

# **RAPPORT FINAL DES METHODES ET RESULTATS DE L'AXE THEMATIQUE :**

## **« Forêt-Biodiversité »**

**Projet PROGYSAT**

**Novembre 2021 – Juin 2023**

*Rédigé par*

*Alexandre Defossez (IRD)*

*Revu par*

*Jean-Baptiste Féret (INRAE)*

# Table des matières

I.	Introduction.....	1
1)	Contexte et objectifs généraux .....	1
2)	Objectifs spécifiques à cette étude .....	1
3)	Orientation méthodologique et hypothèses.....	1
II.	Matériel .....	3
1)	Imagerie satellitaire.....	3
2)	Inventaires forestiers.....	5
3)	Logiciels et principales librairies utilisés.....	6
III.	Méthodes .....	7
1)	Cartographie de la diversité spectrale des communautés forestières à l'échelle de la tuile Sentinel-2 .....	7
a.	<i>Production d'images composites d'indices spectraux à l'échelle d'une tuile Sentinel-2 .....</i>	9
i.	<i>Téléchargement et correction atmosphérique des images .....</i>	9
ii.	<i>Sélection des indices spectraux .....</i>	10
iii.	<i>Détermination du critère d'ennuagement maximal.....</i>	11
iv.	<i>Production des images composites dans deux contextes d'ennuagement contrastés et détermination des indicateurs de diversité <math>\alpha</math> et <math>\beta</math>.....</i>	12
b.	<i>Calcul des indicateurs de diversité spectrale .....</i>	13
2)	Validation des cartes de diversité spectrale à l'échelle d'une tuile Sentinel-2.....	14
a.	<i>Test des corrélations entre les indicateurs dérivés de l'images et ceux calculés à partir des inventaires forestiers du programme Habitat.....</i>	15
b.	<i>Validation des cartes de diversité dans le cadre de l'approche de biodivMapR .....</i>	15
3)	Première approche de cartographie de la diversité spectrale des communautés forestières à l'échelle régionale .....	16
a.	<i>Densification des séries temporelles .....</i>	17
b.	<i>Calcul de la médiane des indices spectraux.....</i>	17
c.	<i>Mosaïquage et détermination des indicateurs de diversité spectrale .....</i>	18
4)	Présentation générale des deux versions de la chaîne de traitements .....	18
IV.	Résultats .....	19
1)	Cartographie des indicateurs de diversité $\alpha$ et $\beta$ sur les tuiles 22NCK et 21NWF à partir des « scènes » désennuagées .....	19
a.	<i>Comparaison des masques : « meilleures » acquisitions individuelles vs images composites</i> 19	
b.	<i>Matrice de corrélation des indices spectraux disponibles dans spinR.....</i>	21
c.	<i>Cartes de diversité <math>\alpha</math> et <math>\beta</math> à l'échelle de la tuile Sentinel-2 .....</i>	21

2)	Résultats de la validation des cartes de diversité spectrale à l'échelle d'une tuile Sentinel-2.	23
a.	<i>Résultats des tests de corrélation entre les indicateurs dérivés de l'imagerie S2 et ceux calculés à partir des inventaires forestiers du programme Habitat</i> .....	23
b.	<i>Examen de la figure de validation produite dans le cadre de l'approche de biodivMapR</i> ....	24
3)	Première cartographie des indicateurs de diversité spectrale $\alpha$ et $\beta$ à une échelle régionale.	25
a.	<i>Cartes de la diversité <math>\alpha</math> et <math>\beta</math> à une échelle régionale</i> .....	25
b.	<i>Validation des cartes de diversité <math>\alpha</math> et <math>\beta</math> à une échelle régionale</i> .....	27
V.	Discussion .....	28
VI.	Conclusion .....	34
VII.	Bibliographie.....	35
	Annexes .....	36

## Table des illustrations

<b>Figure 1.</b> Schéma conceptuel de la distribution spatiale de la biodiversité .....	2
<b>Figure 2.</b> Cartes des Habitats Forestiers de Guyane (2015) .....	5
<b>Figure 3.</b> Représentation de la structure du dispositif d’inventaires forestiers du réseau « Habitat » .....	6
<b>Figure 4.</b> Diagramme de flux représentant les principales étapes de la stratégie méthodologique.....	8
<b>Figure 5.</b> Localisation des tuiles S2 22NCK et 21NWF en Guyane française et au Suriname .....	9
<b>Figure 6.</b> Localisation de la zone de test utilisée pour déterminer une sélection d’indices spectraux comme source d’information spectrale en entrée de biodivMapR. ....	10
<b>Figure 7.</b> Diagramme de flux des étapes de prétraitement (téléchargement et correction atmosphérique) et de sélection des indices spectraux sur la zone test .....	11
<b>Figure 8.</b> Diagramme de flux résumant le processus de production de l’image composite. ....	13
<b>Figure 9.</b> Formules mathématiques de l’indice de Shannon et de la dissimilarité de Bray-Curtis.....	14
<b>Figure 10.</b> Diagramme de flux résumant les étapes principales de validation de la diversité $\alpha$ et $\beta$ proposée dans le cadre de biodivMapR.....	16
<b>Figure 11.</b> Emprise de la région du plateau des Guyanes traitée dans le cadre de la production d’une mosaïque de diversité spectrale des communautés forestières .....	17
<b>Figure 12.</b> Présentation de la structure générale des deux versions de la chaîne de traitement.....	18
<b>Figure 13.</b> Disponibilité des pixels des tuiles 22NCK et 21NWF.....	19
<b>Figure 14.</b> Comparaison des masques des acquisitions individuelles les moins ennuagées et des masques des images composites pour les tuiles 21NWF et 22NCK sur la saison septembre-octobre 2018.....	20
<b>Figure 15.</b> Matrice du $R^2$ entre les indices spectraux produits par spinR à partir de l’acquisition S2 de la zone-test. ....	21
<b>Figure 16.</b> Diversité $\alpha$ et $\beta$ de l’image composite de la tuile 21NWF sur la saison septembre-octobre 2018 .....	22
<b>Figure 17.</b> Diversité $\alpha$ et $\beta$ de l’image composite de la tuile 21NWF sur la saison septembre-octobre 2018 .....	22
<b>Figure 18.</b> Distribution des valeurs de diversité $\alpha$ et $\beta$ issues de la diversité spectrale sur l’emprise des placettes de validation.....	24
<b>Figure 19.</b> Mosaïques des indicateurs de diversité spectrale $\alpha$ et $\beta$ à une échelle régionale du plateau des Guyanes.....	26
<b>Figure 20.</b> Distribution des valeurs de diversité $\alpha$ et $\beta$ issues de la diversité spectrale sur l’emprise des placettes de validation (habitats principaux et secondaires) .....	27
<b>Figure 21.</b> Comparaison des cartographies de la diversité $\alpha$ et $\beta$ de la tuile 22NCK obtenues selon trois modalités.....	28
<b>Figure 22.</b> Comparaison de motifs de diversité $\alpha$ et $\beta$ dans les environs de Kaw (mosaïque régionale) .....	29
<b>Figure 23.</b> Comparaison de motifs de diversité $\alpha$ et $\beta$ à l’est du lac du Brokoponda (Suriname) au niveau d’une zone orpaillée.....	30
<b>Figure 24.</b> Exemple de l’effet de « dilution » sur la Zone-test de la tuile 21NWF .....	32
<b>Figure 25.</b> Anomalie du CRI1 au nord du Lac de Petit Saut.....	33
<b>Tableau 1.</b> Description des caractéristiques physiques des bandes Sentinel-2.....	4
<b>Tableau 2.</b> Résultat des tests de corrélation entre les valeurs des indices de diversité $\alpha$ et $\beta$ dérivés de l’imagerie S2 (diversité spectrale) et des inventaires forestiers (diversité des essences forestières inventoriées sur le terrain). ....	23

# I. Introduction

## 1) Contexte et objectifs généraux

Le travail décrit dans ce rapport s'inscrit dans l'axe « Forêt – Biodiversité » du projet PROGYSAT. Le projet a pour but de produire des méthodes, des outils et des produits cartographiques sur différentes thématiques de suivi de l'environnement et de l'aménagement du territoire, à l'aide de l'imagerie satellitaire sur le plateau des Guyanes, avec une perspective de coopération avec les acteurs de la recherche et du territoire des autres pays concernés : Etat de l'Amapá au Brésil, Suriname et Guyana.

L'axe « Forêt – Biodiversité » a pour but de proposer des approches méthodologiques permettant d'extraire des informations d'intérêt pour l'écologie et la gestion des milieux forestiers du plateau des Guyanes à partir de données de télédétection issues du programme *Copernicus*. Ces informations correspondent par exemple à des cartes permettant de mettre en évidence des ensembles correspondant à différentes communautés d'espèces par des approches non supervisées mises à jour avec une fréquence annuelle, leur étendue spatiale et leur dynamique temporelle. L'objectif de ce type d'information original produit à partir de données d'imagerie satellite est de contribuer à la fois à une meilleure gestion et une meilleure protection du patrimoine forestier, en complétant les observations de terrain ponctuelles. Le bénéficiaire principal des produits cartographiques et des applications qui seront issus de notre travail en Guyane française est l'Office National des Forêts (ONF), partenaire essentiel de l'aménagement et de la préservation des forêts.

## 2) Objectifs spécifiques à cette étude

Les objectifs de notre travail se déclinent en deux volets principaux :

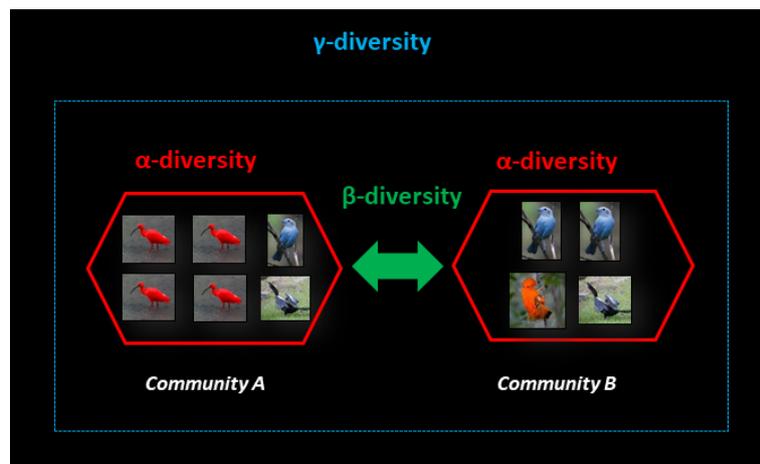
- 1- ***La production d'une chaîne de traitements permettant de cartographier la diversité spectrale des communautés forestières dans le contexte du plateau des Guyanes à partir des séries temporelles Sentinel-2.***
- 2- ***L'évaluation de la cohérence des produits cartographiques obtenus en les comparant avec des mesures de diversité issues des données terrain, notamment les inventaires forestiers de l'Office National des Forêts.***

## 3) Orientation méthodologique et hypothèses

Il existe une variété d'approches permettant de relier les données issues de la télédétection à des variables d'intérêt écologique ou pour la gestion forestière ([Wang and Gamon, 2019](#)). Dans le cadre de ce travail, nous nous intéresserons exclusivement aux données de télédétection optique multispectrale collectées par les satellites Sentinel-2 (S2) du programme *Copernicus*. Nous utiliserons des méthodes s'appuyant sur l'Hypothèse de Variabilité Spectrale ou *Spectral Variation Hypothesis*, proposée par Palmer *et al.* (2002). Cette hypothèse fait l'objet d'une littérature scientifique abondante (voir par exemple Rocchini *et al.* 2018) et suppose que l'hétérogénéité spatiale de l'information spectrale puisse être utilisée comme indicateur de la diversité de la végétation, selon des composantes taxonomiques, fonctionnelles et/ou structurales. Dans le cas de l'application de cette hypothèse aux

données optiques multispectrales, l'information spectrale correspond à une mesure de réflectance mesurée à l'échelle du pixel d'une image, sur une gamme de longueur d'onde comprenant généralement les domaines visible et infrarouge. Dans le cas des milieux forestiers, la lumière réfléchi par la canopée apporte une information sur ses propriétés biophysiques, elle-même reliée à une information taxonomique (Asner & Martin, 2016), et son intégration spatiale sur des surfaces définies de manière appropriée permet potentiellement de renseigner sur la diversité des espèces végétales émergeant de la canopée. En estimant la diversité spectrale à l'aide de l'imagerie optique satellitaire, il est alors possible de produire une estimation de la diversité des espèces arborées sur de vastes étendues géographiques.

La distribution spatiale de la biodiversité (qu'elle soit taxonomique ou spectrale) peut se décomposer en deux composantes : la diversité  $\alpha$  ou « diversité locale », qui représente la richesse et/ou l'abondance en espèces d'une communauté, tandis que la diversité  $\beta$  ou « diversité régionale » renseigne sur la variation de la composition des communautés le long de gradients environnementaux ou selon une configuration spatiale ou temporelle des communautés. En écologie, une « communauté » se définit comme un ensemble d'espèces vivant dans une aire géographique donnée, au même moment. La **Figure 1** permet d'illustrer la décomposition de la distribution spatiale de la biodiversité (voir Whittaker, 1972). Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes intéressés à caractériser la diversité  $\alpha$  et  $\beta$  des communautés forestières, c'est-à-dire des espèces d'arbres formant la canopée, visible depuis l'espace.



**Figure 1.** Schéma conceptuel de la distribution spatiale de la biodiversité. Il décrit les deux composantes de la diversité « totale » ou diversité  $\gamma$  en diversité « locale »  $\alpha$ , c'est-à-dire celles des communautés individuelles, et la diversité « régionale »  $\beta$ , autrement dit, la variation de la diversité « entre » les communautés. Sur la figure ci-dessus, les espèces sont représentées par des espèces d'oiseaux de Guyane française, mais le principe s'applique de la même façon aux espèces végétales.

Une difficulté majeure dans le contexte tropical et notamment équatorial, comme dans le cas du plateau des Guyanes, réside dans le fort taux d'enneumagement pratiquement constant sur une grande partie de l'année. Un aspect conséquent de notre travail a donc été d'identifier un moyen d'utiliser les images S2 en exploitant leur haute résolution temporelle, qui donne accès à davantage d'images par rapport à la majorité des constellations satellitaires.

Notre travail s'inscrit directement dans la continuité de travaux réalisés par Jean-Baptiste Féret et Florian de Boissieu ([UMR TETIS](#)) sur l'étude de la diversité spectrale et le développement de méthodes de cartographie de la diversité  $\alpha$  et  $\beta$  de la végétation. L'essentiel de la méthode a été intégrée sous la forme d'une librairie écrite en langage R appelée *biodivMapR* ([Feret & de Boissieu, 2019](#)). Dans la suite de ce rapport, nous emploierons le terme *biodivMapR* pour désigner soit la méthode de détermination de la diversité spectrale, soit la librairie dans laquelle elle est écrite et peut être appelée. Les travaux menés par l'UMR TETIS dans le cadre de l'axe « Forêt – Biodiversité » se sont appuyés sur une collaboration avec l'ONF en Guyane, notamment Caroline Bedeau, chargée de Recherche et Développement.

## II. Matériel

Notre démarche vise à proposer des méthodes permettant d'optimiser l'utilisation de données de télédétection combinées à des données d'observation terrain. Nous avons pour cela adapté la chaîne de traitements initialement proposée dans *biodivMapR* afin de tirer parti de l'information issue des séries temporelles S2 dans un contexte d'ennuagement très important, et d'exploiter les données d'inventaire forestier disponibles pour valider notre approche, bien que ces données n'aient pas été initialement collectées dans le but d'être intégrées au cadre d'analyse de données terrain et de validation implémenté dans *biodivMapR*.

### 1) Imagerie satellitaire

Nous nous sommes basés sur le traitement d'images satellites optiques S2. Les images S2 sont issues d'un capteur multispectral, qui mesure la réflectance de la surface de la Terre sur une dizaine de bandes spectrales couvrant des domaines de longueurs d'ondes visible et infrarouge. Elles bénéficient à la fois d'une haute répétitivité temporelle, avec une nouvelle acquisition dans la zone considérée tous les 3 à 5 jours, et d'une haute résolution spatiale, avec des pixels d'une dimension allant de 10 m à 20 m selon les bandes spectrales. Ces images sont gratuites et accessibles sur les plateformes *Copernicus Open Access Hub* (ESA) et PEPS (CNES). Les caractéristiques physiques des bandes S2 sont décrites dans le **Tableau 1**.

Nous avons choisi de nous concentrer sur les images S2 pour deux raisons principales :

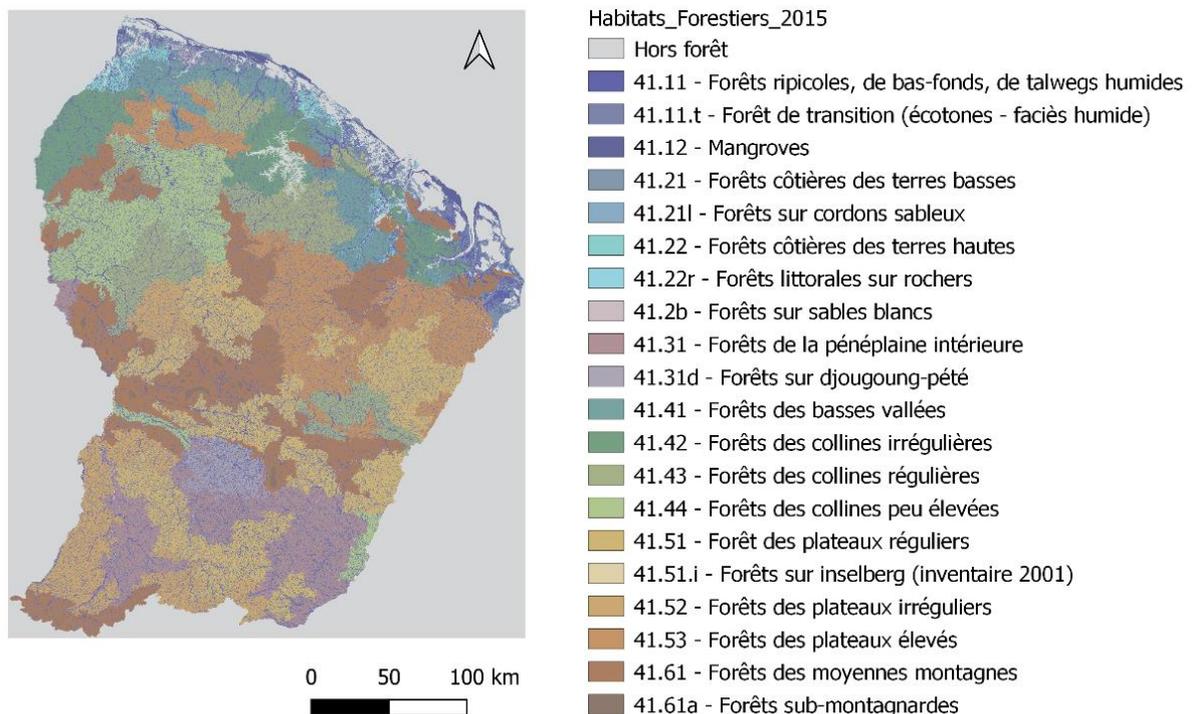
- Une haute résolution spectrale (au total 13 bandes) dont certaines sont utiles au suivi de la végétation, notamment les bandes des domaines de l'infrarouge et du *Red Edge*.
- Une haute répétitivité temporelle, qui permet d'augmenter la probabilité d'acquisition d'images exploitables au regard de l'ennuagement, particulièrement en milieu tropical.

**Tableau 1.** Description des caractéristiques physiques des bandes Sentinel-2. N.B. Les bandes 1, 9 et 10, d'une résolution de 60 m, sont utilisées pour effectuer les corrections atmosphériques, et ne sont donc pas utilisées dans la suite des traitements, notamment avec biodivMapR. Source : ESA.

Résolution spatiale	Domaine spectral	Bande	Satellite Sentinel-2A		Satellite Sentinel-2B	
			Longueur d'onde (nm)	Largeur de bande (nm)	Longueur d'onde (nm)	Largeur de bande (nm)
<b>10m</b>	Bleu	2	496.6	98	492.1	98
	Vert	3	560.0	45	559	46
	Rouge	4	664.5	38	665	39
	PIR	8	835.1	145	833	133
<b>20m</b>	Végétation <i>Red Edge</i>	5	703.9	19	703.8	20
	Végétation <i>Red Edge</i>	6	740.2	18	739.1	18
	Végétation <i>Red Edge</i>	7	782.5	28	779.7	28
	PIR « étroit »	8a	864.8	33	864	32
	SWIR	11	1613.7	143	1610.4	141
	SWIR	12	2202.4	242	2185.7	238
	<b>60m</b>	Aérosol côtier	1	443.9	27	442.3
Vapeur d'eau		9	945.0	26	943.2	27
SWIR – Cirrus		10	1373.5	75	1376.9	76

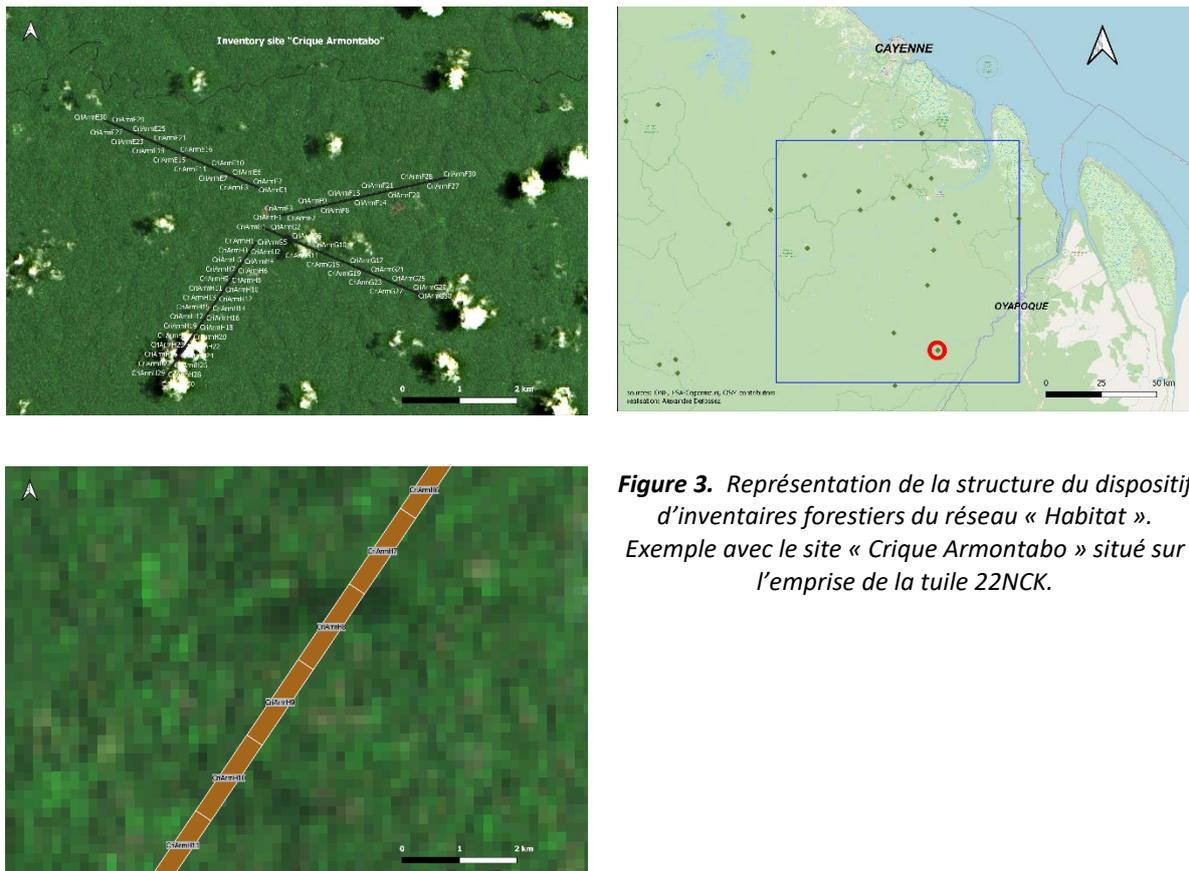
## 2) Inventaires forestiers

Les données terrain utilisées pour évaluer la cohérence des produits cartographiques dérivés des images S2 sont extraites des inventaires forestiers de l'ONF. Les inventaires forestiers sont issus du programme « Habitat ». Ils ont contribué à l'établissement d'une cartographie à l'échelle du territoire des différents types d'habitats forestiers (**Figure 2**). A chaque campagne d'inventaire, différents types d'information sont collectés, notamment la géomorphologie du terrain (altitude, formations géologiques, etc.) et les essences forestières présentes (« code ONF ») avec le nombre d'individus pour chaque essence et le diamètre de tronc à hauteur de poitrine (*Diameter at Breast Height*, DBH).



**Figure 2.** Cartes des Habitats Forestiers de Guyane (2015). Source : ONF.

Un total de 42 sites a été inventorié entre 2005 et 2022, correspondant à 20 types d'habitats principaux identifiés. Les structure spatiale d'un site d'inventaire est décrite dans la **Figure 3** :



**Figure 3.** Représentation de la structure du dispositif d'inventaires forestiers du réseau « Habitat ». Exemple avec le site « Crique Armontabo » situé sur l'emprise de la tuile 22NCK.

Pour chaque site d'inventaire, 2 à 4 sentiers forestiers ou « layons » d'une longueur comprise entre 2.5 et 3 km sont définis. Le long de chaque layon, entre 20 et 30 placettes sont inventoriées (chaque placette constitue une unité d'inventaire). Les placettes font en moyenne 100 m de longueur et 20 m de largeur, bien qu'il existe des variations locales dans leurs dimensions. Les essences forestières sont déterminées par des agents de l'ONF, qui possède une typologie spécifique pour les décrire. Il est important de noter qu'il ne s'agit pas d'une identification botanique taxonomiquement précise, bien qu'il existe un lien entre les deux ([Guitet et al., 2014](#)). En plus des habitats principaux, d'autres niveaux de description des habitats forestiers existent dans la typologie du programme « Habitat » comme les habitats « particuliers ».

Le travail d'analyse des inventaires forestiers a nécessité une collaboration étroite avec le partenaire ONF, représenté par Caroline Bedeau et Olivier Brunaux notamment, sous la forme de réunions et d'un suivi régulier de l'avancée des résultats.

### 3) Logiciels et principales bibliothèques utilisés

Pour réaliser nos traitements et nos analyses de résultats, nous nous sommes basés sur l'utilisation du [logiciel R](#). Il s'agit à l'origine d'une interface de programmation développée pour les analyses statistiques. Aujourd'hui, l'utilisation de R concerne une grande diversité de traitements de données et les *packages* ou « bibliothèques » appliquées aux domaines de la géomatique et de la télédétection se sont multipliés. Nous avons également utilisé R car il s'agit du langage privilégié des écologues et des acteurs du domaine de l'environnement. Dans une perspective de transmission de la méthode aux

acteurs du territoire et de l'environnement en Guyane, il apparaissait préférable de recourir à ce langage. D'autre part, des *packages* spécifiques ont été développées pour l'analyse de la diversité spectrale, faisant partie intégrante du corpus méthodologique de base sur lequel nous nous sommes appuyés :

- [preprocS2](#) : prétraitement des images Sentinel-2 ;
- [spinR](#) : calcul des indices spectraux ;
- [biodivMapR](#) : détermination des métriques de diversité spectrale et méthode de validation des produits cartographiques.

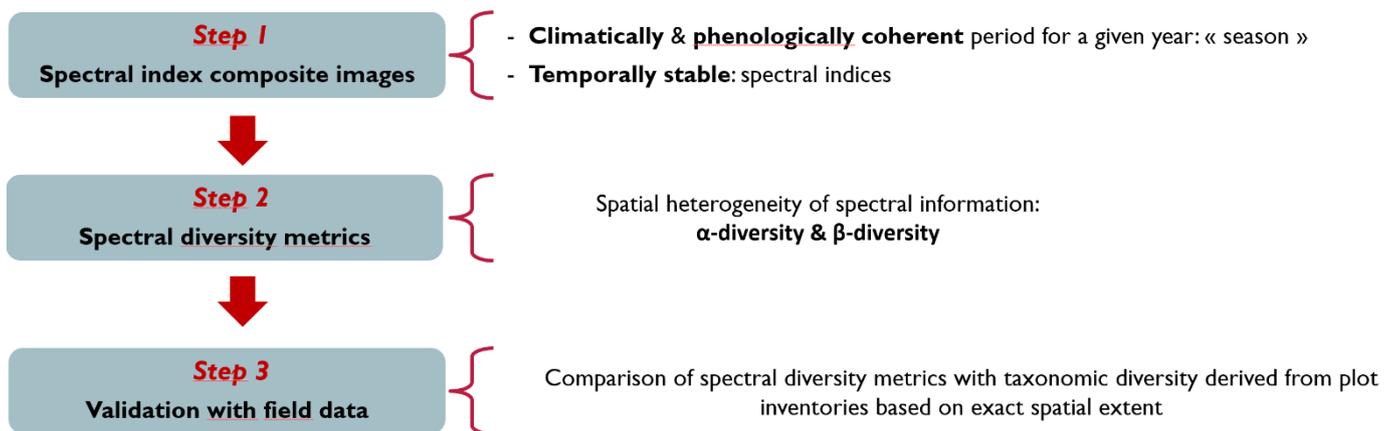
Pour télécharger et appliquer une correction atmosphérique aux images S2, nous nous sommes également appuyés sur la librairie [sen2lasrc](#) développée en Python. L'utilisation de cette librairie, développée durant le déroulement de la phase d'analyse réalisée pour ce projet, a nécessité une phase d'installation et de tests, non présentée dans ce rapport. Les traitements réalisés sur les séries temporelles S2 correspondant à des emprises spatiales importantes, soit plusieurs centaines de tuiles S2, ont nécessité la mise en place de codes s'appuyant sur du calcul intensif tirant partie d'une parallélisation des codes s'exécutant sur des calculateurs puissants. Enfin, nous avons eu recours à la plateforme en ligne [Sentinel Hub Eo Browser](#) comme outils de prévisualisation des images S2 et au [logiciel QGIS](#) comme outil de visualisation des produits cartographiques et de mise en page des cartes finales.

### III. Méthodes

#### 1) Cartographie de la diversité spectrale des communautés forestières à l'échelle de la tuile Sentinel-2

Après réalisation de tests préliminaires de la méthode *biodivMapR* sur un échantillon d'acquisitions individuelles S2 disponibles dans le contexte de zones fortement ennuagées en Guyane française (**Annexes 1 et 2**) il s'est rapidement avéré nécessaire de recourir à des méthodes permettant de tirer parti de tout ou partie des séries temporelles S2 afin de modérer les limites rencontrées par cet ennuagement. Le problème causé par la fréquence élevée des nuages en milieu tropical constitue un sujet d'étude à part entière, avec le développement de différentes méthodes visant à combler les pixels masqués. Nous avons choisi de développer une approche consistant à créer une image synthétique ou « composite » basée sur une série temporelle, dans laquelle l'information assignée à chaque pixel est issue d'indicateurs statistiques produits à partir de l'ensemble de l'information disponible (sans nuages) dans la série temporelle. Afin de conserver une information spectrale cohérente d'un point de vue climatique et phénologique, nous avons fait le choix de nous limiter dans un premier temps à une série d'images S2 acquises sur une courte période (deux mois) en saison « sèche ». Enfin, nous avons cherché à réduire la variabilité spectrale au sein de l'image composite à travers le calcul d'indices spectraux préalablement sélectionnés. On s'attend en effet à ce que les indices spectraux soient temporellement plus stables que les bandes de réflectance, étant théoriquement moins sensibles aux variations. Les images composites correspondant à une période courte peuvent être qualifiées de « saison » au sens d'une unité temporelle climatiquement et phénologiquement cohérente ([Chraïbi et al., 2022](#)).

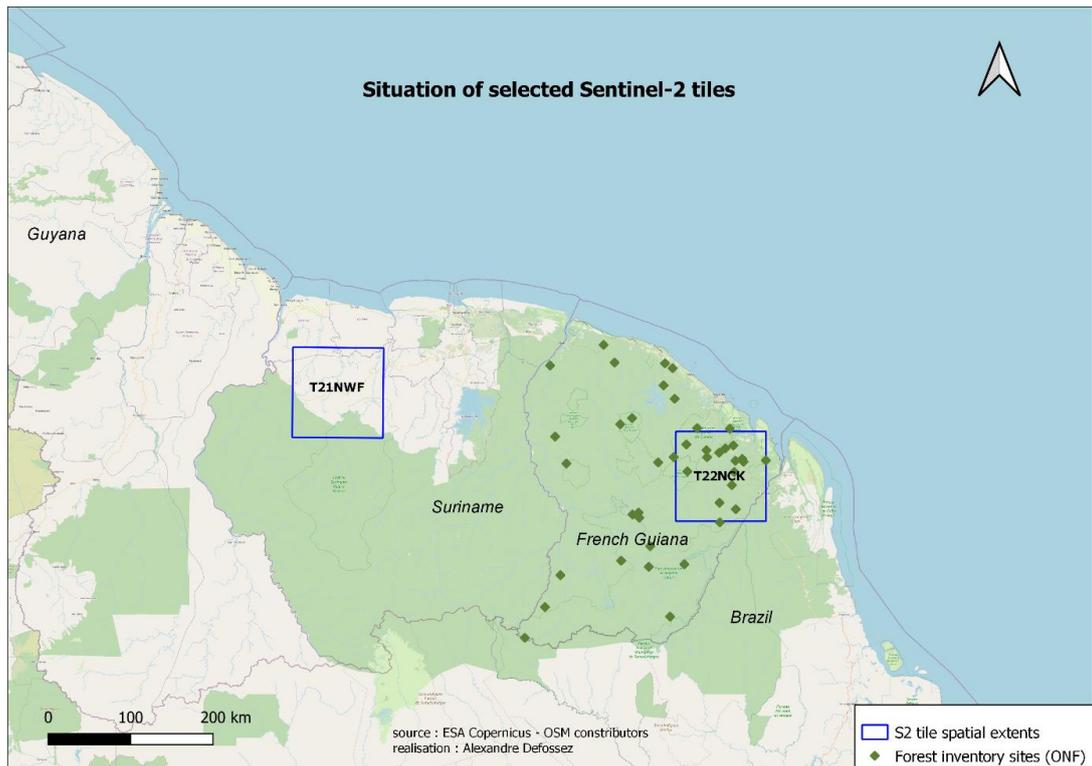
La stratégie méthodologique suivie se décompose en trois étapes principales (**Figure 4**) :



**Figure 4.** Diagramme de flux représentant les principales étapes de la stratégie méthodologique. Le processus suivi a pour but de produire et valider des cartes de diversité spectrale dans le contexte guyanais et en fonction du matériel scientifique disponibles (données, méthodes, expertise...).

La méthode de production des images composites jusqu'au calcul des métriques de diversité a été testé sur deux tuiles S2 reflétant deux contextes d'enneuagement contrastés (**Figure 5**) :

- la tuile 21NWF (Suriname) identifiée à l'aide de la plateforme *Sentinel Hub EO Browser* comme une zone parmi les moins enneuagées du plateau des Guyanes ;
- la tuile 22NCK (Guyane française) qui représente un contexte nettement plus défavorable avec un enneuagement très important. Nous avons également ciblé cette tuile en priorité car elle recouvre une majorité de sites d'inventaires forestiers du programme « Habitat ».



**Figure 5.** Localisation des tuiles S2 22NCK et 21NWF en Guyane française et au Suriname. Les sites d’inventaires forestiers réalisés dans le cadre du programme « Habitat » (ONF) sont également représentés.

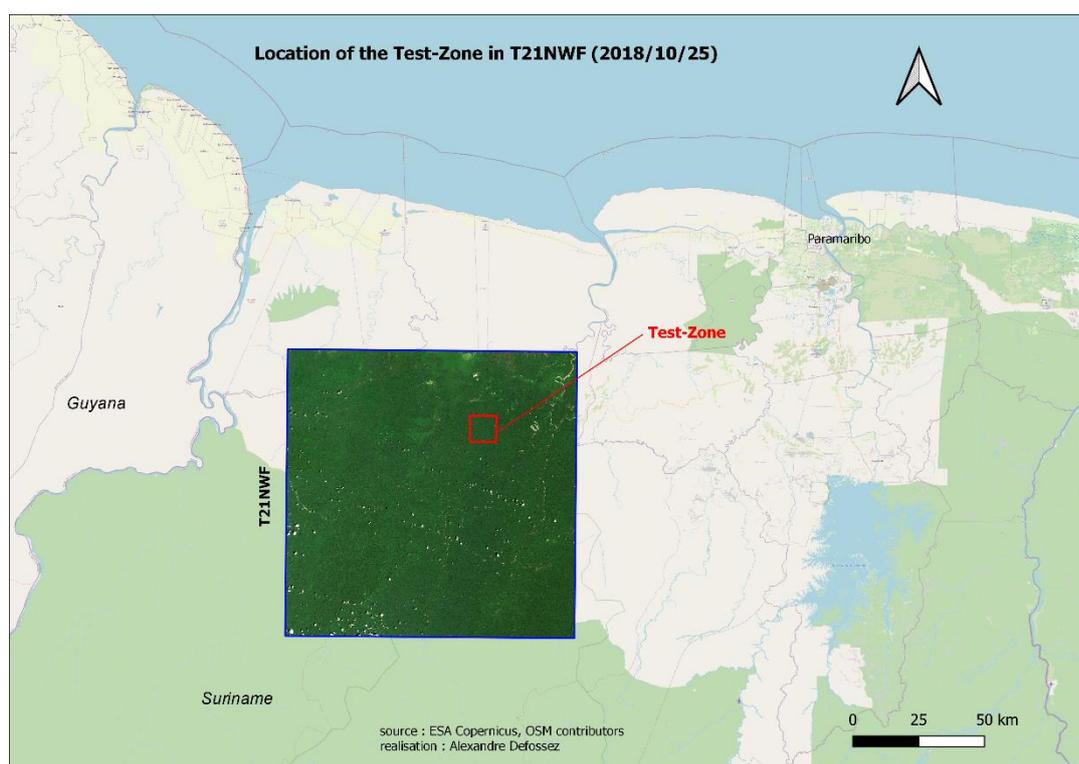
a. Production d’images composites d’indices spectraux à l’échelle d’une tuile Sentinel-2

i. Téléchargement et correction atmosphérique des images

A l’aide de la librairie *sen2lasrc*, nous avons téléchargé et produit au niveau L2A les séries temporelles S2 des mois de septembre et octobre 2018 avec moins de 30% d’ennuage sur les tuiles 21NWF et 22NCK. Les mois de septembre et octobre correspondent au milieu de la saison sèche sur le plateau guyanais, une période avec un ennuagement relativement plus faible. L’année 2018 s’est révélée parmi les plus favorables depuis le début des acquisitions S2 (saison sèche) tout en étant chronologiquement proche des inventaires forestiers les plus récents réalisés par l’ONF dans le cadre du programme « Habitat ». Seules les images avec un taux d’ennuage inférieur ou égal à 30 % d’après l’algorithme de *sen2cor* proposé par *Sentinel Hub Eo Browser* ont été retenues, les autres étant jugées par défaut non-exploitable. Les masques utilisés sont des masques restrictifs combinant *sen2cloudless* et *Fmask*, paramétrés pour filtrer les nuages, les ombres et les éléments « autre » non couverts par la végétation (e.g. surface hydrique, zones urbaines).

## ii. Sélection des indices spectraux

Afin de déterminer quels indices spectraux intégrer dans l'image composite parmi la liste d'indices disponibles dans la librairie *spinR*, nous avons cherché à identifier une série d'indices avec un niveau de redondance limité, c'est-à-dire avec une certaine complémentarité de l'information spectrale. Nous nous sommes basés sur une « zone-test » de 100 km<sup>2</sup> incluse dans l'acquisition individuelle presque entièrement dépourvue de nuages du 25/10/2018 de la tuile 21NWF (**Figure 6**). L'utilisation d'une zone-test nous permet à la fois de réduire le temps de calcul et de limiter d'éventuels biais provoqués par la présence de nuages résiduels non masqués.



**Figure 6.** Localisation de la zone de test utilisée pour déterminer une sélection d'indices spectraux comme source d'information spectrale en entrée de biodivMapR.

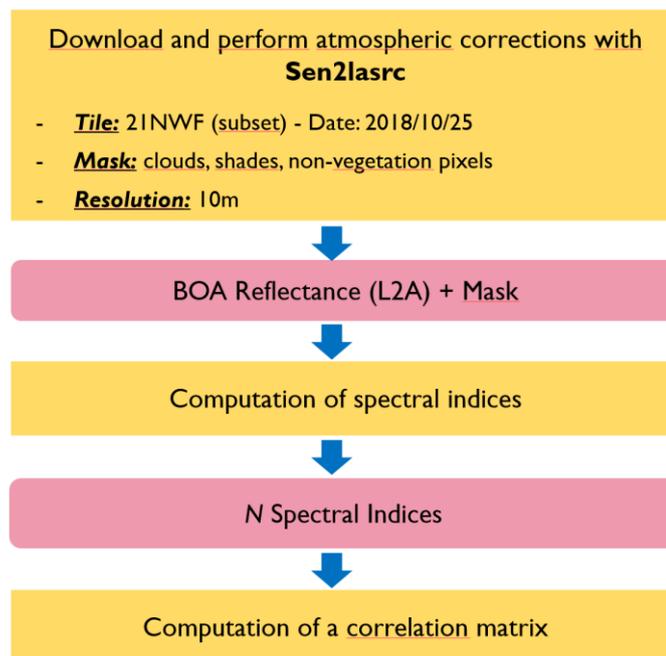
Une première étape a consisté à produire une image multispectrale dans le format accepté par *spinR* à l'aide du package *preprocS2*. A l'intérieur de l'image multispectrale, nous avons conservé uniquement les bandes d'une résolution spatiale de 10 m (bandes 2, 3, 4, 8) et de 20 m (bandes 5, 6, 7, 8A, 11 et 12) correspondant au visible et aux domaines de l'infrarouge et du proche infrarouge (**Tableau 1**). L'étape suivante a consisté à calculer la totalité des indices spectraux fournis par *spinR* avant d'appliquer un masque permettant de filtrer :

- les valeurs de réflectances de type nulles ou négatives ;
- les ombres et les nuages résiduels à partir d'un filtre radiométrique. On suppose en effet que les pixels dont la réflectance dans le bleu (bande 2) est supérieure à 5 % correspondent à des pixels voilés (bordure de nuage) non pris en compte par les masques nuages, et les pixels dont

la réflectance dans le proche infrarouge (bande 8) est inférieure à 20 % correspondent à des pixels de végétation ombragés ;

- les valeurs extrêmes des indices spectraux d'après le critère de l'écart interquartile (IQR ou interquartile range).

Une matrice correspondant au coefficient de détermination ( $R^2$ ) calculé entre toutes les combinaisons possibles d'indices spectraux a été produite. Cette matrice a permis de regrouper les indices spectraux fortement corrélés entre eux. Une sélection d'indices spectraux faiblement corrélés permet d'obtenir des informations potentiellement complémentaires sur les propriétés de la végétation. Les indices les plus communément utilisés dans la littérature ont également été privilégiés. Après examen de la matrice de corrélation, 5 indices spectraux ont été retenus (certains groupes d'indices corrélés ne sont pas représentés afin de conserver un petit nombre d'indices et de faciliter l'interprétation de l'image composite). Les étapes concernant la sélection des indices spectraux sont résumées dans la **Figure 7**.



**Figure 7.** Diagramme de flux des étapes de prétraitement (téléchargement et correction atmosphérique) et de sélection des indices spectraux sur la zone test.

### iii. Détermination du critère d'ennuagement maximal

La première étape de production des images composites a consisté à appliquer un critère de sélection des acquisitions individuelles parmi le jeu d'images L2A téléchargées. Cette règle devait pouvoir s'appliquer de manière uniforme à tous les jeux d'images S2 de niveau L2A utilisables pour constituer une image composite. Le critère de sélection appliqué est le suivant : *l'image composite doit contenir au moins 80 % de pixels clairs (non ennuagés) et être produite à partir d'au moins 6 acquisitions*. Le processus d'application du critère se décompose de la manière suivante :

1. Détermination du pourcentage de pixels clairs des masques de chaque acquisition individuelle ;
2. Empilement (« stack ») des 6 masques avec les pourcentages de pixels clairs les plus élevés dans l'ordre croissant au sein du jeu d'acquisitions individuelles L2A ;
3. Test du critère de 80 % de pixels clairs ;
4. Si le nouveau masque atteint au moins 80 % de pixels clairs, la liste d'acquisitions individuelles est conservée en l'état, sinon, le masque de l'acquisition la moins ennuagée parmi le jeu d'acquisition restant est ajouté au masque cumulé. Le critère est re-testé jusqu'à satisfaction (étape 3) ;
5. Une fois le critère atteint, un masque correspondant au nombre d'acquisitions cumulées par pixel est produit.

Une limite à l'application de la méthode concerne les zones côtières où les tuiles S2 comprennent des surfaces océaniques importantes, intégrées indistinctement au masque de nuages. Dans la chaîne de traitements, il peut s'avérer nécessaire d'ajuster le critère du pourcentage de pixels clairs minimum, en particulier dans le cas des tuiles S2 situées en zones côtières.

*iv. Production des images composites dans deux contextes d'ennuagement contrastés et détermination des indicateurs de diversité  $\alpha$  et  $\beta$*

La seconde étape a consisté à calculer les indices spectraux sélectionnés pour chaque acquisition individuelle retenue (après application du critère d'ennuagement) avant d'appliquer leurs masques respectifs « mis à jour » (utilisation du filtre radiométrique et suppression des valeurs aberrantes). Pour chaque indice spectral, les images correspondant aux différentes acquisitions individuelles ont été empilées pour former des images multibandes (« stack »). Après contrôle visuel, le mNDVI705 n'a finalement pas été pris en compte en raison d'un artefact. La valeur médiane pour chaque pixel des images d'indice spectral multibandes a été utilisée pour produire les images composites. Par rapport à la valeur moyenne, la médiane a été privilégiée car théoriquement moins sensible à d'éventuelles valeurs extrêmes. Les images correspondant aux médianes des différents indices spectraux ont été empilées pour obtenir l'image composite multibande finale (*i.e.* chaque bande correspond à la valeur médiane d'un indice spectral).

Les étapes de production de l'image composite sont résumées dans la **Figure 8**.

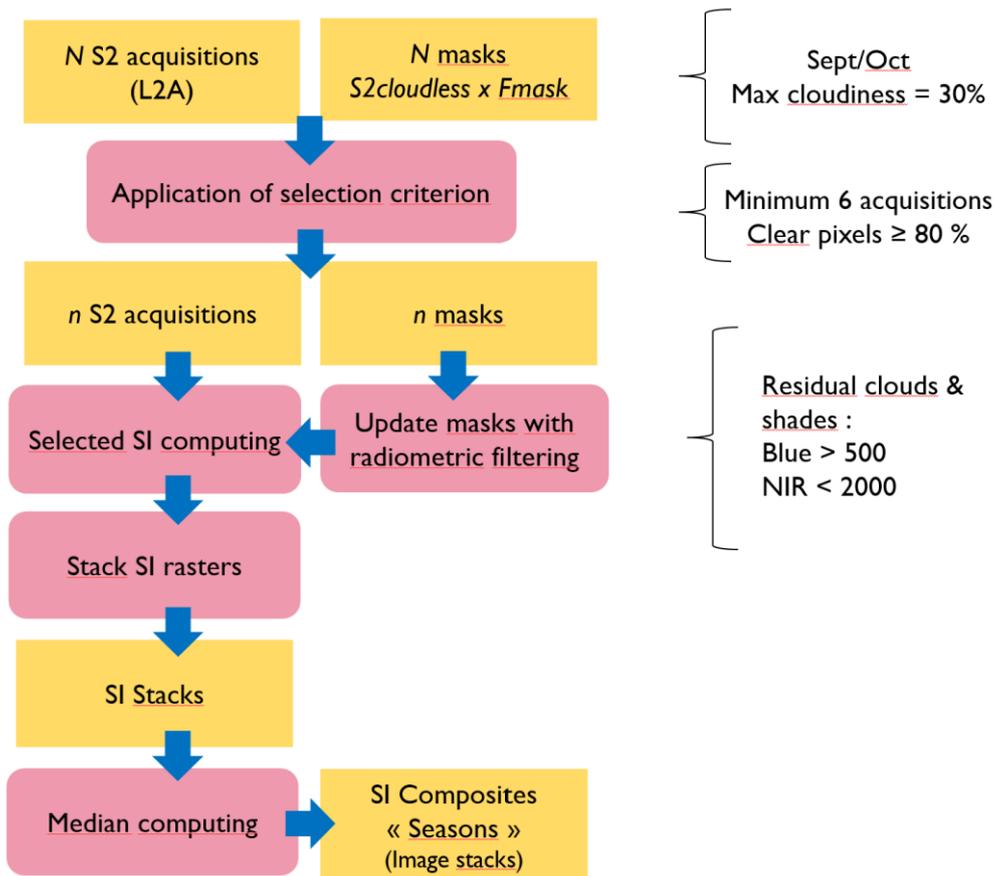


Figure 8. Diagramme de flux résumant le processus de production de l'image composite.

### b. Calcul des indicateurs de diversité spectrale

Une « espèce spectrale », telle que définie dans la méthodologie de *biodivMapR*, correspond à un groupe de pixels (*cluster*) dont l'information spectrale est « proche » d'après leurs coordonnées respectives sur les axes représentant les indices spectraux sélectionnés, mais qui peuvent être spatialement distants. Dans le contexte de la forêt tropicale, le nombre de clusters est fixé à  $k = 50$  clusters (espèces spectrales). Cette valeur arbitraire correspondait dans la version initiale de la méthode à un compromis entre les performances obtenues par la méthode pour l'estimation d'indicateurs de biodiversité et le temps de calcul nécessaire à l'application de la méthode, croissant avec le nombre de clusters (Féret & Asner, 2014). Dans le contexte des forêts tropicales du plateau des Guyanes, ce nombre d'espèces spectrales est évidemment bien en dessous du nombre réel d'espèces d'arbres observables au sommet de la canopée, et la méthode ne cherche pas à effectuer une association parfaite entre espèces taxonomiques et espèces spectrales. On affecte ainsi à chaque pixel de l'image une espèce spectrale. La dernière étape consiste à calculer les métriques de diversité  $\alpha$  et  $\beta$ . La diversité  $\alpha$  est exprimée par l'indice de Shannon, et la diversité  $\beta$  par la dissimilarité de Bray-Curtis (Figure 6). Ces métriques sont calculées au sein de chaque cellule d'une grille de 100 m x 100 m (soit 1 ha, correspondant à 100 pixels de 10 m de côté d'une image S2) appliquée sur l'image des espèces spectrales. On obtient finalement deux images dérivées de l'image initiale des réflectances, correspondant à la diversité spectrale approchée dans les composantes de diversité  $\alpha$  et  $\beta$ . L'indice de Shannon et la dissimilarité de Bray-Curtis ont été utilisés ici car ils constituent des indicateurs de la diversité taxonomique couramment utilisés en écologie.

## Indice de Shannon

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$$

avec :

$$p(i) = n_i / N$$

où sont définis :

$p(i)$  : proportion de l'espèce  $i$  dans l'environnement.

$n_i$  : le nombre d'individus de l'espèce  $i$ .

$N$  : le nombre total d'individus incluant toutes les espèces de l'environnement considéré.

## Dissimilarité de Bray-Curtis

$$BC_{jk} = 1 - \frac{2 \sum_{i=1}^p \min(N_{ij}, N_{ik})}{\sum_{i=1}^p (N_{ij} + N_{ik})}$$

où sont définis :

$N_{ik}$  : l'abondance d'une espèce  $i$  dans un échantillon  $k$ .

$N_{ij}$  : l'abondance d'une espèce  $i$  dans un échantillon  $j$ .

$\min(...,...)$  : pour une espèce  $i$  présente dans  $j$  et  $k$ , le nombre minimum d'individus entre  $j$  et  $k$ .

$p$  : Nombre total d'espèces.

**Figure 9.** Formules mathématiques de l'indice de Shannon et de la dissimilarité de Bray-Curtis.

Source : Wikipédia.

## 2) Validation des cartes de diversité spectrale à l'échelle d'une tuile Sentinel-2

Après concertation avec les agents de l'ONF, il est apparu plus pertinent de traiter les données d'inventaires forestiers à l'échelle du layon plutôt qu'à l'échelle de la parcelle. D'autre part, tous les individus (arbres) dont le DBH était inférieur à 40 cm ont été écartés : on estime que ces individus ne participent pas à la canopée et ne sont donc pas détectables sur les images S2. Les données de comptage des essences forestières ont donc été « agrégées » au layon. Nous avons testé deux hypothèses de validation correspondant à deux approches possibles :

- **Hypothèse de validation 1 :** *Il existe une corrélation entre les valeurs des indices de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  dérivés des images S2 et les valeurs des indices diversité  $\alpha$  et  $\beta$  des essences forestières inventoriées à l'échelle du layon.*
- **Hypothèse de validation 2 :** *L'habitat et la localisation géographique influencent la composition des communautés d'essences forestières participant à la canopée ; ces communautés peuvent se distinguer en termes de diversité spectrale à travers ses composantes  $\alpha$  et  $\beta$ .*

a. *Test des corrélations entre les indicateurs dérivés de l'images et ceux calculés à partir des inventaires forestiers du programme Habitat*

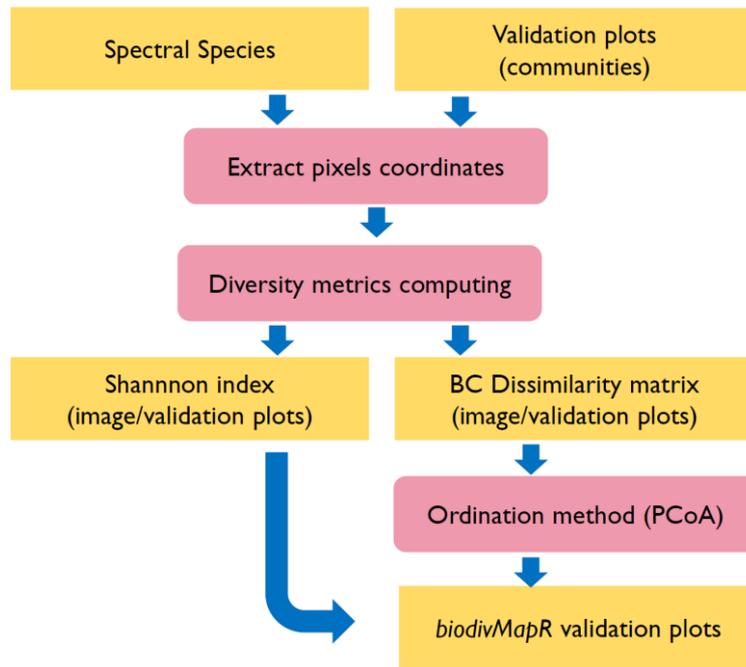
Tester l'hypothèse 1 a pour but de mettre en évidence l'existence d'un potentiel lien entre les valeurs des indices diversité dérivés des images S2 et les valeurs de ces mêmes indices obtenus à partir des inventaires forestiers. L'enjeu de cette hypothèse de validation n'est pas de démontrer formellement l'existence d'un lien de type « cause à effet » entre la diversité spectrale et la diversité des essences forestières participant à la canopée, mais de confirmer à la fois l'intérêt de rechercher l'existence de ce lien et l'existence d'une certaine correspondance entre l'échelle spatiale des inventaires forestiers avec la résolution des images de diversité  $\alpha$  et  $\beta$ .

L'indice de Shannon (diversité  $\alpha$ ) et la dissimilarité de Bray-Curtis (diversité  $\beta$ ) ont été calculés à partir des données de comptage des essences forestières sur les parcelles d'inventaires du réseau « Habitat » présentes sur la tuile 22NCK. Les placettes d'inventaire forestier ont été agrégées au layon. Deux tests statistiques ont été utilisés pour comparer les valeurs issues des inventaires forestiers et des images de diversité spectrale : le test de corrélation de Pearson afin de comparer les valeurs de l'indice de Shannon et le test de Mantel pour comparer les matrices de dissimilarité de Bray-Curtis.

b. *Validation des cartes de diversité dans le cadre de l'approche de biodivMapR*

L'hypothèse 2 se réfère à la méthode de validation proposée dans le cadre de *biodivMapR* : il s'agit de vérifier si des types de végétation différenciés sur le terrain se distinguent par des motifs de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  sur les images de diversité spectrale. Pour tester cette hypothèse, il a été nécessaire de former un nouveau jeu de placettes de validation : les placettes ont été regroupées en fonction du type d'habitat et du layon auquel elles appartenaient, de manière à prendre en compte à la fois un effet de l'habitat et un effet « géographique » dans la formation des différents ensembles forestiers. En fonction du nombre d'habitats inventoriés au sein de chaque layon, des placettes de validation de tailles différentes ont été obtenues. Dans les inventaires forestiers, un même habitat peut se distinguer dans certains cas en habitat « particulier ». Trois types d'habitat « particulier » ont été jugés suffisamment distincts de l'habitat principal pour en être distingué dans les regroupements de placettes d'après l'expertise de l'ONF : les forêts marécageuses, les forêts sur savane roche et inselberg, et les forêts sur « cuirasses ».

Après définition du jeu de placettes de validation, les valeurs des pixels de l'image des « espèces spectrales » ont été extraites sur l'emprise des placettes et les indices de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  ont été recalculés pour chacune des placettes. Les valeurs ont ensuite été projetées sur les axes d'une Analyse en Coordonnées Principale (PCoA) de façon à visualiser la correspondance entre le type de placettes et les potentiels « motifs » de diversité spectrale  $\alpha$  et  $\beta$ . Les étapes principales de la méthode de validation de *biodivMapR* sont résumées dans la **Figure 10** ci-dessous :

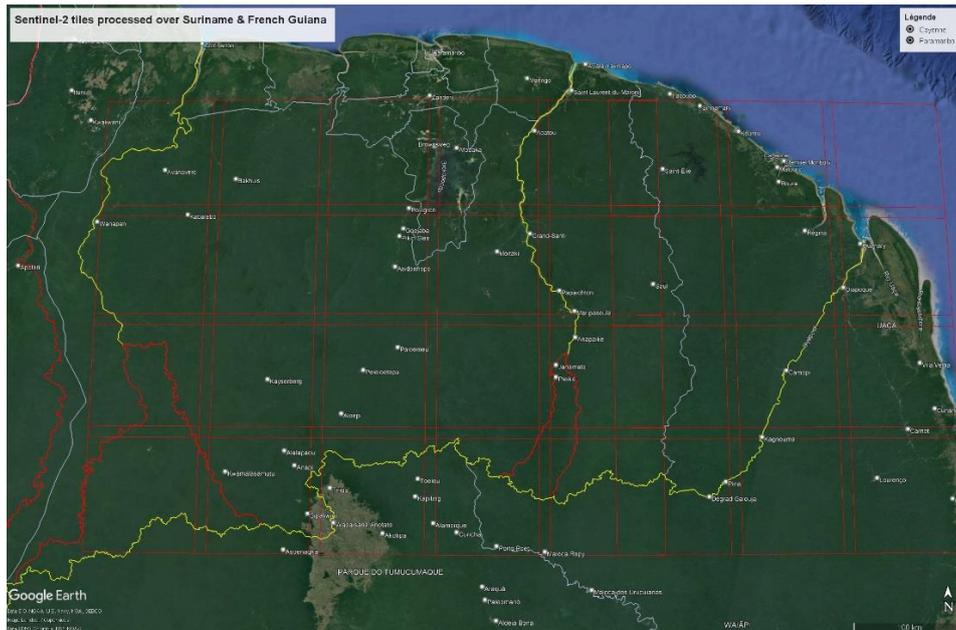


**Figure 10.** Diagramme de flux résumant les étapes principales de validation de la diversité  $\alpha$  et  $\beta$  proposée dans le cadre de biodivMapR.

### 3) Première approche de cartographie de la diversité spectrale des communautés forestières à l'échelle régionale

Dans le but d'obtenir une cartographie de la diversité spectrale des communautés forestières à une échelle régionale, la chaîne de traitements a été restructurée en profondeur afin d'intégrer une étape de mosaïquage des tuiles S2. Cette restructuration a nécessité de prendre en compte deux contraintes : le recours à une puissance de calcul importante et le traitement de tuiles situées dans les contextes d'enneigement les plus défavorables au sein du plateau des Guyanes. Afin de répondre à ces contraintes, deux solutions ont été proposées : 1) *l'optimisation des traitements à l'aide du package [bigRaster](#), dédiée au traitement d'images de taille importante et la mise en place d'une parallélisation des traitements ; 2) la densification des séries temporelles S2 utilisées pour produire les images composites désenneigées (i.e. l'élargissement de la fenêtre temporelle investiguée et par là l'augmentation du nombre d'acquisitions individuelles dans la série).*

L'emprise choisie recouvre la Guyane française, le Suriname (à l'exception de la bande côtière, en partie déboisée) et la partie nord de l'Etat de l'Amapà au Brésil. Une zone frontalière au sud-est du Guyana se trouve également intégrée à la mosaïque. Au total, l'emprise de la région investiguée recouvre 32 tuiles S2 (**Figure 11**).



**Figure 11.** Emprise de la région du plateau des Guyanes traitée dans le cadre de la production d'une mosaïque de diversité spectrale des communautés forestières. Au total 32 tuiles S2 sont présentes dans la région investiguée.

#### a. *Densification des séries temporelles*

Pour l'ensemble des tuiles, les acquisitions individuelles des mois d'août, septembre, octobre et novembre 2018 ont été traitées à l'aide du programme *sen2lasrc* : téléchargement, production des masques de nuages (*s2cloudless*, *Fmask*, et  $s2cloudless \times Fmask$ ) et correction atmosphérique LaSRC. Cette étape a nécessité environ trois mois de temps de calcul machine, réduits à moins de trois jours grâce à la parallélisation des codes. A l'inverse de la première version de la chaîne de traitements, toutes les acquisitions ont été traitées y compris les plus ennuagées (pas de critère sur l'ennuagement).

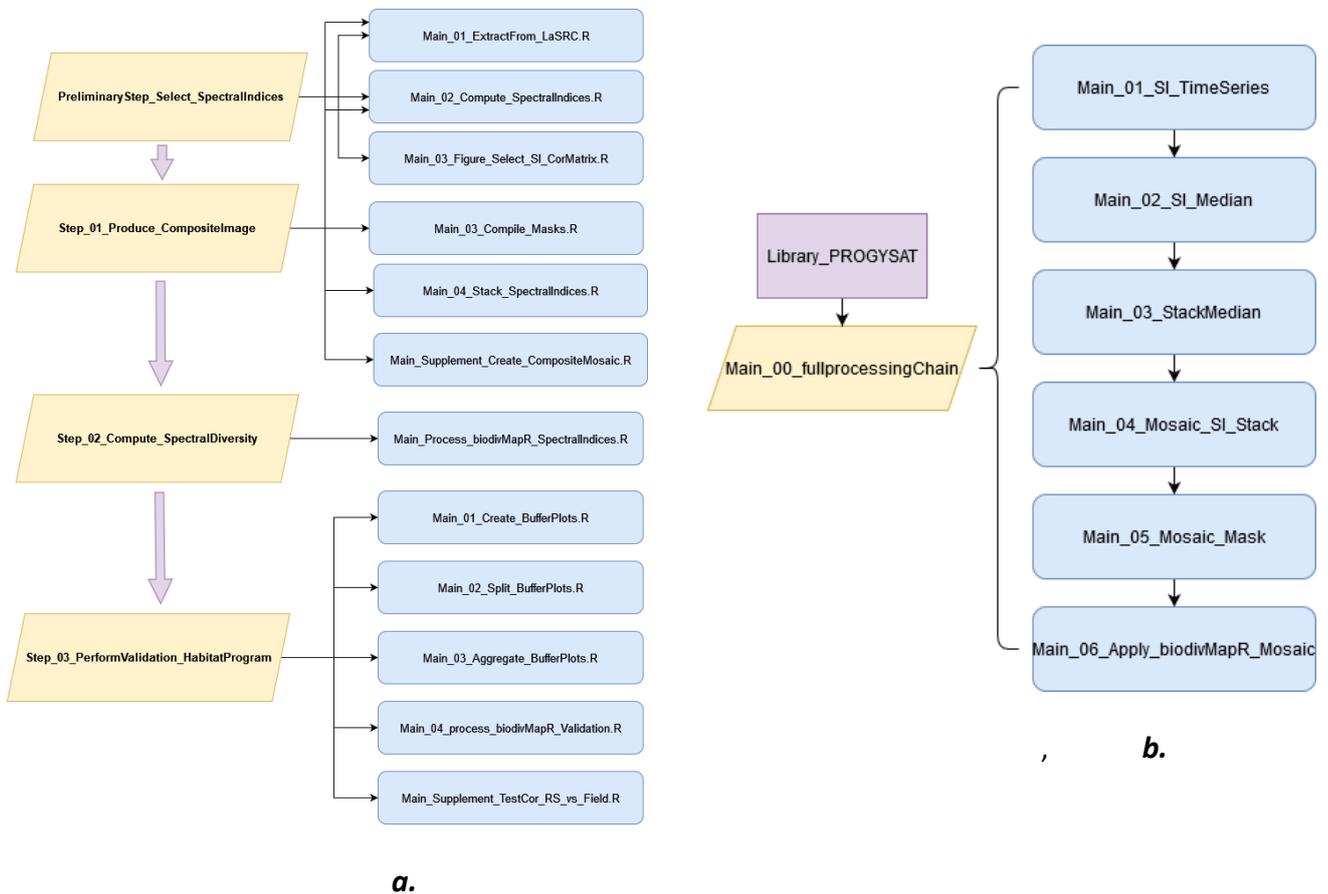
#### b. *Calcul de la médiane des indices spectraux*

Pour chaque pixel des acquisitions individuelles téléchargées et prétraitées (correspondant au jeu de tuiles S2 utilisé pour construire la mosaïque) les indices spectraux NDVI et  $CR_{SWIR}$  (un indice spectral sensible à la teneur en eau de la végétation) ont été calculés. Les indices EVI et CRI1 intégrés dans la première version de la chaîne de traitements ont été écartés afin de limiter la présence des artéfacts dans l'image finale. Pour chaque série temporelle d'acquisitions individuelles associée à une tuile S2, les valeurs médianes NDVI et  $CR_{SWIR}$  ont été calculées pour tous les pixels. Une image composite à deux bandes ( $NDVI_{Median}$  et  $CR_{SWIR, Median}$ ) est obtenue pour chaque tuile S2.

### c. Mosaïquage et détermination des indicateurs de diversité spectrale

Les images composites d'indices spectraux des différentes tuiles S2 et leurs masques de nuages ont été assemblés en mosaïques. Aucune méthode d'harmonisation des parties chevauchantes n'a été appliquée, elles correspondent aux premières images utilisées dans l'ordre d'apparition de la liste d'images. Le calcul des indicateurs de diversité spectrale  $\alpha$  et  $\beta$  a finalement été appliqué à la mosaïque d'images composites à l'aide du package *biodivMapR* selon les mêmes étapes précédemment décrites (détermination des espèces spectrales, production de l'image de diversité spectrale et calcul des métriques de biodiversité). A l'issue de cette dernière étape, nous obtenons une mosaïque de diversité  $\alpha$  (indice de Shannon) et une mosaïque de diversité  $\beta$  (dissimilarité de Bray-Curtis) sur l'emprise géographique régionale précédemment définie. Les produits raster correspondant à ces indices de diversité ont été obtenus avec une résolution spatiale de 100 m x 100 m.

### 4) Présentation générale des deux versions de la chaîne de traitements



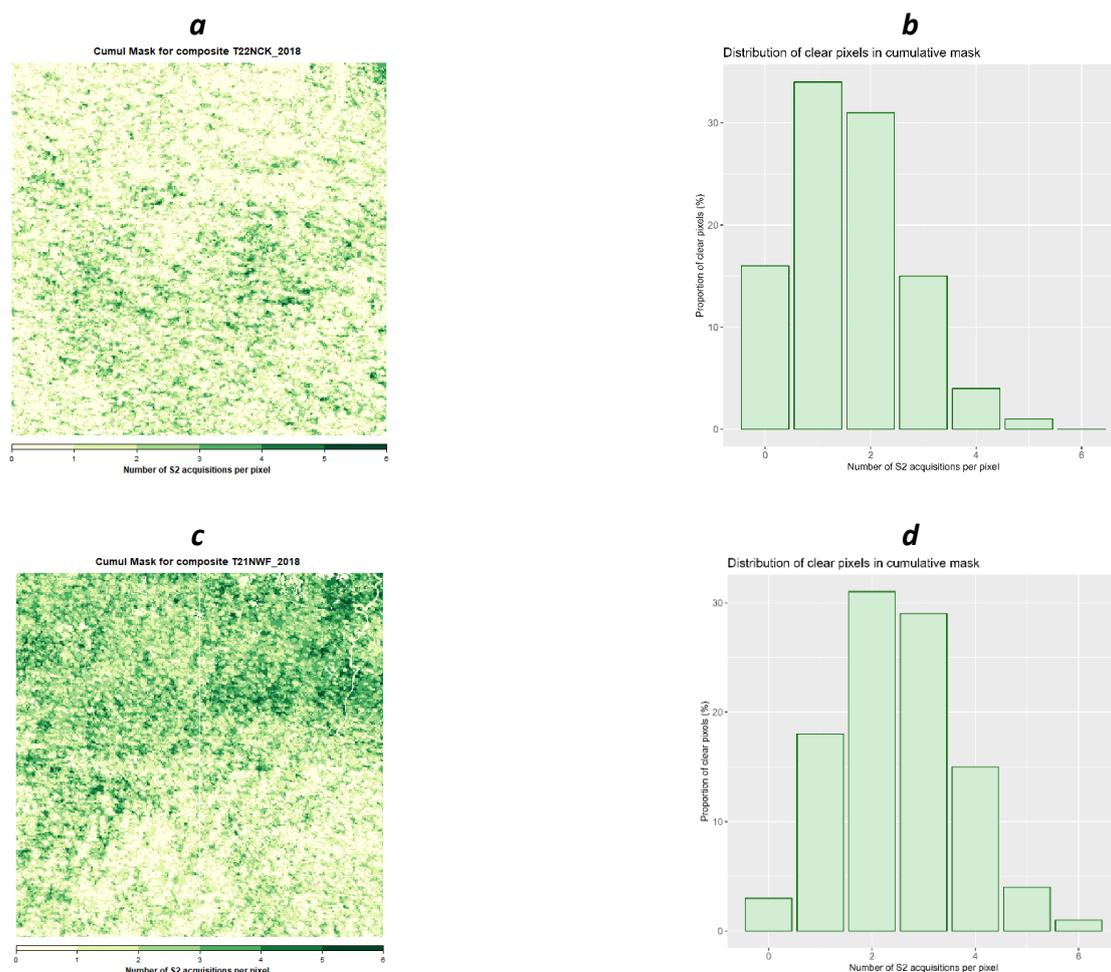
**Figure 12.** Présentation de la structure générale des deux versions de la chaîne de traitements. Les boîtes bleues représentent les scripts R associés aux différentes étapes de la chaîne, représentées par les boîtes jaunes. La boîte violette représente les fonctions écrites pour les besoins de la chaîne, séparées du corps principal. **(a)** Première version de la chaîne de traitements, permettant d'appliquer un critère de sélection des acquisitions S2 à l'échelle d'une tuile et sur une période temporelle courte, phénologiquement cohérente (« saison »). **(b)** Deuxième version de la chaîne de traitements, permettant de traiter la totalité des acquisitions S2 disponibles sur une période étendue (« densification » de la série S2) en vue de réaliser une mosaïque de la diversité spectrale à l'échelle régionale. Cette version fait appel à une puissance de calcul importante.

## IV. Résultats

### 1) Cartographie des indicateurs de diversité $\alpha$ et $\beta$ sur les tuiles 22NCK et 21NWF à partir des « scènes » désennuagées

#### a. Comparaison des masques : « meilleures » acquisitions individuelles vs images composites

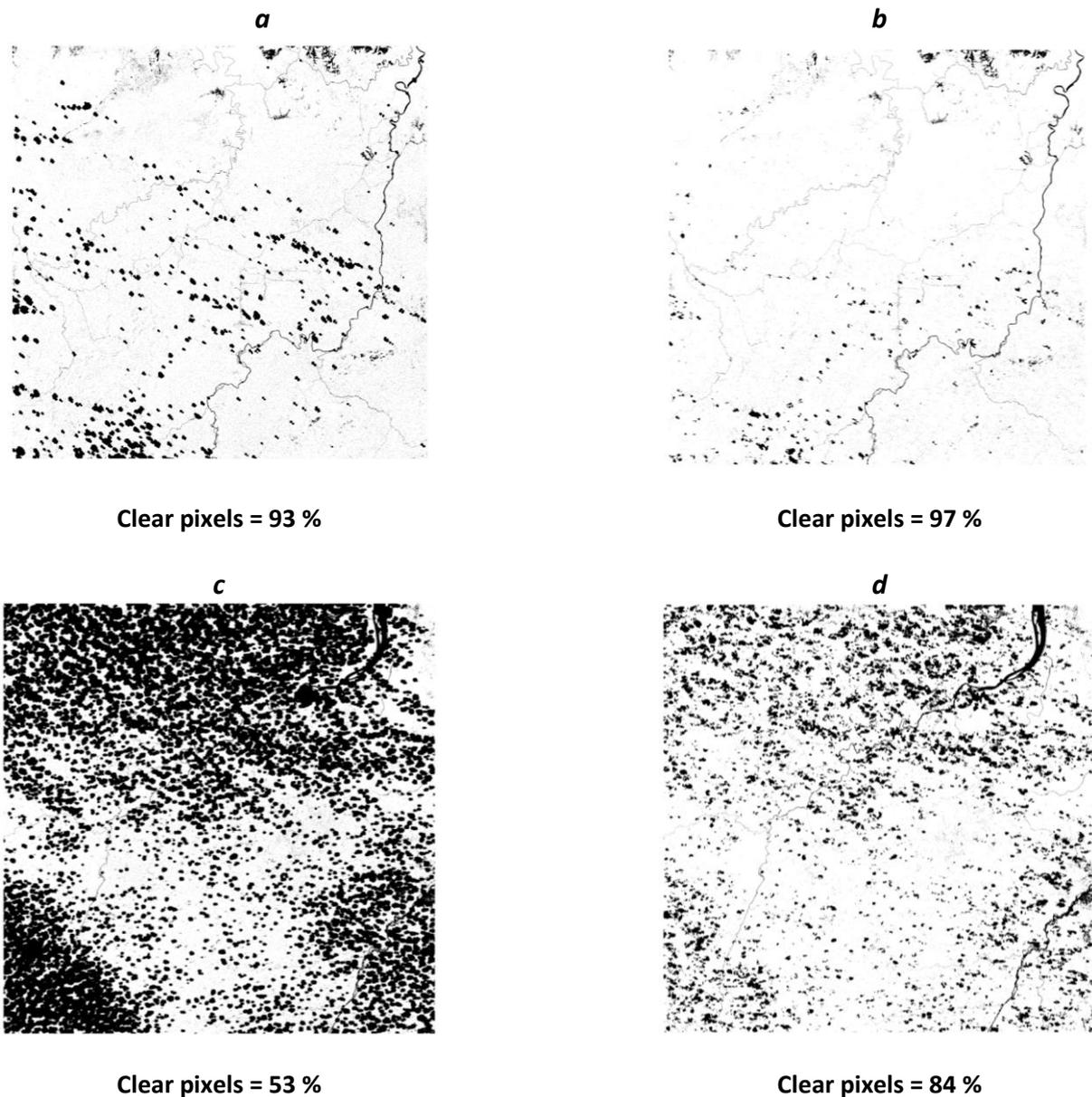
Les masques des acquisitions cumulées des tuiles 21NWF et 22NCK sont présentés dans la **Figure 13**. Nous observons que, dans les deux cas, la majorité des pixels synthétiques de l'image composite (~75%) dérivent d'une série de 1 à 3 pixels. On constate une différence entre les deux tuiles concernant le nombre de pixels masqués (aucune acquisition disponible) : la fréquence relative de pixels masqués de la tuile 22NCK atteint 16 % (**Figure 13-b**) et seulement 3 % pour la tuile 21NWF (**Figure 13-d**).



**Figure 13.** Disponibilité des pixels des tuiles 22NCK et 21NWF. Cartographies du nombre d'acquisitions par pixel des tuiles 22NCK (a) et 21NWF (c). Fréquences relatives associées au nombre d'acquisitions utilisées par pixel des tuiles 22NCK (b) et 21NWF (d).

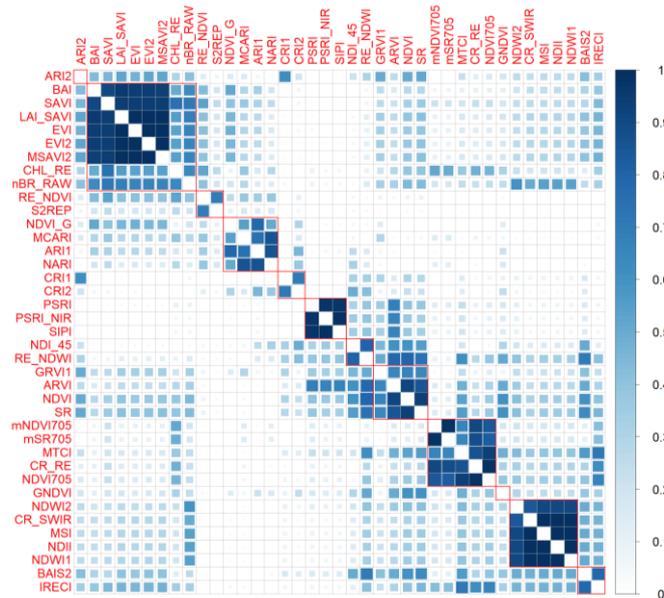
Si l'on compare les pourcentages de pixels clairs des masques des images composites par rapport aux masques des « meilleures » acquisitions individuelles correspondantes (

**Figure 14**), on constate que, dans le cas de 21NWF, la création de l'image composite a permis d'augmenter de 4 % le nombre de pixels clairs tandis que dans le cas de 22NCK, l'image composite a permis d'atteindre 84 % de pixels clairs contre 53 % pour la meilleure acquisition, ce qui représente une augmentation de 31 % de pixels disponibles pour la détermination de la diversité spectrale. Cette comparaison des masques confirme l'intérêt d'utiliser une image composite par rapport à la recherche de la « meilleure » acquisition individuelle, notamment dans une zone soumise à un fort ennuagement.



**Figure 14.** Comparaison des masques des acquisitions individuelles les moins ennuagées et des masques des images composites pour les tuiles 21NWF et 22NCK sur la saison septembre-octobre 2018. **(a)** Masque de la tuile 21NWF à la date d'acquisition du 25/10/2018 ; **(b)** Masque de la tuile 21NWF de l'image composite correspondant à la saison septembre-octobre 2018 ; **(c)** Masque de la tuile 22NCK à la date d'acquisition du 09/09/2018 ; **(d)** Masque de la tuile 22NCK de l'image composite correspondant à la saison septembre-octobre 2018.

b. Matrice de corrélation des indices spectraux disponibles dans spinR



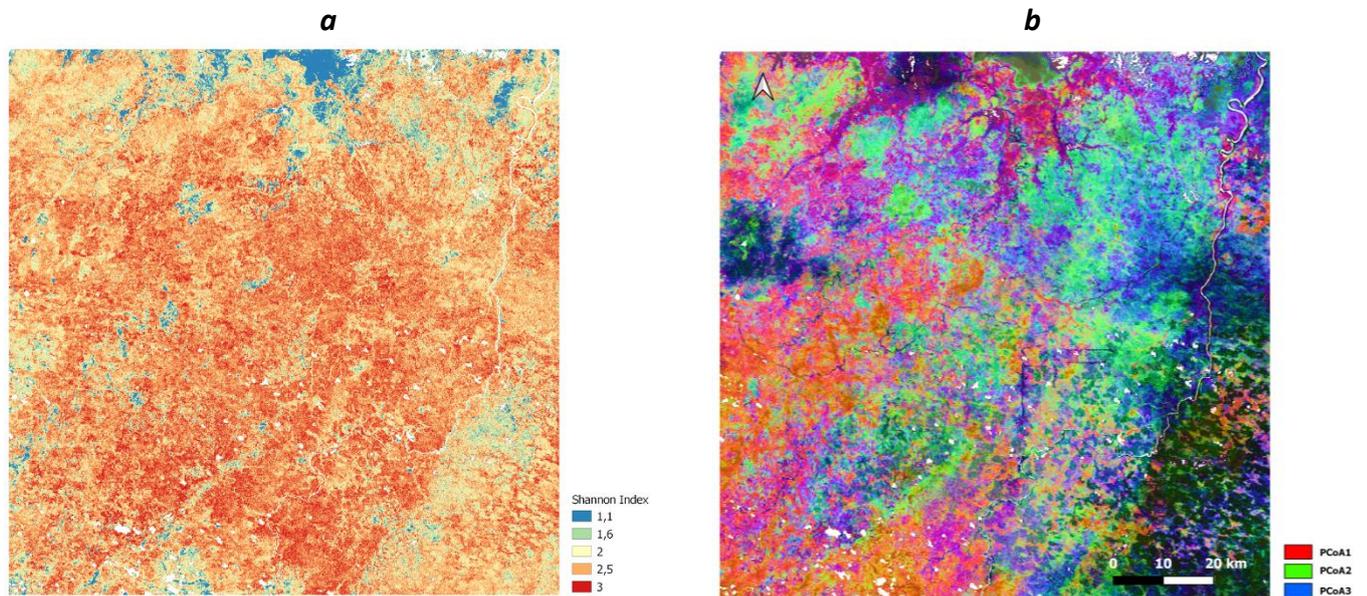
**Figure 15.** Matrice du  $R^2$  entre les indices spectraux produits par spinR à partir de l'acquisition S2 de la zone-test. Plus la valeur du  $R^2$  se rapproche de 1, plus la corrélation entre les deux indices correspondant est élevée. Les encadrés représentent  $k = 12$  groupes obtenus après classification ascendante hiérarchique (CAH). Les groupes d'indices spectraux sont représentés par les encadrés rouges.

Après examen de la matrice de  $R^2$  (**Figure 15**) nous avons choisi  $k = 12$  groupes d'indices ordonnés par classification ascendante hiérarchique (CAH). Les indices ARI2 et GNDVI isolés ont été écartés. Les indices  $RE_{NDVI}$ , S2REP,  $NDVI_G$ , MCARI, ARI1, NARI, PSRI,  $PSRI_{NIR}$ , SIPI,  $NDI_{45}$ ,  $RE_{NDWI}$ , BAIS2 et IRECI ont également été écartés. Ces derniers sont jugés moins pertinents concernant les propriétés biophysiques de la végétation tropicale et sont également utilisés de manière plus marginale dans la littérature scientifique. Nous avons sélectionné les indices spectraux suivants : EVI, CRI1, NDVI,  $mNDVI_{705}$  et  $CR_{SWIR}$ , chaque indice étant corrélé de manière relativement importante aux autres indices de son groupe ( $R^2$  entre 0.6 et 1). Les indices EVI, CRI1, NDVI et  $mNDVI_{705}$  font l'objet d'une utilisation fréquente dans la littérature scientifique (voir notamment [Liu et Huete 1995](#); [Huete 2012](#); [Xue et Su 2017](#)). Le  $CR_{SWIR}$ , développé par l'UMR TETIS dans le cadre de travaux associés au suivi de l'état de santé des forêts par télédétection, a été défini à l'issue d'un travail visant à optimiser le lien entre la teneur en eau foliaire du couvert végétal et les informations acquises par S2. Cet indice spectral est décrit dans le cadre d'un dossier thématique de l'ONF (cf. [Rendez-vous techniques de l'ONF - n°69-70](#)).

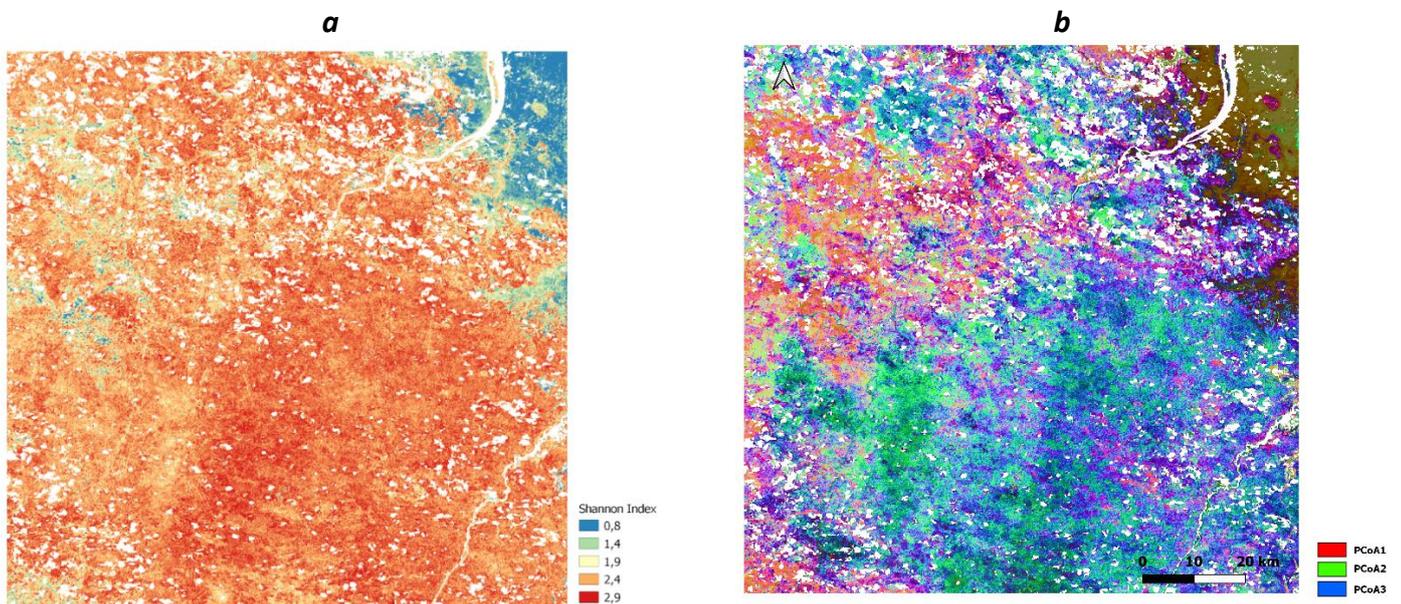
c. Cartes de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  à l'échelle de la tuile Sentinel-2

Sur les **Figure 16 – a** et **Figure 17 – a**, nous observons une distribution relativement homogène de la diversité  $\alpha$  avec des zones particulières où elle tend à diminuer. Concernant la diversité  $\beta$ , des motifs très contrastés apparaissent, notamment sur la tuile 21NWF (**Figure 16 – b**). Concernant la tuile 22NCK (**Figure 17 – b**), nous observons une augmentation du nombre de motifs qui peuvent être distingués

par rapport au résultat obtenu avec la « meilleure » acquisition (**Annexe 1**). Ce résultat confirme l'intérêt de l'utilisation d'une image composite. Sur la **Figure 16 – b**, on peut observer la présence d'un artéfact sur la partie droite de l'image (à l'est).



**Figure 16.** Diversité  $\alpha$  et  $\beta$  de l'image composite de la tuile 21NWF sur la saison septembre-octobre 2018. **(a)** Diversité  $\alpha$  (indice de Shannon) et **(b)** la diversité  $\beta$  (dissimilarité de Bray-Curtis).



**Figure 17.** Diversité  $\alpha$  et  $\beta$  de l'image composite de la tuile 21NWF sur la saison septembre-octobre 2018. **(a)** Diversité  $\alpha$  (indice de Shannon) et **(b)** la diversité  $\beta$  (dissimilarité de Bray-Curtis).

## 2) Résultats de la validation des cartes de diversité spectrale à l'échelle d'une tuile Sentinel-2

### a. Résultats des tests de corrélation entre les indicateurs dérivés de l'imagerie S2 et ceux calculés à partir des inventaires forestiers du programme Habitat

Le **Tableau 2** indique les résultats des tests de corrélation entre les indices de diversité spectrale et les indices de diversité calculés à partir des inventaires forestiers (hypothèse de validation 1). Dans le cas de la diversité  $\alpha$ , nous n'observons pas de corrélation significative. Avec la diversité  $\beta$ , le test de Mantel révèle une corrélation faible mais significative entre les matrices de dissimilarité de Bray-Curtis issues des images de diversité spectrale et celles issues des inventaires forestiers.

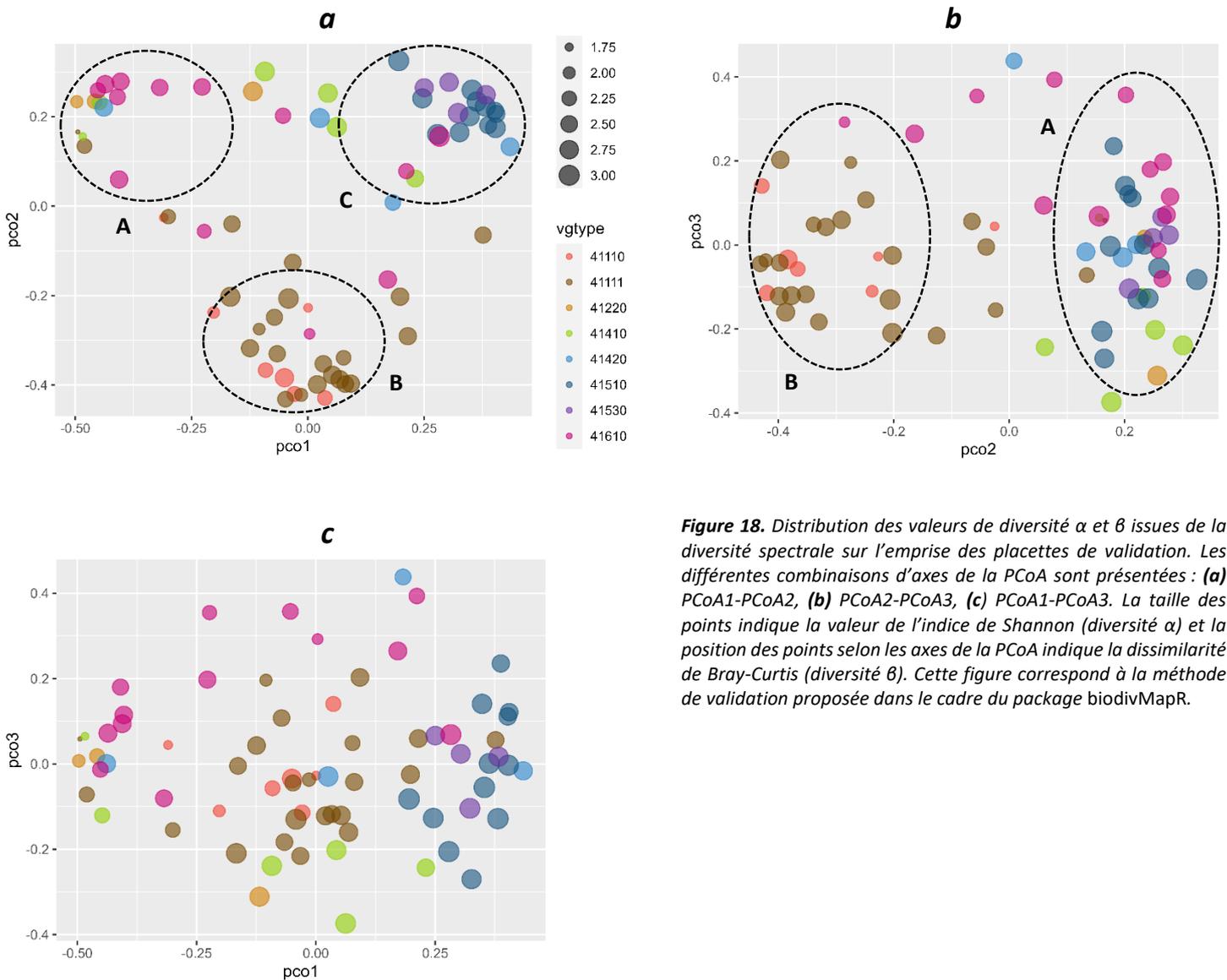
**Tableau 2.** Résultat des tests de corrélation entre les valeurs des indices de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  dérivés de l'imagerie S2 (diversité spectrale) et des inventaires forestiers (diversité des essences forestières inventoriées sur le terrain). Deux cas de figure sont présentés : test de corrélation où les placettes de tous les habitats principaux sont prises en compte (« Layons : tous les habitats »), test de corrélation dans le cas où un seul type d'habitat principal a été pris en compte (« Layons : habitats uniques »). Dans ce second cas, seul l'habitat majoritaire a été conservé.

	Test de corrélation de Pearson (diversité $\alpha$ )	Test de Mantel (diversité $\beta$ )
Layons : tous les habitats	Coefficient = -11 ; p-value = 0.5	Observation = 0.5 p-value = $1 \times e^{-4}$
Layons : habitats uniques	Coefficient = 0.07 ; p-value = 0.69	Observation = 0.32 p-value = $5 \times e^{-4}$

b. Examen de la figure de validation produite dans le cadre de l'approche de biodivMapR

Sur les axes 1 et 2 de la PCoA (**Figure 18**), on peut distinguer trois groupes de placettes de validation correspondant à trois ensembles d'habitats principaux d'après la typologie du programme « Habitat » :

- **A** : Forêts de plateaux réguliers (41510) ; Forêts de plateaux élevés (41530)
- **B** : Forêts ripicoles, de bas-fonds, de talwegs humides (41110) ; Forêts de transition écotone – faciès humide (41111)
- **C** : Forêts de moyennes montagnes (41610)



**Figure 18.** Distribution des valeurs de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  issues de la diversité spectrale sur l'emprise des placettes de validation. Les différentes combinaisons d'axes de la PCoA sont présentées : (a) PCoA1-PCoA2, (b) PCoA2-PCoA3, (c) PCoA1-PCoA3. La taille des points indique la valeur de l'indice de Shannon (diversité  $\alpha$ ) et la position des points selon les axes de la PCoA indique la dissimilarité de Bray-Curtis (diversité  $\beta$ ). Cette figure correspond à la méthode de validation proposée dans le cadre du package biodivMapR.

A l'inverse, on ne distingue aucune distribution particulière des valeurs de diversité  $\alpha$ . L'hypothèse de validation 2 est donc partiellement validée. En **Annexe 3**, la distribution des placettes de validation a été représentée sans la diversité  $\alpha$  et avec les étiquettes indiquant les layons auxquels les placettes de validation appartenaient. Lorsqu'il existait une information sur la présence d'un habitat particulier au sein d'un habitat principal d'après la typologie de l'ONF, la placette de validation considérée a également été différenciée par son type d'habitat particulier. Ces résultats, qui ne modifient pas l'interprétation générale donnée avec la **Figure 18**, sont présentés en **Annexe 4**.

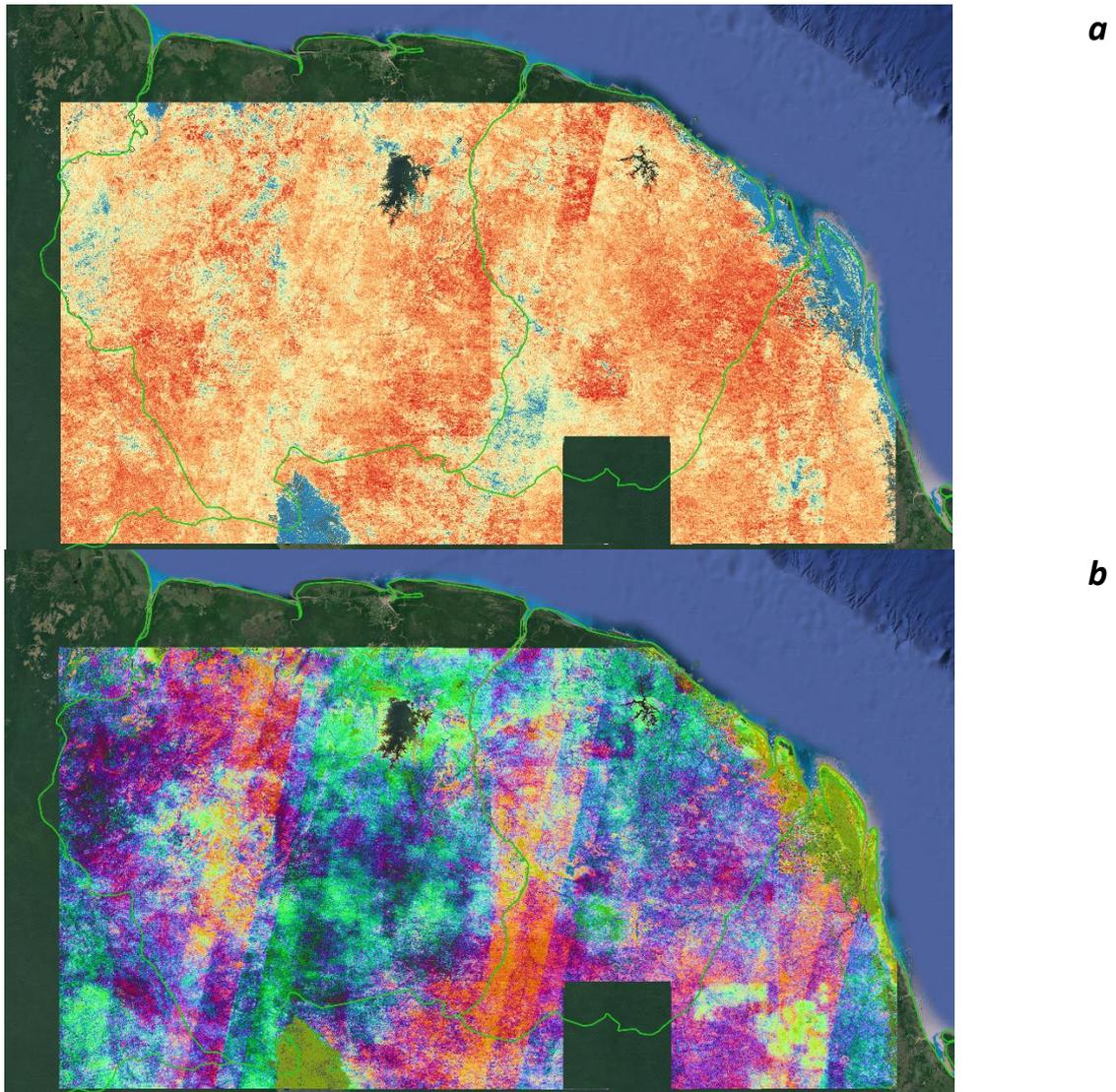
### 3) Première cartographie des indicateurs de diversité spectrale $\alpha$ et $\beta$ à une échelle régionale

#### *a. Cartes de la diversité $\alpha$ et $\beta$ à une échelle régionale*

La **Figure 19** montre un premier résultat de cartographie de la diversité  $\alpha$  et  $\beta$  à l'échelle d'une partie du plateau des Guyanes, comprenant la Guyane française, le Suriname et la partie nord de l'Amapà au Brésil ainsi qu'une zone située au sud-est du Guyana. Il ne s'agit pas ici de décrire de manière précise et exhaustive les cartographies obtenues mais de relever les tendances et artefacts observés.

La diversité  $\alpha$  (**Figure 19 – a**) révèle des motifs contrastés dans la partie ouest de la région, marquée par une diminution nette dans la zone côtière en Guyane française et la pointe nord de l'Amapà. A la pointe sud-ouest de la Guyane française et la partie ouest du Suriname, la diversité  $\alpha$  présente également des motifs de plus faible diversité, avec des formes éparses. Au niveau de la frontière sud du Suriname avec le Brésil (Amapà) un motif « compact » de diminution de la diversité  $\alpha$  apparaît de façon très marquée. Inversement, il apparaît difficile d'identifier des « hot spots » de diversité  $\alpha$ . On peut toutefois observer une tendance dans l'est de la Guyane française, avec une large zone marquée par une diversité relativement importante.

La diversité  $\beta$  (**Figure 19 - b**) révèle des motifs complexes difficiles à délimiter. De façon cohérente avec la diversité  $\alpha$ , les zones côtières à l'est de la Guyane française et à la pointe nord de l'Amapà forment un ensemble contrasté.



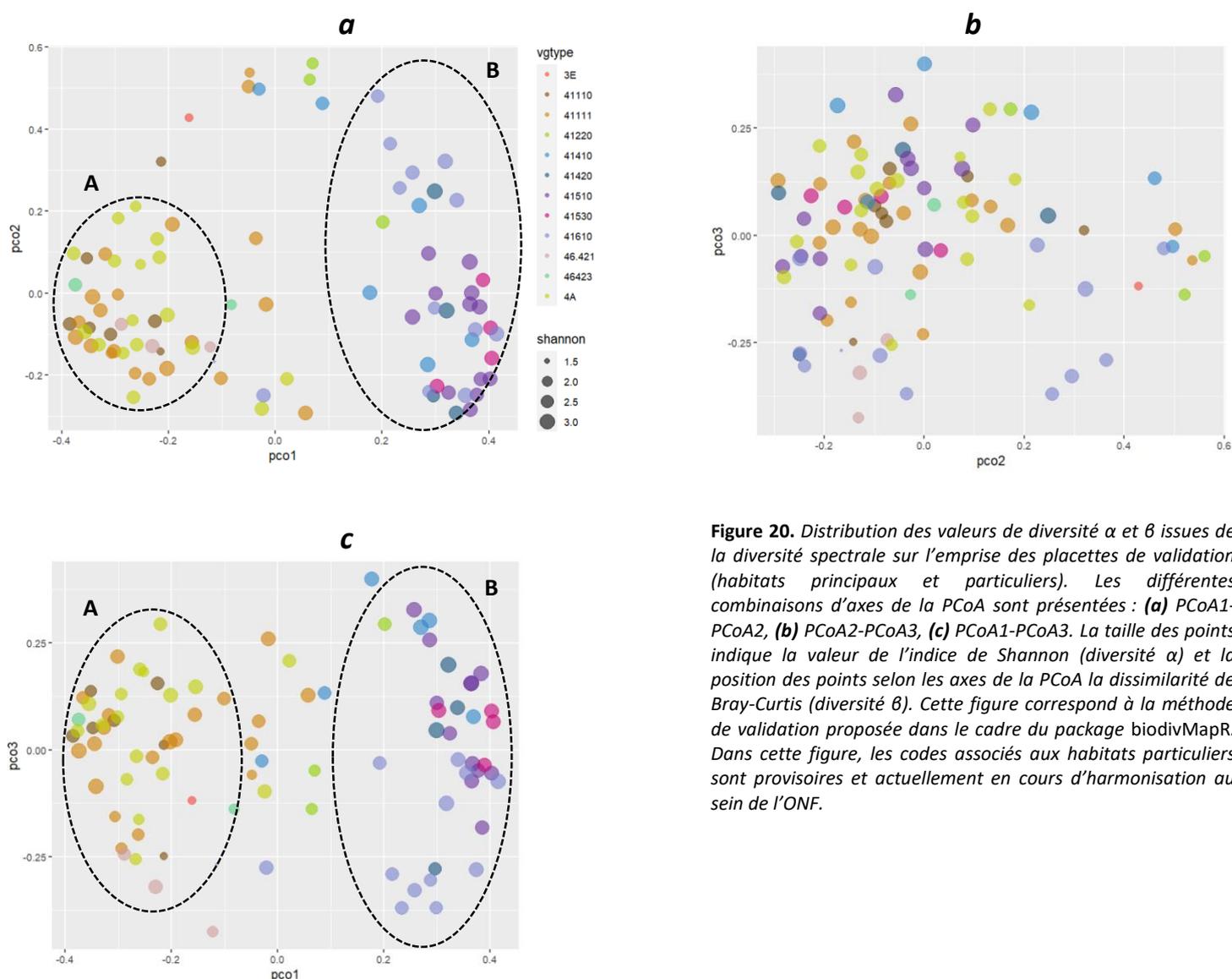
**Figure 19.** Mosaiques des indicateurs de diversité spectrale  $\alpha$  et  $\beta$  à une échelle régionale du plateau des Guyanes. La région comprend le Suriname (à l'exception de la bande côtière), la majorité de la Guyane française, la partie nord de l'Etat de l'Amapa au Brésil et une zone frontalière du Guyana à l'ouest. **(a)** Diversité  $\alpha$  de la mosaïque régionale S2 (indice de Shannon) et **(b)** Diversité  $\beta$  de la mosaïque régionale S2 (dissimilarité de Bray-Curtis).

Sur les deux cartes de la **Figure 19**, la présence d'artéfacts liés aux fauchées d'acquisition des satellites S2 rend moins lisible la lecture des motifs (effet de « bandes »).

b. Validation des cartes de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  à une échelle régionale

D'après l'axe 1 de la PCoA présenté sur la **Figure 20**, on peut distinguer deux groupes de placettes de validation correspondant à deux ensembles d'habitats principaux ou particuliers d'après la typologie du programme « Habitat » :

- **A** : Forêts de plateaux réguliers (41510) ; Forêts de plateaux élevés (41530) ; Forêts de moyennes montagnes (41610)
- **B** : Forêts ripicoles, de bas-fonds, de talwegs humides (41110) ; Forêts de transition écotone – faciès humide (41111) ; Forêts marécageuses (4A)

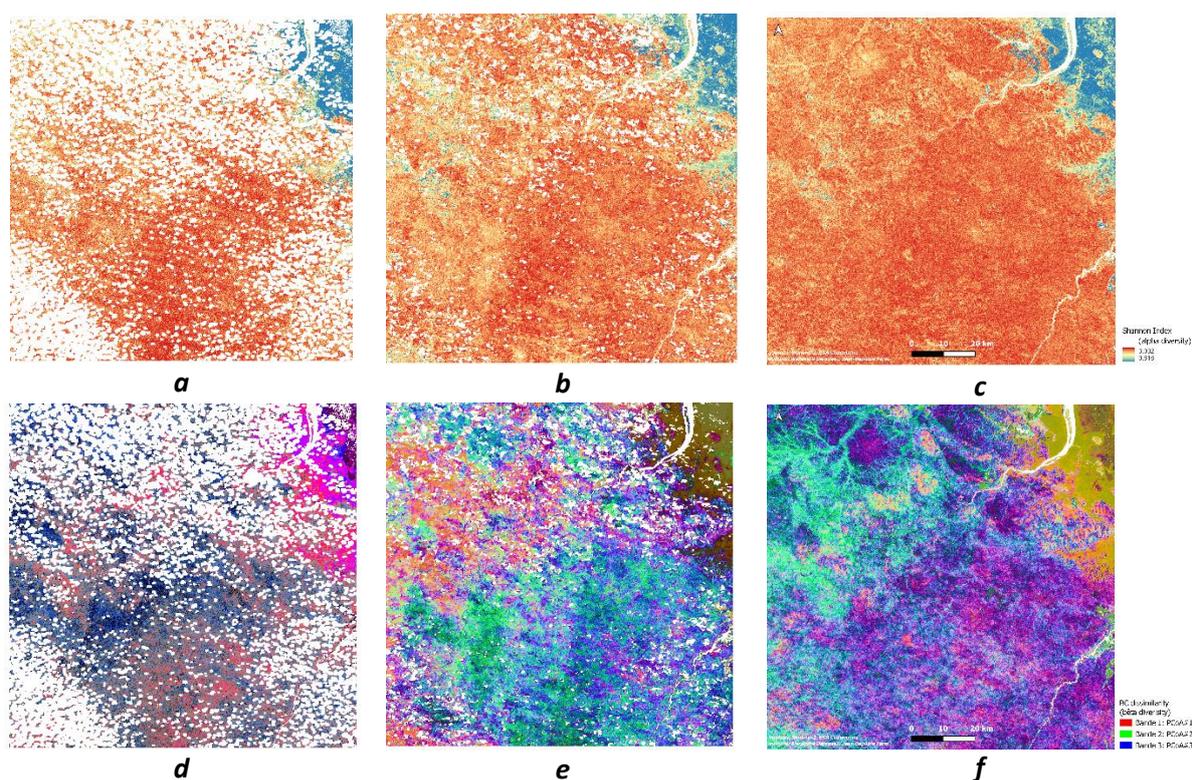


**Figure 20.** Distribution des valeurs de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  issues de la diversité spectrale sur l'emprise des placettes de validation (habitats principaux et particuliers). Les différentes combinaisons d'axes de la PCoA sont présentées : (a) PCoA1-PCoA2, (b) PCoA2-PCoA3, (c) PCoA1-PCoA3. La taille des points indique la valeur de l'indice de Shannon (diversité  $\alpha$ ) et la position des points selon les axes de la PCoA la dissimilarité de Bray-Curtis (diversité  $\beta$ ). Cette figure correspond à la méthode de validation proposée dans le cadre du package biodivMapR. Dans cette figure, les codes associés aux habitats particuliers sont provisoires et actuellement en cours d'harmonisation au sein de l'ONF.

En dehors des forêts marécageuses (4A), les autres habitats particuliers identifiés dans la **Figure 20** (46.421 : forêts basses sur armure latéritique, 46A23 : forêts basses sur inselbergs, 3E : cambrouses) sont insuffisamment représentés pour pouvoir mettre en évidence des tendances dans la distribution de la diversité  $\alpha$  et  $\beta$  associées à ces habitats particuliers.

## V. Discussion

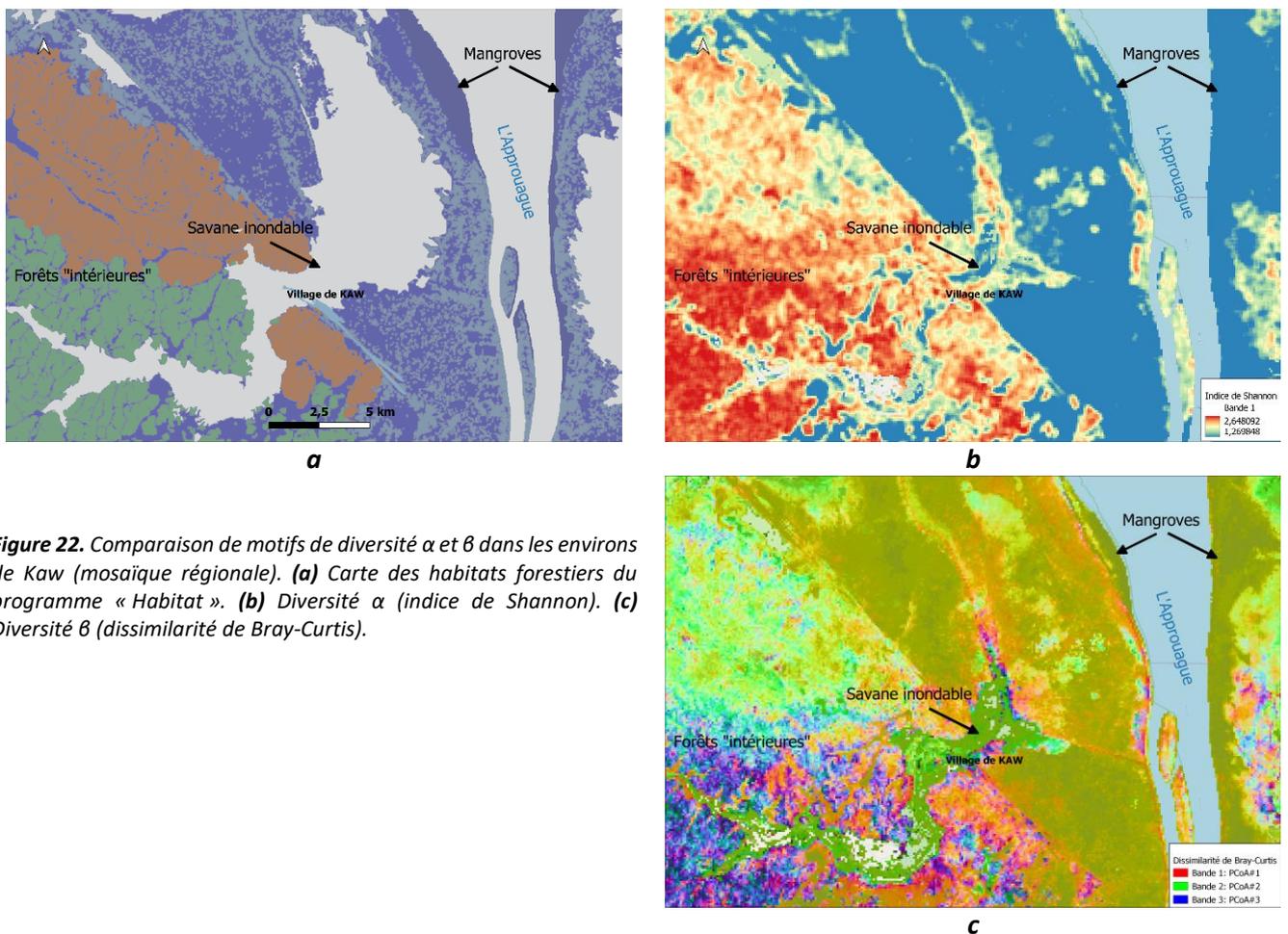
Nos travaux ont permis de montrer que la cartographie de la diversité spectrale à travers les composantes  $\alpha$  et  $\beta$  était possible sur le plateau des Guyanes dans des contextes de fort et moyen ennuagement. La méthode proposée, qui consiste à produire une image composite à partir d'une série temporelle d'images S2, a été réalisée selon deux processus : 1) la création d'une image composite sur une courte fenêtre temporelle (une « saison ») avec un nombre minimum d'acquisitions pour une surface maximale de pixels désennuagés (application du critère de sélection) ; 2) la création d'une image composite sur une large fenêtre temporelle en utilisant la totalité des acquisitions (pas de critère de sélection). Dans le premier cas de figure, nous avons cherché à produire une image phénologiquement cohérente. Dans le second cas, il s'agissait de produire une représentation permettant d'identifier des tendances « globales » dans la distribution spatiale de la diversité à une échelle régionale. L'interprétation des motifs de diversité spectrale s'est révélée possible avec ces deux méthodes, mais leur comparaison a permis de mettre en évidence l'intérêt de densifier la série temporelle à l'origine de l'image composite, surtout dans un contexte local de fort ennuagement (**Figure 21**).



**Figure 21.** Comparaison des cartographies de la diversité  $\alpha$  et  $\beta$  de la tuile 22NCK obtenues selon trois modalités. Cartographie obtenue avec **(a)(d)** l'acquisition individuelle du 09/09/2018, **(b)(e)** la saison septembre-octobre 2018 (version 1 de la chaîne de traitements), **(c)(f)** l'image composite de la période août-novembre 2018 (version 2 de la chaîne de traitements). **(a)(b)(c)** Diversité  $\alpha$  représentée par l'indice de Shannon. **(d)(e)(f)** Diversité  $\beta$  représentée par la dissimilarité de Bray-Curtis.

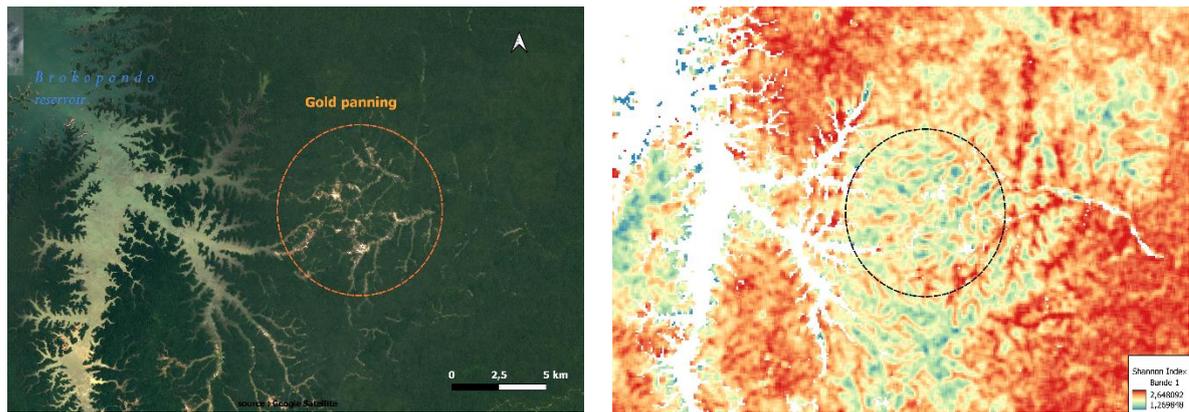
Dans les zones soumises à un fort ennuagement, le choix de la méthode à privilégier peut être vu comme un compromis entre cohérence temporelle et phénologique (sélection des acquisitions) et taille de la surface désennuagée.

Nous avons pu mettre en évidence l'existence de motifs de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  spatialement cohérents. Par exemple, sur une partie importante du littoral, la diminution de la diversité  $\alpha$  peut être mise en relation avec la présence de mangroves (**Figure 22**), caractérisées par des communautés essentiellement composées de palétuviers du genre *Avicennia* ou *Rhizophora*, avec une faible richesse spécifique et une haute spécialisation. La présence de mangroves permet d'expliquer dans ce cas à la fois la diminution de la diversité  $\alpha$  et le contraste marqué en termes de diversité  $\beta$  par rapport aux forêts intérieures nettement plus diversifiées. En dehors des forêts, les milieux ouverts de type « savane » permettent également d'expliquer une association entre une baisse importante de la diversité  $\alpha$  et un contraste marqué de diversité  $\beta$ , comme par exemple à l'intérieur de la réserve de Kaw, dominée par des savanes inondables (**Figure 22**).

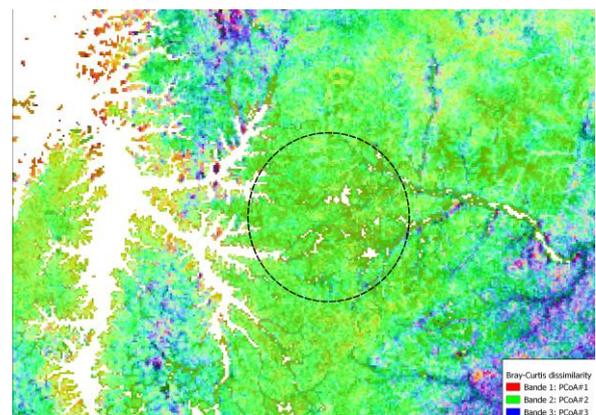


**Figure 22.** Comparaison de motifs de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  dans les environs de Kaw (mosaïque régionale). **(a)** Carte des habitats forestiers du programme « Habitat ». **(b)** Diversité  $\alpha$  (indice de Shannon). **(c)** Diversité  $\beta$  (dissimilarité de Bray-Curtis).

D'autres zones sur le plateau des Guyanes présentent une diminution marquée de diversité  $\alpha$ . Après discussion avec les partenaires de l'ONF, il est apparu que ces motifs pouvaient être associés à une végétation dégradée ou en partie déforestée par des activités d'orpaillage. Certaines zones sont en effet connues pour avoir subi ce type d'activité comme à l'est du réservoir Brokopondo au Suriname (**Figure 23**).



**Figure 23.** Comparaison de motifs de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  à l'est du lac du Brokoponda (Suriname) au niveau d'une zone orpaillée. **(a)** Image satellite Google Earth **(b)** Diversité  $\alpha$  (indice de Shannon). **(c)** Diversité  $\beta$  (dissimilarité de Bray-Curtis).



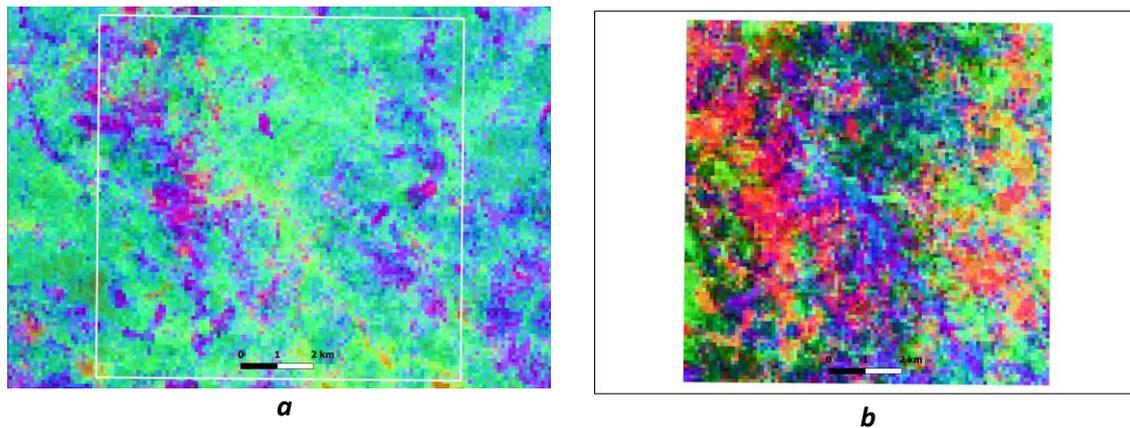
Cependant, d'une manière générale, nous pouvons observer une grande diversité des motifs de diversité  $\beta$  sans lien direct avec la diversité  $\alpha$ . Ces variations de diversité  $\beta$  sont *a priori* plus difficiles à interpréter en l'absence d'informations précises sur la composition des communautés forestières et leur distribution spatiale. De plus, il n'est pas possible d'établir une correspondance géographique entre la distribution des motifs de diversité  $\beta$  et les ensembles forestiers décrits dans la carte des habitats forestiers de Guyane. L'interprétation de ces motifs doit nécessairement s'accompagner d'une mise en relation avec des inventaires réalisés sur le terrain.

Dans le cadre de notre travail, la première hypothèse (corrélation entre les valeurs des indices de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  issus des images S2 et des inventaires forestiers) n'a pu être que partiellement validée : nous avons pu montrer l'existence d'une corrélation significative (bien qu'assez faible) entre la dissimilarité de Bray-Curtis calculée à partir des inventaires forestiers et celle dérivée des images S2, tandis qu'aucune corrélation n'a pu être mise en évidence concernant l'indice de Shannon. L'absence de corrélation dans le cas de la diversité  $\alpha$  peut s'expliquer par la faible précision taxonomique des inventaires forestiers. En effet, les essences forestières répertoriées dans les inventaires ont été traitées comme proxy des espèces, alors qu'une partie des essences peut être associée à plus d'une espèce, voire une même espèce à plusieurs essences forestières. La propagation des erreurs de détermination dans les inventaires forestiers a été décrite par [Guitet et al., \(2014\)](#), ainsi qu'une méthode pour simuler des communautés botaniques à partir des inventaires forestiers en tenant compte des différentes erreurs de détermination possible. Dans le temps qui nous était imparti, il n'a pas été possible d'appliquer cette méthode de simulation des communautés botaniques et de tester

l'existence de corrélations avec les indicateurs de diversité issus des images S2, mais cette approche constitue une perspective majeure dans le cas d'une poursuite des travaux.

La seconde hypothèse de validation, correspondant à l'approche de validation proposée dans le cadre de *biodivMapR*, est également partiellement validée. De façon cohérente avec le test de l'hypothèse 1, la diversité  $\beta$  seule permet de montrer ici qu'il existe un lien entre la diversité issue des images S2 et les communautés forestières investiguées sur le terrain. Parmi les habitats principaux recensés dans les inventaires forestiers, deux à trois groupes d'habitats se distinguent. Sur la **Figure 18**, nous avons observé que 3 groupes de placettes de validation diffèrent selon les axes 1 et 2 de la PCoA, soit deux groupes liés à la présence d'un relief particulier (forêt de moyenne montagne ou forêts de « plateaux ») et un groupe lié au réseau hydrographique (*e.g.* forêts ripicoles). Sur la **Figure 20**, la séparation entre les groupes de placettes associées aux forêts « de relief » et celles associées au réseau hydrographique est encore plus marquée selon l'axe 1 de la PCoA. D'autre part, il n'est pas possible de distinguer de séparation claire entre les placettes des forêts de plateaux, et celles de forêt de moyenne montagne. Néanmoins, avec les deux méthodes de production de l'image composite (critère de sélection des acquisitions et densification de la série temporelle), la distinction la plus importante en terme de diversité  $\beta$  concernait les forêts de « relief » et celles associées au réseau hydrographique. Cette observation est cohérente avec le fait que ces deux ensembles de forêts peuvent être considérés comme les plus contrastés d'après la typologie du programme « Habitat ». La distribution spatiale des motifs de diversité  $\beta$ , dans le cadre méthodologique que nous proposons, devrait permettre de distinguer les communautés forestières les plus contrastées à différentes échelles. Dans des perspectives de poursuite de nos travaux, il serait également intéressant de continuer à tester différents niveaux de la typologie du programme « Habitat » afin d'identifier les plus adaptés pour valider les indicateurs. Par exemple, il serait intéressant de tester le niveau « faciès » qui permet de prendre en compte le niveau de perturbation du milieu forestier.

Toutefois, l'exploration des liens entre la diversité spectrale et la distribution des communautés forestières doit prendre en compte l'influence de l'échelle géographique. En effet, il est possible d'observer des différences dans la composition des motifs de diversité  $\beta$  en fonction de l'échelle géographique d'application utilisée (**Figure 24**). Cette différence s'explique par un effet de « dilution » où l'augmentation de la surface investiguée tend à augmenter la plage de valeurs possibles des différents indices spectraux constituant l'image composite (*i.e.* augmentation de la plage de variation de la réflectance dans les différentes bandes S2). Les motifs de diversité  $\beta$  observés localement sur une image « étendue » apparaissent alors comparativement moins contrastés par rapport à une image « réduite » se limitant à la zone investiguée.

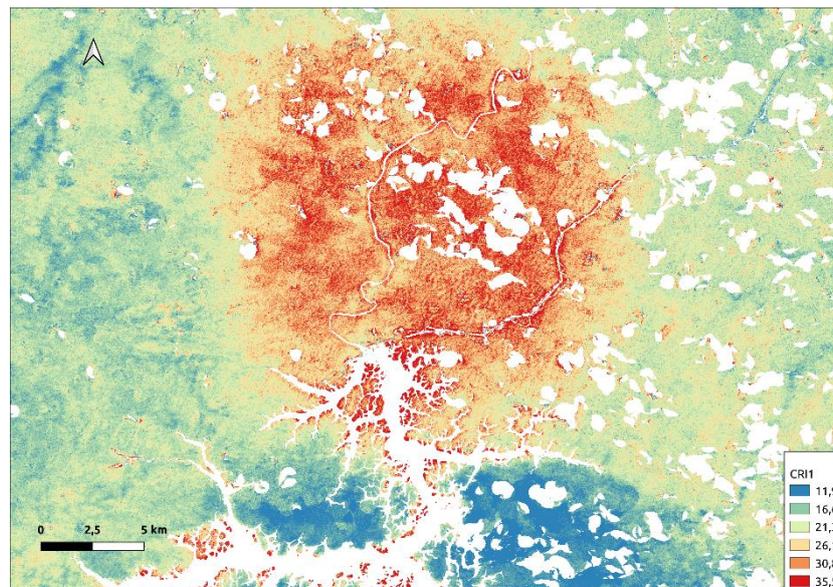


**Figure 24.** Exemple de l'effet de « dilution » sur la zone-test de la tuile 21NWF. **(a)** Diversité  $\beta$  déterminée à l'échelle de la tuile entière. **(b)** Diversité  $\beta$  déterminée à partir d'un extrait de la tuile 21NWF correspondant à la zone-test utilisée pour sélectionner les indices spectraux.

Une autre difficulté à prendre en compte concerne les effets de « bandes » apparaissant de manière très visible sur les mosaïques de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  (échelle régionale). Ces « bandes » limitent fortement le potentiel d'utilisation de produits cartographiques de diversité spectrale en introduisant artificiellement des écarts dans les valeurs de réflectance. Cet artéfact peut avoir différentes origines. D'abord, il pourrait provenir du capteur des satellites S2, comme c'est le cas de la *Spectral Response Non-Uniformity* ou SRNU (pour plus de détails, voir [la documentation technique de l'ESA sur le programme Sentinel-2](#)). Autrement, il pourrait être lié à la fonction de distribution de réflectance bidirectionnelle (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*, BRDF) qui permet de décrire la réflectivité bidirectionnelle d'une surface. Cet artéfact, lié à la nature anisotrope du rayonnement réfléchi par la canopée, est également indépendant de notre démarche méthodologique et nécessiterait un traitement en amont des images S2. Dans tous les cas, il n'a pas été possible de le corriger dans le cadre de ce travail. Une meilleure prise en compte de effets de BRDF et des artefacts des capteurs S2 dans les futures évolutions de la chaîne de traitements développée dans le cadre de PROGYSAT apparaît comme un point majeur pour l'établissement de cartographies de la diversité spectrale à des échelles régionales.

En dehors de la correction des effets BRDF ou capteur, d'autres pistes d'amélioration des produits cartographiques de diversité spectrale devraient être considérées. Pour constituer les images composites, une sélection d'indices spectraux a été faite sur la base des indices disponibles dans le package *spinR* et des corrélations existantes entre ces différents indices. Cependant, ce choix d'indices n'est pas entièrement figé et d'autres possibilités pourraient être testées en fonction des propriétés biophysiques ou écologiques de la canopée ciblées. Il existe à l'heure actuelle une très grande diversité d'indices spectraux, dont certains peuvent être liés à différentes propriétés de la végétation et dans différentes versions permettant d'exploiter au mieux l'information contenue dans les bandes spectrales. De plus, il n'est pas toujours possible d'anticiper certains artéfacts comme ceux liés aux effets atmosphériques. Dans notre démarche, nous avons initialement sélectionné le CRI1 théoriquement sensible à la présence de caroténoïdes dans les feuilles. Or les données acquises par S2 ne sont spectralement pas suffisamment riches et résolues pour permettre l'estimation de la teneur en caroténoïdes de la végétation. Cet indice nécessite des informations dans des domaines spectraux du visible de faible longueur d'onde. Son utilisation avec les données S2 fait appel à la bande bleue, particulièrement affectée par des effets atmosphériques. Cela rend cet indice finalement peu

pertinent pour l'estimation de la diversité forestière à partir d'indicateurs de diversité spectrale. De fait, nous avons observé des motifs de diversité  $\beta$  potentiellement liés à une perturbation localisée de la bande bleue et non à des variations locales de la composition en espèces des communautés forestières (**Figure 25**). Dans une optique de mieux prendre en compte les variations liées à la dimension structure de la canopée, la fusion du produit dérivé de S2 avec des images SAR pourrait également être envisagée. Il existe aujourd'hui des méthodes permettant de fusionner les images Sentinel-2 et Sentinel-1. L'intégration dans l'image composite d'une dimension issue d'acquisitions RADAR pourrait contribuer à augmenter la précision des indicateurs de diversité  $\alpha$  et  $\beta$ , indépendamment des conditions météorologiques et d'éventuels effets atmosphériques.



**Figure 25.** Anomalie du CRI1 au nord du Lac de Petit Saut. La valeur du CRI1 représentée ici correspond à la médiane des acquisitions sélectionnées pour la création de l'image composite sur la saison septembre-octobre 2018.

## VI. Conclusion

Notre travail a permis de mettre en place une chaîne de traitements opérationnelle, semi-automatisée, permettant de réaliser une cartographie des indicateurs de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  dérivés de la diversité spectrale pour suivre la distribution spatiale des communautés forestières sur le plateau des Guyanes. La chaîne de traitements a été développée en deux versions complémentaires :

- *Une version à l'échelle d'une tuile S2 permettant de sélectionner un nombre restreint d'acquisitions désennuagées de façon à privilégier la cohérence climatique et phénologique de la végétation ;*
- *Une version à l'échelle régionale permettant de traiter une mosaïque d'images S2 la plus complète possible à l'aide de séries temporelles S2 denses.*

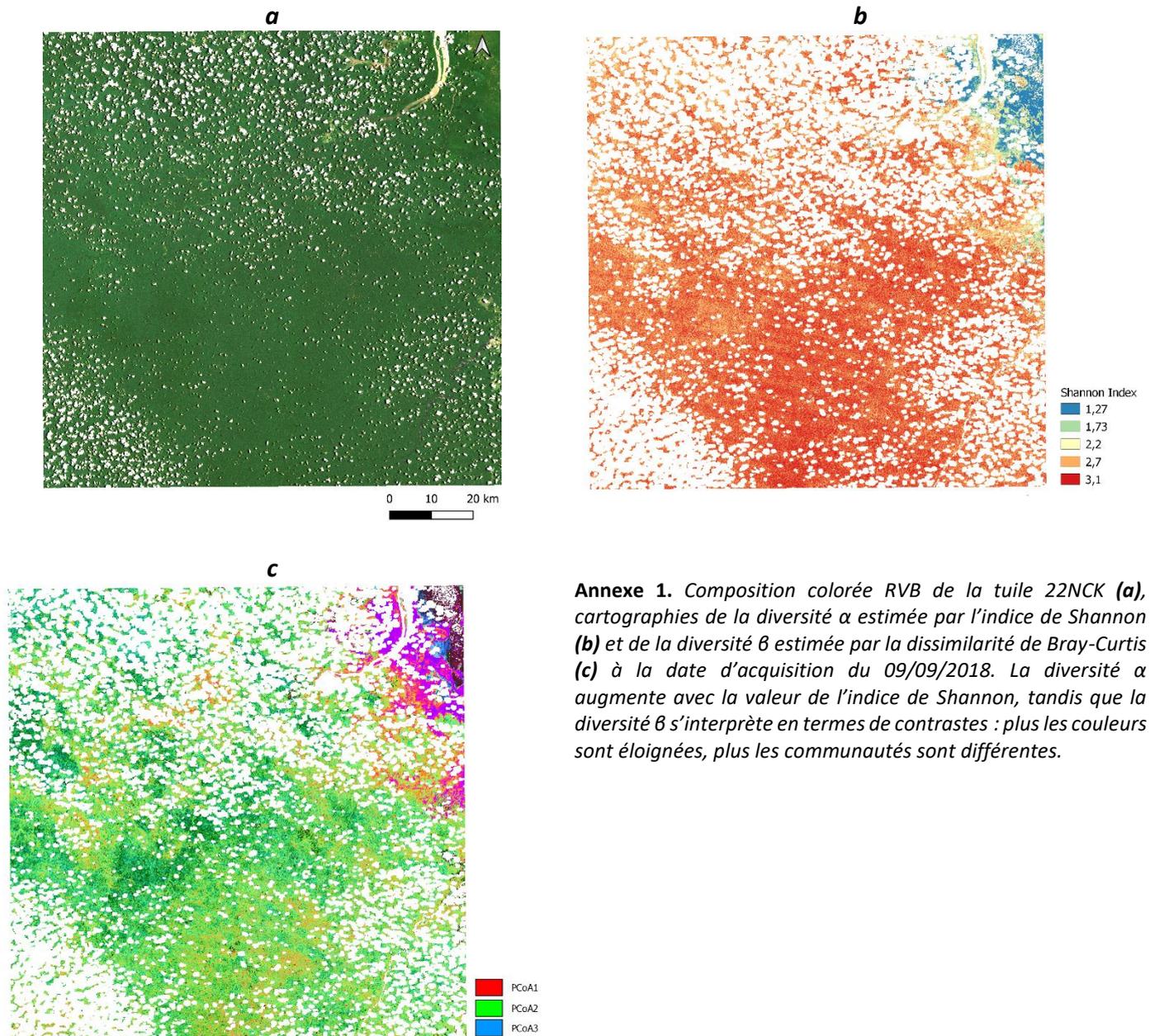
Le code R est accessible [en ligne](#) ainsi que d'autres ressources du projet PROGYSAT (présentations de restitution des travaux de l'axe Forêt-Biodiversité, posters...). Notre travail confirme l'intérêt de l'imagerie S2 combinée à des méthodes permettant la production d'images composites sans nuages en milieu tropical, trop fortement ennuagé pour garantir des acquisitions individuelles avec un ennuagement réduit, grâce à leur haute résolution temporelle. Cependant, il est important de noter que la chaîne de traitements développée ici ne permet pas d'obtenir systématiquement un produit exploitable. Un travail de fond sur le traitement du signal S2 qui dépasse le cadre du projet PROGYSAT serait nécessaire pour renforcer la dimension opérationnelle des cartographies produites, notamment dans le but de corriger les potentiels effets de BRDF.

Notre travail a également permis de montrer que des communautés forestières particulièrement contrastées pouvaient être identifiées à l'aide des indicateurs de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  issus de la diversité spectrale. Par exemple, les milieux forestiers associés au réseau hydrographiques (*e.g.* forêts ripicoles) ou certains milieux particuliers comme les mangroves. Dans notre démarche de validation s'appuyant sur le réseau d'inventaires forestiers du programme « Habitat », il a été montré que les forêts associées à certains reliefs pouvaient se distinguer en termes de contrastes de diversité  $\beta$ . Concernant le potentiel d'utilisation de la chaîne de traitements, il faut s'attendre à être en mesure d'identifier en premier lieu des différences « extrêmes » en termes de composition ou de richesse spécifique des communautés. Une évaluation plus précise du potentiel opérationnel de la méthode, notamment dans le but de cartographier des transitions plus fines des communautés, nécessiterait une consolidation de la validation basée sur la collaboration avec les botanistes et écologues. Enfin, l'interprétation des motifs de diversité spectrale sera facilitée par les utilisateurs, dans la mesure où ils savent au préalable quelles communautés ou quelles caractéristiques écologiques ou biophysiques des forêts sont ciblées. Par exemple, cela peut se traduire par un choix particulier d'indices spectraux associés à certaines propriétés foliaires (*e.g.* présence de pigments) pour constituer l'image composite, ou encore, par la recherche de motifs avec une morphologie particulière sur les cartes de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  (*e.g.* motifs associés à une géomorphologie spécifique ou de zones d'impacts des activités humaines comme l'orpaillage). Dans une perspective opérationnelle, il est essentiel de considérer les produits cartographiques issus de la chaîne de traitements comme une couche d'information complémentaire à d'autres sources de données spatialisées (*e.g.* Modèles Numériques de Canopée, indicateurs de texture, etc.) et qu'ils ne peuvent, d'une façon générale, se suffire à eux-mêmes.

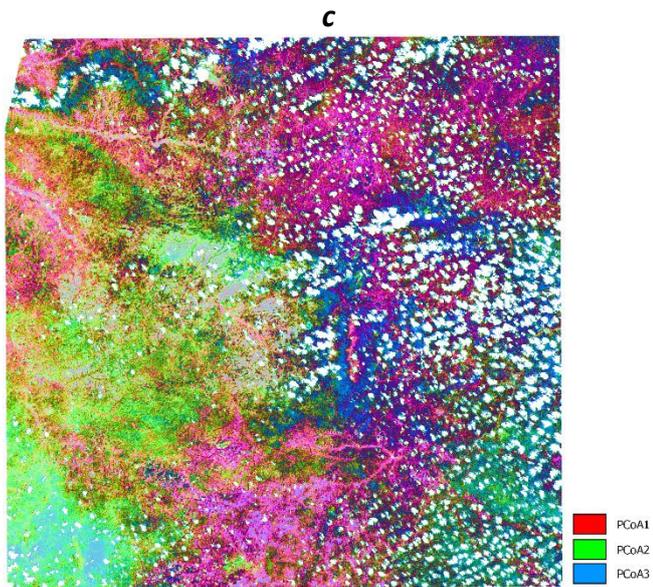
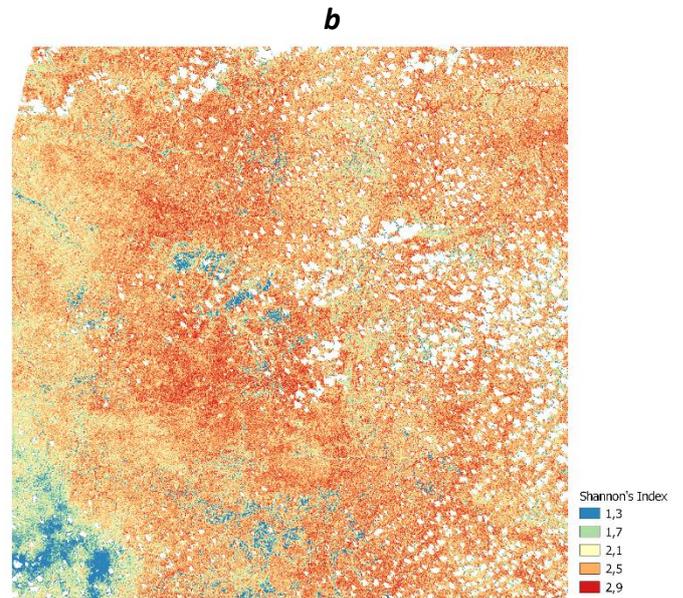
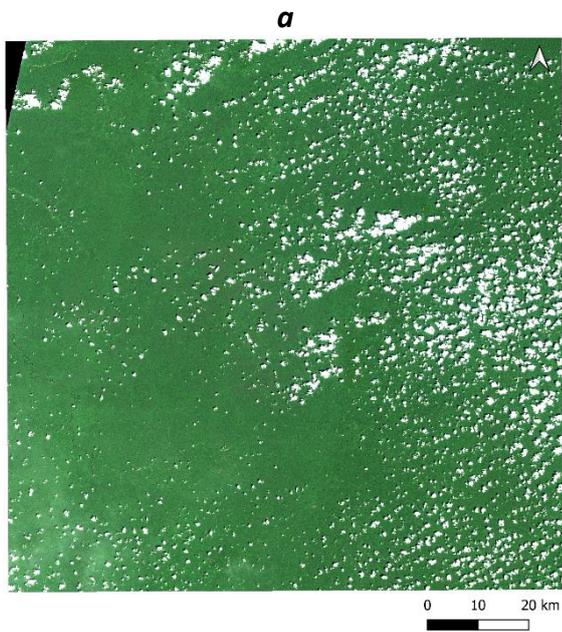
## VII. Bibliographie

- Asner, G. P., & Martin, R. E. (2016). Spectranomics: Emerging science and conservation opportunities at the interface of biodiversity and remote sensing. *Global Ecology and Conservation*, 8, 212-219. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.09.010>
- Chraïbi, E., De Boissieu, F., Barbier, N., Luque, S., & Féret, J. B. (2022). Stability in time and consistency between atmospheric corrections: Assessing the reliability of Sentinel-2 products for biodiversity monitoring in tropical forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112, 102884. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102884>
- Féret, J. B., & Asner, G. P. (2014). Mapping tropical forest canopy diversity using high-fidelity imaging spectroscopy. *Ecological Applications*, 24(6), 1289-1296. <https://doi.org/10.1890/13-1824.1>
- Féret, Baptiste, et Florian de Boissieu. 2019. « BiodivMapR: An r Package for A- and B-diversity Mapping Using Remotely Sensed Images », 7. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13310>
- Guitet, S., Sabatier, D., Brunaux, O., Hérault, B., Aubry-Kientz, M., Molino, J. F., & Baraloto, C. (2014). Estimating tropical tree diversity indices from forestry surveys: A method to integrate taxonomic uncertainty. *Forest Ecology and Management*, 328, 270-281. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.045>
- Huete, Alfredo R. 2012. « Vegetation indices, remote sensing and forest monitoring ». *Geography Compass* 6 (9): 513-32. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2012.00507.x>
- Liu, Hui Qing, et Alfredo Huete. 1995. « A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33 (2): 457-65. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1995.8746027>.
- Palmer, Michael W, Peter G Earls, Bruce W Hoagland, Peter S White, et Thomas Wohlgemuth. 2002. « Quantitative Tools for Perfecting Species Lists », 17. <https://doi.org/10.1002/env.516>
- R Core Team (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>
- Rocchini, Duccio, Sandra Luque, Nathalie Pettorelli, Lucy Bastin, Daniel Doktor, Nicolò Faedi, Hannes Feilhauer, et al. 2018. « Measuring B-diversity by Remote Sensing: A Challenge for Biodiversity Monitoring ». Édité par Francesca Parrini. *Methods in Ecology and Evolution* 9 (8): 1787-98. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12941>.
- Wang, R., & Gamon, J. A. (2019). Remote sensing of terrestrial plant biodiversity. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111218. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.09.010>
- Xue, Jinru, et Baofeng Su. 2017. « Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications ». *Journal of sensors* 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>

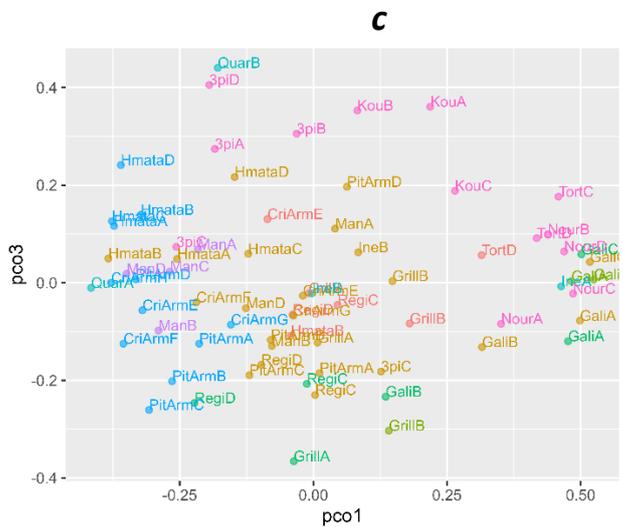
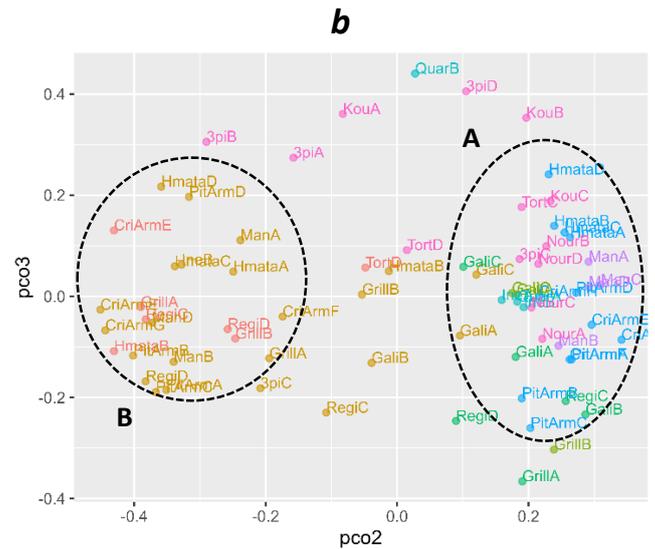
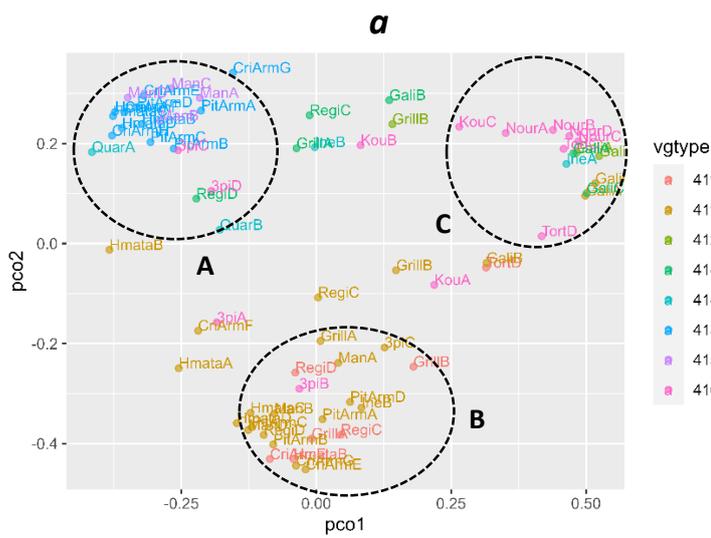
## Annexes



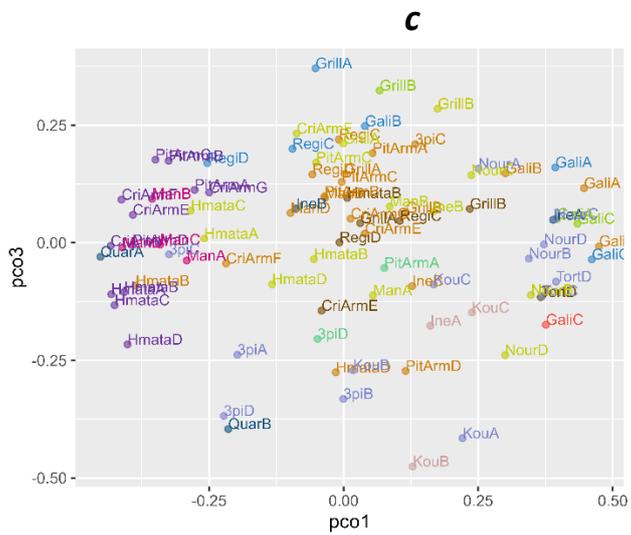
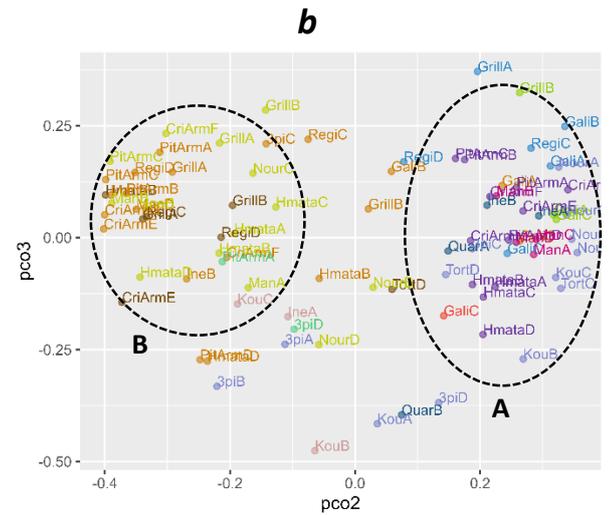
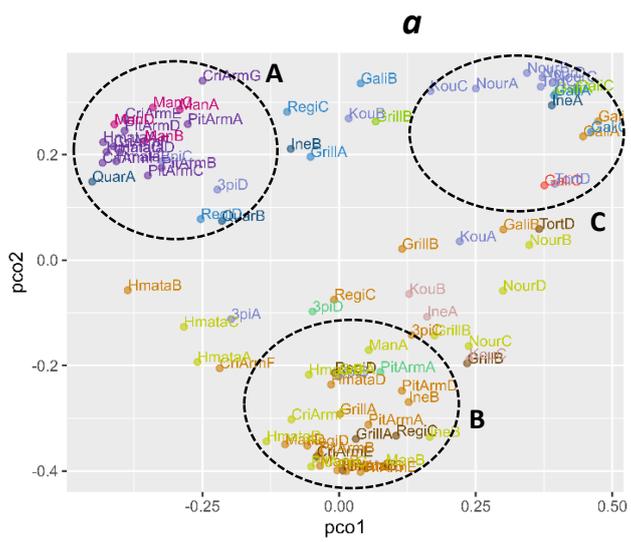
**Annexe 1.** Composition colorée RVB de la tuile 22NCK **(a)**, cartographies de la diversité  $\alpha$  estimée par l'indice de Shannon **(b)** et de la diversité  $\beta$  estimée par la dissimilarité de Bray-Curtis **(c)** à la date d'acquisition du 09/09/2018. La diversité  $\alpha$  augmente avec la valeur de l'indice de Shannon, tandis que la diversité  $\beta$  s'interprète en termes de contrastes : plus les couleurs sont éloignées, plus les communautés sont différentes.



**Annexe 2.** Composition colorée RVB de la tuile 22NBJ **(a)**, cartographies de la diversité  $\alpha$  estimée par l'indice de Shannon **(b)** et de la diversité  $\beta$  estimée par la dissimilarité de Bray-Curtis **(c)** à la date d'acquisition du 23/10/2020. La diversité  $\alpha$  augmente avec la valeur de l'indice de Shannon, tandis que la diversité  $\beta$  s'interprète en termes de contrastes : plus les couleurs sont éloignées, plus les communautés sont différentes.



**Annexe 3.** Distribution des valeurs de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  issues de la diversité spectrale sur l'emprise des placettes de validation. Les différentes combinaisons d'axes de la PCoA sont présentées : **(a)** PCoA1-PCoA2, **(b)** PCoA2-PCoA3, **(c)** PCoA1-PCoA3. La position des points selon les axes de la PCoA représente la dissimilarité de Bray-Curtis (diversité  $\beta$ ). Cette figure correspond à la méthode de validation proposée dans le cadre du package biodivMapR. L'indice de Shannon (diversité  $\alpha$  n'est pas représentée sur cette figure).



**Annexe 4.** Distribution des valeurs de diversité  $\alpha$  et  $\beta$  issues de la diversité spectrale sur l'emprise des placettes de validation (habitat principal et particulier). Les différentes combinaisons d'axes de la PCoA sont présentées : **(a)** PCoA1-PCoA2, **(b)** PCoA2-PCoA3, **(c)** PCoA1-PCoA3. La position des points selon les axes de la PCoA représente la dissimilarité de Bray-Curtis (diversité  $\beta$ ). Cette figure correspond à la méthode proposée dans le cadre du package `biodivMapR`. L'indice de Shannon (diversité  $\alpha$  n'est pas représentée sur cette figure).