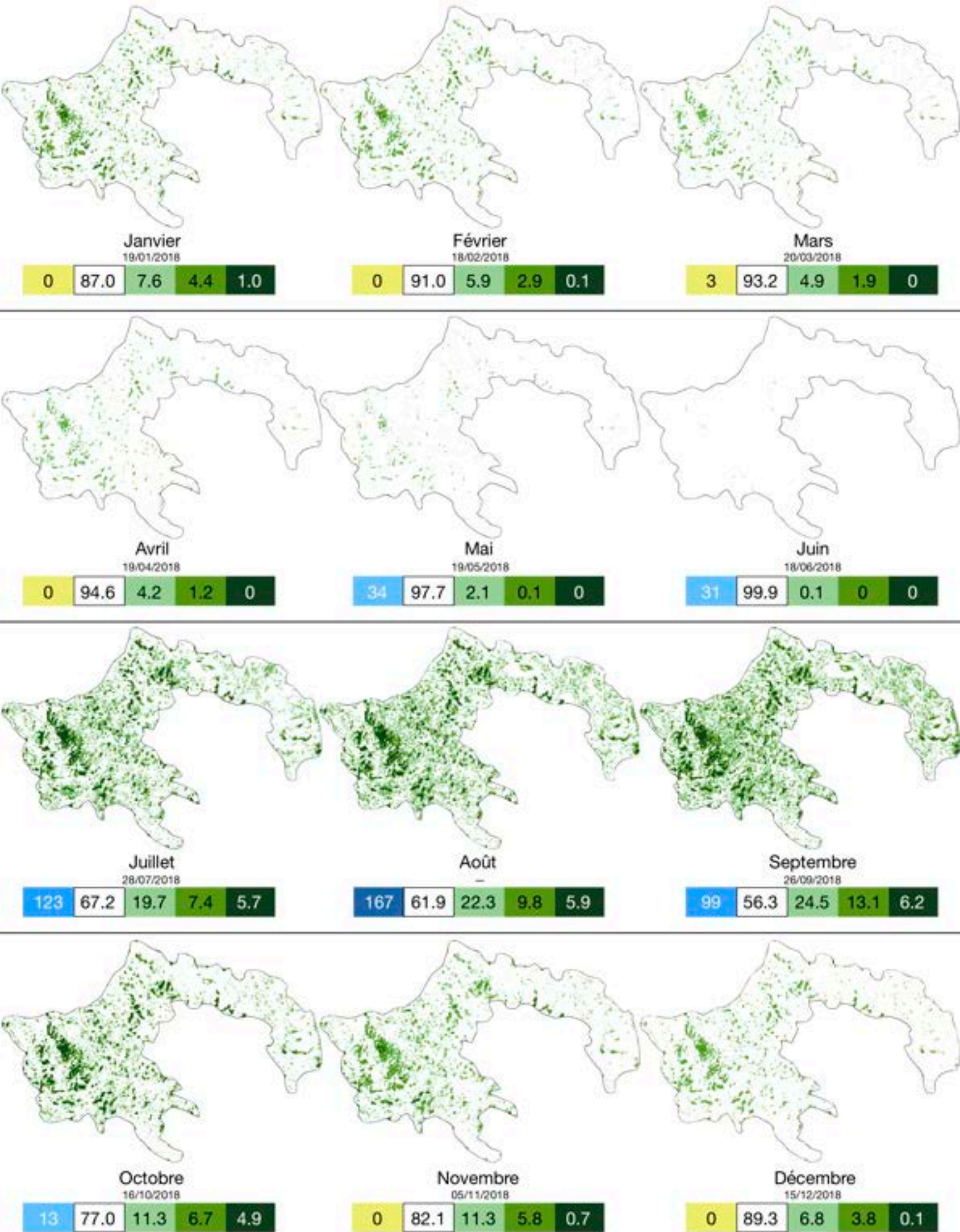
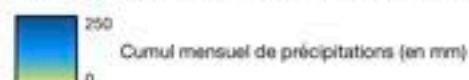
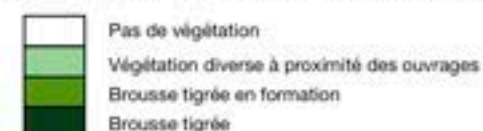


Fig. 10. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation **TSAVI** et **NDVI** calculés à partir d'images **Sentinel-2** pour la zone **C2** (Nlamey) en 2018 :



Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.



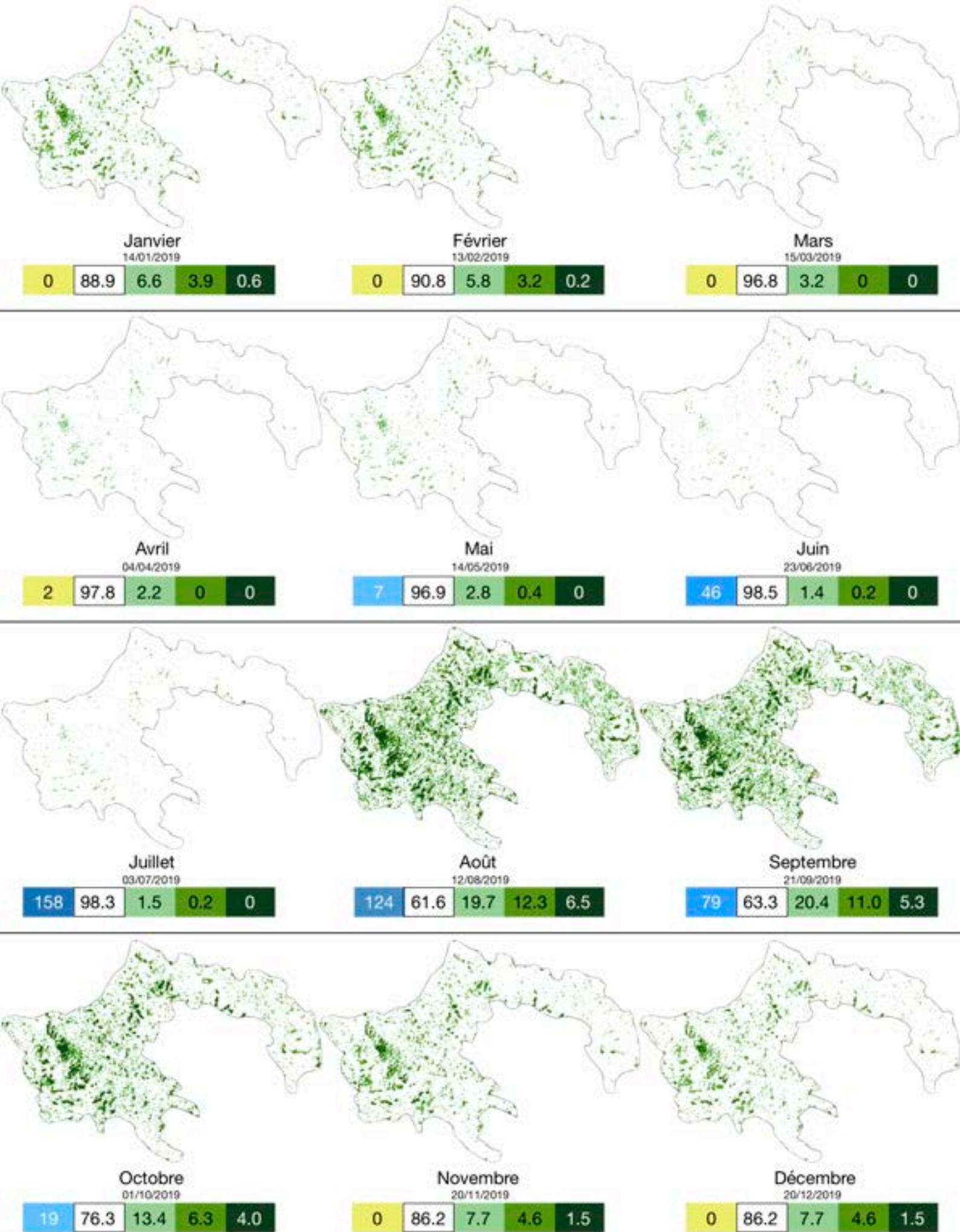
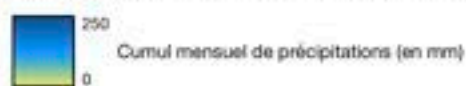


Fig. 11. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation **TSAVI** et **NDVI** calculés à partir d'images **Sentinel-2** pour la zone **C2** (Nlamey) en 2019 :



Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.



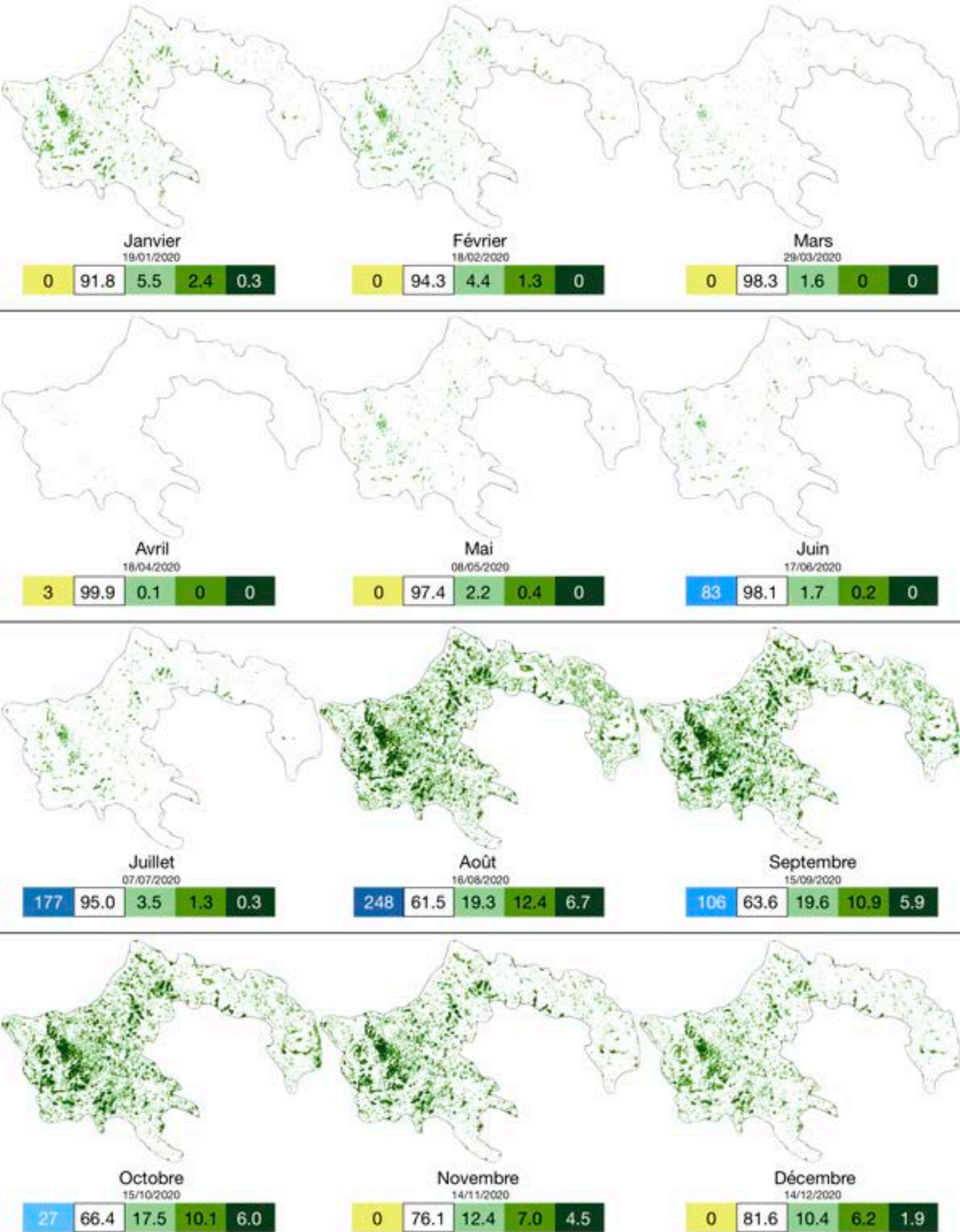
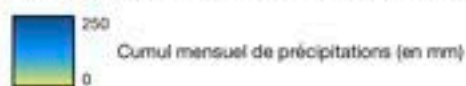
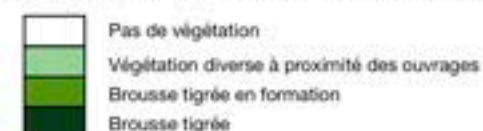


Fig. 12. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation **TSAVI** et **NDVI** calculés à partir d'images **Sentinel-2** pour la zone **C2** (Nlamey) en 2020 :



Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.



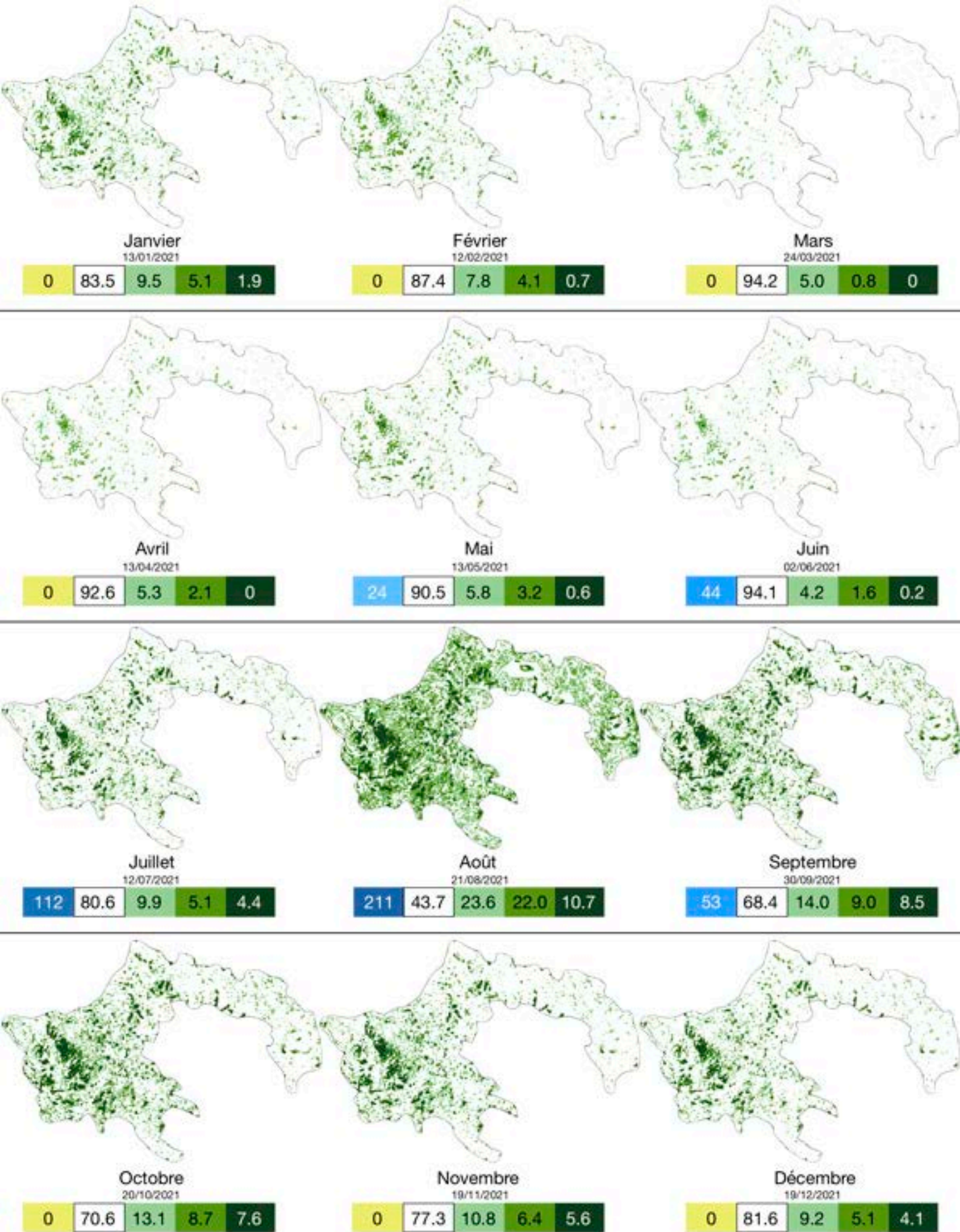
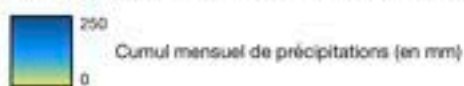
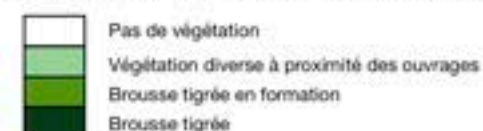


Fig. 13. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation **TSAVI** et **NDVI** calculés à partir d'images **Sentinel-2** pour la zone **C2** (Nlamey) en 2021 :



Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.



3.4.2. Compilation des classifications du couvert végétal dans des graphiques

Une manière différente de présenter et de résumer l'information est d'extraire les pourcentages de superficie et les cumuls mensuels de précipitations et de les afficher sur un graphique. Ceux-ci sont construits pour nos quatre zones C2 (Fig. 14.), C (Fig. 15.), W1 (Annexe 26), N1 (Annexe 27).

Les graphiques nous donnent une vue d'ensemble de l'évolution de nos classes de végétation de 2018 à 2021. Nous remarquons d'emblée que les cycles de végétation concordent avec les précipitations comme nous l'avons décrit précédemment. Les cumuls annuels de précipitations sont légèrement en-dessous de la normale 1991-2020 en 2018, 2019, 2021 tandis que l'année 2020 a été plus humide. Pourtant, l'année 2020 ne semble pas avoir eu un couvert végétal plus étendu que les autres années sur les sites de Niamey (Fig. 14., Annexes 26, 27). En effet, la couverture végétale de l'ensemble des classes ne dépassent pas les 40% alors qu'elle les dépassait en 2018 (zone C). A l'inverse, l'année 2021 pourtant en léger déficit pluviométrique a connu un pic remarquable en août (Niamey). Il est difficile de dégager une tendance générale sur quatre années mais globalement, nous sommes restés dans une situation stable (site de Niamey), avec parfois une légère augmentation en 2020 et 2021 par rapport aux années précédentes. Nous notons tout de même une avancée positive sur toutes les zones : le couvert végétal a mieux résisté à la saison sèche 2020-2021 que pendant les deux autres saisons sèches mesurées. La fin de la saison sèche des années 2018, 2019 et 2020 ne dépasse jamais les 5% de végétation tandis qu'elle approche des 10% en mai 2021. Les importantes précipitations de l'été 2020 se sont peut-être infiltrées plus en profondeur que les autres années, ce qui a permis de conserver davantage d'eau et à la végétation de rester en place plus longtemps (Fig. 14.).

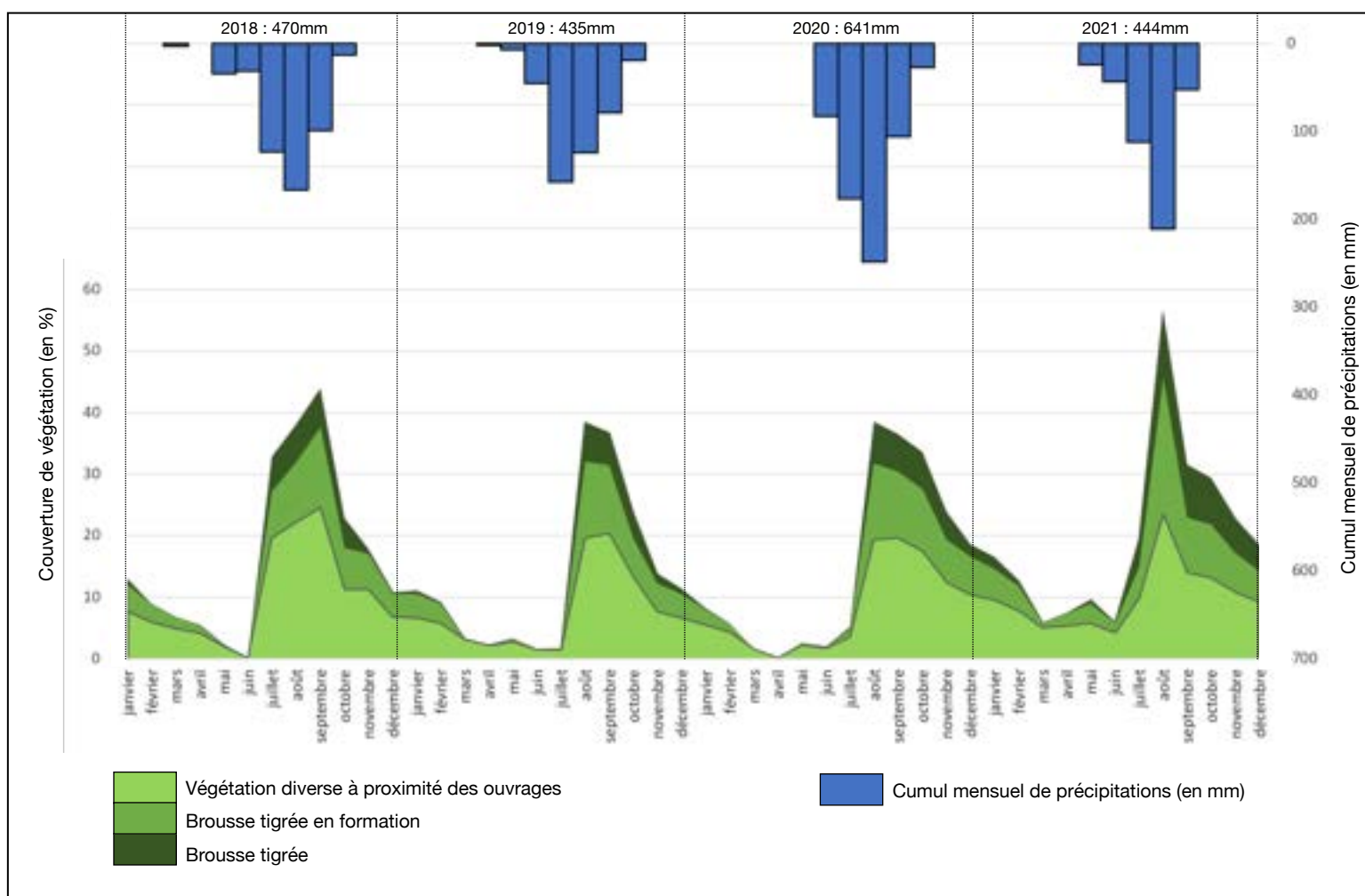
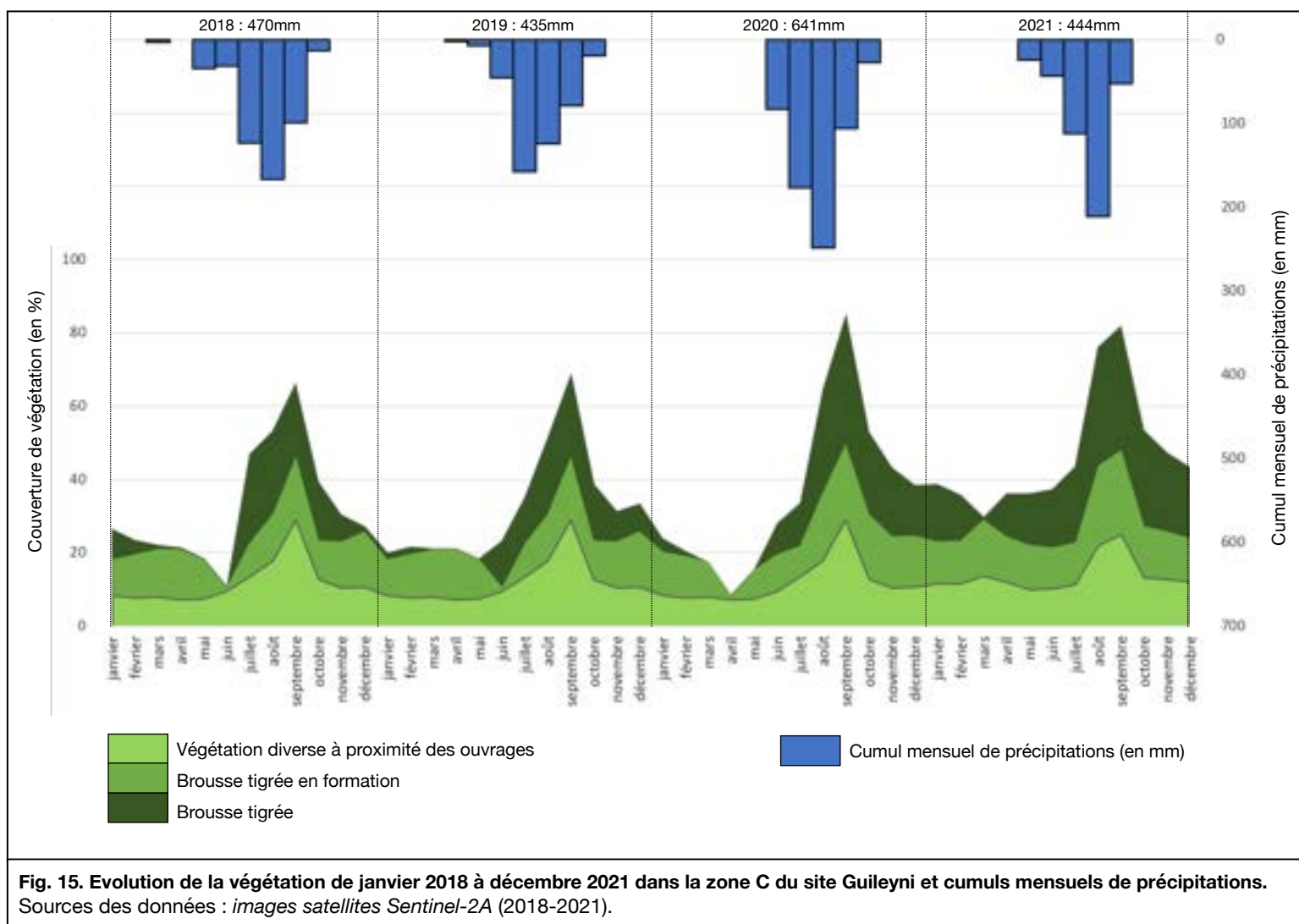


Fig. 14. Evolution de la végétation de janvier 2018 à décembre 2021 dans la zone C2 du site Niamey et cumuls mensuels de précipitations. Sources des données : images satellites Sentinel-2A (2018-2021).

Nous observons le même phénomène à Guileyni et sur ce site, la différence entre 2018-2019 et 2020-2021 apparaît plus nettement qu'à Niamey (**Fig. 15.**). Ici, le couvert végétal a dépassé les 80% de la zone lors des saisons humides de 2020 et 2021 alors qu'il n'atteint pas les 70% les deux saisons précédentes. Les classes de brousse tigrée en formation et surtout de brousse tigrée ont connu une augmentation considérable qui se prolonge même lorsque les pluies cessent. La végétation à proximité des ouvrages est restée stable.



3.5. Bilan des évolutions de l'ensemble des zones de végétation (Niamey)

Elargissons à présent notre étude à l'ensemble des zones du site de Niamey. Pour appréhender la variation du couvert végétal, nous avons simplement fait la somme annuelle des NDVI des années 2018 et 2021. La valeur moyenne de la somme des NDVI est calculée pour chacune des zones, ainsi que le taux de variation entre les deux années. Les valeurs sont reportées dans un tableau et illustrées sur la carte des sites de Niamey (**Fig. 16., Table 2**) et Guileyni (**Fig. 18., Table 3**) avec un dégradé de couleur allant du rouge (taux de variation négatif, perte de végétation) au vert (taux de variation positif, gain de végétation).

Dans l'ensemble, les zones de Niamey ont un indice NDVI en 2021 supérieur à 2018. Toutes les zones ont gagné en végétation à l'exception de la zone C3 dont l'intensité du NDVI a perdu 9%. Cette diminution nous a interpellé, d'autant plus qu'elle contraste nettement avec la zone C2, adjacente de la C3. En analysant des images aériennes, nous nous sommes aperçus qu'une partie

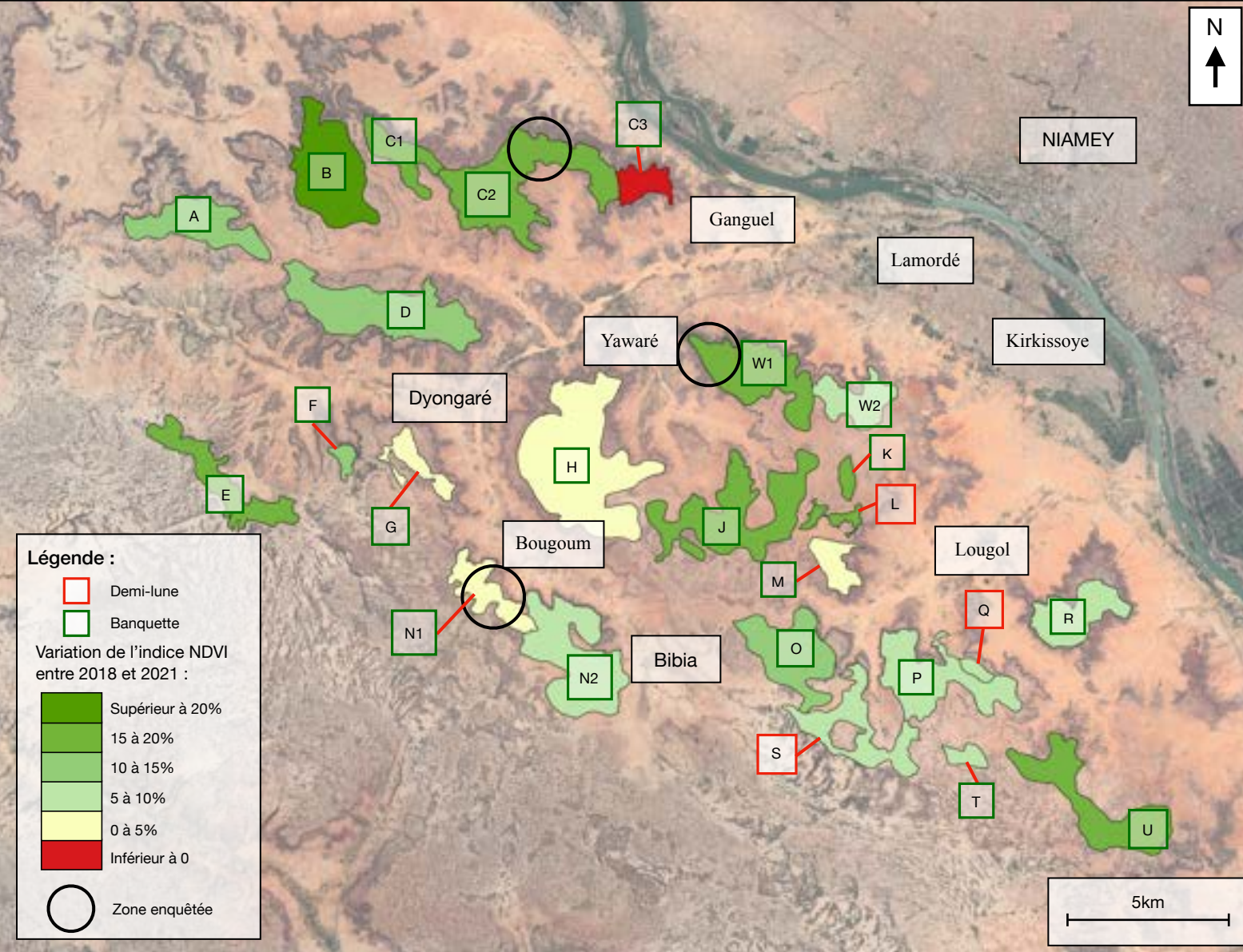


Fig. 16. Evolution de l'indice NDVI cumulé moyen par zone entre 2018 et 2021 pour le site de Niamey.

Type d'ouvrage	Superficie (en ha)	Identifiant	NDVI cumulé moyen en 2018	NDVI cumulé moyen en 2021	Taux de variation (en %)	Date de construction des ouvrages
banquette	417	B	1,63	1,97	21,5	2011
banquette	373	U	1,55	1,85	19,9	2006
banquette	561	C2	1,32	1,55	17,5	2008
banquette	144	C1	1,34	1,57	17,2	2008
banquette	516	J	1,38	1,61	17,2	2006
demi_lune	46	L	1,27	1,47	16,3	2016
banquette	253	E	1,41	1,64	16,2	2014
banquette	34	K	1,18	1,38	16,2	2005
banquette	354	W1	1,23	1,43	15,7	2006
banquette	328	O	1,48	1,68	13,7	2012
banquette	274	A	1,39	1,58	13,4	2014
banquette	505	D	1,34	1,52	13,2	2008
banquette	34	F	1,48	1,66	12,4	2011
demi_lune	28	Q	1,23	1,34	8,5	2008
banquette	45	T	1,35	1,46	8,1	2008
banquette	374	P	1,31	1,42	7,9	2008
banquette	229	R	1,14	1,22	6,9	2006
demi_lune	274	S	1,23	1,31	6,5	2016
banquette	170	W2	1,08	1,14	5,2	2006
banquette	480	N2	1,29	1,36	5,1	2006
banquette	815	H	1,42	1,49	4,4	2012
banquette	103	M	1,08	1,13	4,3	2013
banquette	106	G	1,15	1,19	3,3	2006
banquette	170	N1	1,30	1,32	2,1	2002
banquette	96	C3	1,21	1,10	-9,1	2006

Table 2. Classement des évolutions de l'indice NDVI cumulé moyen par zone entre 2018 et 2021 pour le site de Niamey.

des ouvrages construits en 2006 ont été détruits entre 2018 et 2021 et remplacés par des bâtiments industriels (**Fig. 17.**), ce qui explique le recul de la végétation. C'est également ce qui explique le faible taux de variation de la zone H (+4,4%) où des ouvrages ont également été remplacés (**Annexe 28**). Parmi nos trois sites d'étude, celui de Niamey est le seul où ce phénomène a été observé. Il est très probable que l'extension urbaine de Niamey sur la rive droite du fleuve Niger soit en cause. La ville a vu sa superficie être multipliée par trois de 2000 à 2016 et a annexé des villages proches de nos zones d'ouvrages comme Lamordé ou Kirkissoye (**Fig. 16.**) qui ne faisaient pas partie de la commune de Niamey il y a encore quelques années (Abdourazack Niandou 2020).

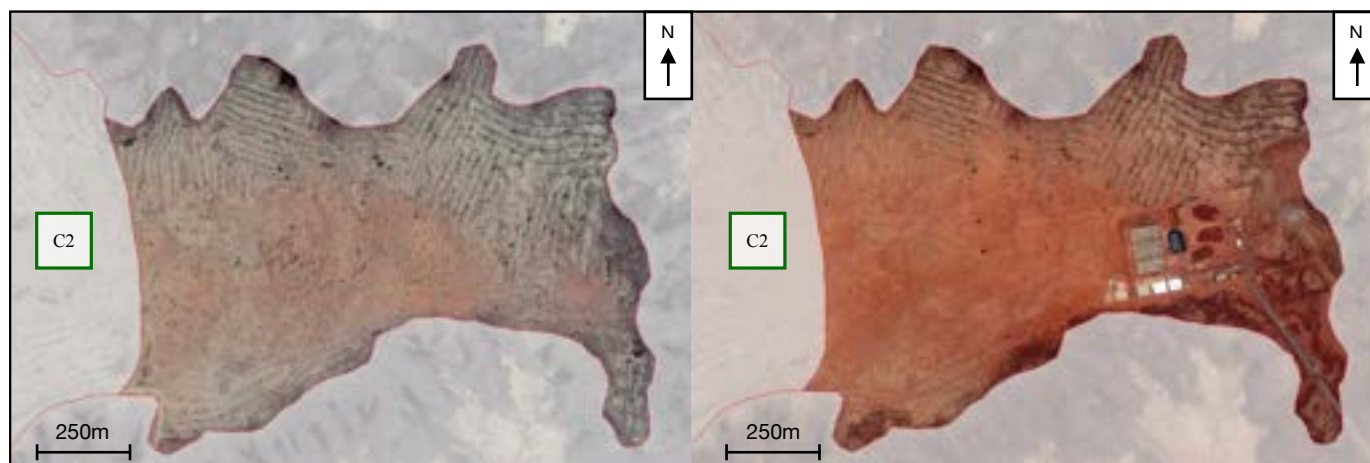


Fig. 17. Evolution de la zone C3 entre novembre 2018 (à gauche) et mai 2021 (à droite) sur le site de Niamey.
Sources des données : images satellites Google Earth (2018-2021).

Les zones B et U sont les zones qui ont le plus gagné en intensité du signal NDVI avec environ 20% d'intensité de plus en 2021 par rapport à 2018. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces taux de variation élevés. Ces deux zones ont la particularité d'être assez éloignées des villages d'éleveurs et il est probable qu'elles aient moins subi de coupes sauvages pour le bois de chauffe. La distance qui séparent ces zones des villages environnants a peut-être contribué à restreindre l'accès au bétail et qu'en conséquence, les plantations aient moins été touchées par le broutage. Les taux de variation plus bas des zones G (+3,3%), N1 (+2,1%) et N2 (+5,5%) vont dans ce sens car elles sont toutes localisées à proximité directe d'un village (Dyongaré, Bougoum, Bibia). Mais ces hypothèses sont d'autant plus difficiles à valider que nous avons d'autres zones qui ont obtenu un taux de variation élevé et qui sont situées à proximité directe des villages. C'est par exemple le cas de la zone W1 (+15%), K (+16,2%) et L (+16,3%).

Pour être plus précis, nous ne devrions pas prendre en compte uniquement la distance au village comme critère de sélection de la zone de pâturage. Comme nous l'a expliqué Salek Seidi Ousseini, les éleveurs ne choisissent pas leurs zones de pâturage uniquement en fonction de la proximité avec leur village. Une multitude d'autres critères sont à considérer, comme par exemple l'appartenance des terres, les règles tacites entre les éleveurs ou les ethnies (Peuls et Zarmas), la disponibilité en fourrage ou la recherche d'un fourrage particulier.

Comme nous ne disposons pas de ces informations, nous avons cherché d'autres raisons qui pourraient expliquer les disparités spatiales des taux de variation. Nous avons émis l'hypothèse de l'ancienneté des ouvrages car dans la littérature, il est souvent question de la dégradation des banquettes au fil du temps avec les processus d'érosions éolienne et hydrique (en particulier lors de pluies intenses). Notre correspondant nigérien nous a aussi démontré que les ouvrages n'étaient presque jamais entretenus après leur construction, ce qui rendrait pertinent une analyse par ancienneté des ouvrages. Sur Google Earth, nous nous sommes procurés des images d'archives de 1985 à 2022 sur lesquels nous relevons les dates d'implantation des ouvrages. Les dates qui apparaissent dans les tableaux (**Tables 2, 3**) correspondent à l'année la plus ancienne où les ouvrages sont visibles.

Plus encore que l'hypothèse de la distance au village, l'ancienneté des ouvrages pour expliquer les variations de l'intensité du signal NDVI ne semble pas pertinente. Nous avons des zones avec des ouvrages anciens (antérieurs à 2010) qui ont un taux de variation élevé (U, C2, C1, J) ou un taux de variation faible (N1, G, N2, W2). De la même manière, les ouvrages récents peuvent avoir un taux de variation élevé (B, L, E) ou faible (M, H, S). Il est donc difficile de démontrer un quelconque rapport entre la date de construction des ouvrages et l'évolution de la végétation.

Étudions à présent le cas des demi-lunes. Nous disposons de trois zones où ce type d'ouvrage a été construit : zones L, Q, S. La plus ancienne (Q), construite en 2008, présente un taux de variation de +8,5%, soit le taux moyen de l'ensemble de nos zones. Les deux autres zones sont bien plus récentes puisqu'elles datent de 2016. Bien que leur ancienneté soit la même, la zone L bénéficie d'un taux de variation de +16% contre +6,5% pour la zone S. L'intensité de l'indice NDVI ne semble pas non plus dépendre de l'ancienneté pour les demi-lunes et celles-ci ne semblent pas marquer de grande différence de tendance avec les banquettes anti-érosives.

3.6. Bilan des évolutions de l'ensemble des zones de végétation (Guileyni)

L'étude du site de Guileyni est plus intéressante car les zones de demi-lunes sont plus nombreuses et relativement anciennes avec des dates de construction qui remontent à 2009 (**Fig. 18., Table 3**). Le résultat obtenu indique nettement que les demi-lunes ont un taux de variation plus élevé que les banquettes (les taux de variation avoisinent les +30% pour les zones A et C), ce qui contraste avec le site de Niamey. La réussite de ces ouvrages s'explique peut-être par le fait que les demi-lunes sont construites sur des plateaux où la brousse tigrée est encore en excellent état (par rapport au site de Niamey). Sur ce site, la population à proximité est moins nombreuse et la pression anthropique est plus faible. Contrairement au site de Niamey où des infrastructures comme des routes ou des bâtiments industriels sont construits, le site de Guileyni semble mieux préserver. C'est en tout cas ce que l'on constate sur les images satellitaires.

Lors de la rédaction du mémoire, les observations de terrain ne sont pas encore disponibles, nous ne pouvons donc pas les confronter aux résultats obtenus par télédétection.

3.7. Bilan des évolutions de l'ensemble des zones de végétation (Tahoua)

Sur le site de Tahoua, nous étudions un nombre d'ouvrages plus important à l'échelle d'un bassin versant de 2234km². Ici, la récupération des terres dégradées est plus ancienne que sur nos sites précédents. Les premiers projets voient le jour à la fin des années 1970 (projet Ourihamiza) et se développent surtout à partir de 1984 (Rochette 1988). Aux alentours de Keïta (**Annexe 2**), le Programme de Développement Rural Intégré (PDRI/Keïta) est exécuté de 1984 à 1991 par la FAO et finance la construction de banquettes et de demi-lunes. Ceux-ci sont construits sur des plateaux gréseux et sur quelques glacis autrefois cultivés et désormais désertifiés.

La méthodologie appliquée est identique aux sites précédents, mais étant donné le nombre de zones d'ouvrages, nous n'avons pas eu le temps de les dater et de faire l'analyse de leur ancienneté par rapport à l'évolution de leur couvert végétal. Toutefois, le graphique (**Fig. 19.**) résume les gains et pertes de végétation entre 2018 et 2021 des banquettes et demi-lunes. Comme pour les sites 1 et 2, une majorité d'ouvrages a un taux de variation positif (97 sur 151) avec des valeurs inférieures à 30% (84 sur 97). Au delà, nous obtenons des résultats très élevés qui peuvent être expliqués par plusieurs phénomènes.

D'abord, il arrive que les banquettes ne soient pas encore toutes construites en 2018 et que le réseau d'ouvrages se densifie jusqu'en 2021. Sur les taux supérieurs à +30%, nous remarquons aussi des banquettes totalement vierges de plantation en 2018 et une végétation développée en 2021 (zone 137). L'année de plantation peut donc aussi expliquer ces résultats. Ensuite, il arrive que la zone de banquettes en 2018 soit détruite et remplacée par une zone de demi-lunes lorsque nous observons les images en 2021, comme par exemple la zone 53. La densité de plantation en demi-lunes est supérieure aux banquettes, ce qui augmente considérablement l'indice de végétation.

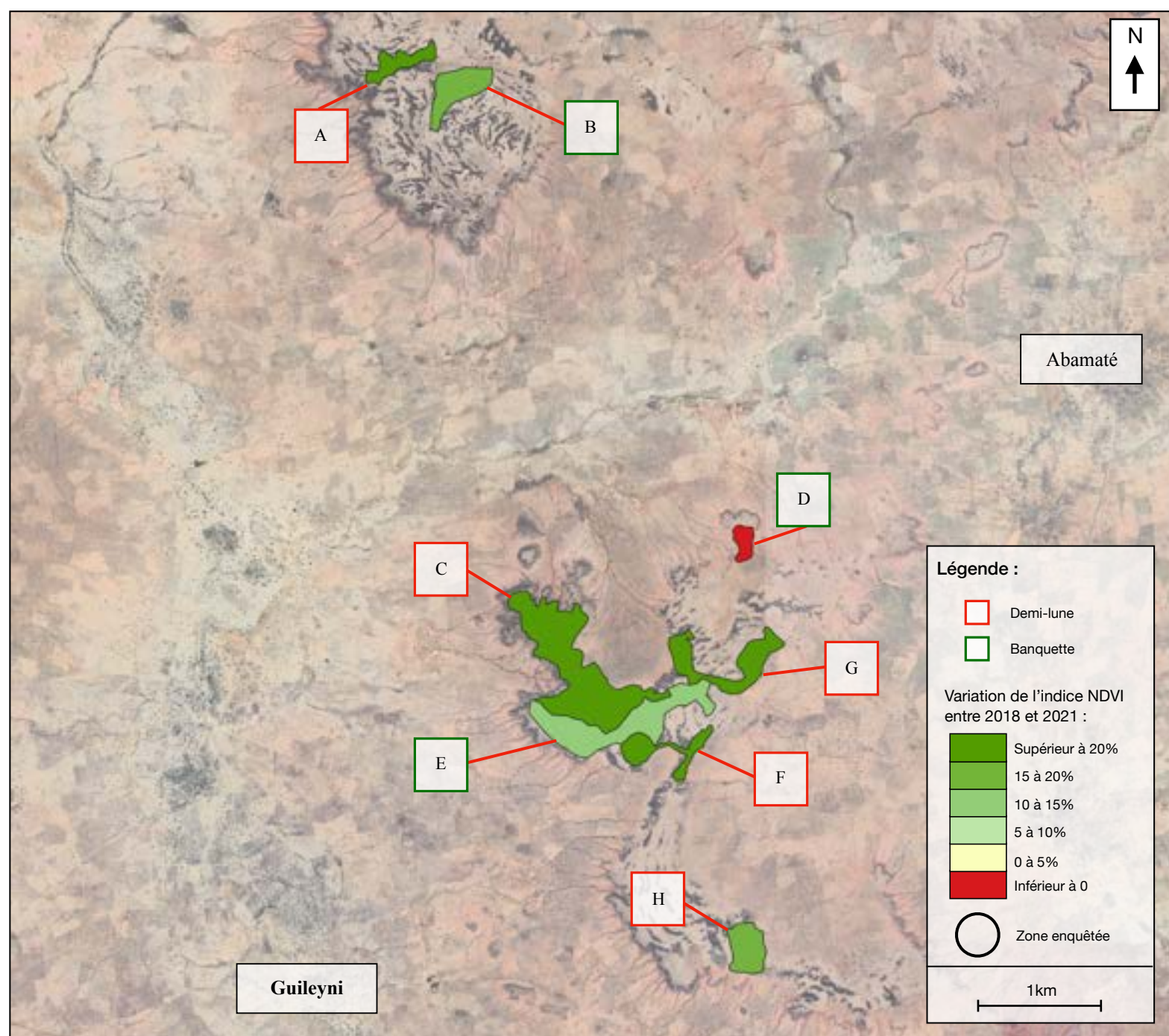


Fig. 18. Evolution de l'indice NDVI cumulé moyen par zone entre 2018 et 2021 pour le site de Guileyni.

Type d'ouvrage	Superficie (en ha)	Identifiant	NDVI cumulé moyen en 2018	NDVI cumulé moyen en 2021	Taux de variation (en %)	Date de construction des ouvrages
demi_lune	12	A	1,80	2,33	29,8	2013
demi_lune	81	C	1,94	2,50	29,0	2016
demi_lune	16	F	1,94	2,38	22,7	2009
demi_lune	29	G	1,56	1,87	20,1	2009
demi_lune	17	H	1,93	2,24	16,0	2013
banquette	20	B	1,54	1,79	16,0	2013
banquette	50	E	1,52	1,74	14,5	2013
banquette	6	D	1,16	1,16	-0,2	2013

Table 3. Classement des évolutions de l'indice NDVI cumulé moyen par zone entre 2018 et 2021 pour le site de Niamey.

Concernant les reculs de la végétation importants (au-delà de -20%), nous nous apercevons qu'il s'agit surtout de demi-lunes situées à proximité les unes des autres. D'après les images satellites d'archives (rares à cet endroit), les demi-lunes se repèrent aisément en 2018 mais pas en 2021. Certaines ont l'air recouvertes de sable pendant que d'autres ont complètement disparu (zones 120, 123, 124, 126). L'ensablement est peut-être en cause où une dégradation liée à l'abandon des demi-lunes.

Enfin, notons que l'ensemble du bassin versant a connu une hausse de 9,2 % de l'intensité de son indice de végétation de 2018 à 2021 (**Fig. 19.**), ce qui correspond environ à la médiane des taux de variation observés sur les zones d'ouvrages.

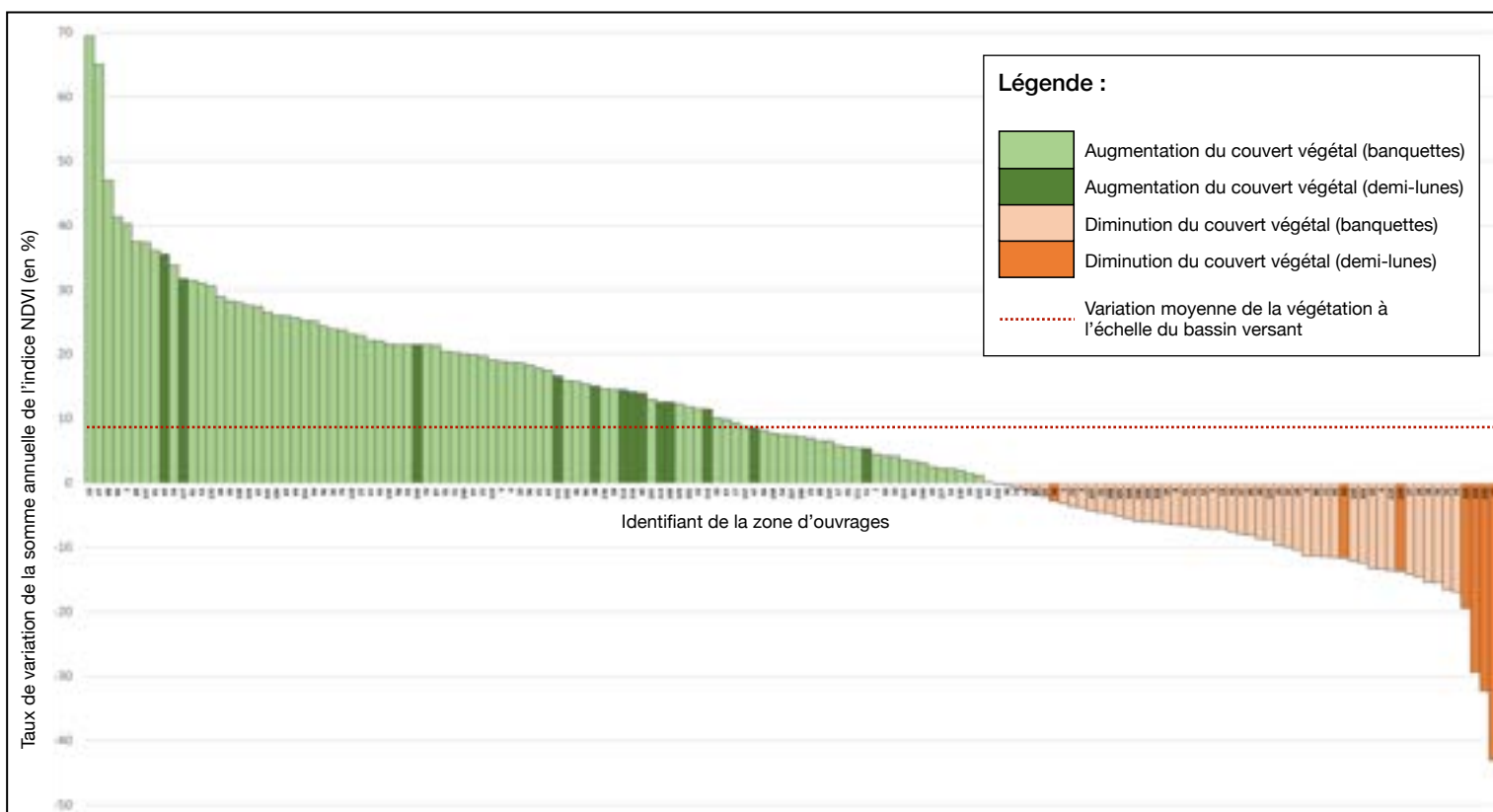


Figure 19. Evolution du couvert végétal des zones de banquettes et de demi-lunes entre 2018 et 2021 (site de Tahoua).

Conclusion, limites et perspectives

Dans cette étude, nous avons utilisé une approche par télédétection pour suivre la végétation sur les ouvrages de restauration des terres dégradées dans trois sites du Niger. Deux méthodologies ont été développées selon les images satellites à notre disposition, SPOT et Sentinel-2. Pour l'image SPOT, la classification-objet nous a semblé la plus pertinente tandis qu'une classification-pixel a été utilisée pour les données Sentinel-2. Après avoir comparé les deux résultats, nous avons appliqué la méthodologie aux images Sentinel-2 de janvier 2018 à décembre 2021.

Plusieurs types de présentation ont été proposés et elles montrent qu'il est possible d'exploiter les images satellites à l'échelle du mois ou de l'année, de suivre les évolutions des différentes classes de végétation et de les mettre en relation avec les précipitations. Cette étude prouve qu'il est possible de suivre la végétation avec des images Sentinel-2, mais les classifications réalisées nécessitent davantage de validation terrain. La finesse de l'image nous permet une estimation des types de végétation qui doivent être prises avec du recul.

En effet, plusieurs biais peuvent compromettre la qualité de l'estimation du couvert végétal. Pour commencer, les images satellites les plus intéressantes sont celles prises pendant la saison des

pluies. Or, c'est à cette période que la couverture nuageuse est la plus présente. Sur l'ensemble de notre étude, nous avons eu la chance de n'avoir que deux mois manquants pour le site de Niamey et une sur le site de Guileyni.

Deuxièmement, nous nous efforçons de prendre les images dont la date est la plus proche du milieu du mois, mais il arrive que celle-ci ne soit pas exploitable (non disponible sur le serveur du CNES ou couverture nuageuse trop importante), nous choisissons alors la date du début ou de la fin du mois. Cette remarque est importante car les dates d'acquisition à deux semaines près peuvent altérer la qualité des résultats : une image prise début juillet avec un cumul de précipitations important apparaîtra avec peu de végétation par rapport à une image prise à la fin du mois. La comparaison inter-annuelle de chaque mois doit toujours être tempérée par les dates d'acquisition. Ce problème est particulièrement préoccupant pour les sommes annuelles des indices NDVI. Par exemple, si l'image du mois de juillet date du 4, l'indice sera faible et va diminuer la somme annuelle. A l'inverse, si l'image date du 24, l'indice a de grandes chances d'être haut sur toute l'image et le résultat annuel sera haut, ce qui faussera la comparaison inter-annuelle.

La solution proposée est de calculer l'état de la végétation au plus haut de l'année pour chaque pixel. Par exemple, si un pixel apparaît comme de la végétation diverse à proximité des ouvrages en juillet mais comme de la brousse tigrée en août, il est alors comptabilisé comme de la brousse tigrée. Ce type de calcul demande une reclassification des seuillages et a été utilisé avec succès sur la carte des comparaisons annuelles (**Annexe 29**).

Troisièmement, l'intitulé des classes peut être trompeur. Les classifications basées sur des indices de végétation rendent compte de la surface foliaire présente. Or en période sèche, contrairement à ce que l'on observe sur les classes des mosaïques de carte par mois, la végétation arbustive et en particulier la brousse tigrée ne disparaît pas, c'est son feuillage qui disparaît.

De plus, les années de construction des ouvrages acquises sur Google Earth sont choisies à partir du moment où les ouvrages sont visibles. Si une zone de banquettes est visible sur une image de 2006, qu'elle n'apparaît pas en 2002 mais qu'il n'y a pas d'image disponible entre les deux dates, nous indiquons 2006.

Il arrive que l'espace entre deux banquettes soit complété par des demi-lunes (phénomène visible sur la zone W1 du site de Niamey à partir de fin 2021). Dans ce cas, nous gardons la dénomination banquette alors que nous devrions créer une nouvelle classe.

Pour améliorer la classification Sentinel et gagner du temps, il pourrait être intéressant d'exploiter les signatures temporelles et de réaliser une classification annuelle. Nous avons commencé à explorer cette technique en analysant les évolutions de différentes occupations du sol (équivalentes à nos classes) sur la compilation des NDVI de janvier 2018 à mai 2022 (**Annexe 30**).

Ce travail n'est qu'une ébauche des possibilités que nous offre la télédétection dans ces territoires arides. La faible nébulosité et la densité limitée du couvert végétal en font un outil particulièrement adapté pour répondre aux besoins de suivi de la végétation dans les programmes d'aide au développement. Comme nous l'avons vu, il est difficile de dégager une tendance assurée sur seulement quatre années. Il serait pertinent de travailler avec des données plus anciennes et de poursuivre le suivi d'année en année. En quantifiant la végétation et en dégagant les grandes tendances d'évolution, les données produites par télédétection peuvent être intéressantes pour analyser le couvert végétal qui est un des facteurs qui joue un rôle important dans le cycle de l'eau.

L'exploitation des données de télédétection offre des perspectives intéressantes pour les populations locales et elles pourraient être utilisées de façon opérationnelle pour aider les agriculteurs et les éleveurs à choisir les ouvrages les plus adaptés à leur territoire. Ce type de suivi pourrait être mis en place pour analyser d'autres méthodes de culture (comme le zaï) tout en gardant à l'esprit que la résolution spatiale à 10m restera une approximation pour suivre des ouvrages de quelques mètres seulement.

Bibliographie

Abdourazack Niandou, A., 2020. Urbanisation et précarité de l'énergie électrique à Niamey, Niger. *Theses, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II ; Université Abdou Moumouni*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03450190>.

Ambouta, K. et Dan Lamso, N., 1996. Rapport d'étude des sols des terroirs de Nazey et Togom(Ouallam), *Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni de Niamey, non publié*.

Ambouta, K., 2004. Caractérisation de la brousse tigrée au Niger. *Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger*. <https://bibliosud.omekas.mind-and-go.net/>.

Anyamba, A. et Tucker, C.J., 2005. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003, *Journal of Arid Environments*, 63(3), pp. 596–614. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.007>.

Baret, F., Guyot, G. et Major, D. J., 1989. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation.

Brandt, M., Tappan, G., Diouf, A., Beye, G., Mbow, C. et Fensholt, R., 2017. Woody Vegetation Die off and Regeneration in Response to Rainfall Variability in the West African Sahel, *Remote Sensing* 9 (1): 39. <https://doi.org/10.3390/rs9010039>.

Chairet, R., Ben Salem, Y. et Aoun, M., 2019. Features extraction and land cover classification using Sentinel 2 data. In *2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 497–500. IEEE.

Dardel, C., 2014. Entre désertification et reverdissement du Sahel : Diagnostic des observations spatiales et in situ. *Thèses, Université Paul Sabatier - Toulouse III*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00944267>.

Delwaulle, J.C., 1973. Résultats de six ans d'observations sur l'érosion au Niger. *BOIS & FORETS DES TROPIQUES* 150 (150): 15–36. <https://doi.org/10.19182/bft1973.150.a19182>.

Demangeot, J., 1976. Les Espaces naturels tropicaux: essai de géographie physique. *Collection Géographie*. Paris ; New York ; Barcelone: Masson.

Descroix, L., Guichard, F., Grippa, M., Lambert, L., Panthou, G., Mahé, G., Gal, L. *et al.* 2018. Evolution of Surface Hydrology in the Sahelo-Sudanian Strip: An Updated Review. *Water* 10 (6): 748. <https://doi.org/10.3390/w10060748>.

Descroix, L., 2021. Sécheresse, désertification et reverdissement au Sahel. *Nation Unies, IRD, Convention sur la lutte contre la désertification*. <https://www.unccd.int/sites>.

Forestry Economics and Policy Division, 2005. Situation des forêts du monde 2005. *FAO*. <https://www.fao.org/publications/card/fr/c/af4b437f-b2d5-5c0e-a707-2ee9161d4f20/>.

Frampton, W. J., Dash, J., Watmough, G. et Milton, E. J., 2013. Evaluating the Capabilities of Sentinel-2 for Quantitative Estimation of Biophysical Variables in Vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82 (août): 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007>.

Galle, S., Seghieri, J., et Mounkaila, H., 1997. Fonctionnement hydrologique et biologique à l'échelle locale : cas d'une brousse tigrée au Niger. *Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens*, 105–18. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010013990>.

Gardelle, J., Hiernaux, P., Kergoat, L. et Grippa, M., 2010. Less Rain, More Water in Ponds: A Remote Sensing Study of the Dynamics of Surface Waters from 1950 to Present in Pastoral Sahel (Gourma Region, Mali). *Hydrology and Earth System Sciences* 14 (2): 309–24. <https://doi.org/10.5194/hess-14-309-2010>.

Gonzalez, P., Tucker, C. J. et Sy, H., 2012. Tree Density and Species Decline in the African Sahel Attributable to Climate. *Journal of Arid Environments* 78 (mars): 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.11.001>.

Hänke, H., Börjeson, L., Hylander, K. et Enfors-Kautsky, E., 2016. Drought Tolerant Species Dominate as Rainfall and Tree Cover Returns in the West African Sahel. *Land Use Policy* 59 (décembre): 111–20. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.08.023>.

Haralick, R. M., Shanmugam, K., et Dinstein, I., 1973. Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-3, no. 6, pp. 610–621.

Herbes, J. M. d', Abouta, K. et Peltier, R., 1997. Fonctionnement et gestion des écosystèmes forestiers contractés sahéliens. *Textes de l'atelier du 20-25 novembre 1995, Niamey, Niger*.

Heusch, B., 1986. Cinquante ans de banquettes de D.R.S.-C.E.S. en Afrique du Nord : un bilan. *Spécial Erosion* 22: 153–62.

Ibrahim, B., Malam Abdou, M., Aghali, I., Mahamadou, B., Mamadou, I., Descroix, L., Le Breton, E. et Vandervaere, J. P., 2020. Dynamique Hydro-Erosive Actuelle Des Bassins Versants Endoréiques De La Région De Niamey (Sud-Ouest Du Niger). *European Scientific Journal ESJ* 16 (novembre). <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p149>.

Köppen, W., 1900. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geographische Zeitschrift* 6 (11): 593–611.

Laminou Manzo, O., Amani, A., Dan Guimbo, I., Rachidi, A. H. et Mahamane A., 2020. Impacts des banquettes dans la récupération des terres dégradées au Niger. *Journal of Applied Biosciences* 151 (juillet): 15510–29. <https://doi.org/10.35759/JABs.151.1>.

- Morel, A. et Ambouta, K. 1987. Contribution à l'édaphologie de la brousse tigrée de l'Ouest Nigérien. *Revue de Géographie Alpine* 75 (1): 92–93.
- Monserud, R. A. et Leemans, R., 1992. Comparing Global Vegetation Maps with the Kappa Statistic. *Ecological Modelling* 62 (4): 275–93. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(92\)90003-W](https://doi.org/10.1016/0304-3800(92)90003-W).
- Nassirou Ado, M., Sani Moussa, M. et Ambouta, K., 2021. Effets des Demi-Lunes Multifonctionnelles sur la Production du Sorgho en Afrique de l'Ouest: Cas de la Région de Tahoua au Niger. *European Scientific Journal ESJ* 17 (34). <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n34p112>.
- Nations Unies, 2021. Niger : près de 600.000 personnes exposées à une insécurité alimentaire dans la région de Tillabéry (OCHA). <https://news.un.org/fr/story/2021/10/1105412>.
- Ota, T., Mizoue, N. et Yoshida, S., 2011. Influence of Using Texture Information in Remote Sensed Data on the Accuracy of Forest Type Classification at Different Levels of Spatial Resolution. *Journal of Forest Research* 16 (6): 432–37. <https://doi.org/10.1007/s10310-010-0233-6>.
- Ozer, P., Hountondji, Y. C., Jelil Niang, A., Karimoune, S., Laminou Manzo, O. et Salmon, M., 2010. Désertification au Sahel: Historique et perspectives. *Bulletin de la Société Géographique de Liège* 54 (avril): 69.
- République du Niger, 2011. Initiative Grande Muraille Verte. *Ministère de l'hydraulique et de l'environnement*. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/Ner169723.pdf>.
- Rochette, R. M., 1989. Le Sahel en lutte contre la désertification: leçons d'expériences. *Verlag Josef Margraf*.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. et Deering, D. W., 1974. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication* 351 (janvier): 309.
- Tarchiani, V., Di Vecchia, A., Pini, G., Mahaman Laminou, A., Toudjani, Z. et Maman, G., 2008. Approches méthodologiques et outils opérationnels pour la gestion des forêts classées en Afrique de l'Ouest: le cas du Niger. *Sci. Chang. Planet* 19: 261–67.
- Tucker, J. C. 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8 (2): 127–50. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
- Tucker, J. C. et Nicholson, S. E., 1999. Variations in the Size of the Sahara Desert from 1980 to 1997. *Ambio* 28 (7): 587–91.
- World Bank, 2021. Population, total — Niger. *United Nations World Population Prospects*. <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur>.

Annexes

Annexe 1. Présentation des structures d'accueil (PACTE, IGE et IRD).

Mon stage s'est déroulé au sein de deux laboratoires, l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) et le laboratoire de sciences sociales PACTE et de mars à août 2022. Il a été financé par un troisième organisme, l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

L'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) est un laboratoire en sciences de la planète et de l'environnement qui s'intéresse particulièrement aux régions polaires, aux zones de montagne et à la zone intertropicale. Cette dernière est au coeur d'enjeux sociétaux et environnementaux importants comme le changement climatique, les pressions démographiques, et d'urbanisation qui bouleversent l'usage des terres et de l'accès aux ressources en eau. Autant de thèmes que l'on retrouve dans le sujet de notre étude et qui entrent en jeu pour expliquer nos résultats. L'IGE a développé une stratégie de renforcement de l'activité partenariale Nord Sud en recherche, formation et transfert sociétal qui se concrétise en Afrique de l'Ouest par le suivi, la compréhension et la prévision du système climatique et des processus physiques et biogéochimiques. Parmi les grands objectifs de l'IGE fixés pour la période 2021-2025 en Afrique de l'Ouest, nous retrouvons la modélisation du fonctionnement hydrogéologique, la compréhension de l'évolution de la zone critique et la prédiction de l'évolution des ressources en eau selon différents scénarios en Afrique sub-saharienne. Pour remplir ces objectifs, certains membres de l'IGE participent à des campagnes de terrain plus ou moins longues en Afrique de l'Ouest en partenariat avec d'autres organismes comme l'IRD¹.

L'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) est un organisme pluridisciplinaire qui travaille en partenariat avec les pays méditerranéens et intertropicaux. L'objectif principal est d'orienter les politiques de développement et de répondre aux grands enjeux liés aux changements globaux, environnementaux, économiques, sociaux et culturels qui affectent la totalité de la planète². L'IRD est présent au Niger depuis 1957 où ses champs de recherche se sont longtemps focalisés sur le domaine hydrologique, avant de se diversifier dans d'autres thématiques (conservation de la biodiversité, santé, sociologie, agronomie, etc.³).

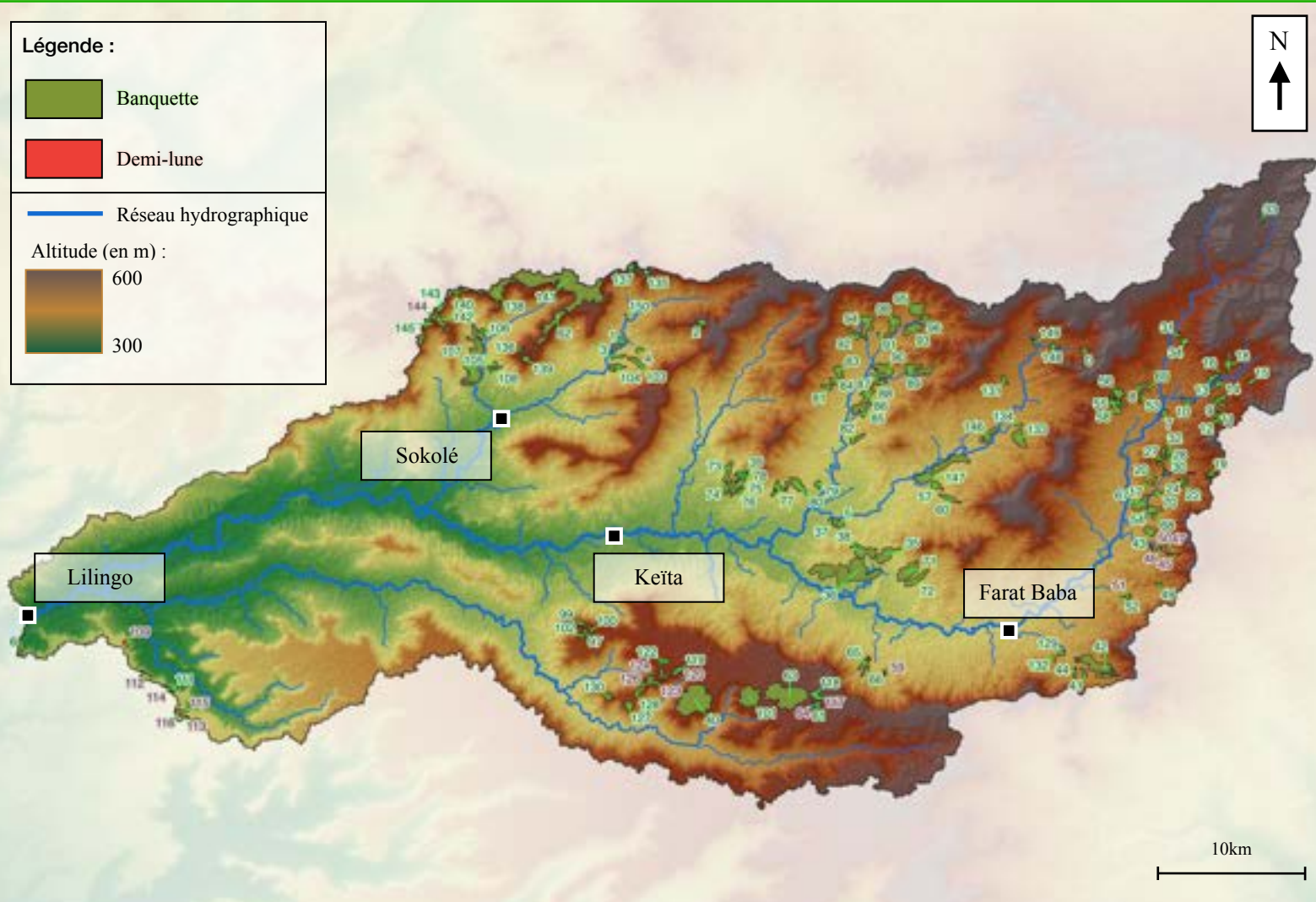
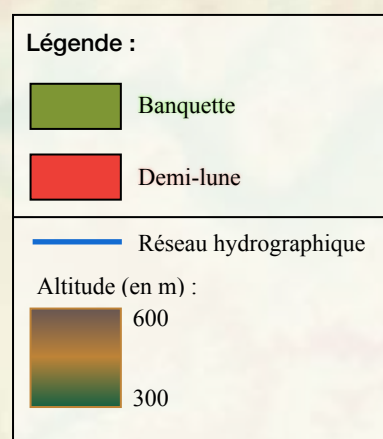
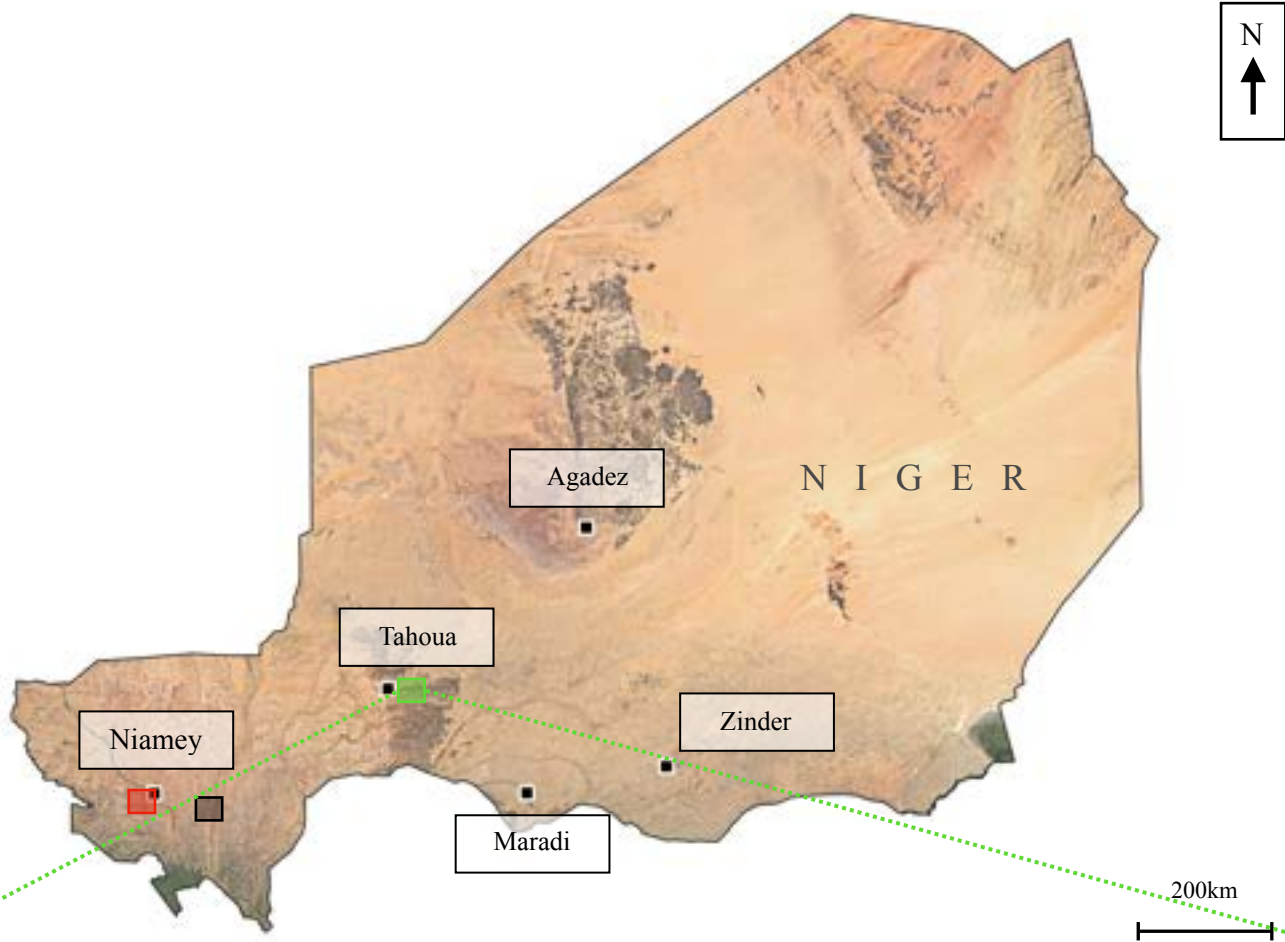
Le laboratoire PACTE place l'interdisciplinarité au coeur de ses pratiques et est constitué de géographes, d'urbanistes, de sociologues, d'historiens et d'économistes. Composé de cinq équipes thématiques, j'ai surtout été lié à l'équipe Environnements pour les questions techniques de télédétection dont le présent travail est le résultat⁴.

¹ IGE — Présentation de l'Unité. 2022. <https://www.ige-grenoble.fr/-Presentation-de-l-Unité->

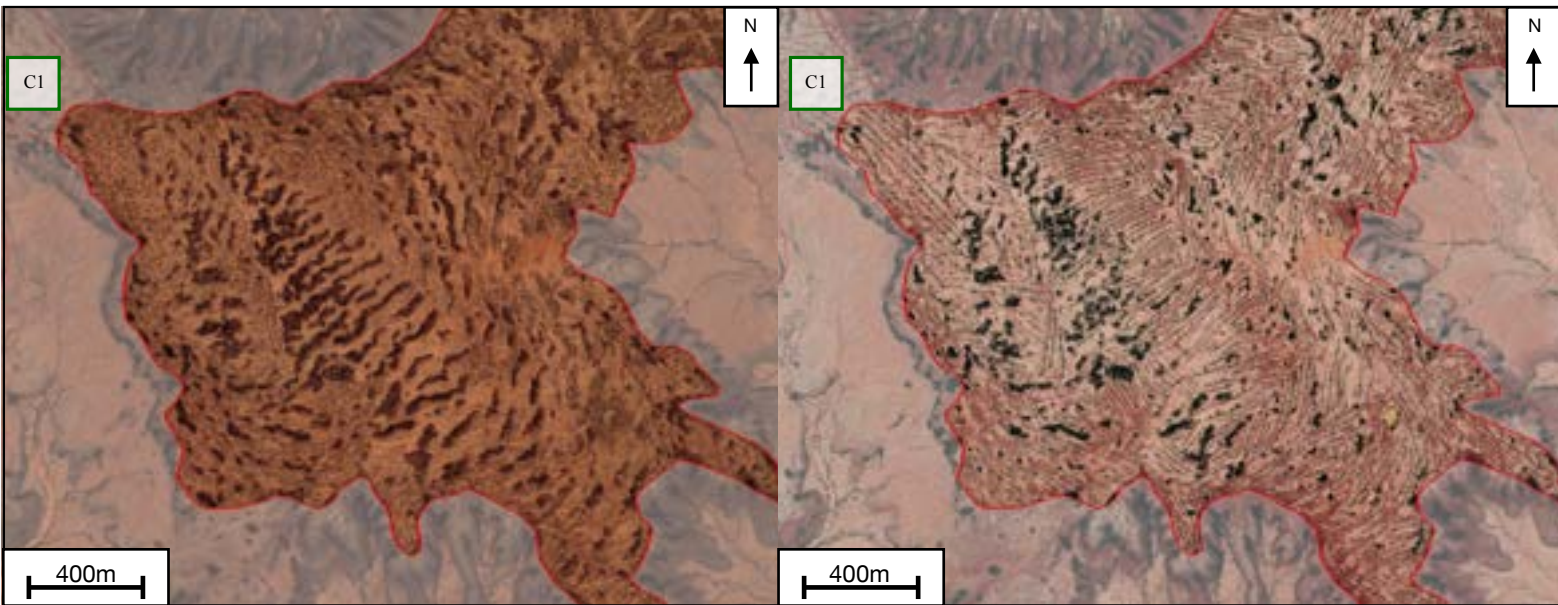
² IRD — Notre identité. 2022. <https://www.ird.fr/notre-identite>

³ IRD Niger — Présentation de l'IRD au Niger. 2022. <https://www.ird.fr/niger/presentation>

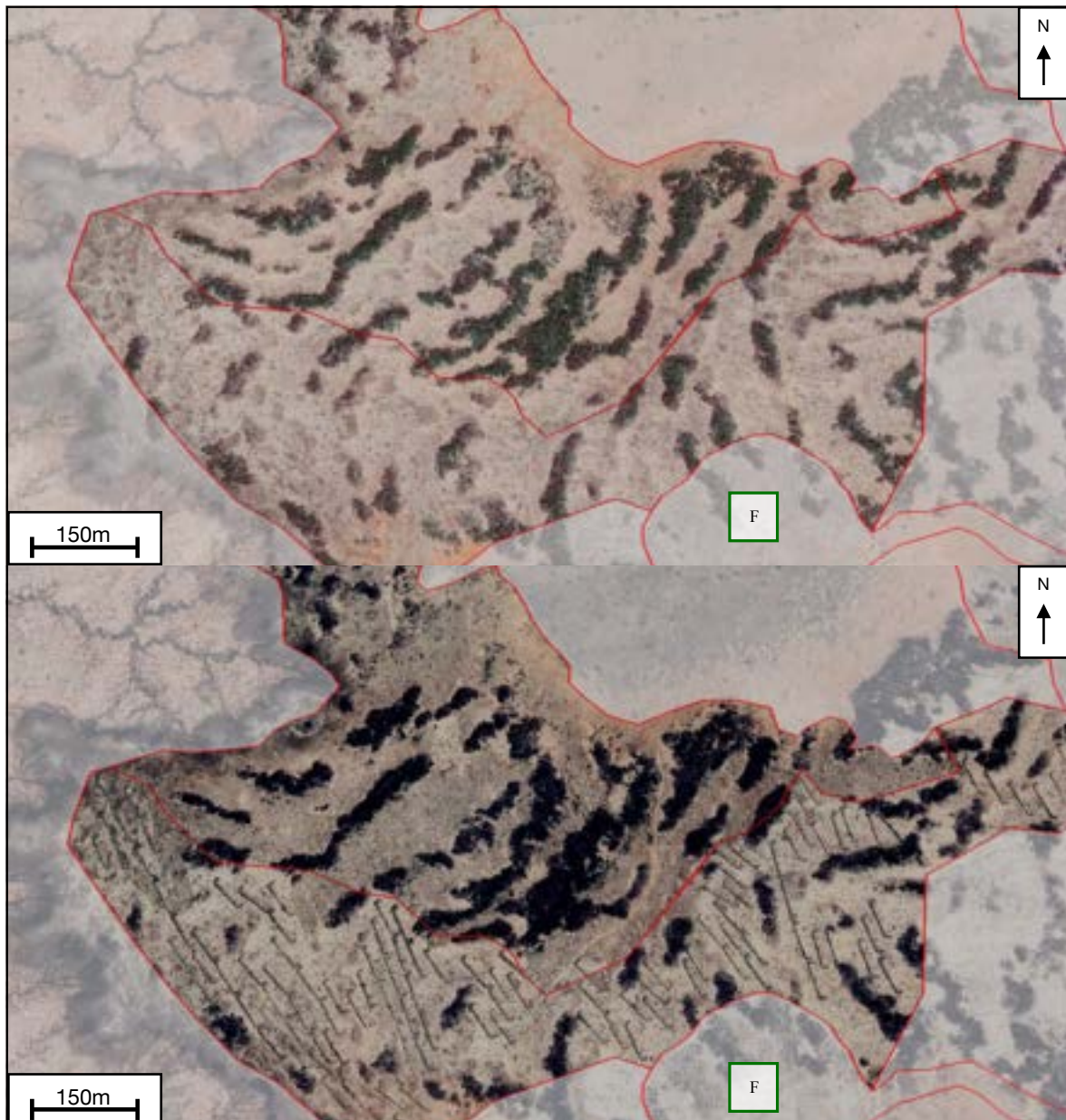
⁴ Laboratoire PACTE — Projet scientifique. 2022. <https://www.pacte-grenoble.fr/page/projet-scientifique>



Annexe 2. Site d'étude N°3 : Bassin versant de Keïta à l'Est de Tahoua.



Annexe 3. Evolution de la zone C2 entre décembre 2002 (à gauche) et novembre 2018 (à droite) sur le site de Niamey. Cette annexe nous permet de garder à l'esprit que pendant la période qui précède notre étude (avant 2018), la brousse tigrée a connu un important déclin.
Sources des données : images satellites Google Earth (2002-2018).

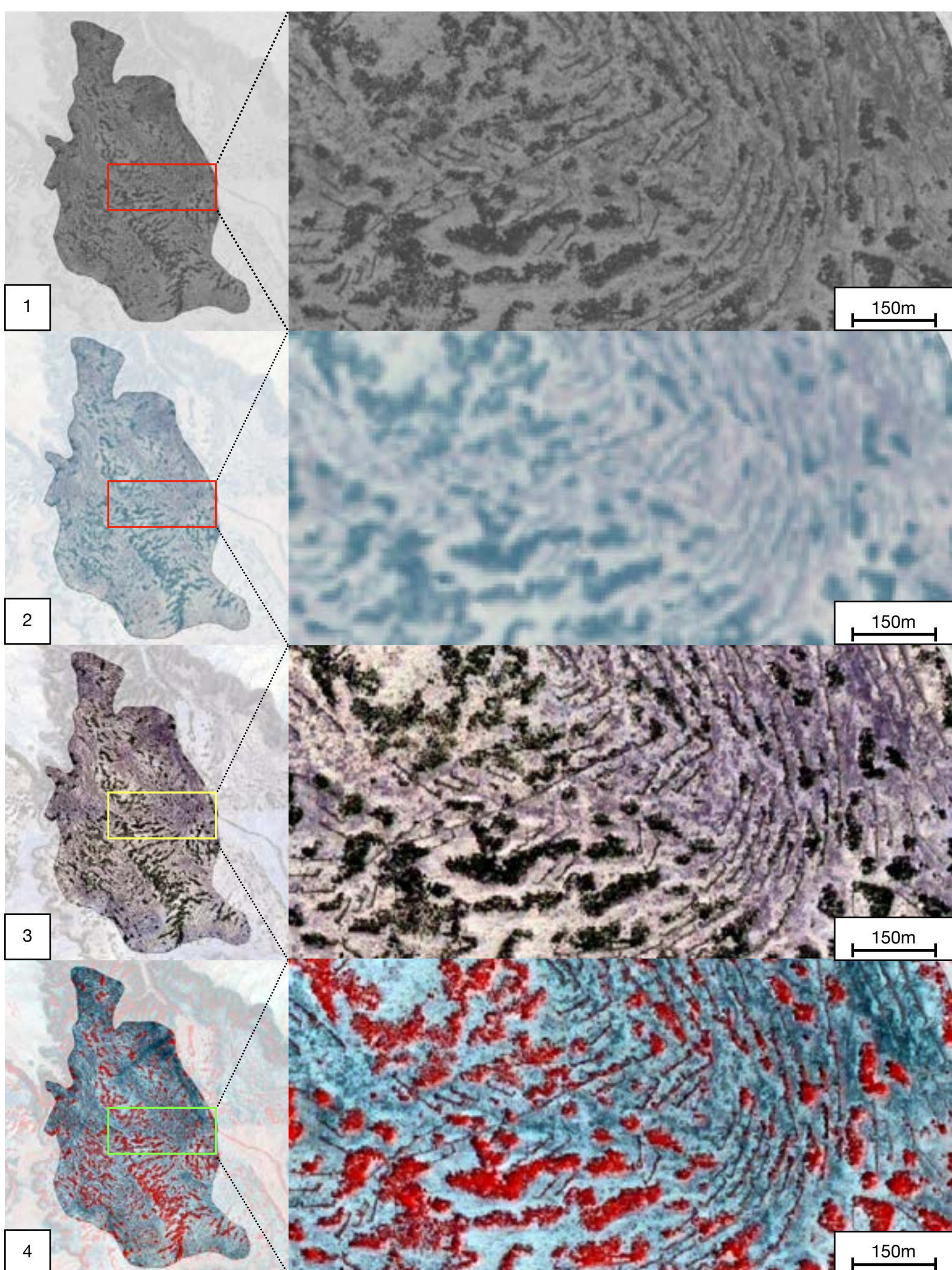


Annexe 4. Evolution des zones C et E entre janvier 2010 (en haut) et février 2019 (en bas) sur le site de Guileyni. Ici, les bandes de brousse tigrée ont subi moins de dégâts qu'à Niamey. Les ouvrages ont été implantés directement entre les bandes de végétation.
Sources des données : images satellites Google Earth (2010-2019).

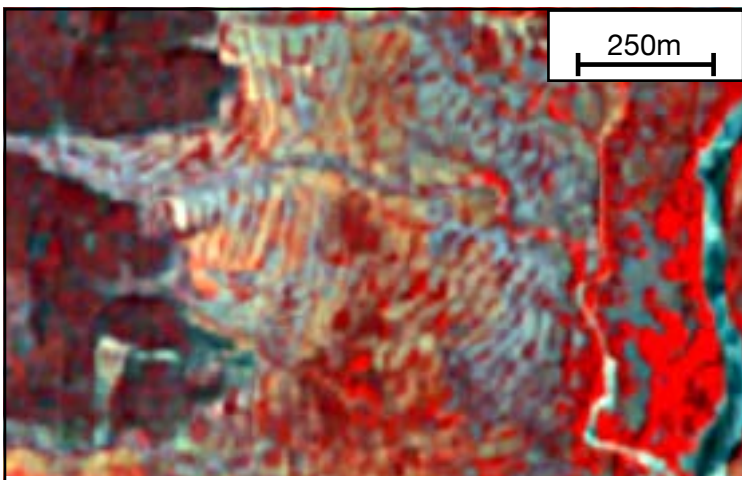
Satellite	Domaine	Résolution spectrale	Bande	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Fauchée
SPOT 6,7	Optique	Panchromatique	Visible	1,5m	26 jours	60 km
		Multispectrale	Bleu Vert Rouge Proche-infrarouge	6m		
Sentinel-2	Optique	Multispectrale	Bande 2 – Bleu	10m	5 jours	290 km
			Bande 3 – Vert			
			Bande 4 – Rouge			
			Bande 5 – Vegetation Red Edge	20m		
			Bande 6 – Vegetation Red Edge			
			Bande 7 – Vegetation Red Edge			
			Bande 8 – NIR	10m		
			Bande 8A – Vegetation Red Edge	20m		
			Bande 11 – SWIR			
			Bande 12 – SWIR			

Logiciels de système d'information géographique utilisés : QGis (en priorité), ArcGis.
Outils de télédétection : Orfeo ToolBox (en priorité), SAGA GIS, GRASS.

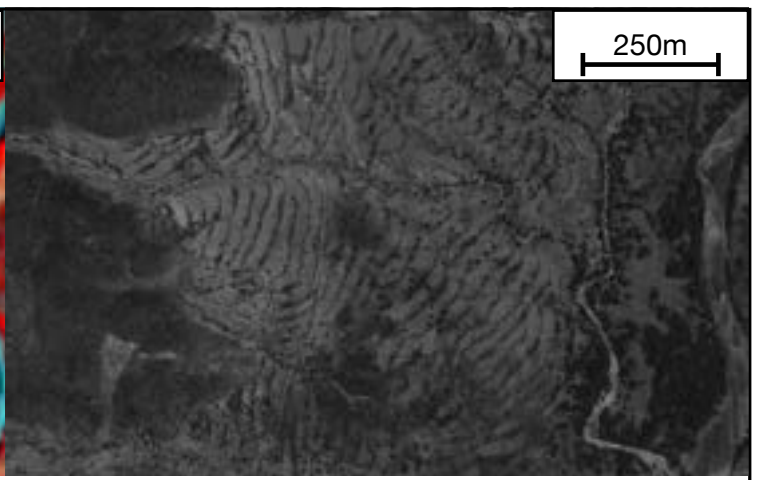
Annexe 5. Caractéristiques techniques des capteurs des satellites utilisés dans ce mémoire et outils géomatiques utilisés.



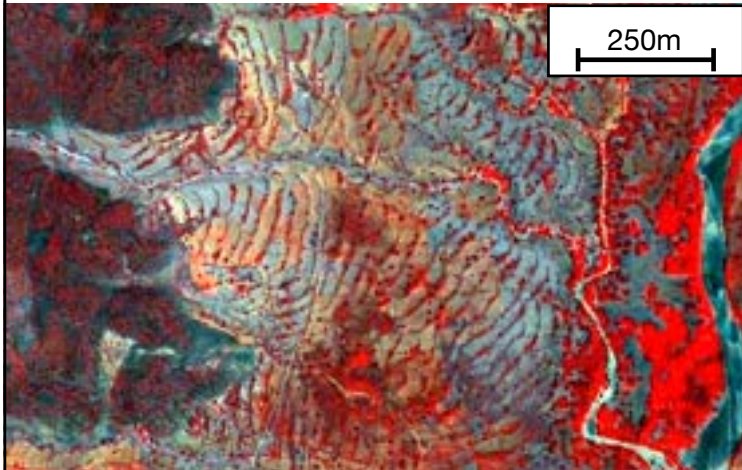
Annexe 6. Illustration et agrandissement du produit **SPOT** pour la zone A (Niamey) avec la bande **panchromatique** (1), les bandes **multispectrales** assemblées en composition vraie-couleur (2), le résultat du **pansharpening** (3) et la **composition fausse-couleur** post-pansharpening (4).



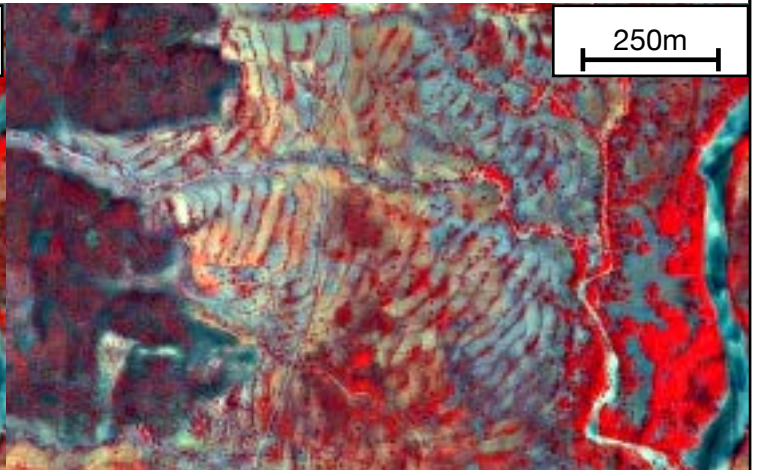
Multispectral (sharpen)



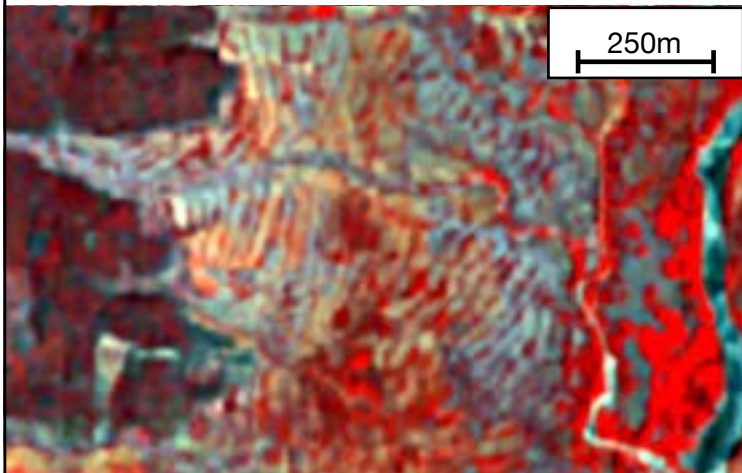
Panchromatic (original)



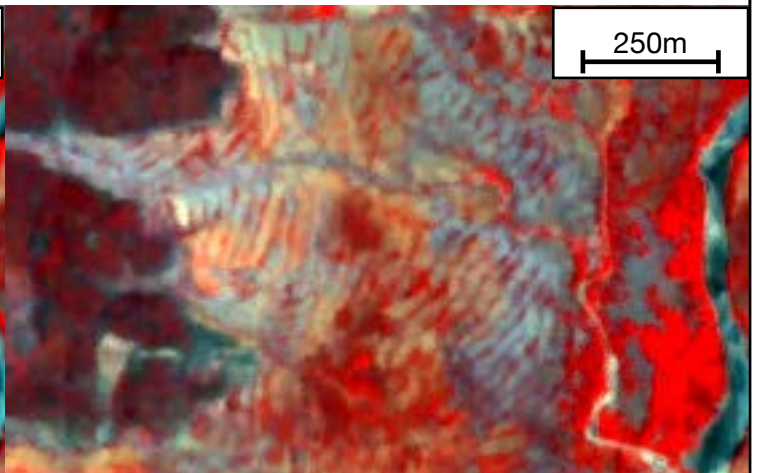
Bayesian pansharpener



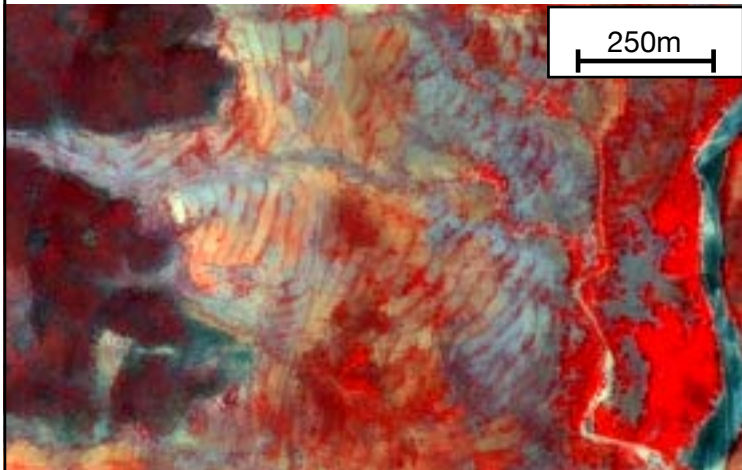
Ratio Component Substitution (RCS) pansharpener



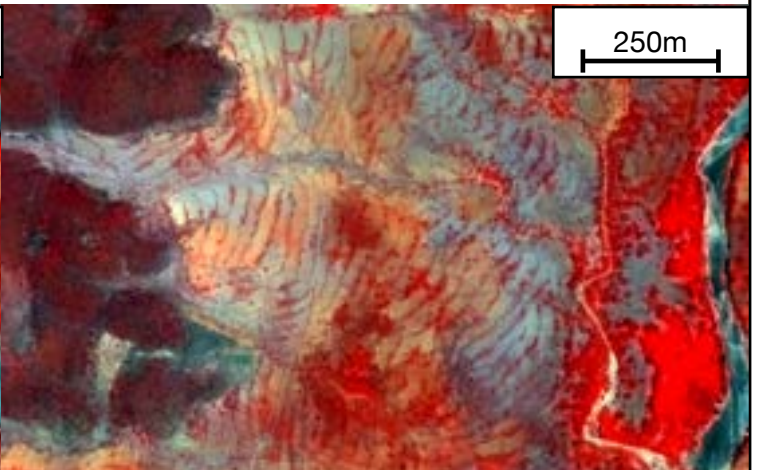
Local Mean and Variance Matching (LMVM) pansharpener r1



Local Mean and Variance Matching (LMVM) pansharpener r3

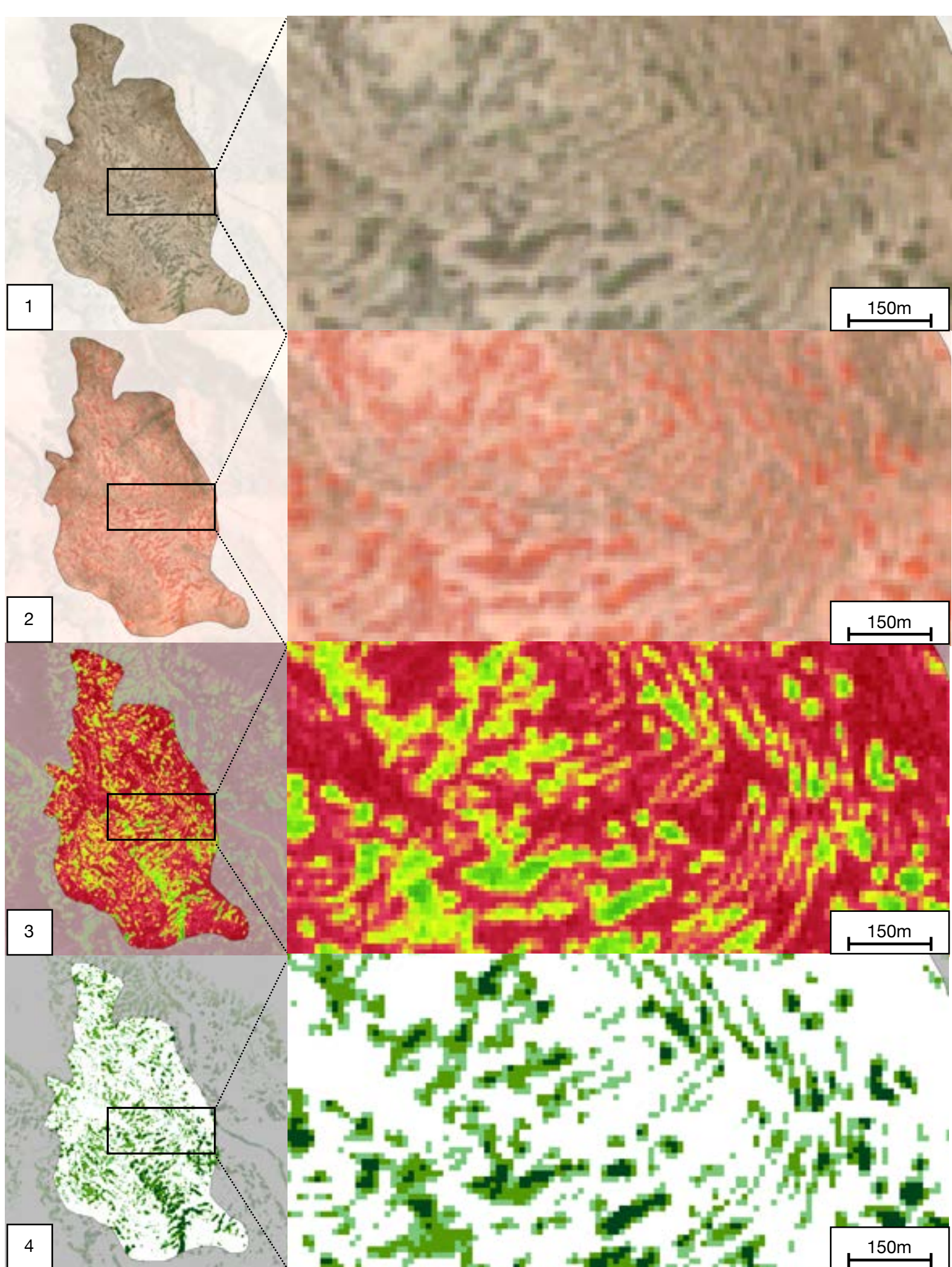


Local Mean and Variance Matching (LMVM) pansharpener r6

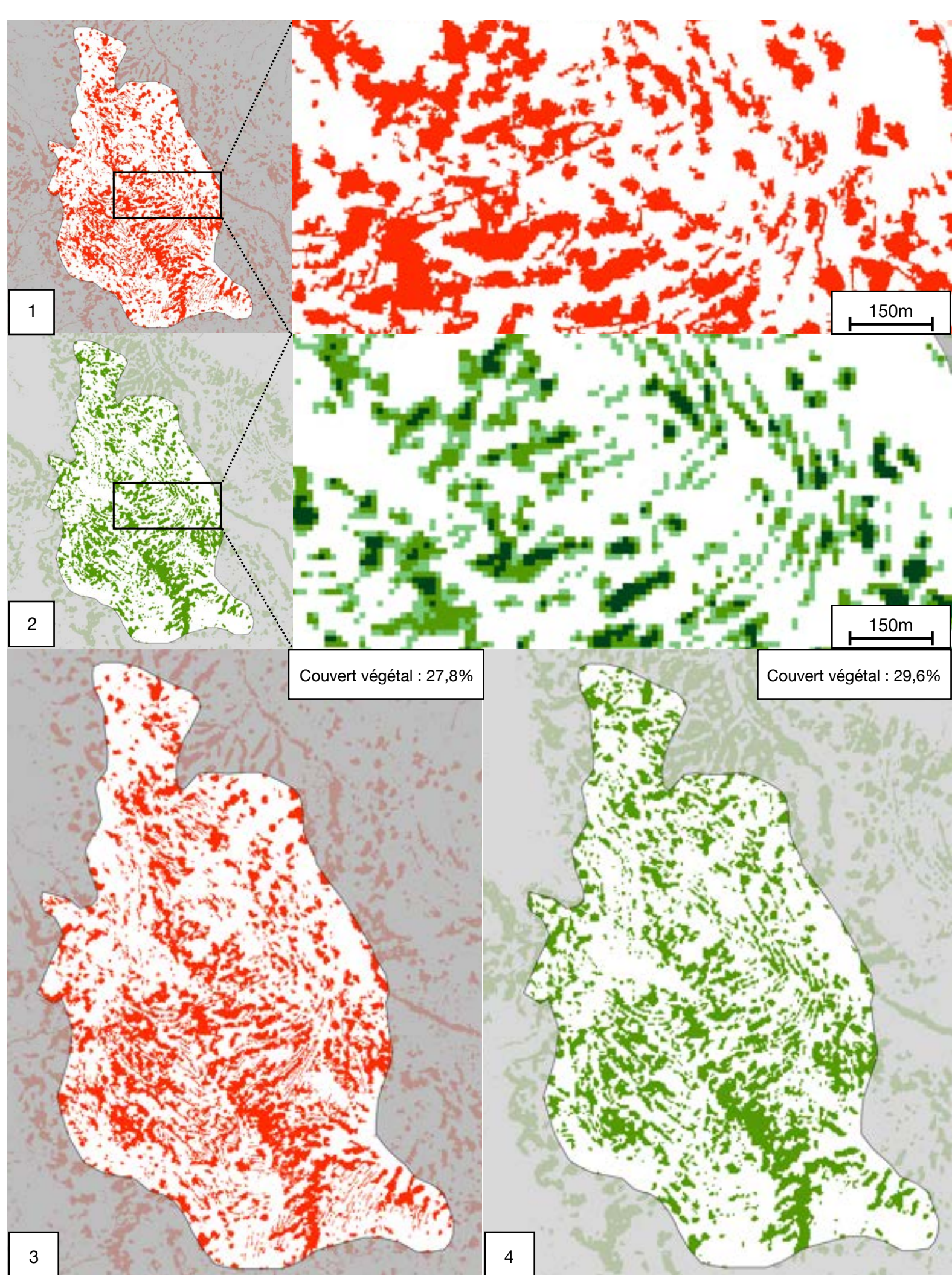


Local Mean and Variance Matching (LMVM) pansharpener r10

Annexe 7. Comparaison des différents algorithmes de **pansharpener** au sein de l’outil OTB Pansharpener à partir des bandes multispectrales affûtées et de la bande panchromatique originale du produit **SPOT6**.



Annexe 10. Illustration et agrandissement du produit **Sentinel-2** pour la zone A (Niamey) avec une **composition vraie-couleur** (1), une **composition fausse-couleur** (2), l'indice NDVI (3) et le résultat de la **classification** en quatre classes (4).



Annexe 11. Comparaison de la classification **SPOT** (1) (image juillet 2016) avec la classification **Sentinel-2** (2) (image juillet 2018) pour la zone B (Niamey) avec agrandissement et résultats du calcul de superficie totale de la végétation (3) (4).

Guide d'entretien collectif à l'endroit des autorités coutumières et assemblée villageoise

Village..... **Date**.....

1. A quand remonte les ouvrages antiérosifs dans le terroir et sur les sommets des plateaux en particulier ?
2. Comment était l'état du sommet du plateau avant la réalisation des ouvrages ?
3. Quel est l'état actuel de la végétation et des ouvrages sur les sommets des plateaux ?
4. Citez les effets induits par les ouvrages : en termes de végétation et du ravinement
5. La présence des ouvrages des banquettes et demi-lunes sur les plateaux a-t-elle favorisé le développement des activités agricoles sur les unités aval ? Justifiez votre réponse.
6. Y'a-t-il eu des plantations au niveau des ouvrages de banquettes et demi-lunes ? Si oui, quel type d'espèce ?
7. Quel type de végétation se développe sur les ouvrages de banquettes et demi-lunes ?
8. Le comité de gestion est-il fonctionnel ?
9. Quels sont le ou les types d'entretiens réalisés au niveau des sites aménagés (colmatage des ouvrages dégradés) ?
10. Selon vous, quels sont les facteurs déterminants l'efficacité des ouvrages des banquettes et demi-lunes sur les sommets des plateaux ?

Annexe 12. Guide d'entretien utilisé lors des campagnes de terrain à Niamey et Guileyni.
Source : *Salek Seidi Ousseini* (mai 2022).



Annexe 13A. *Gueira senegalensis* coupée sur le plateau de la zone C2 (site Niamey).
Source : Salek (2022).



Annexe 13B. Demi-lune disposées sur le plateau de Yawaré (zone W1), site de Niamey.
Source : Salek (2022).



Annexe 13C. Trace de coupe sur un *Acacia seyal* qui pousse sur une banquette construite en 2005, zone W1 (Niamey).
Source : Salek (2022).



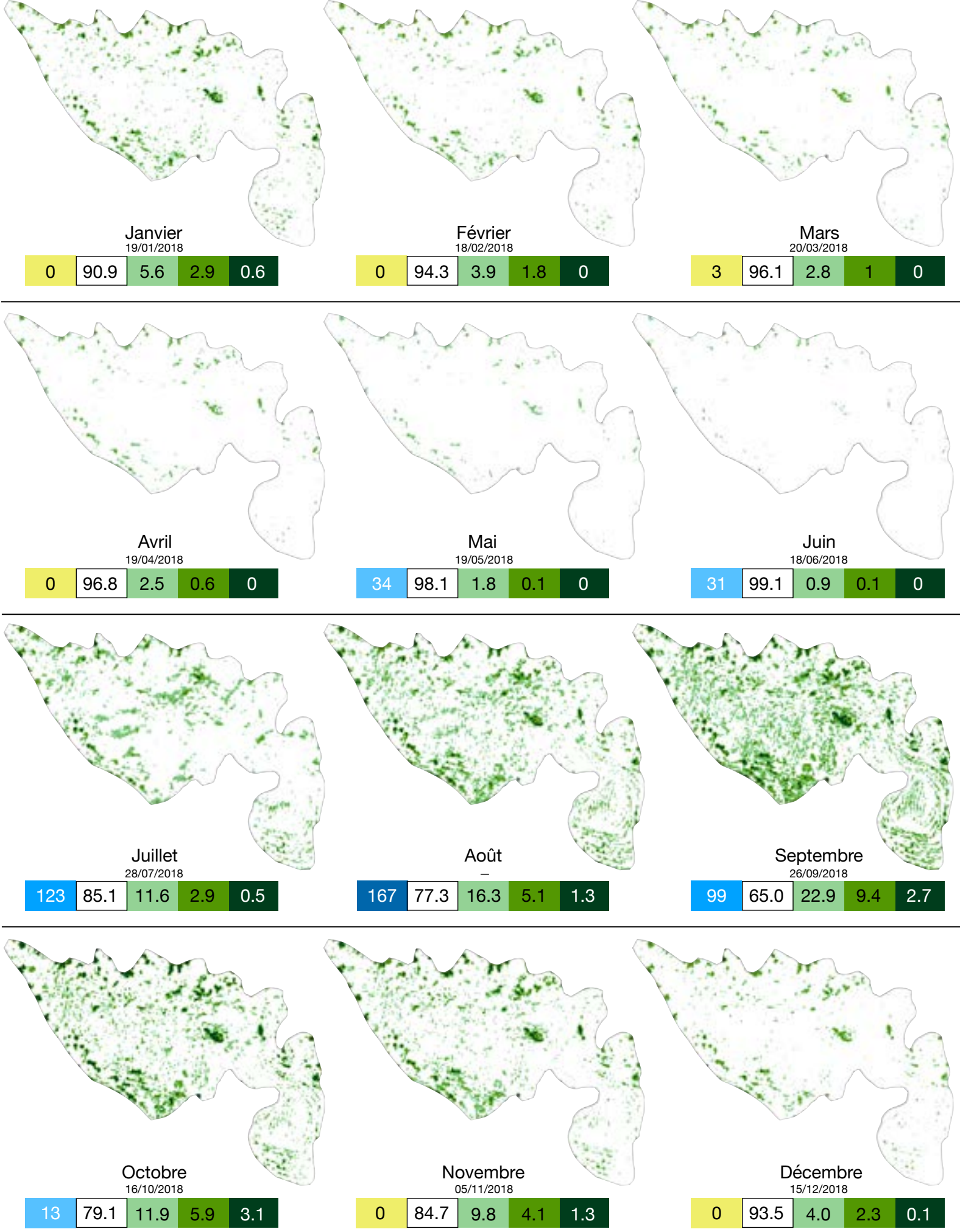
Annexe 13D. Banquette en bon état surmontée d'*Acacia seyal* de plus d'une dizaine d'années, zone W1 (Niamey).
Source : Salek (2022).



Annexe 13E. Bourrelet d'une banquette recouvert par *Laptadenia hastata*, zone N1 (Niamey).
Source : Salek (2022).

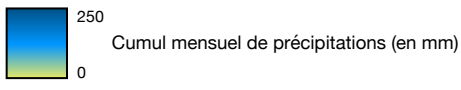


Annexe 13F. Présence de *Senna occidentalis* et *Laptadenia hastata* sur le plateau de Bougoum, zone N1 (Niamey).
Source : Salek (2022).

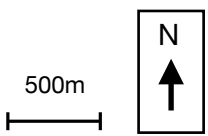


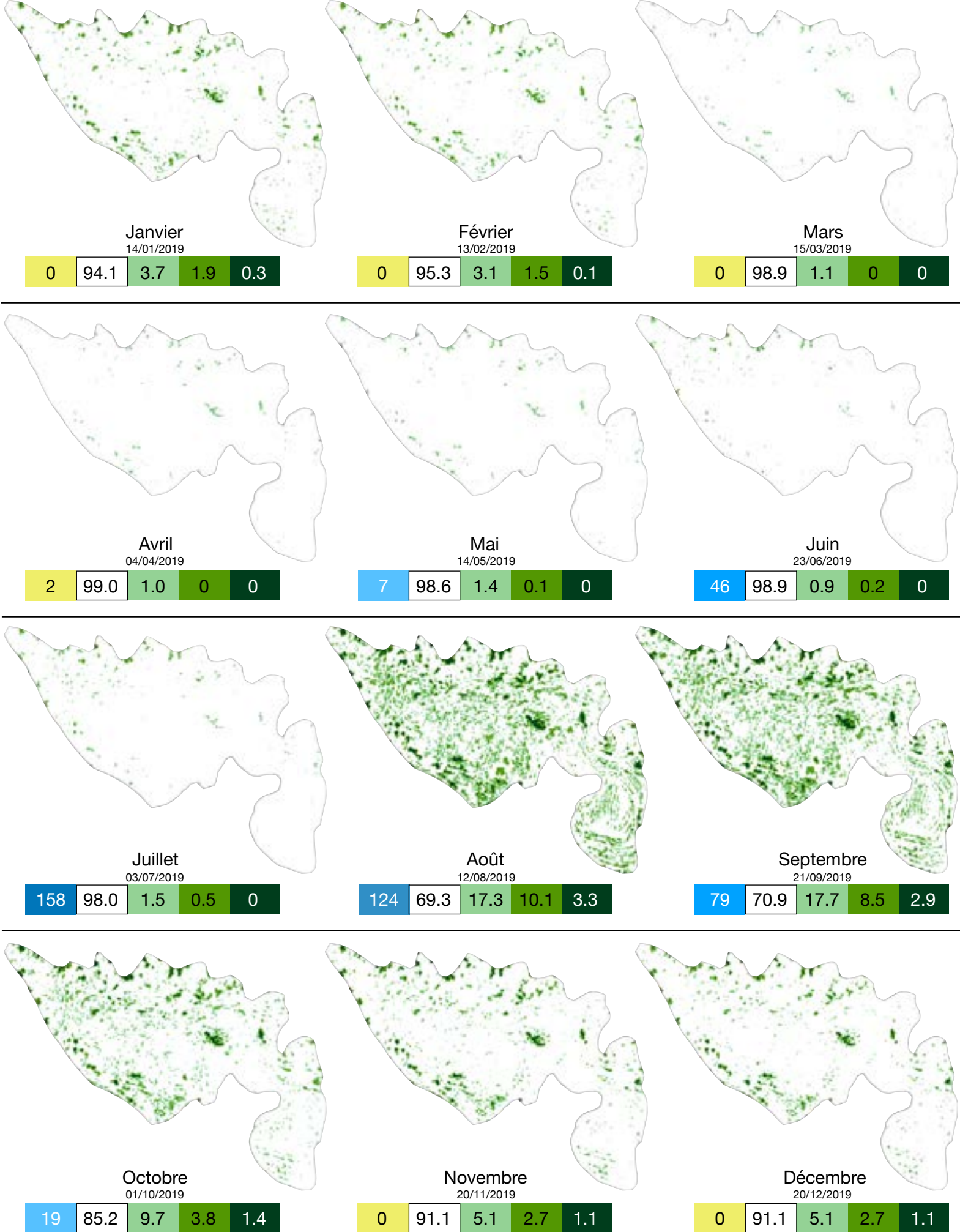
Annexe 14. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation TSAVI et NDVI calculés à partir d'images Sentinel-2 pour la zone W1 en 2018 :

- Pas de végétation
- Végétation diverse à proximité des ouvrages
- Brousse tigrée en formation
- Brousse tigrée



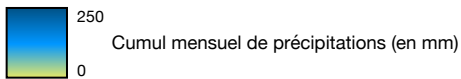
Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.



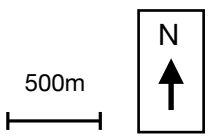


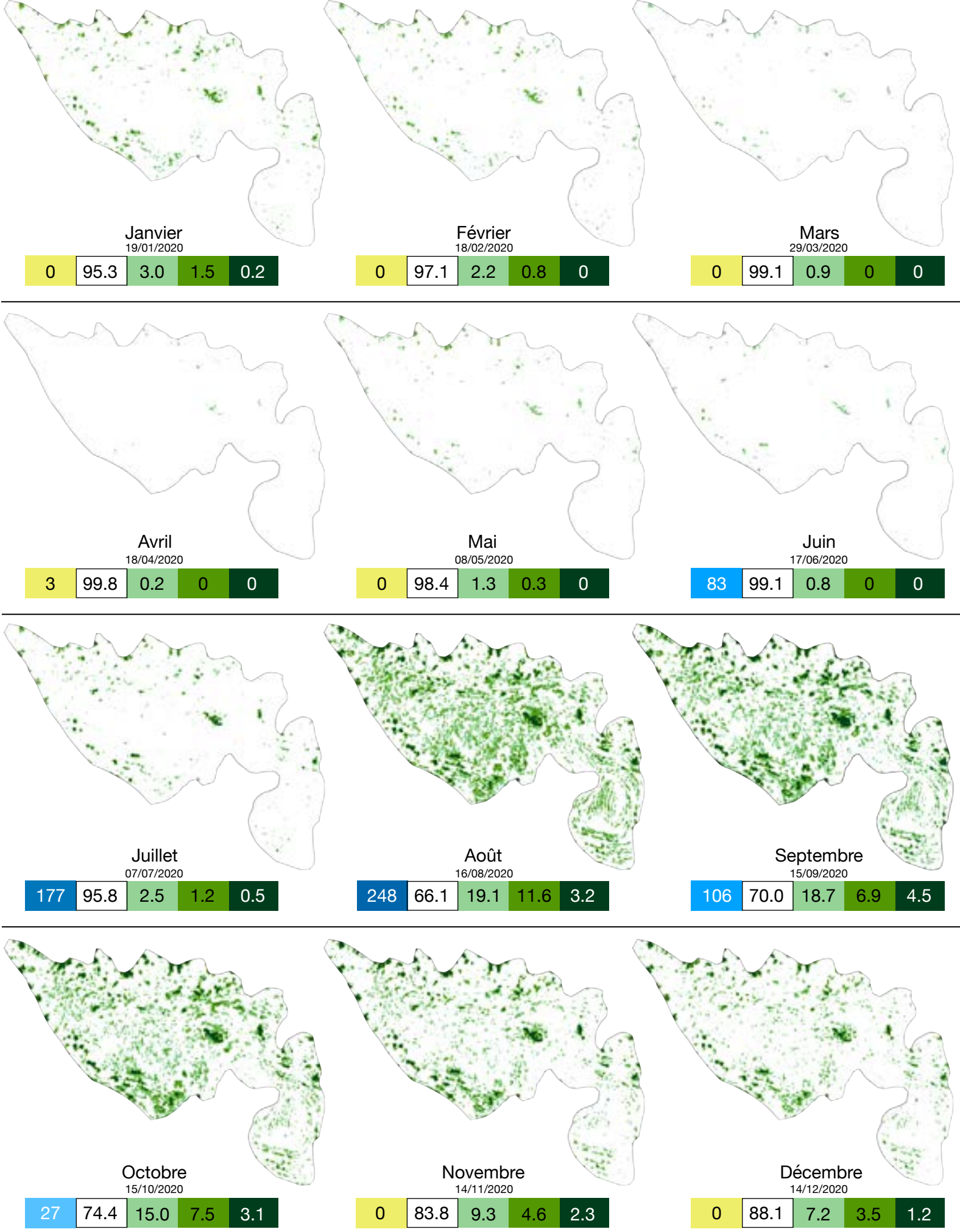
Annexe 15. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation TSAVI et NDVI calculés à partir d'images Sentinel-2 pour la zone W1 en 2019 :

- Pas de végétation
- Végétation diverse à proximité des ouvrages
- Brousse tigrée en formation
- Brousse tigrée



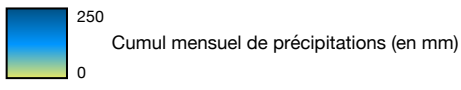
Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.



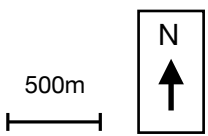


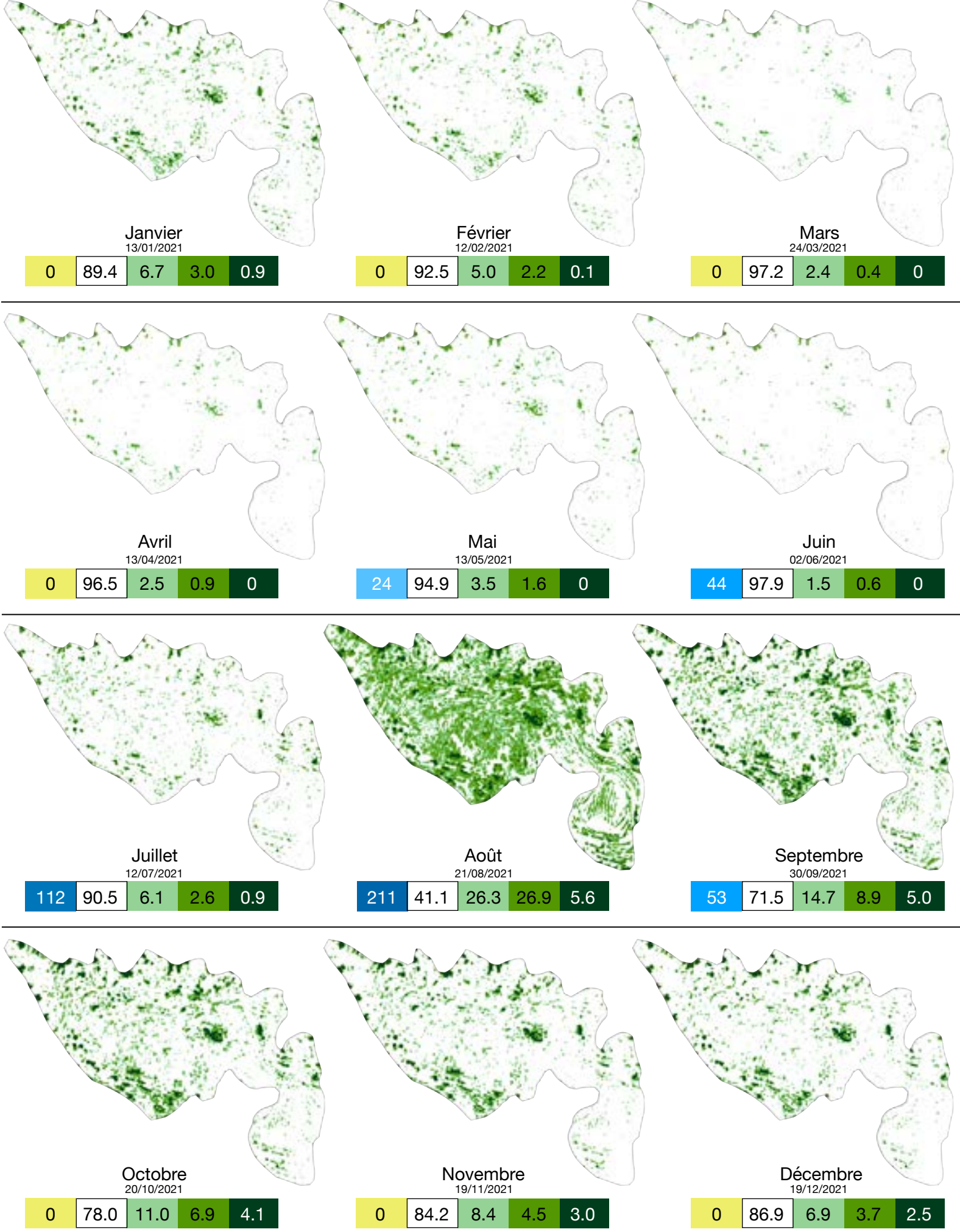
Annexe 16. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation TSAVI et NDVI calculés à partir d'images Sentinel-2 pour la zone W1 en 2020 :

- Pas de végétation
- Végétation diverse à proximité des ouvrages
- Brousse tigrée en formation
- Brousse tigrée



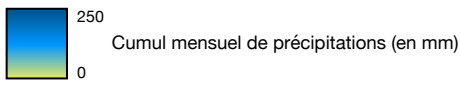
Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.



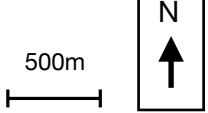


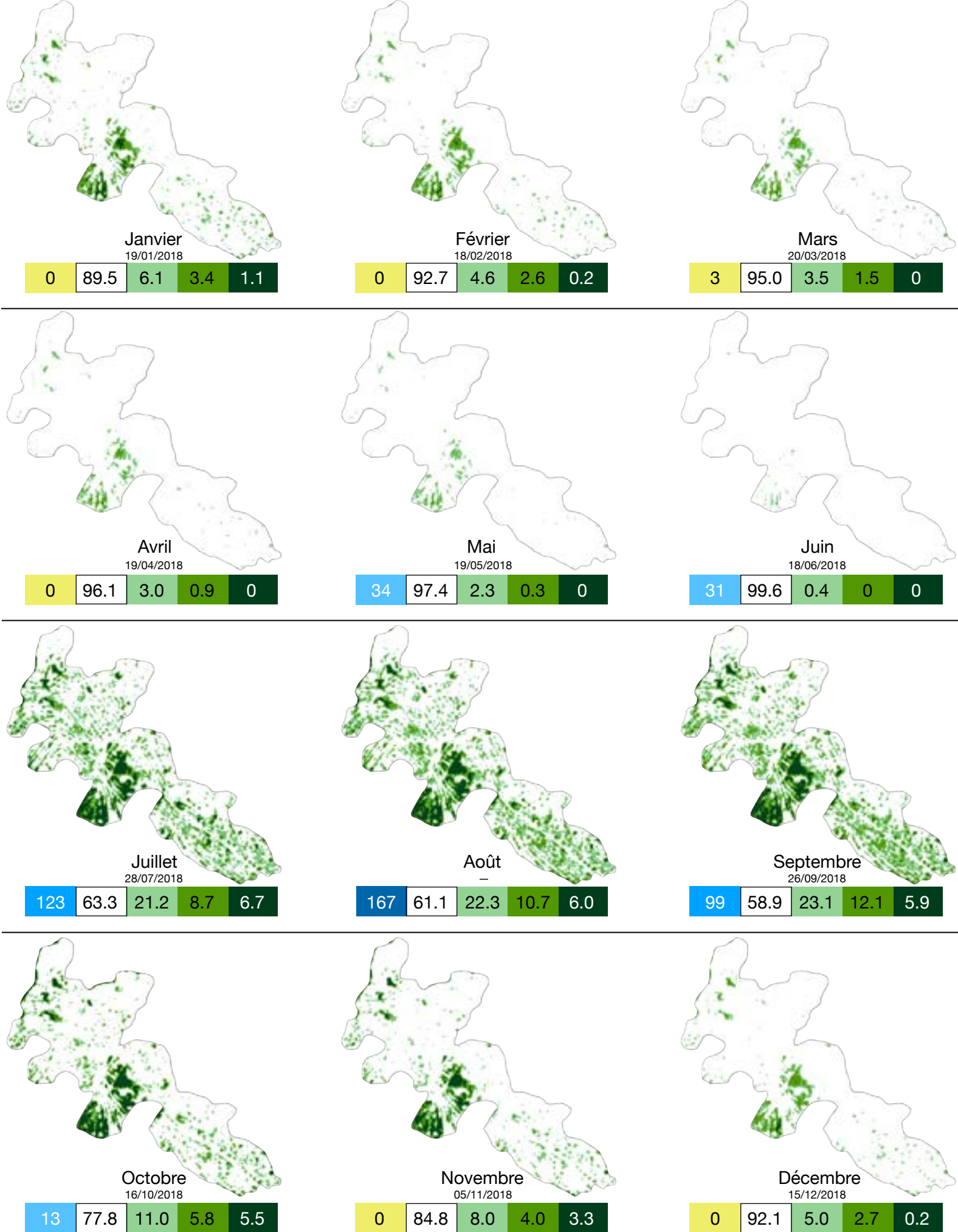
Annexe 17. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation TSAVI et NDVI calculés à partir d'images Sentinel-2 pour la zone W1 en 2021 :

- Pas de végétation
- Végétation diverse à proximité des ouvrages
- Brousse tigrée en formation
- Brousse tigrée



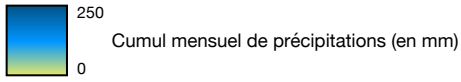
Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.



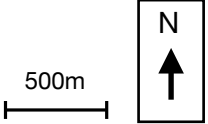


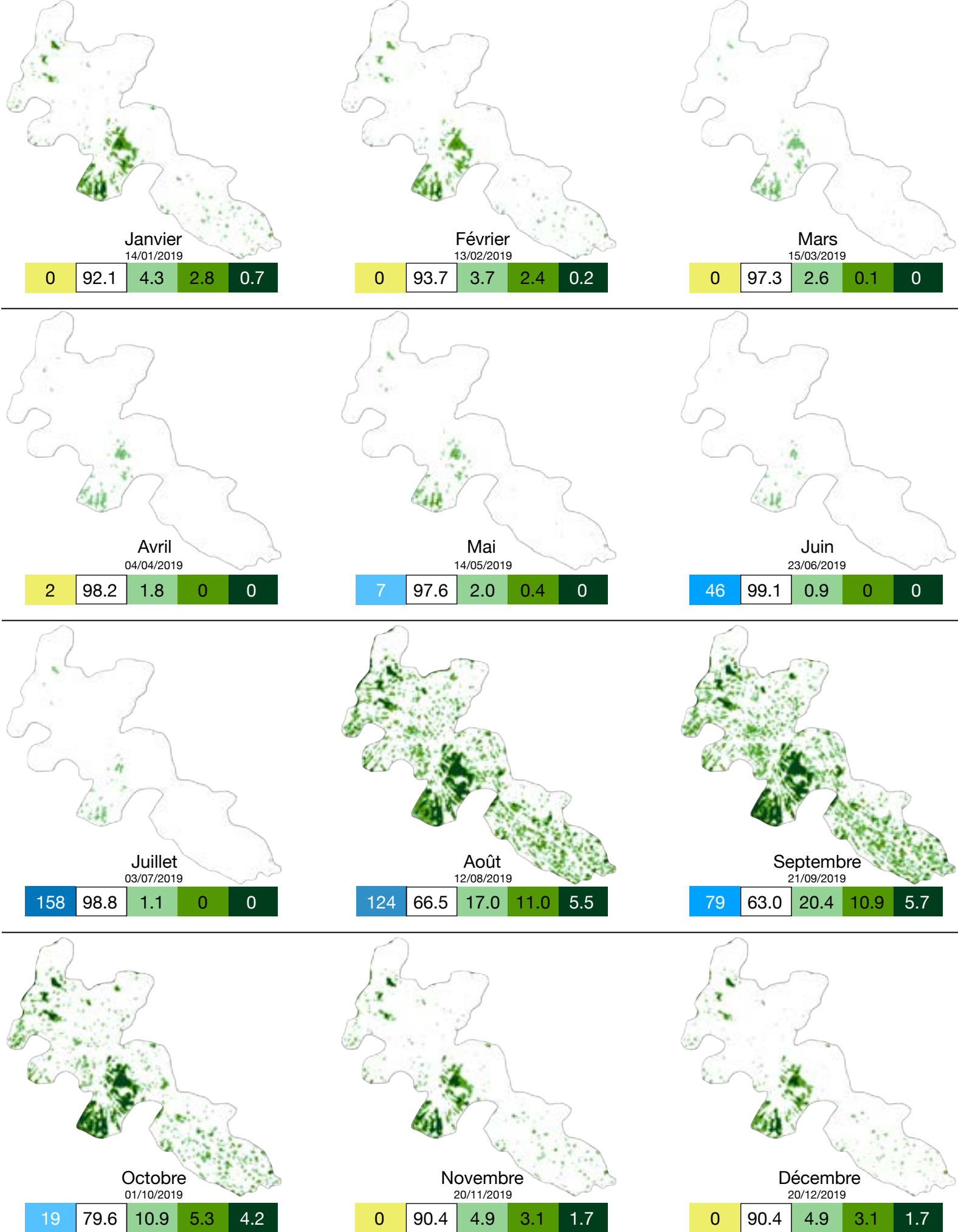
Annexe 18. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation TSAVI et NDVI calculés à partir d'images Sentinel-2 pour la zone N1 en 2018 :

- Pas de végétation
- Végétation diverse à proximité des ouvrages
- Brousse tigrée en formation
- Brousse tigrée



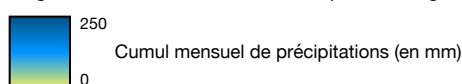
Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.



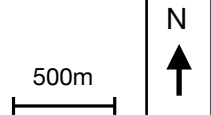


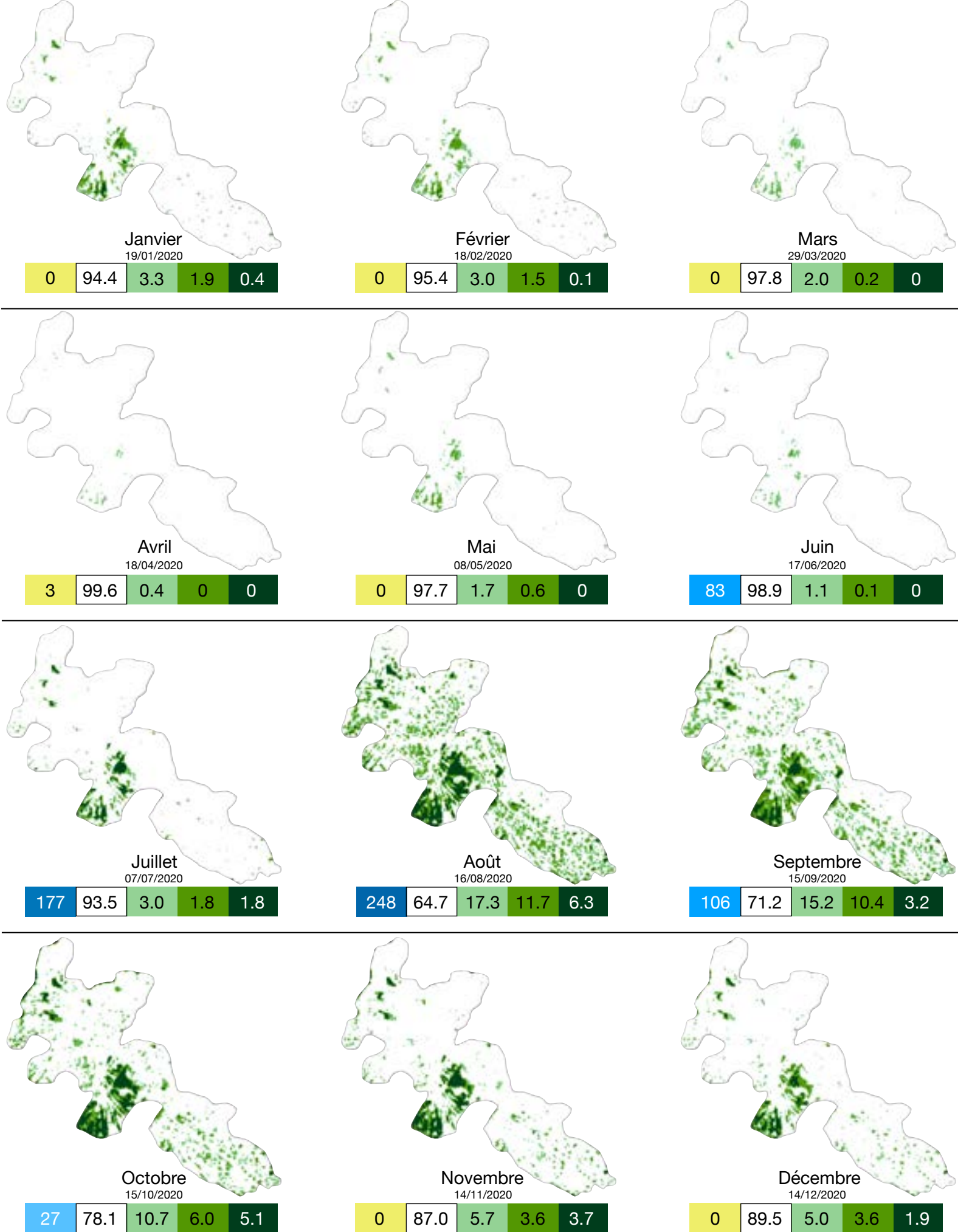
Annexe 19. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation TSAVI et NDVI calculés à partir d'images Sentinel-2 pour la zone N1 en 2019 :

- Pas de végétation
- Végétation diverse à proximité des ouvrages
- Brousse tigrée en formation
- Brousse tigrée



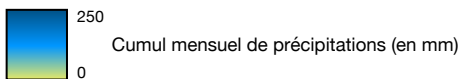
Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.



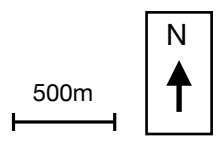


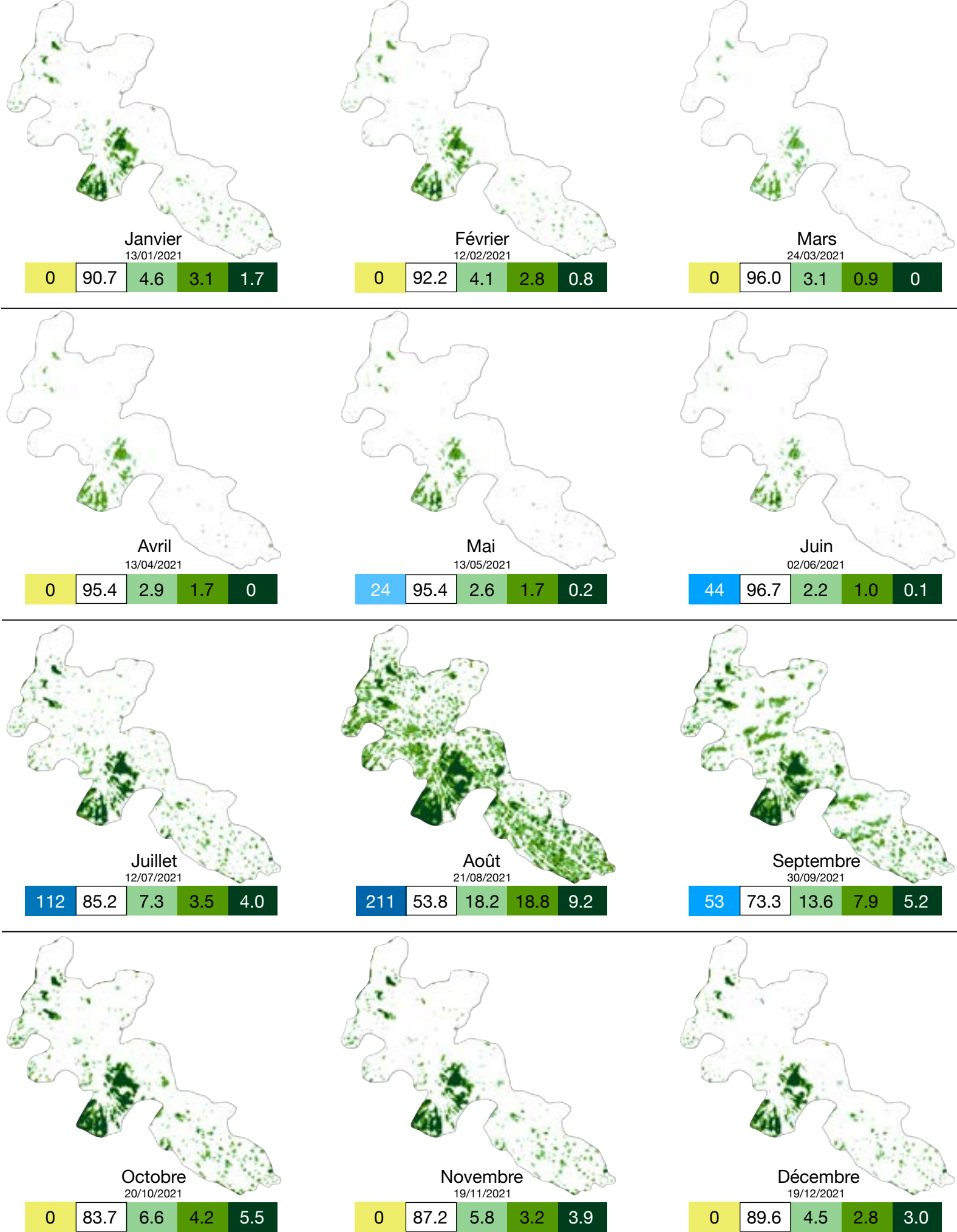
Annexe 20. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation TSAVI et NDVI calculés à partir d'images Sentinel-2 pour la zone N1 en 2020 :

- Pas de végétation
- Végétation diverse à proximité des ouvrages
- Brousse tigrée en formation
- Brousse tigrée



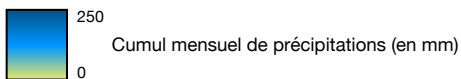
Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.



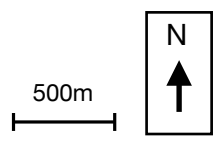


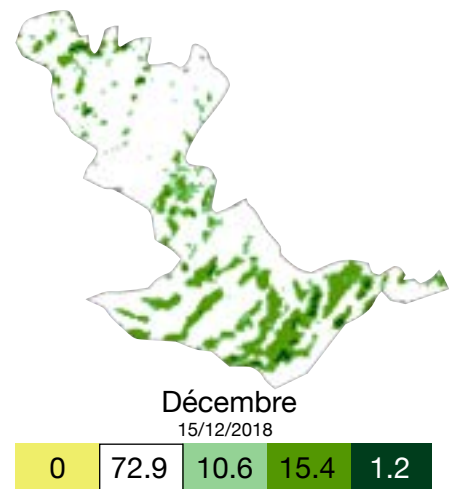
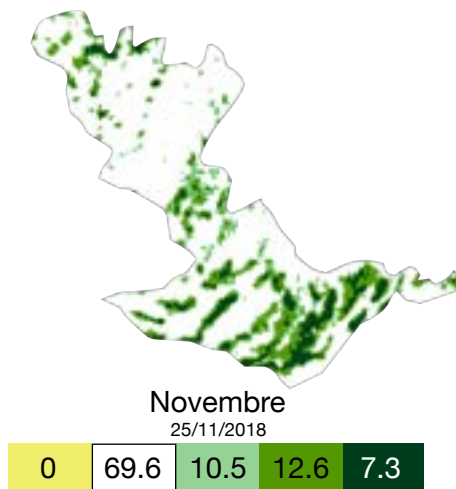
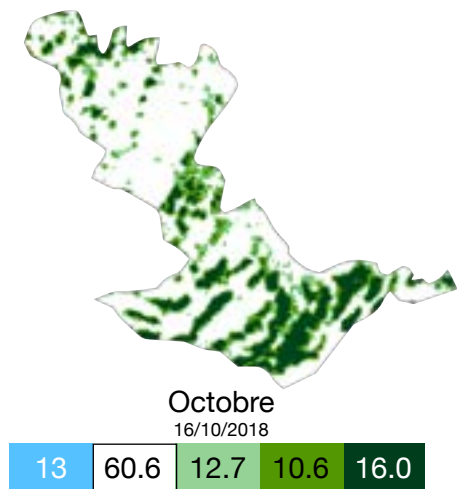
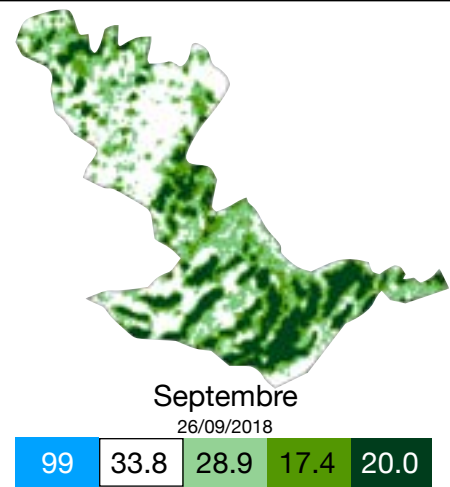
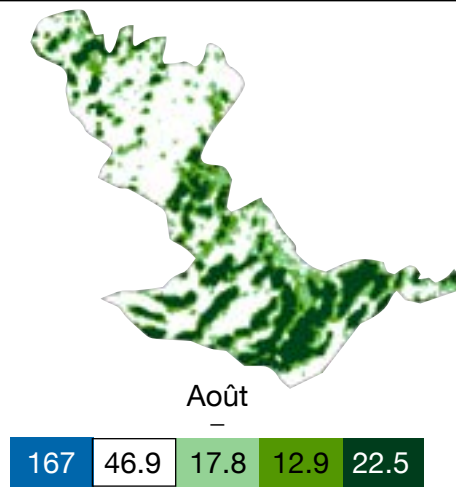
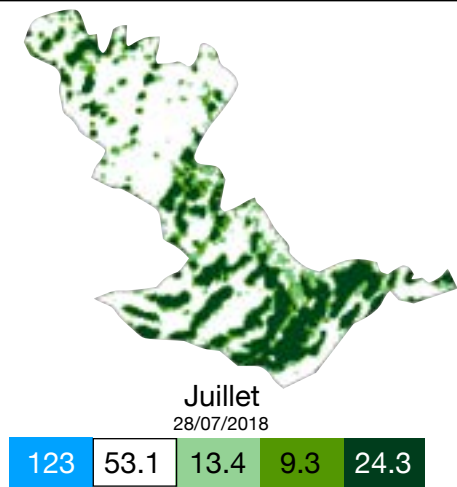
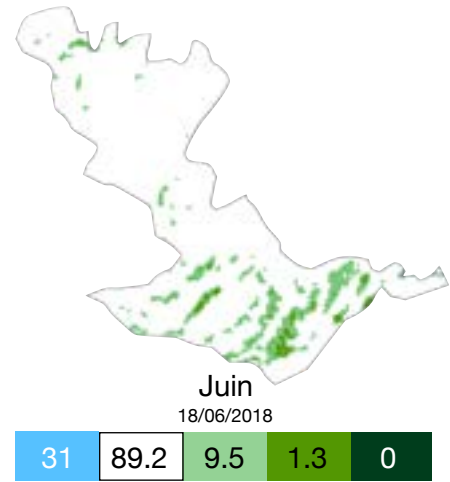
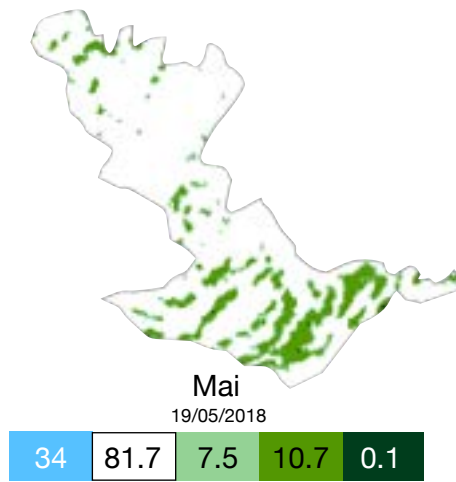
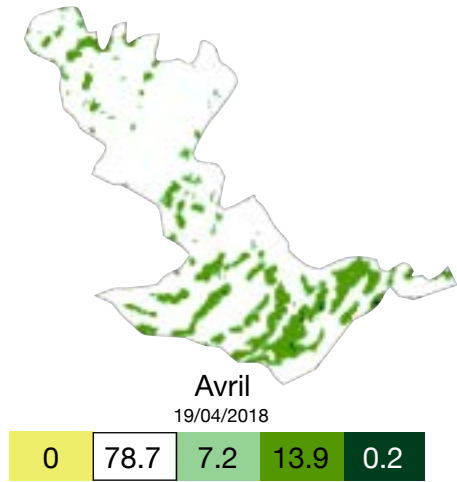
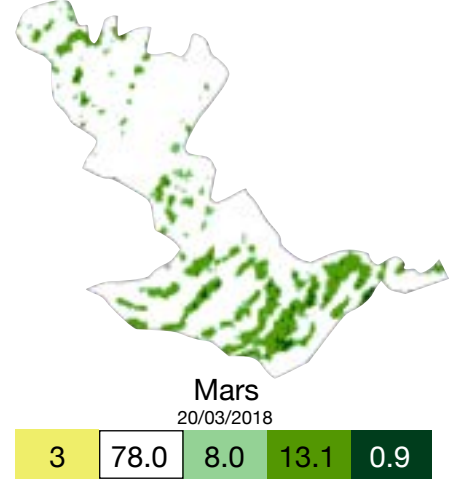
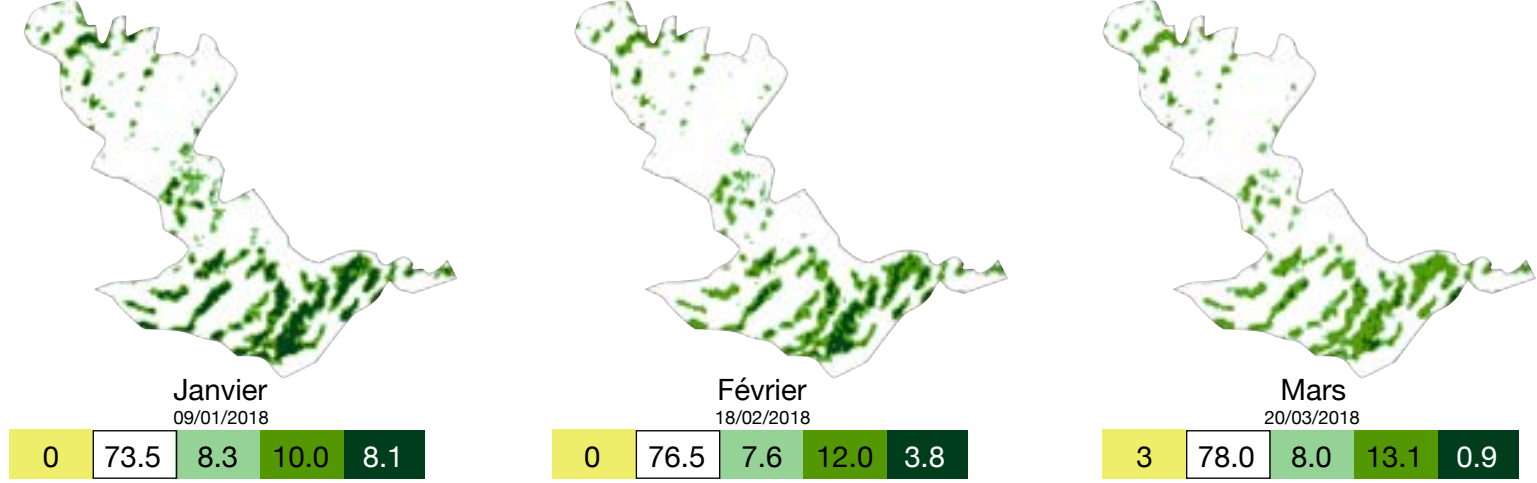
Annexe 21. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation TSAVI et NDVI calculés à partir d'images Sentinel-2 pour la zone N1 en 2021 :

- Pas de végétation
- Végétation diverse à proximité des ouvrages
- Brousse tigrée en formation
- Brousse tigrée



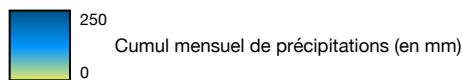
Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.



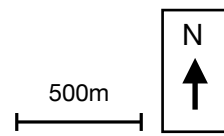


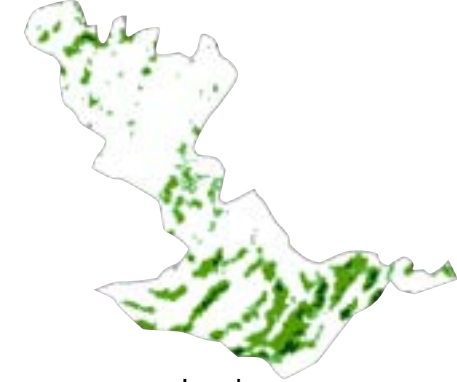
Annexe 22. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation TSAVI et NDVI calculés à partir d'images Sentinel-2 pour la zone C en 2018 :

- Pas de végétation
- Végétation diverse à proximité des ouvrages
- Brousse tigrée en formation
- Brousse tigrée

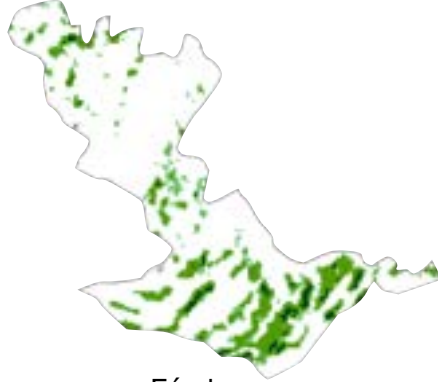
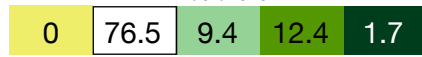


Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.

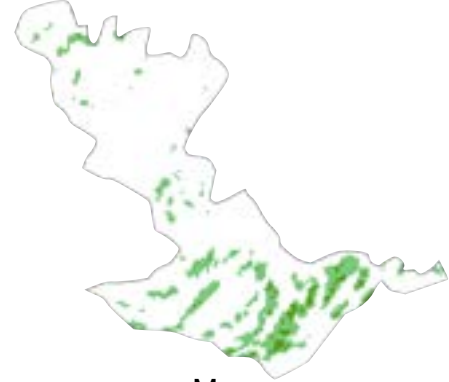
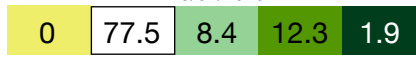




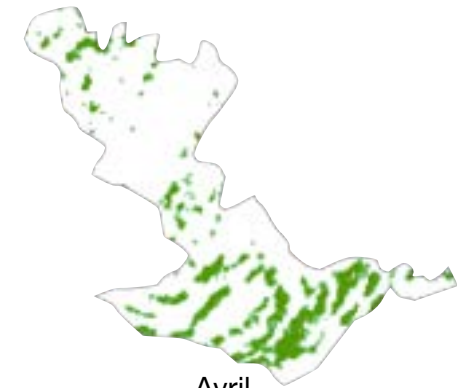
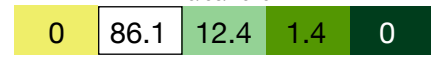
Janvier
14/01/2019



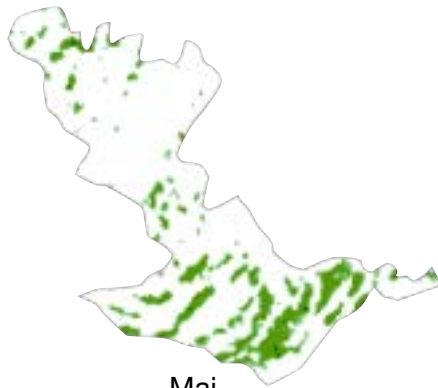
Février
13/02/2019



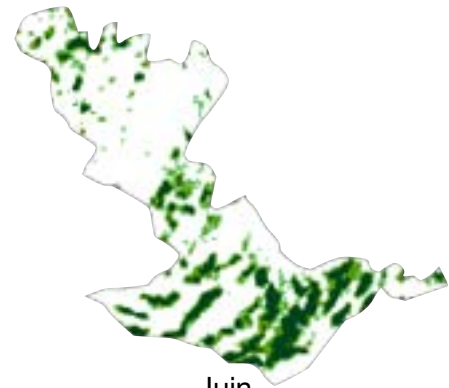
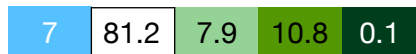
Mars
15/03/2019



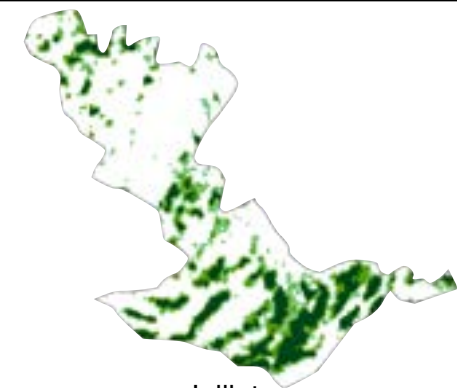
Avril
04/04/2019



Mai
14/05/2019



Juin
23/06/2019



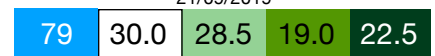
Juillet
03/07/2019



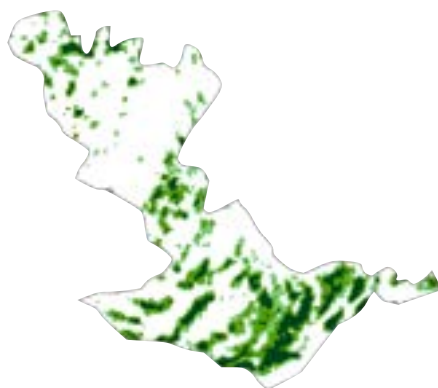
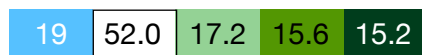
Août
12/08/2019



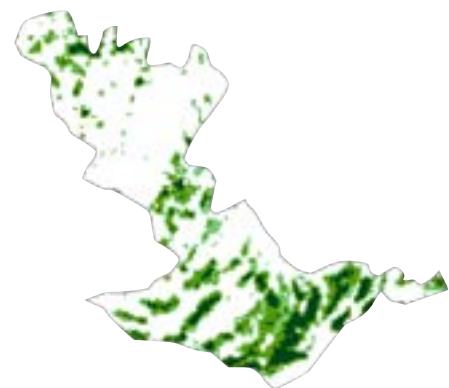
Septembre
21/09/2019



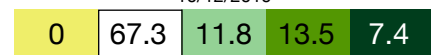
Octobre
-



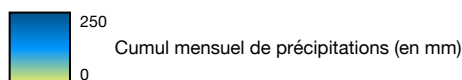
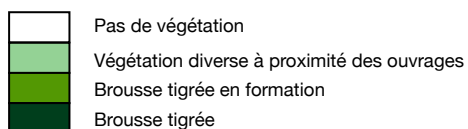
Novembre
20/11/2019



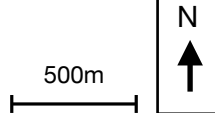
Décembre
10/12/2019

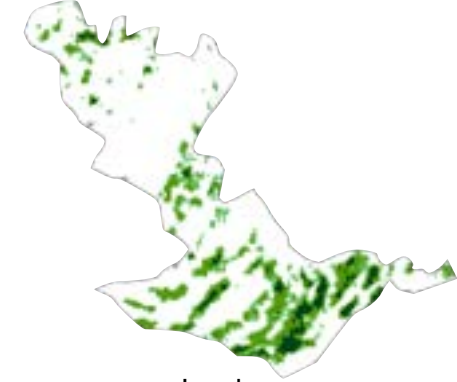


Annexe 23. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation TSAVI et NDVI calculés à partir d'images Sentinel-2 pour la zone C en 2019 :

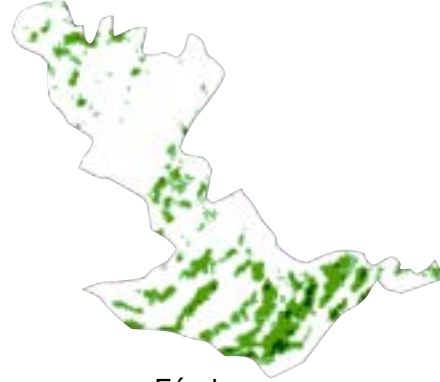
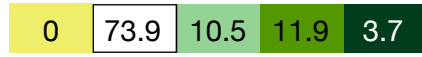


Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.

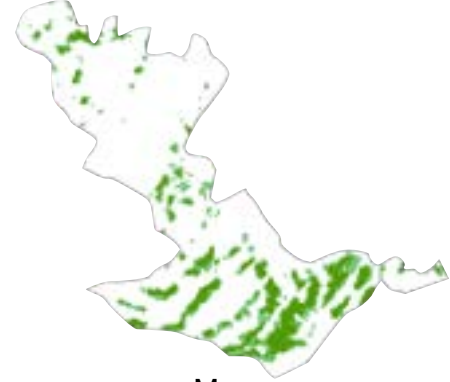
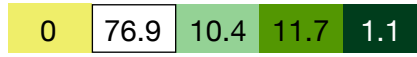




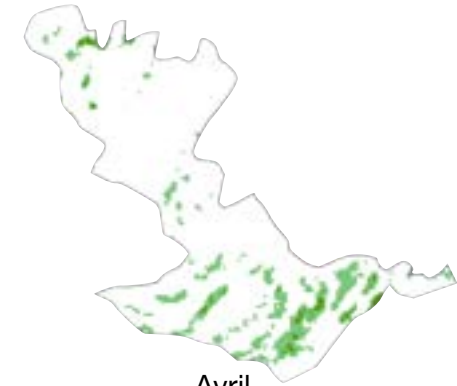
Janvier
19/01/2020



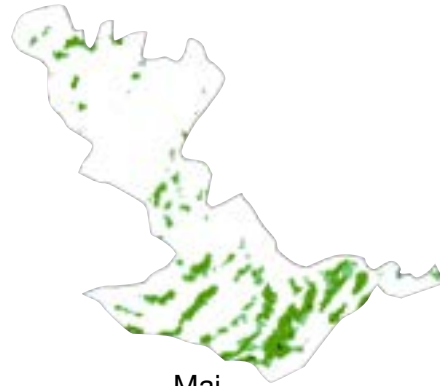
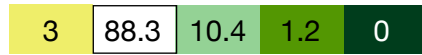
Février
18/02/2020



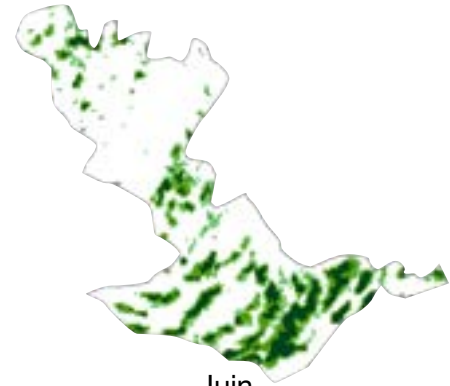
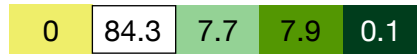
Mars
29/03/2020



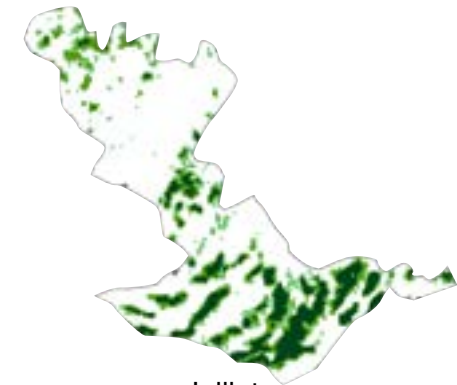
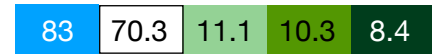
Avril
18/04/2020



Mai
08/05/2020



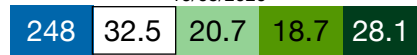
Juin
17/06/2020



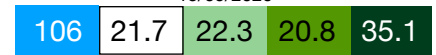
Juillet
07/07/2020



Août
16/08/2020



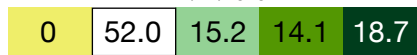
Septembre
15/09/2020



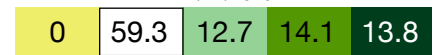
Octobre
15/10/2020



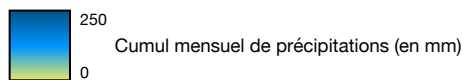
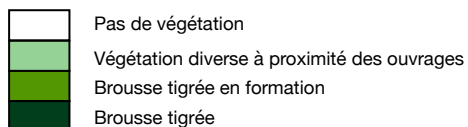
Novembre
14/11/2020



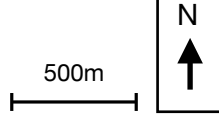
Décembre
14/12/2020

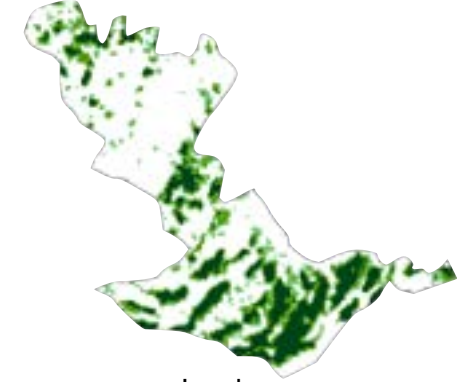


Annexe 24. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation TSAVI et NDVI calculés à partir d'images Sentinel-2 pour la zone C en 2020 :

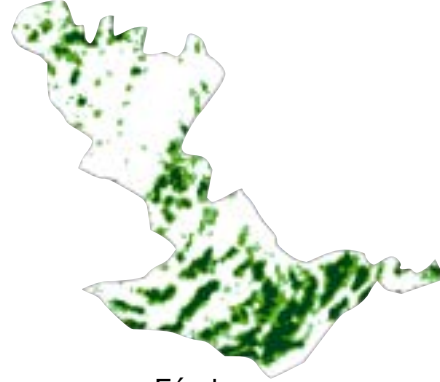
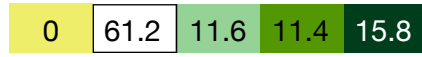


Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.

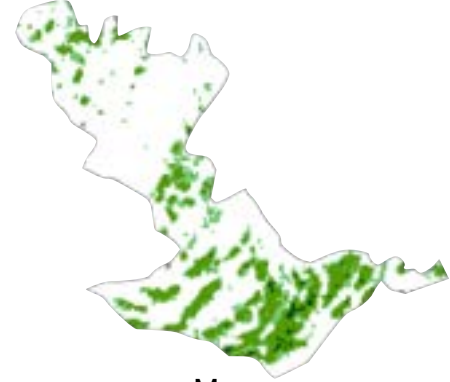
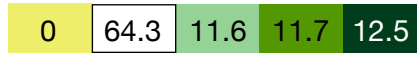




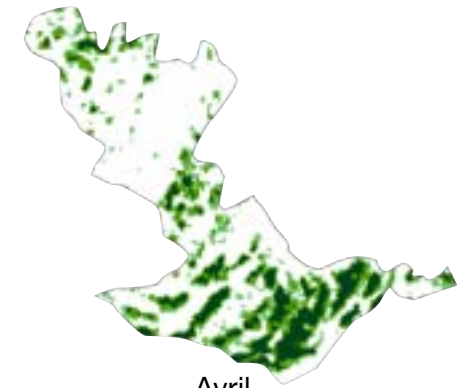
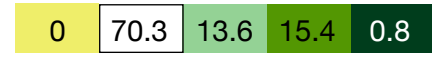
Janvier
13/01/2021



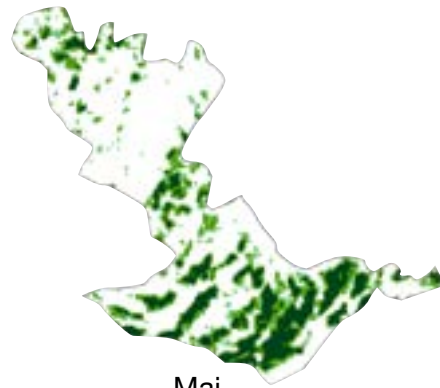
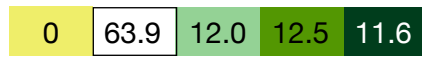
Février
12/02/2021



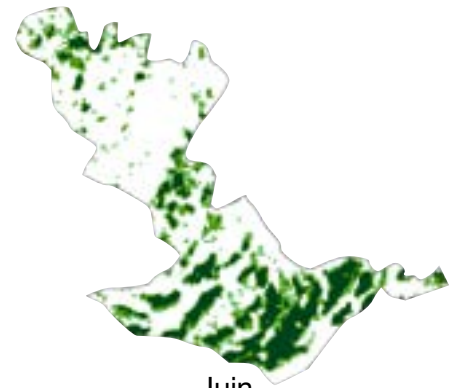
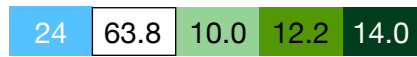
Mars
14/03/2021



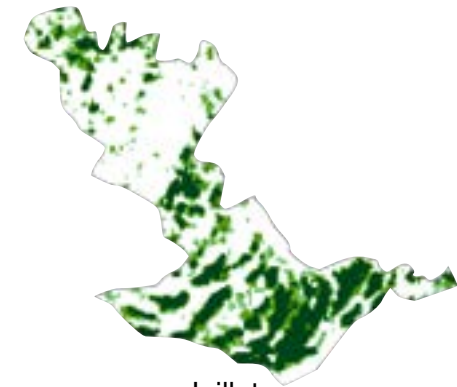
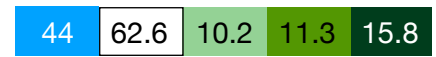
Avril
13/04/2021



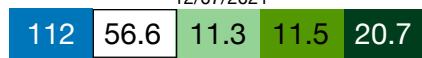
Mai
23/05/2021



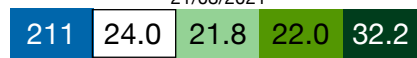
Juin
02/06/2021



Juillet
12/07/2021



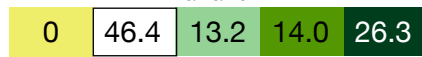
Août
21/08/2021



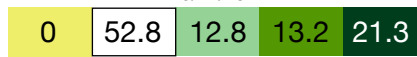
Septembre
20/09/2021



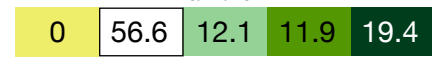
Octobre
20/10/2021



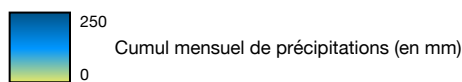
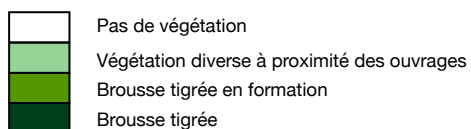
Novembre
19/11/2021



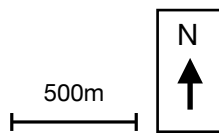
Décembre
19/12/2021

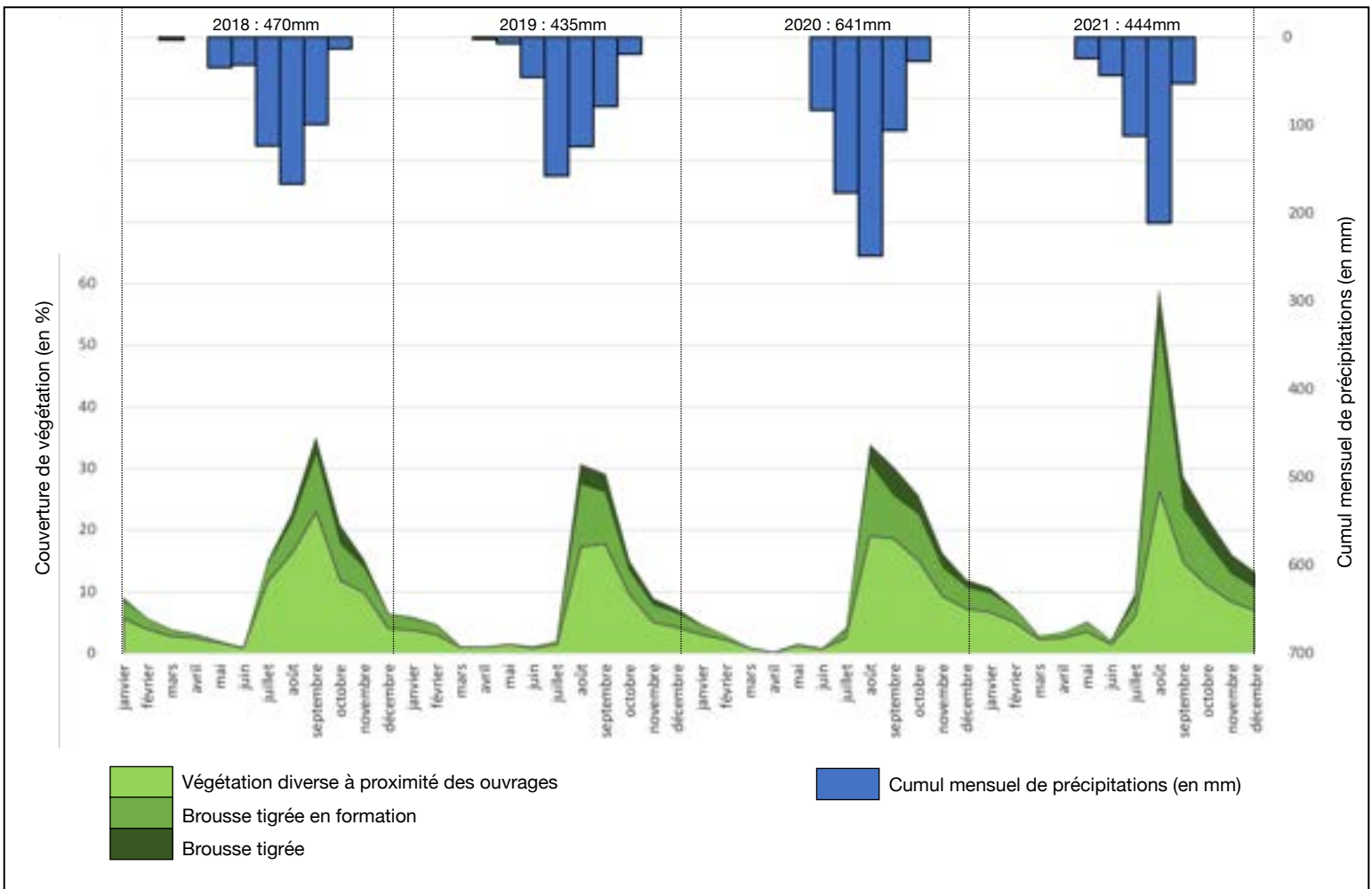


Annexe 25. Formation végétale estimée à partir des indices de végétation TSAVI et NDVI calculés à partir d'images Sentinel-2 pour la zone C en 2021 :

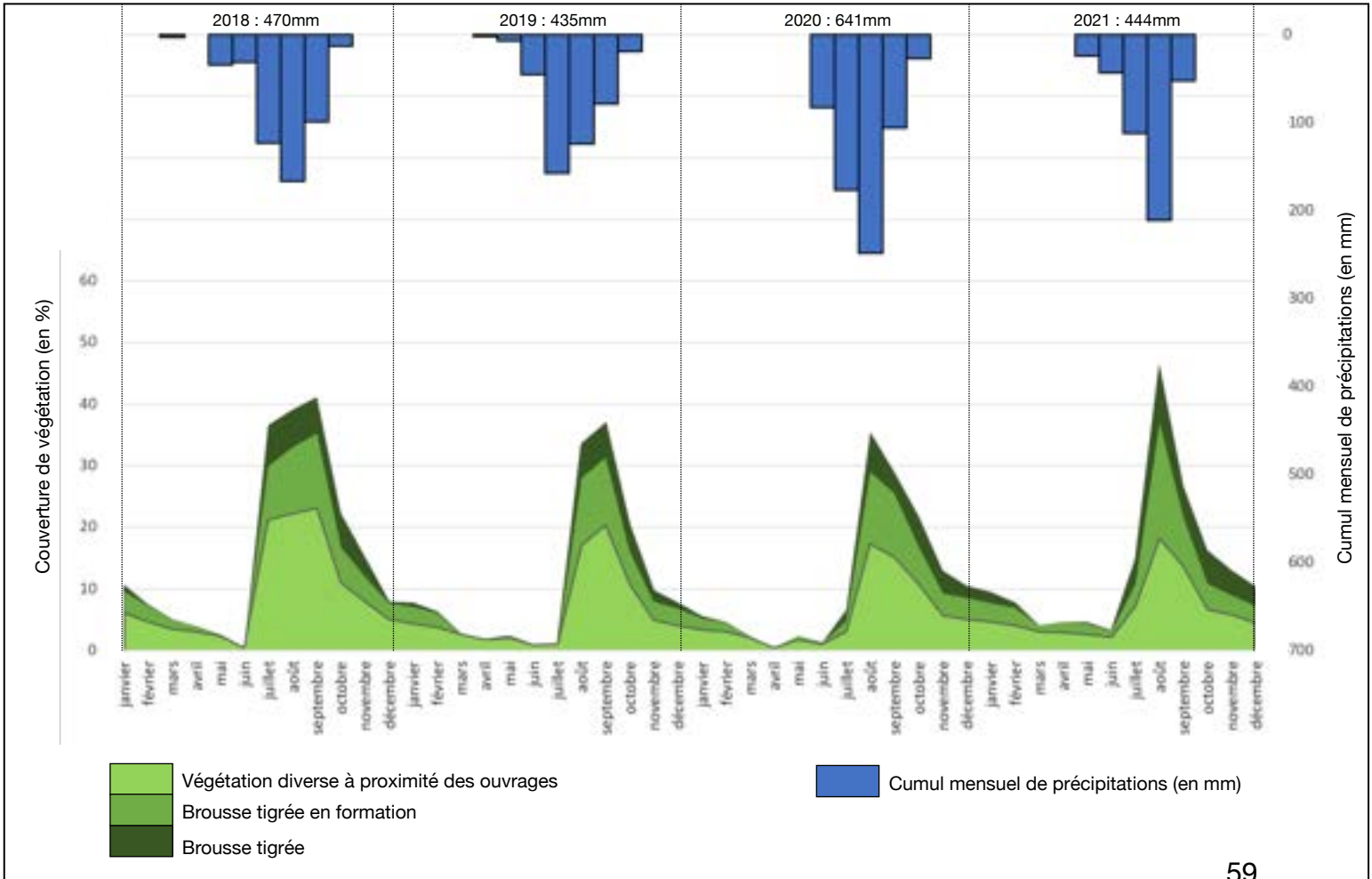


Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale, le cumul de précipitations et la date d'acquisition de l'image satellite sont indiqués.

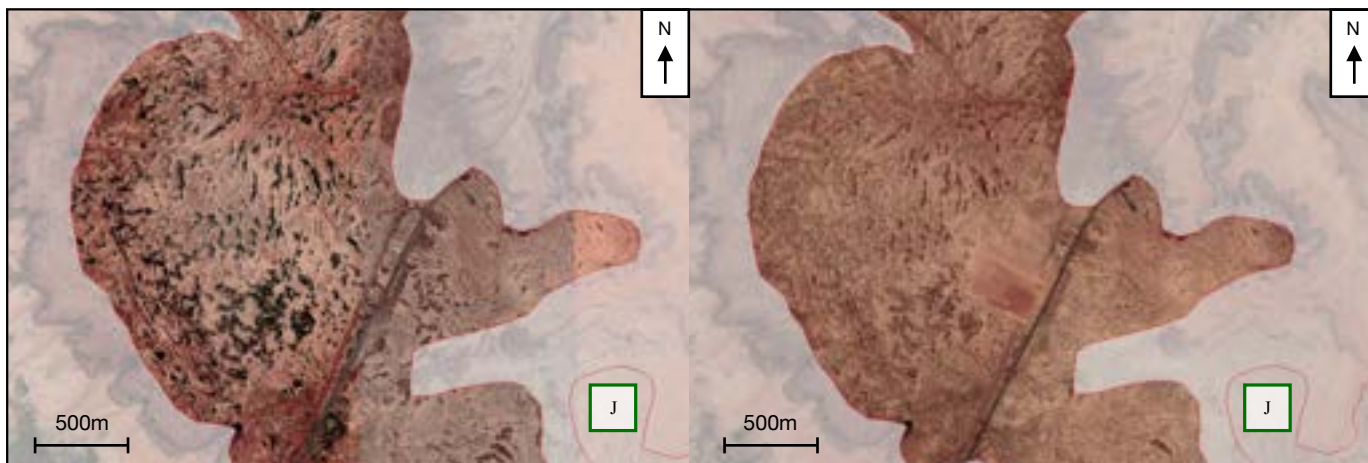




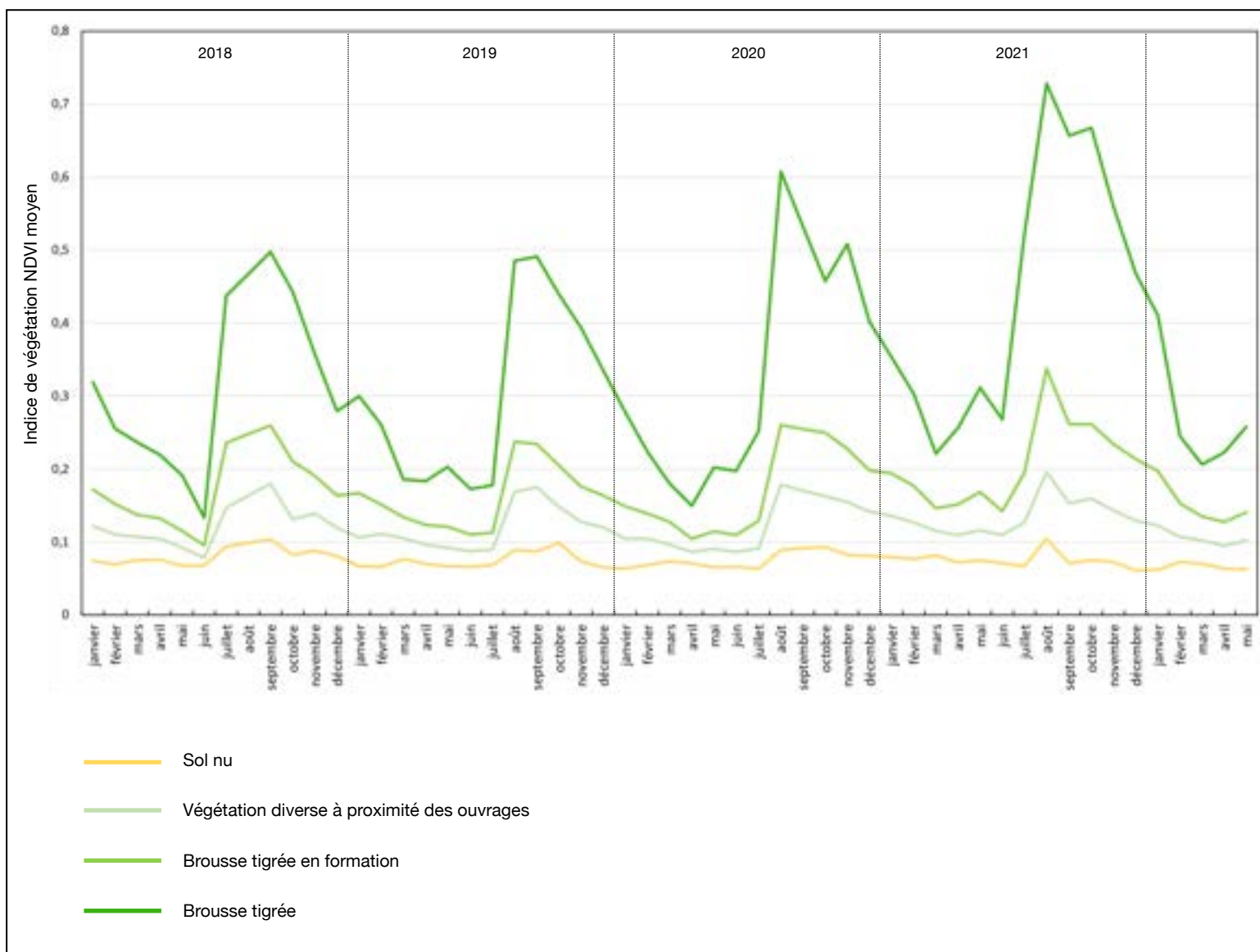
Annexe 26. Evolution de la végétation de janvier 2018 à décembre 2021 dans la zone W1 du site Niamey et cumuls mensuels de précipitations.
Sources des données : images satellites Sentinel-2A (2018-2021).



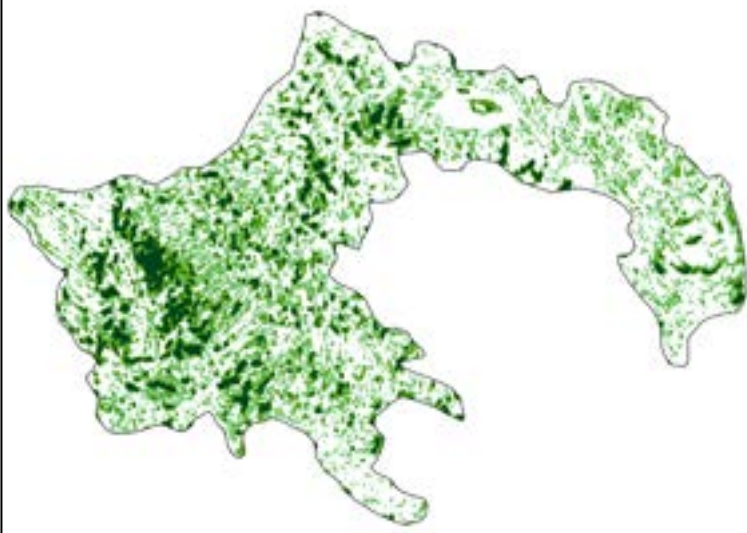
Annexe 27. Evolution de la végétation de janvier 2018 à décembre 2021 dans la zone N1 du site Niamey et cumuls mensuels de précipitations.
Sources des données : images satellites Sentinel-2A (2018-2021).



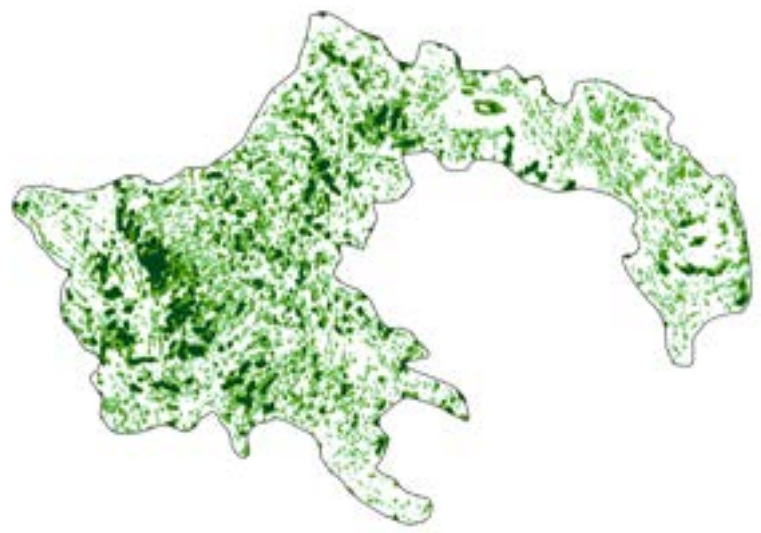
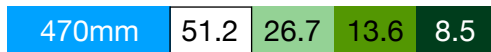
Annexe 28. Evolution de la zone H entre juillet 2018 (à gauche) et mai 2021 (à droite) sur le site de Niamey.
Sources des données : images satellites Google Earth (2018-2021).



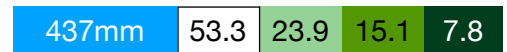
Annexe 30. Evolution de l'indice NDVI de quatre occupations du sol calculé à partir d'images Sentinel-2 sur le site de Niamey de janvier 2018 à mai 2022 (expérimental).



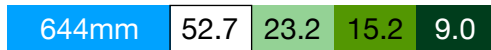
2018



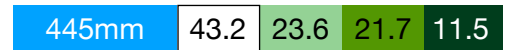
2019



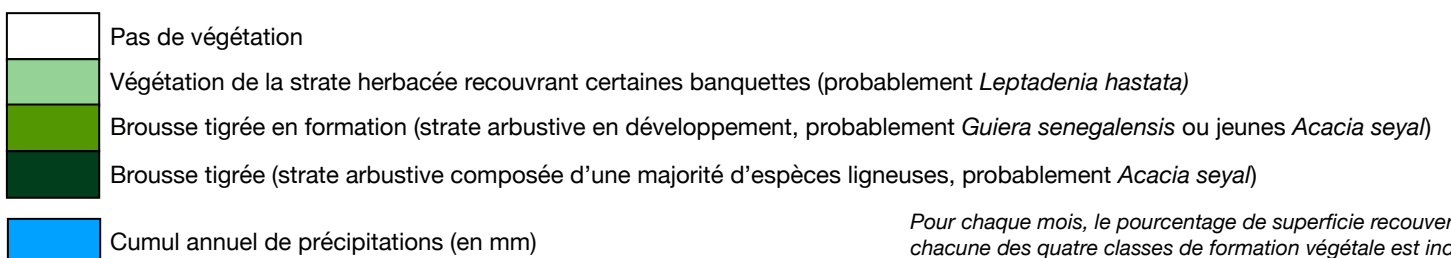
2020



2021



Formation végétale estimée à partir des indices de végétation TSAVI et NDVI :



Pour chaque mois, le pourcentage de superficie recouvert par chacune des quatre classes de formation végétale est indiqué.

Annexe 29. Bilans annuels de végétation de la zone C2 (Niamey), après reclassification (expérimental).