



# Cartographie des formations végétales particulières observables via télédétection

## Bilan Janvier 2017

Pauline Perbet, Nicolas Karasiak, Pierre Joubert.



*Améliorer la connaissance et la description du territoire est une mission importante du Parc amazonien de Guyane. La forêt tropicale guyanaise est souvent représentée comme une structure homogène. En réalité, le sud de la Guyane est caractérisé par la présence de formations végétales qui se démarquent de la forêt (végétations basses, affleurements rocheux, forêt de Parinari, pinotières, palmiers bâches...). Certaines de ces formations sont clairement observables à partir d'images satellites.*

*Avec l'aide de Nicolas Karasiak, stagiaire de Master 2, la Parc amazonien a mis en place en 2016 une méthode de cartographie de ces formations végétales par télédétection semi-automatique.*

*La cartographie a été réalisée en utilisant la méthode Random Forest à partir uniquement de logiciels libres et gratuits.*

## Mots clés

Formation végétale particulière, Télédétection, SPOT5, Qgis, Parc amazonien de Guyane, Cartographie

## Objectifs de l'action

### Sous titre

Le Parc bénéficie de données satellites sur l'ensemble de son territoire. Sur ces images apparaissent des formations végétales connues mais non cartographiées (Cambrouses, formation de palmiers-bâches ou de Pinots, savanes roches, forêts de lianes, forêts sur djougoun-pete, forêts sommitales d'inselbergs, forêts de transition sur inselberg, autres...).

L'objectif est d'identifier et de cartographier ces formations, de les caractériser en terme de signature spectrale, de structure, d'organisation spatiale et de géomorphologie. Ces formations non forestières contribuent à former des paysages végétaux particuliers caractéristiques du sud de la Guyane [1]. La cartographie résultante pourra compléter les autres projets de

recherche (CAREFOR [2] et DYNFORDYV 2015) et la cartographie des habitats [3].

Enfin, à terme, la description de ces objets géographiques pourrait permettre d'en réaliser un suivi puis de révéler une évolution de ces formations végétales.

Nicolas Karasiak, stagiaire de Master 2 a travaillé durant 6 mois à la mise en place d'une méthodologie adaptée pour permettre de cartographier les végétations notables de ce territoire si particulier.

Ce rapport reprend une partie du rapport de stage de Nicolas, et le complète pour permettre un condensé de toutes les informations réunies lors de cette étude.

Les formations végétales particulières ciblées sont :

- **Végétations basses** : formations denses et homogènes se distinguant de la forêt par sa faible hauteur (cambrouses de bord de fleuve, cambrouses de relief, Pripri de bord de fleuve, végétations de zones humides) [image 1],

- **Forêts de palmiers-bâches** (*Mauritia flexuosa*) [image 2],

- **Forêts de palmiers pinots** (*Euterpe oleracea*) (pinotières),

- **Affleurements rocheux**, (savanes roches, végétations sèches sur roche) [image 3 et 4],

- **Forêts à parinari** : Situées essentiellement dans la région de la haute Waki et du haut Oyapock. Cette forêt est principalement observée sur des sols à Djougoun-pete [image 2].

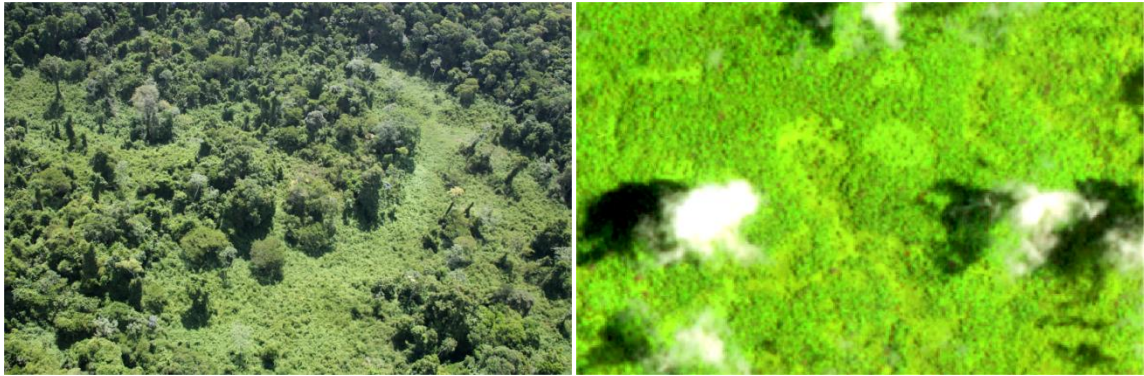


Image 1 : Cambrouses et forêts lianesentes dans la région Arawa - Photo PP 12/10/2015 – Image SPOT 5 du 12/09/2012

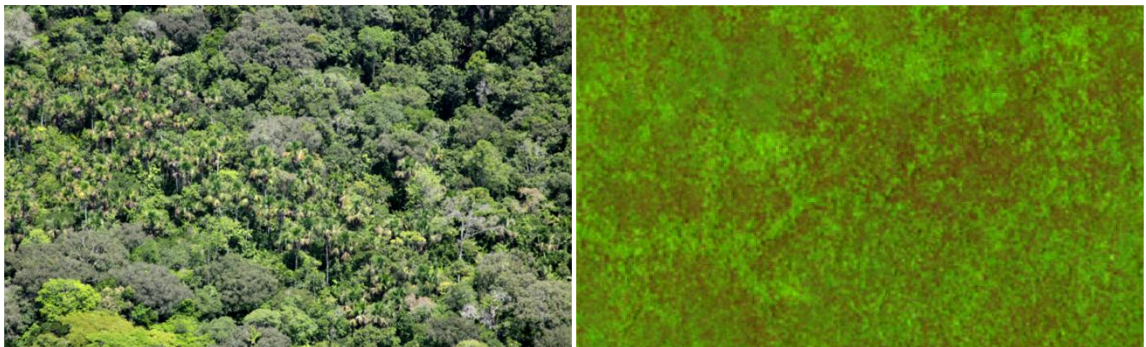


Image 2 : Forêt sur Djougoun-pete dans la plaine de la Waki, composé de Parinaris et de palmiers-bâches – Photo PP 12/10/2015 – Image SPOT 5 du 12/09/2012



Image 3 : Mont Arawa, Inselberg dans le centre Sud de la Guyane – Photo PP 12/10/2015 – Image SPOT 5 du 12/09/2012

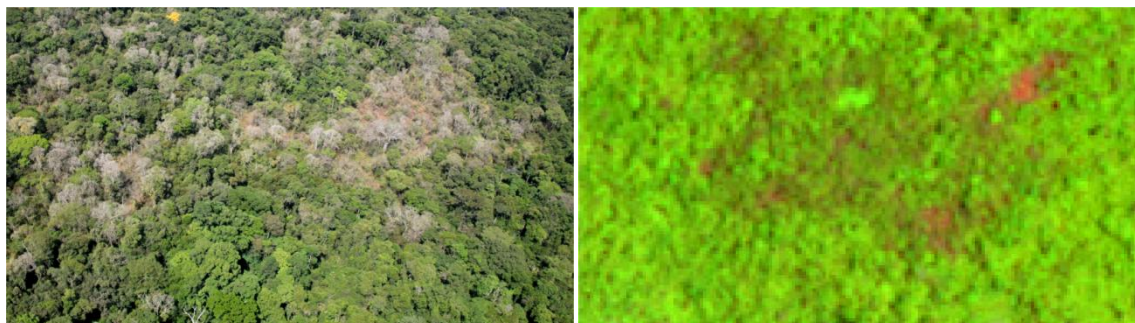


Image 4 : Végétations sèches sur roche, dans la région Arawa – Photo PP 12/10/2015 – Image SPOT 5 du 12/09/2012

### Collaborateurs :

Le Parc amazonien de Guyane, est largement soutenu par des spécialistes en télédétection et en formations végétales amazoniennes :

- Daniel Sabatier (IRD-UMR AMAP),
- Stephane Guitet (ECOFOR-ONF, IRD-UMR AMAP),

- Valery Gond (CIRAD),
- Olivier Brunaux (ONF).

### Matériels et Méthodes Données de télédétection

Les différentes données disponibles pour cette cartographie sont listées dans le Tableau 1

Tableau 1 : Images satellites et données disponibles sur le territoire du PAG en 2017

Type d'image	Période	Résolution		Couverture
		Multispectrale	Panchromatique	
Landsat (5 -7 - 8)	Depuis 1990	30m	15m	100%
SPOT 4	1998 - 2013	20m		100%
SPOT 5	2002 - 2015	10m	2,5m	100%
SPOT (6 -7)	2014 -	6m	1,5m	70 % du PAG
Pléiade	2012 -	2m	0,5m	5 % du PAG
Sentinel - 2	2015 -	10m		100%
Géophysique aéroporté (BRGM)	1996	?		Partie nord du PAG
Lidar	2014	1m		Itoupe et Bellevue de l'Inini
Image Radar Sentinel -1	2015			100%

Les images SPOT5 étaient les seules sources disponibles sur l'ensemble du Parc amazonien de Guyane au lancement de l'étude. La nébulosité élevée de ces images a nécessité la superposition de plusieurs (2 à 4) scènes pour avoir une représentation complète du territoire. Ainsi 23 images entre 2007 et 2014 ont été traitées (Figure 1).

	Base de données	Date	Nombre de
Données hélicoptées	Projet CAREFOR	2006/2008	247
	Missions hélicoptées spécifique PAG	2015/2016	780
	Mission hélicoptée de l'ONF		18
Données terrestres	Programme habitat		1070
	Terrain PAG	2015	41
	Mission 7 bornes		45

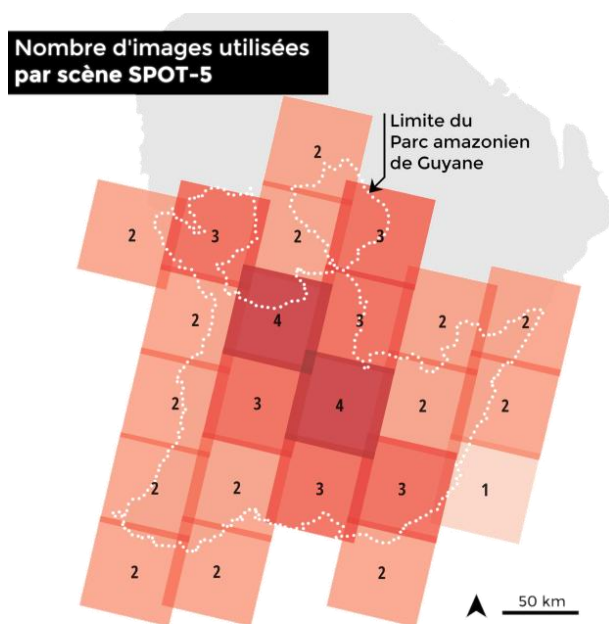


Figure 1 : Nombre d'images utilisées pour chaque scène SPOT5

## Outils

Les outils utilisés pour le traitement de données de télédétection sont listés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Logiciels libres employés pour le projet

Traitement des images	Orpheo tool box
	Grass
	Plugin Dzetsaka
Gestion des données	Qgis
Analyses statistiques	R

Pour la classification, l'utilisation des applications libres a été priorisée, et ainsi permettre une diffusion plus large de la méthodologie.

## Données de référence / Points de contrôles

Les données de références proviennent de différentes missions hélicoptères et terrestres (Tableau 3).

Les données prises en vol présentent une forte erreur de localisation, alors que les données terrains peuvent correspondre à des formations trop petites par rapport à la résolution des images SPOT 5.

Tableau 3: Liste des données terrains et de survols utilisées

Pour éviter le biais lié aux données terrain, la validation statistique a été réalisée à partir de polygones numérisés de manière aléatoire sur les images SPOT6 et SPOT7 datant de 2014 et 2015 (Tableau 4). Ces images ont été obtenues à travers un appel à projet proposé par SEAS Guyane et par GEOSUD.

Tableau 4 : Nombre de pixel utilisé dans la donnée de référence

Type	Nombre de pixel
Parinari	2621442
Végétation basse	1144031
Palmier bêche	287094
Roche	362706
Forêt	721649844
Pinotière	99586
Total	726164703

## Apport des indices ?

Les travaux de télédétection sur la végétation fond souvent appel à des indices comme le NDVI ou le EVI. Des tests intégrant ces indices à la méthode ont été réalisés. Ceci n'a pas eu d'effet, ou a diminué sensiblement le résultat Kappa obtenu après la classification. Ces indices n'ont donc pas été intégrés à la méthode, et seulement les 4 bandes d'origine de SPOT5 ont été conservées [3].

## Méthodes :

Cette cartographie a été réalisée à partir d'une classification supervisée de type random forest. Les images SPOT 5 ont d'abord été prétraitées pour rendre les images superposables géographiquement et spectralement entre elles. En premier lieu les images ont été géoréférencées en utilisant comme référence la mosaïque IGN de 2008. Ensuite la calibration pour obtenir les valeurs de réflectances TOA (Top of atmosphere) et les indices NDCI pour préparer un masque de nuage ont été réalisés avec QGIS et Orphéo Tool Box.

La classification a été effectuée avec le Plugin Dzetazaka. Ce plugin utilise notamment les algorithmes de classification Random Forest spécialement développé pour cet exercice par Nicolas Karasiak. En s'aidant des relevés de terrains des polygones d'entraînements (ROI =

Région of Interest) ont été numérisés pour chacune des images SPOT5 (Tableau 5). Au total ce sont 1608 polygones qui ont été créés sur les 55 différentes images, soit en moyenne une trentaine par image. Après la classification, les résultats de moins de 10 pixels (correspondant à 0,1ha) sont supprimés grâce à l’outil Sieve de Qgis. Au court des classifications, un tableau de confusion était produit par Dzetazaka, pour estimer la qualité de l’algorithme et des parcelles d’entraînement, pour pouvoir les améliorer le cas échéant.

Tableau 5 : Classes et types des ROI utilisés pour la classification

ID	Type
1	Parinari
2	Végétation basse
3	Palmier-bâche
4	Affleurement rocheux
6	Nuage
7	Ombre
8	Frange nuageuse
9	Eau
10	Forêt classique
11	Pinotière
12	Forêt déstructurée

Après la classification de toutes les images, un travail de synthèse des résultats a été effectué pour superposer correctement chaque scène à partir de l’outil mapcalc de Grass. Seulement les classes Parinari, Végétation basse, palmiers-bâches, Affleurements rocheux et Pinotières ont été gardées à l’issue de cette combinaison. Les forêts déstructurées, malgré l’intérêt certain que peut apporter la cartographie de ces formations, n’ont pas été conservées par manque de connaissance terrain.

Pour finaliser la cartographie, un dernier filtre a été opérée en appliquant un masque réalisé à partir des zones d’abattis et zones exploitations minières provenant des couches de surveillance du territoire.

### Limites de la méthode

Il a été difficile de trouver les parcelles d’entraînement pour les palmiers-bâches et palmiers pinots. En effet, très peu de données terrains sont disponibles, et ces formations sont spectralement difficile à identifier en photo-interprétation.

Nous avons tenté d’utiliser les modèles de classification obtenus à partir d’une scène pourvue de données terrain pour la reproduire sur les images avoisinantes. Néanmoins les classifications obtenues n’ont malheureusement pas donné les résultats escomptés en raison de la trop forte différence spectrale entre les scènes. Cette différence spectrale est liée à la séparation temporelle généralement de plusieurs mois ou années entre les scènes.

D’autres erreurs sont apparues lors de la fusion des résultats. En effet, les images SPOT 5 ne sont pas correctement géoréférencées, ce qui crée des erreurs de localisation des objets. Malgré le géoréférencement manuel effectué préalablement, un effet de marge est parfois observable (Figure 2).



Figure 2 : exemple d’erreur de juxtaposition des images

## Résultats généraux

### Une première analyse statistique à partir des données terrain

Lorsque la cartographie complète a été terminée, une analyse statistique globale a été effectuée à partir des données terrains. Au vue de la mauvaise qualité des résultats obtenus (annexe 1) nous avons supposé que les données terrains utilisées comportent un fort biais. En effet, les distances optimales obtenues lors des analyses des courbes ROC sont très élevées. Les validations terrains par hélicoptères permettent d’informer sur les zones particulières ou douteuses. Néanmoins les points GPS relevés à partir de l’hélicoptère sont trop éloignés de la réalité géographique, ce qui augmente les erreurs et ne permet pas de faire un tableau de confusion. De plus, les données terrains au sol, ne sont pas toujours adaptées à la résolution des résultats de 0,1 hectare. Les formations végétales plus petites, qui peuvent être observées sur le terrain ne seront donc pas représenté dans la cartographie finale.

Les tests de courbe ROC ont été effectués à partir du logiciel R et de l’outil p-ROC [4,5]. Cet outil d’analyse est adapté à nos résultats, puisqu’il fonctionne malgré une distribution non équilibré des classes. De plus, le mauvais calage des images et des points terrains, restreint l’interprétation des matrices des confusions, alors que l’analyse des courbes ROC donne une indication de distance optimale.

La distance entre chaque point de référence et le polygone de végétation basse le plus proche est obtenue à partir d’un outil SIG. Le test ROC calcule ensuite la

spécificité (pourcentage des objets détectés correspondant effectivement aux objets observés) et la sensibilité (pourcentage des objets observés effectivement détecté). A partir de ces paramètres, l'AUC (area under curve) est calculée, elle représente la qualité de la prédiction (**plus le modèle est idéal, plus l'AUC se rapproche de 1**). Le résultat d'AUC est caractérisé par une distance optimale (distance entre objets détectés et points GPS) correspondant au point le plus proche de l'idéal (maximum de la somme sensibilité + spécificité).

### Validation statistique à partir d'images SPOT6

Une seconde phase de validation a donc été réalisée à partir de polygone numérisé de manière aléatoire sur les images SPOT6 à notre disposition.

Le tableau de confusion (Tableau 6) et les tests de courbes ROC (Figure 3) montrent des résultats acceptables pour la végétation basse, la forêt à Parinari et les roches. Alors que les deux types de palmiers ont des résultats plus faibles. Les palmiers-bâches sont confondus avec les zones à Parinari, ce qui peut s'expliquer par leur proximité géographique, en particulier en lieux et place de la péninsule de la Waki. Les pinotières sont particulièrement confondues avec la forêt. Comme expliqué plus haut, ces deux classes de végétation sont difficilement différenciables de la forêt de part leur réponse spectrale. Et, si les pinotières sont nombreuses, elles sont aussi souvent de dimensions réduites.

Tableau 6 : Matrice de confusion obtenu à partir de l'outil r.kappa (Grass)

		Référence							Row Sum	Précision utilisateur
		Parinari	Veg_basse	Palmier-bâche	Roche	Forêt	Pinot			
Classification	Parinari	1001	0	216	0	19	5	1241	81%	
	Veg_basse	0	2172	0	0	10	0	2182	100%	
	Bâche	38	0	41	0	12	32	123	33%	
	Roche	0	0	0	1219	0	0	1219	100%	
	Forêt	156	889	19	339	13801	1045	16249	85%	
	Pinot	0	0	0	0	9	343	352	97%	
	Col Sum	1195	3061	276	1558	13851	1425	21366		
	Précision producteur	84%	71%	15%	78%	100%	24%			

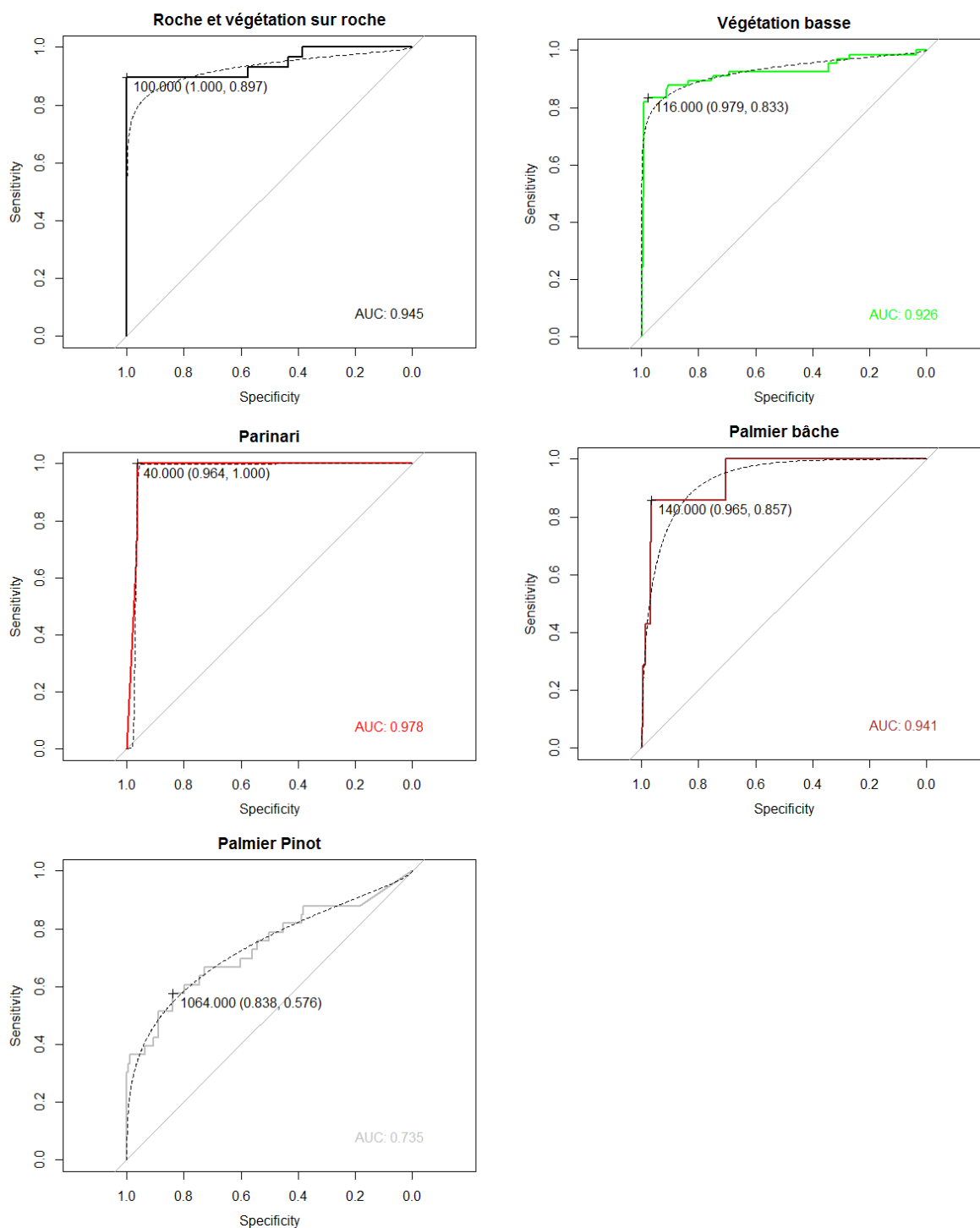


Figure 3 : Résultats des courbes ROC en fonction des classes cartographiées. La distance optimale est indiquée à l'intérieur de chaque graphique, l'AUC (Aréa Under the Curve) est noté en bas à droite.

Pour mieux évaluer les raisons de ces erreurs, le kappa a été estimé en fonction des scènes (seules les scènes comprenant suffisamment de données de référence ont été analysées). On observe une hétérogénéité de la qualité des résultats (Figure 4). En effet, les scènes situées dans le sud de la Guyane, présentent des résultats kappa très faibles. Les scènes 689/343, 688/345, 689/345 et 690/345 ont une forte confusion de pinotières observés

sur SPOT6, mais pas détecté lors de la classification en Random Forest. Les images SPOT5 disponibles pour la scène 691/345 n'ont pas permis de repérer tous les affleurements rocheux, ce qui a fortement augmenté la confusion entre roche et forêt dans les statistiques.

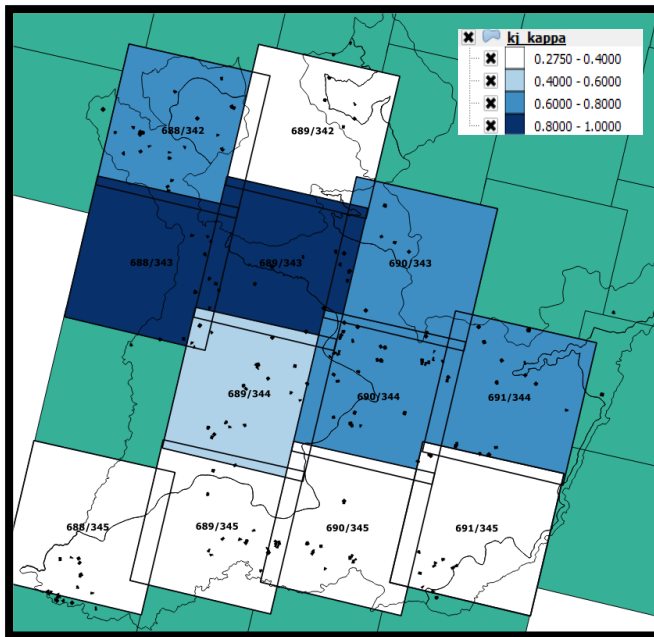


Figure 4 : Résultat kappa calculé en fonction des KJ de SPOT5. Les points noirs correspondent aux polygones de référence qui ont été numérisé à partir des images SPOT6.

## Résultats par types de formations végétales

Le caractère innovant de cette donnée, amène de nombreuses questions quant aux particularités environnementales de ces formations végétales. Ces formations représentent seulement 1,4% de la totalité du territoire du PAG (Tableau 7), mais on les observe dispersées, ou agglomérées en fonction des zones. Plusieurs analyses spatiales mettant en relation des variables environnementales ont donc été réalisées pour mieux définir les différentes classes de végétation. A partir du SRTM 30m, l'exposition, le pourcentage de pente, et la position du bassin versant ont été testés. En plus de ces paramètres géomorphologiques, la situation géographique des formations végétales par rapport aux grands habitats forestiers [2], aux anciens lieux de vie, et aux découvertes archéologiques ont été analysée. Enfin la dispersion des types de végétations entre eux a été étudiée.

Tableau 7 : Pourcentage de représentation de chaque type de végétation par rapport à la surface total du PAG (3,4 million d'hectare)

Formation	Proportion sur le PAG
Parinari	0,776%
Végétation basse	0,361%
Palmier-bâche	0,085%
Roche	0,125%
Pinotière	0,031%
<b>Total_formation</b>	<b>1,379%</b>

Dans un second temps, la réponse spectrale des différentes classes a été observée que ce soit avec les images SPOT 5 (Figure 5), SPOT6 ou Sentinel2 pour comprendre les caractéristiques spectrales de chaque formation, et pouvoir ainsi les réutiliser dans une éventuelle suite du projet.

Les différents tableaux de résultats et rapports d'analyses spectrales sont présentés en annexe 2, 3 et 4.

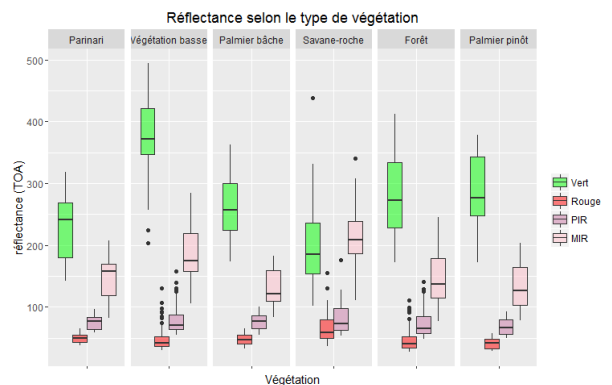


Figure 5 : Amplitude spectrale moyenne de chaque végétation pour chaque bande SPOT 5, sur l'ensemble du territoire à partir des ROI.

## Affleurements rocheux

### Résultats :

La classification des affleurements rocheux, à partir des images SPOT4/5, présente des résultats statistiques relativement corrects, **AUC=0.94 et distance optimale=100m**. L'AUC proche de 1 montre une bonne performance de la classification, la distance optimale de 100 mètres est légèrement trop importante, ceci semble correspondre à la sous représentation des roches sur le KJ 691/345 (figure 4). La matrice de confusion, montre une forte précision producteur de 78%, et 100% des entités de roche sont bien classées vis-à-vis des données de référence. On peut donc considérer que la carte est une bonne représentation de la localisation de savanes-roches, inselbergs et autres dalles rocheuses.

### Variables environnementales :

Comme nous aurions pu l'espérer, les affleurements rocheux sont très largement représentés dans la classe des forêts sur Inselberg de la cartographie des habitats [2].

L'exposition et le pourcentage de pente ont été mis en relation avec la localisation des affleurements rocheux avec un test khi2. On observe alors qu'il n'y a pas d'influence de l'exposition sur la localisation des roches (p-value=0,999). En revanche, les affleurements rocheux sont plus fréquents dans les fortes pentes (p-value=0,0035), (Figure 6).



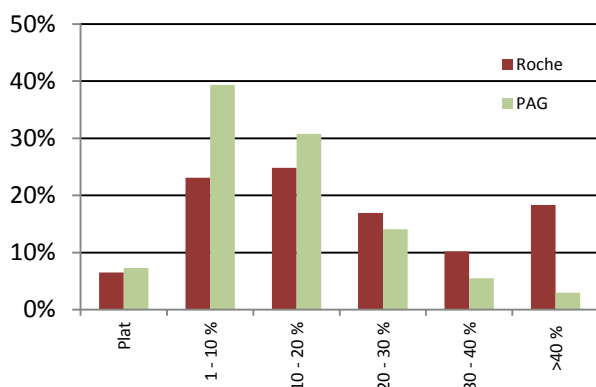


Figure 6 : Répartition des affleurements rocheux en fonction de la pente par rapport à ce que l'on peut retrouver dans le territoire du Parc Amazonien de Guyane

### Caractéristiques spectrales :

L'analyse des résultats de détection de roche sur 3 images de la scène SPOT5 (690/343) a montré une plus forte intensité dans le moyen infrarouge alors que le vert est plus faible comparé aux autres classes (Figure 7). Seule cette classe présente ce type de réponses spectrales, ces 2 bandes sont donc primordiales pour la caractérisation des roches.

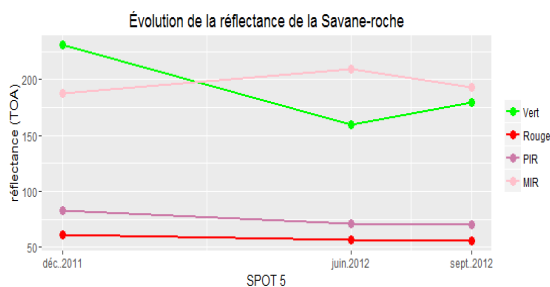


Figure 7 : Evolution de la réflectance des affleurements rocheux pour 3 images du KJ 690/343

### Perspectives :

Un effort reste à poursuivre quant à la caractérisation des zones de roche sous couvert végétal. La signature spectrale de ce type de formation végétale, végétation qui a tendance à sécher durant la saison sèche, pourrait être améliorée à partir d'analyse multi-temporelle.

Les falaises, une autre sous-classe des affleurements rocheux semble aussi être sous représentées dans la classification. L'angle de prise de vue des images satellites ne permet pas systématiquement de discerner ces formations rocheuses à très fort dénivelé.

Une analyse de nouveaux procédés de télédétection doit être menée, pour améliorer la cartographie des végétations sur roche ou des falaises. Une étude sur la faisabilité de l'utilisation des mesures géophysiques,

radar ou du SRTM est à programmer. De plus, l'opportunité d'obtenir des séries temporelles à partir de Sentinel2 ouvre de nouvelles perspectives.

## Végétations basses

### Résultats :

La cartographie des végétations basses, a donné des résultats de test ROC Curve tel que l'**AUC=0.92 et distance optimale = 116m**. Ces résultats montrent une bonne précision, malgré quelques omissions dans la classification qui tendent à augmenter la distance optimale. Ces résultats sont cohérents avec la matrice de confusion (Tableau 6) qui indique des erreurs entre les végétations basses et la forêt (71% de précision producteur, et 100% de précision utilisateur) qui révèle que le résultat de la classification n'est pas une représentation exhaustive de cette formation. Néanmoins, cette cartographie s'est révélée très précieuse pour le déplacement terrestre lors de plusieurs missions de terrain ("Saut parasol (2015)", "7 bornes (2015)", "Itoupe (2016)"....).

### Variables environnementales :

Les cambrouses sont des formations végétales particulièrement mal connues, et cette cartographie pourrait permettre d'apporter de nouveaux éléments de compréhension (répartition globale, position géomorphologique, dynamique temporelle, rapports aux occupations anthropiques...).

Les végétations basses se retrouvent particulièrement dans les zones de plat correspondant aux forêts de bas-fond (Figure 8). Les végétations basses de terrain plat peuvent correspondre à des prairies, mais aussi à des cambrouses à bambous. Par contre, les formations qui sont situés sur les fortes pentes sont certainement des cambrouses de bambous ou de balisier.

La proportion de cambrouse (donc des végétations basses qui ne sont pas sur du plat) est supérieure dans les zones exposées au Nord / Nord Ouest. Cette préférence n'est pas assez importante pour être validé statistiquement par le test de Khi 2 (p value=0,96), (Figure 9).

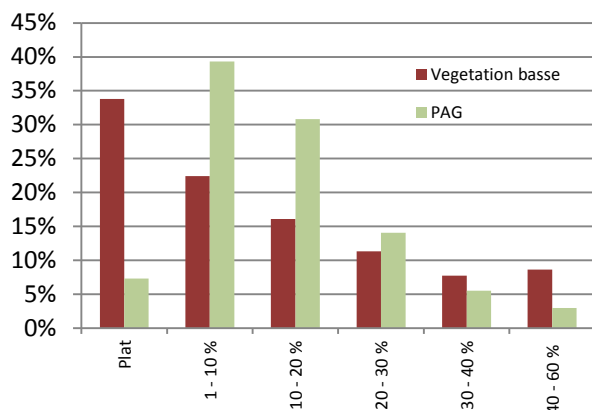


Figure 8 : Répartition des végétations basses en fonction de la déclinaison par rapport à ce que l'on peut retrouver dans le territoire du Parc Amazonien de Guyane

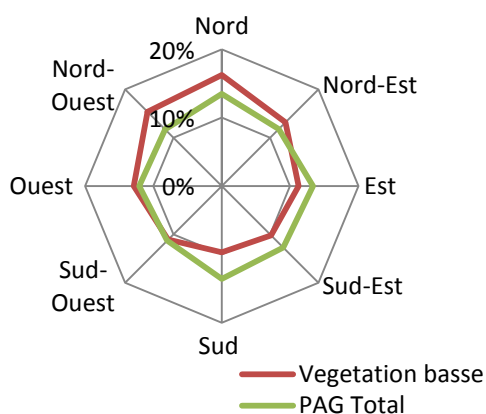


Figure 9 : répartition des végétations basses en fonction de l'exposition.

Avec un p-value du test Khi2 égal à 0,47, on considère qu'il n'y a pas de particularité quant à la localisation des végétations basses par rapport à la position des bassins versant.

La classe des végétations basses correspond à plusieurs sous-types (cambrouses de bord de fleuves, cambrouses d'altitudes, pripris, Héliconia...). L'analyse PCA multivariée (Figure 10), cherche à mettre en lumière ces différents sous-types en fonction de plusieurs variables. Ces caractéristiques sont fortement liées aux classes d'habitats forestiers. On observe un groupe d'entités qui est plutôt situé dans les zones hautes et pentues, qui peut correspondre aux cambrouses, et aux forêts de montagnes (41610 et 41611). Alors que les formations qui se situent dans les forts rangs de Stralher doivent plutôt correspondre aux pripris et végétations inondées des forêts de bas-fond (41110 et 41111).

La question de l'origine des cambrouses reste aujourd'hui en suspens. Ces forêts de bambou sont-elles d'origines anthropiques ou proviennent-elles

d'événements naturels ? Pour tenter de répondre à cette question nous avons cherché à mettre en relation les entités de végétation basses avec leurs distances aux villages anciens ou aux découvertes archéologiques. Néanmoins ces données présentent un biais, puisque la plupart de nos connaissances se limitent dans les zones aujourd'hui habitées, c'est à dire sur les bords de la zone d'étude (fleuves frontaliers). Cette donnée aujourd'hui trop pauvre ne permet donc pas d'interpréter l'origine des cambrouses, néanmoins des projets sont en cours pour approfondir cette question ("LongTime – CNRS")

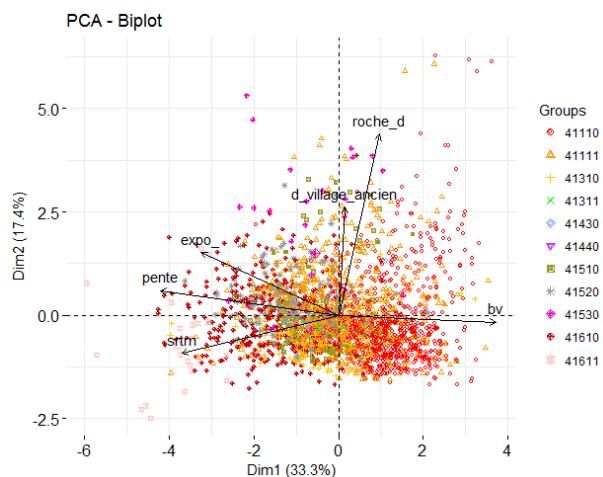


Figure 10 : Analyse multivariée PCA pour le type végétation basse, à partir de 10% des entités, *roche\_d*=distance à la roche, *bv*=numéro de Stralher du bassin versant, *expo*=exposition, *pente*=pourcentage de pente, *d\_village\_ancien*=distance des villages anciens ou des découvertes archéologiques, *srtm*=altitude d'après de SRTM 30m. Les groupes de couleurs correspondent aux classes d'habitat forestier de l'ONF [voir correspondance annexe 1, Tableau 4]

### Caractéristiques spectrales :

Les végétations basses ont une plus forte moyenne de réflectance de la bande verte par rapport aux autres classes (Figure 5). Ses caractéristiques spectrales semblent stables le long de l'année (Figure 11). Seule la bande verte a tendance à diminuer en réflectance en septembre, en début de saison sèche, ce qui n'est pas le cas pour aucune autre formation végétale étudiée ici.

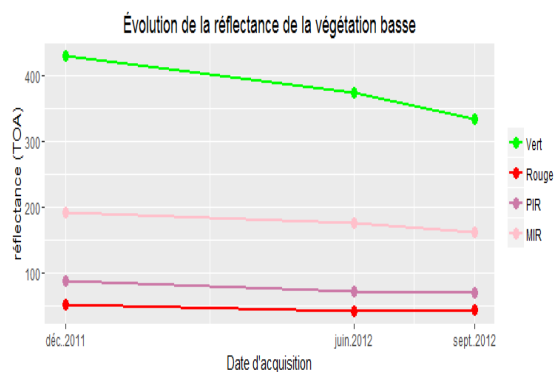


Figure 11 : Evolution de la réflectance des végétations basses pour 3 images du KJ 690/343

L'analyse de la séparabilité des formations avec les images SPOT6 et Sentinel 2 a montré l'importance du vert et du proche Infrarouge pour la détection de ces formations basses.

### Perspectives :

La classe de végétation basse réunit plusieurs sous-classes : Les pripris (végétation basses hétérogènes de bord de fleuve), les zones homogènes à balisiers (*Heliconia spp.*, *Phenakospermum guyannense*) et les cambrouses (zone homogène de bambous, *Lasiacis sp.*). Pour améliorer la connaissance concernant ces formations végétales, très homogènes, une amélioration des connaissances sur leurs signatures spectrales doit être menée à partir d'images satellites de meilleure résolution spatiale (SPOT6 et SPOT7) ou spectrale (Sentinel 2). Des pistes de recherche autour de la texture et des analyses orientée-objets doivent aussi être étudiées. Prochainement, un projet de recherche centré sur l'origine et la dynamique des cambrouses pourrait améliorer nos connaissances sur ces formations.

## Forêts à Parinari

### Résultat :

La pénélaine de la Waki connaît des caractéristiques spectrales très particulières. Les différentes missions terrain ont révélé que cet espace pouvait être caractérisé spectralement par la dominance de Parinari. En effet, la couleur brune de ses feuilles est facilement repérable, ce qui s'ajoute à une canopée plus ouverte. De plus, la prédominance de cette espèce modifie particulièrement la texture de cette région. Ces caractéristiques ont permis d'avoir de très bon résultats statistiques **l'AUC est très proche de 1 (0.94) si on accorde une tolérance spatiale de 40m**. On observe néanmoins quelques confusions entre les palmiers-bâches et la forêt classique (Tableau 6).

La principale difficulté de cette classe a été de correctement seuiller l'intensité des Parinaris. En effet, les données de terrain concernant les Parinaris, proviennent des missions habitat de l'ONF, représentent la moyenne des Parinaris sur une parcelle de 100m<sup>2</sup>. Le fait que les Parinaris sont parfois minoritairement présents sur ces zones, ont rendu difficile l'estimation de leur présence par pixel. La création des parcelles d'entraînement, primordiale pour ce travail, a été facilitée en forçant les contrastes de l'image depuis Qgis afin de bien différencier les zones potentielles de Parinaris avec la forêt.

Il a donc fallu plusieurs essais en vérifiant visuellement et statistiquement les résultats pour valider une méthodologie.

### Variables environnementales :

Les forêts à Parinari sont situées essentiellement sur les faibles pentes, de moins de 10% (p-value=0.0000165). Elles représentent l'essentiel (61%) de la forêt de djougoug-pétés définie par la cartographie des habitats [2]. Ceci confirme que ce type de végétation est en forte relation avec le paysage particulier de la pénélaine de la Waki.

L'exposition n'est pas un critère dépendant (p-value=0,999), ce qui semble logique puisque cette végétation est principalement installée sur des faibles pentes (Figure 12).

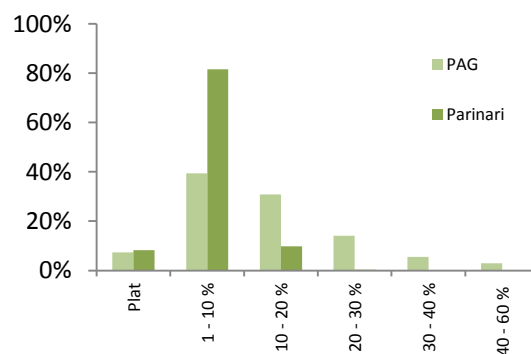


Figure 12 : Répartition des Parinaris en fonction de la pente par rapport à ce que l'on peut retrouver dans le territoire du Parc Amazonien de Guyane

L'analyse multivariée des paramètres environnementaux en relation avec la classe de la forêt de Parinari ne montre pas de dépendance particulière entre les variables.

### Caractéristiques spectrales :

Les analyses de la séparabilité des classes sur l'ensemble du territoire ont montré que les Parinaris avaient une forte tendance à se mélanger spectralement avec les palmiers-bâches et la forêt. Sa réflectance dans le vert est néanmoins plus basse que ces classes, et suit

la même évolution au cours de l'année. Contrairement aux palmiers et à la forêt, la forêt le Parinari a un moyen infrarouge en baisse en juin et septembre, ce qui permet de mieux le différencier (Figure 13).

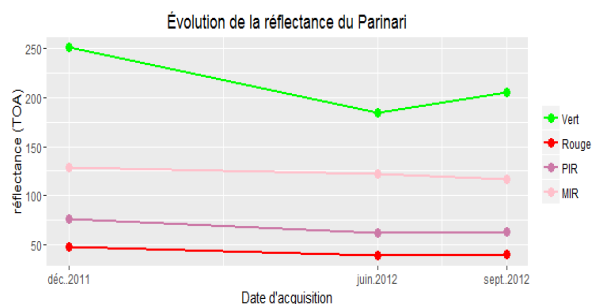


Figure 13 : Evolution de la réflectance des Parinari pour 3 images du KJ 690/343

L'analyse de la séparabilité avec Sentinel 2, a montré de bons résultats par l'utilisation de l'infrarouge lointain.

#### **Perspectives :**

Les résultats obtenus pour cette classe semblent très corrects, en ne semblent pas nécessiter d'amélioration. Dans le cas où une nouvelle classification se mettrait en place avec des capteurs ayant une plus grande signature spectrale, les confusions avec les palmiers-bâches pourraient être améliorées.

### **Palmiers-bâches**

#### **Résultat :**

Les grandes surfaces recouvertes de palmiers-bâches sont plutôt rares sur le territoire du PAG. Néanmoins ce palmier est très commun dans la zone de la plaine de la Waki. Malgré le peu de donnée terrain concernant cette classe nous avons tenté de l'intégrer à la classification. Cette faiblesse au niveau des données d'apprentissage n'a pas permis de bien identifier cette classe. Le tableau de confusion montre une forte erreur avec la forêt à Parinari et les pinotières. Même si le test ROC curve montre des résultats très correct, la matrice de confusion et l'observation de terrain nous obligent à considérer cette classe comme très approximative et insuffisante.

#### **Variables environnementales:**

Malgré les doutes émis sur cette classe, l'étude de ses caractéristiques géomorphologiques donne des résultats assez logique pour ce type de formation végétale, puisqu'on la retrouve en général sur un terrain plutôt plat (Figure 14) et dans le paysage des forêts sur djougoung-pétés (annexe 2, tableau 4). Ces palmiers-bâches auraient une faible préférence pour l'exposition Nord / Nord-

Ouest, mais la dépendance à cette variable n'est pas validée pas le test de Khi 2.

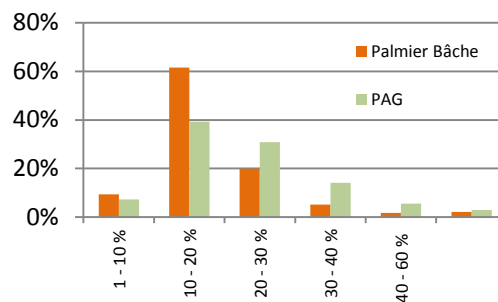


Figure 14 : Répartition des Parinari en fonction de la pente par rapport à ce que l'on peut retrouver dans le territoire du Parc Amazonien de Guyane

#### **Caractéristiques spectrales :**

Les caractéristiques spectrales des palmiers-bâches sont très proches de la forêt hétérogène. Néanmoins par rapport à la forêt, le palmier-bâche a une réflectance plus marquée dans le vert en décembre, ce qui est un atout pour la différenciation.

Les caractéristiques spectrales des images SPOT6 semble accentuer la confusion entre palmiers bâche et Parinari. Néanmoins la résolution spectrale des images Sentinel 2 est très prometteuse pour séparer ces deux essences, en particulier dans le rouge et l'infra-rouge lointain.

#### **Perspectives :**

Les tests de séparabilité réalisés à partir de Sentinel 2, prouvent que de meilleurs résultats de classification seront possibles en utilisant les nouveaux capteurs disponibles. Pour cela, une amélioration de la qualité des données de référence sera indispensable.

### **Pinotières**

#### **Résultats :**

Les résultats sur l'identification des zones de pinots sont très faibles avec 76% de confusion avec la forêt. Les zones détectées paraissent correctes, mais elles sont très loin d'être exhaustives.

Malgré un résultat ROC curve correct (AUC=0,7), la distance optimale de plus de 1km montre un fort taux d'erreur, puisque cette distance est bien au-delà de ce que l'on peut attendre en cartographie.

#### **Variables environnementales:**

Comme pour les palmiers-bâches, même si la classification a raté un grand nombre de pinotières, celles qui ont été classifiées sont situées en particulier dans les zones de bas fond et les forêts de transition (60%), c'est-

à-dire dans les terrains plats (Figure 15). Ces paysages sont caractéristiques des formations de pinotières en Guyane. La cartographie des pinotières, bien qu'incomplète donne tout de même des résultats intéressants.

Comme les autres classes, la position sur le bassin versant ne semble pas être une variable dépendante (p-value=0,066).

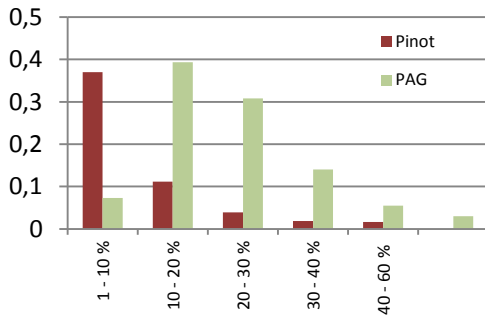


Figure 15 : Répartition des pinotières en fonction de la pente par rapport à ce que l'on peut retrouver dans le territoire du Parc Amazonien de Guyane

### Caractéristiques spectrales :

Les réflectances SPOT5 correspondantes aux pinotières sont extrêmement proches de la forêt. Celles-ci rendent leur classification délicate, et seraient responsable des mauvais résultats obtenus pour cette classe.

Les images SPOT6 ne semblent pas régler ce problème de confusion. Par contre, les tests effectués sur les images Sentinel 2 montrent une réelle amélioration de la discrimination avec l'utilisation des bandes infra-rouge proche (855-875nm), moyen (1565-1655nm) et lointain (2100-2280nm)), (Figure 16).

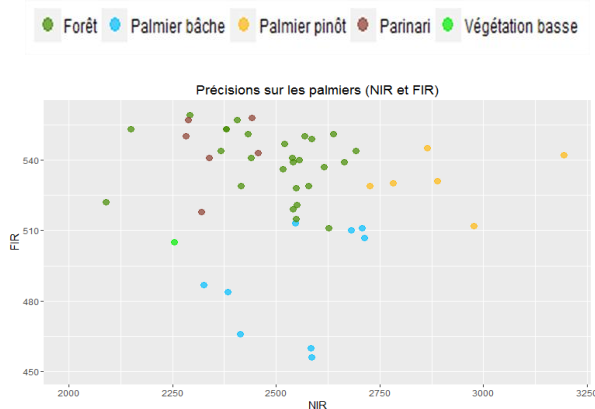


Figure 16 : Dispersion des valeurs spectrales des types de végétation en fonction du lointain infrarouge et du proche infrarouge de Sentinel 2

### Perspectives :

Même si les résultats sont encore très moyens, nous avons une première cartographie des pinotières sur le territoire du PAG. La reproduction de cette méthode à partir d'images Sentinel2 permettrait probablement d'améliorer ce premier essai. Les missions de terrain ont montré que la majorité des pinotières sont assez petites (moins de 0,2 hectare). Ces petites entités seront donc aussi difficilement repérables avec Sentinel 2. La bonne résolution de SPOT6 pourrait permettre de cibler ces petites formations, mais la séparabilité spectrale entre pinotières et forêt est trop faible. Au vu des capteurs aujourd'hui disponibles, la cartographie des pinotières devra donc être limitée aux grandes zones de pinots.

### Discussion :

Cette étude a permis de réaliser une première cartographie des formations végétales particulières sur le sud de la Guyane. Malgré quelques difficultés de réalisation son existence est une avancé importante pour la connaissance du territoire du Parc amazonien de Guyane. Ces résultats s'inscrivent dans la continuité de la cartographie des paysages de forêt réalisée avec le capteur VEGETATION de SPOT-4 [2].

La principale difficulté de cette cartographie à l'échelle du Parc amazonien de Guyane, a été de mettre en place une méthodologie qui prenne en compte la grande hétérogénéité des images SPOT 5. En effet, ces images satellitaires présentent de fortes disparités spectrales, spatiales et temporelles. Ces complications sont accentuées par la nécessité de multiplier le nombre d'image à traiter pour détourner les masques liés au fort ennuagement de cette région équatoriale.

Le second défi a été de réunir des données de terrain dans une région très difficilement accessible. In fine nous avons choisi d'utiliser comme données de validation des images satellites de résolution supérieure telle que SPOT6/7.

Les classes affleurement rocheux, végétations basses et forêt de Parinari ont montré de très bons résultats de classification. Néanmoins, les classes "affleurements rocheux" et "végétations basses" devraient être détaillées, puisqu'elles réunissent plusieurs sous-types. Les résultats statistiques provenant de la classification des palmiers-bâches et des pinotières n'ont pas été convaincants. Ces confusions semblent liées au fait que les zones de palmiers sont en général très petites, et les zones de références correctement géolocalisées sont peu nombreuses.

La suite de ce travail devra prendre en compte les récents capteurs satellites qui apportent une nette amélioration de précision, mais qui nécessitent de développer des méthodologies adaptées (nouvelles bandes spectrales), efficaces (poids des images important) et cohérentes. Cette première cartographie reste donc dynamique et pourra être améliorée avec l'accès à de nouvelles images.

Cette étude fournit pour la première fois une évaluation chiffrée de la fréquence de ces formations à l'échelle du territoire. Elle relève la rareté de ces formations qui occupent moins de 1,4% du massif forestier. La cartographie montre une distribution très hétérogène avec notamment des zones de forte concentration de forêt basses qui peuvent traduire des dynamiques forestières très variables. C'est une contribution importante pour une meilleure connaissance de l'espace forestier mais aussi pour la compréhension de la dynamique de ces écosystèmes. Ces données publiques et les méthodes de traitement ont été largement partagées, en particulier avec l'ONF pour potentiellement améliorer la connaissance des habitats forestiers de Guyane, avec les équipes du projet BIOMAP (Intégration de données spatialisées multi-échelles pour la cartographie des types de forêt et de la biomasse en Amapà et Guyane) porté par l'AMAP, et avec l'IRD dans le cadre du projet DYNFORDYV (forçage environnementaux et anthropiques du turnover forestier, conséquences sur la diversité des communautés d'arbres en forêt tropicale).

## **Bibliographie :**

[1] Granville, J.-J., Les formations végétales primaires de la zone intérieure de Guyane (1994), in Forêt guyanaise : gestion de l'écosystème forestier et aménagement de l'espace régional, Nature Guyanaise, SÉPANGUY 244 p.

[2] Gond V et al. (2011) Broad-scale spatial pattern of forest landscape types in the Guiana Shield. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 13:357–367

[3] Guitet S., Brunaux O., de Granville J.J., Gonzalez S., Richard-Hansen C., 2015. Catalogue des habitats forestiers de Guyane. DEAL Guyane. 120p.

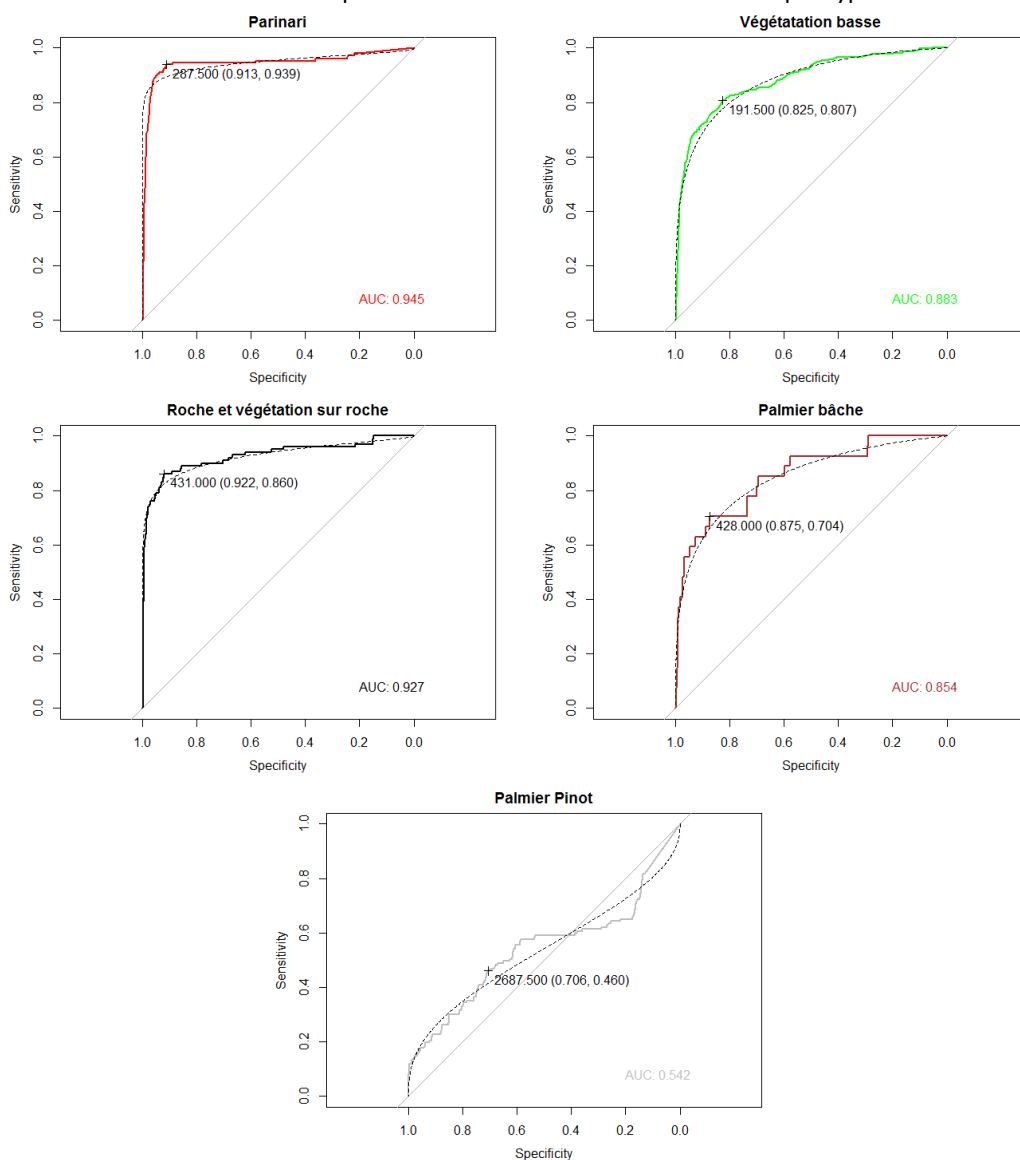
[4] Karasiak, N, Cartographie des végétations particulières du Parc amazonien de Guyane, Rapport de stage, Master SIGMA, Toulouse, 2016

[5] R Development Core Team (2009) R : A language and environment for statistical computing; Computing RfS, editor. Vienna, Austria.

[6] Robin X, Turck N, Hainard A, Tiberti N, Lisacek F, et al. (2011) pROC: an open-source package for R and S+ to analyze and compare ROC curves. *BMC Bioinformatics* 12: 77

**Annexe**

**Annexe 1.** Résultats ROC Curve obtenus à partir des données terrains et de survols par type de formations végétales.



ANNEXES

**Annexe 2.** Tableaux de résultats des paramètres géomorphologiques

*Tableau 1. Répartition des formations végétales en fonction de l'exposition*

Exposition	Parinari		Végétation basse		Palmier-Bâche		Roche		Pinot		Forêt		PAG Total	
	area	%	area	%	area	%	area	%	area	%	area	%	area	%
Plat standard	12593	4%	39946	31%	2053	6%	2137	5%	4439	40%	2E+06	6%	2E+06	6%
Nord	41305	12%	14118	8%	4701	12%	5173	10%	751	5%	5E+06	11%	5E+06	13%
Nord-Est	36344	12%	11461	9%	3208	10%	4027	10%	939	8%	4E+06	11%	4E+06	11%
Est	35096	12%	9797	8%	3460	11%	4458	11%	856	8%	5E+06	13%	5E+06	13%
Sud-Est	28567	10%	8912	7%	3346	10%	5306	13%	1189	11%	4E+06	12%	5E+06	12%
Sud	33216	11%	8463	7%	3418	11%	5859	15%	943	9%	5E+06	13%	5E+06	13%
Sud-Ouest	32294	11%	9647	8%	3024	9%	4675	12%	771	7%	4E+06	11%	4E+06	11%
Ouest	36697	13%	11211	9%	4125	13%	4273	11%	500	5%	4E+06	11%	4E+06	11%
Nord-Ouest	35013	12%	13362	11%	4756	15%	4433	11%	691	6%	4E+06	11%	4E+06	11%

*Tableau 2. Répartition des formations végétales en fonction du pourcentage de pente*

Pente	Parinari		Vegetation basse		Palmier-Bâche		Roche		Pinot		Forêt		PAG	
	area	%	area	%	area	%	area	%	area	%	area	%	area	%
Plat	23968	8%	42839	34%	3012	9%	2580	7%	5070	46%	3E+06	7%	3E+06	7%
1 - 10 %	237297	82%	28412	22%	19759	62%	9154	23%	3863	35%	1E+07	39%	1E+07	39%
10 - 20 %	28542	10%	20401	16%	6377	20%	9844	25%	1276	12%	1E+07	31%	1E+07	31%
20 - 30 %	1096	0%	14390	11%	1646	5%	6718	17%	457	4%	5E+06	14%	5E+06	14%
30 - 40 %	155	0%	9785	8%	574	2%	4054	10%	202	2%	2E+06	6%	2E+06	6%
>40 %	63	0%	10970	9%	698	2%	7255	18%	209	2%	1E+06	3%	1E+06	3%



ANNEXES

Tableau 3. Répartition des formations végétales en fonction de la position du bassin versant

Numéro de Strahler du bassin versant	Parinari		Vegetation basse		Palmier- Bâche		Roche		Pinot		Forêt		PAG total	
	area	%	area	%	area	%	area	%	area	%	area	%	area	%
1	204688	70%	65508	52%	21664	68%	31388	78%	3482	31%	2E+07	62%	2E+07	62%
2	50418	17%	19218	15%	6271	20%	5206	13%	2399	22%	7E+06	19%	7E+06	19%
3	21906	8%	14274	11%	2398	8%	2203	5%	2338	21%	4E+06	10%	4E+06	10%
4	9624	3%	13955	11%	972	3%	731	2%	2083	19%	2E+06	5%	2E+06	5%
5	1429	0%	9117	7%	346	1%	312	1%	574	5%	804494	2%	8E+05	2%
6	967	0%	3362	3%	87	0%	182	0%	195	2%	331081	1%	3E+05	1%
7	1694	1%	752	1%	143	0%	74	0%	0	0%	171617	0%	2E+05	0%
8	285	0%	848	1%	81	0%	153	0%	0	0%	168071	0%	2E+05	0%
9	0	0%	118	0%	0	0%	61	0%	0	0%	63247	0%	63426	0%
10	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%

ANNEXES

Tableau 4. Répartition des formations végétales en fonction des types d'habitat forestier

Habitat de Guyane [2]	Parinari		Vegetation basse		Palmier Bâche		Roche		Pinot		Forêt		PAG Total	
	area	%	area	%	area	%	area	%	area	%	area	%	area	%
41.11 - forêt ripicoles, de bas-fonds, de talwegs humides	26037	9%	43545	36%	3221	11%	2347	6%	5187	50%	4078003	7%	4158340	8%
forêt de transition (écotones - faciès humide)	48252	18%	29603	25%	4847	16%	4763	13%	3625	35%	9389326	17%	9480416	17%
41.31 - forêt de la péninsule intérieure	17032	6%	5296	4%	3810	13%	7080	19%	87	1%	5553758	10%	5587063	16%
41.31d - forêt sur djougoung-pétés	167756	61%	8	0%	10339	34%	443	1%	11	0%	811604	1%	990161	3%
41.43 - forêt des collines régulières	0	0%	228	0%	0	0%	550	1%	0	0%	2712741	5%	2713519	3%
41.44 - forêt des collines peu élevées	367	0%	274	0%	103	0%	63	0%	0	0%	1834957	3%	1835764	2%
41.51 - forêt des plateaux réguliers	12466	5%	4887	4%	3183	11%	8835	23%	71	1%	10439441	19%	10468883	19%
41.5.i - forêt sur inselberg	0	0%	0	0%	0	0%	47	0%	0	0%	1243	0%	1290	0%
41.52 - forêt sur plateaux irréguliers	692	0%	10317	9%	721	2%	4189	11%	620	6%	4933462	9%	4950001	12%
41.53 - forêt sur plateaux élevés	0	0%	91600%	1%	0	0%	227	1%	0	0%	5623755	10%	5624898	2%
41.61 - forêt des moyennes montagnes	2130	1%	24581	20%	3642	12%	8136	22%	871	8%	9239849	17%	9279209	18%
41.61a - forêt sub-montagnarde	69	0%	569	0%	105	0%	1074	3%	6	0%	236217	0%	238040	1%

## Annexe 3

## Analyse des végétations particulières du Parc amazonien de Guyane à partir d'images SPOT5

Nicolas Karasiak

### Carte d'identité des végétations particulières

Les données spectrales utilisées pour les statistiques ont été obtenues à partir de **53 images SPOT 5** traitées en TOA (Top Of the Atmosphere) obtenues à **32 dates différentes**.

Les analyses reposent sur un total de **1106 parcelles d'entraînement**, dont **391 de végétation basse**, **169 de savane-roche**, **348 de forêt**, **116 de parinari**, **48 de palmier bêche** et **34 de palmier pinot**.

### Analyse des images SPOT 5

Après avoir identifié et recensé les végétations particulières sur l'ensemble du parc, il a été effectué des analyses zonales afin d'en extraire la réflectance moyenne de chaque parcelle d'entraînement pour chaque type de végétation. Afin d'optimiser le traitement et de pouvoir aisément le reproduire, un script R a été développé et génère un fichier CSV qui contient toutes les données spectrales des polygones pour chaque image. Le script parcourt toutes les images d'un dossier indiqué, les rattache au fichier vectoriel du même nom et sauvegarde le tout dans un fichier CSV. Par la suite une fusion permet d'obtenir un fichier unique qui contient toutes les caractéristiques spectrales de l'ensemble des parcelles d'entraînement.

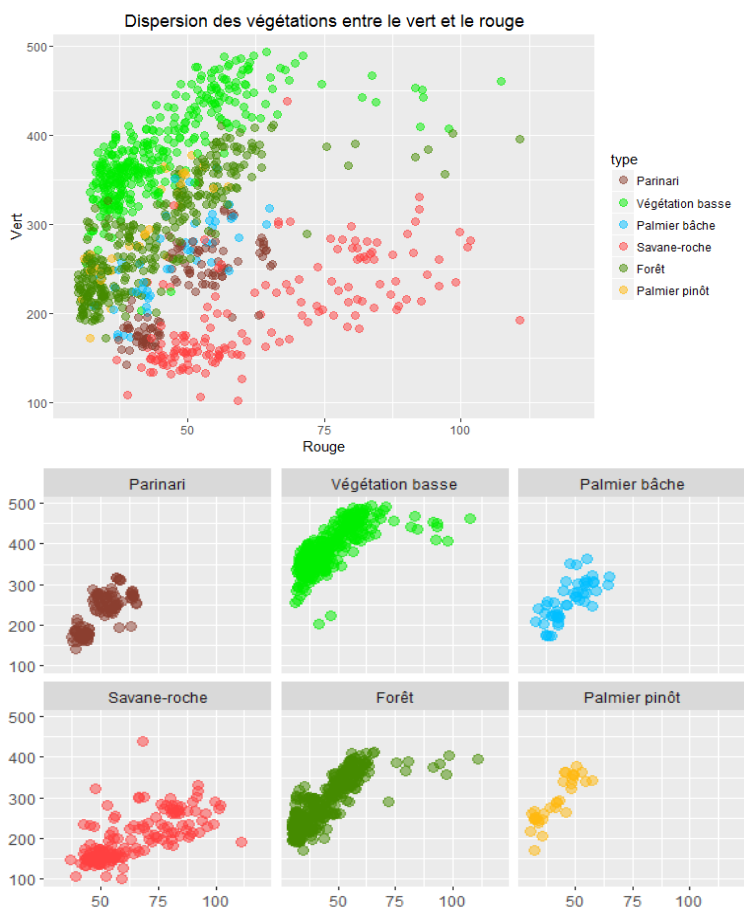
### Amplitude de réflectance de la végétation particulière



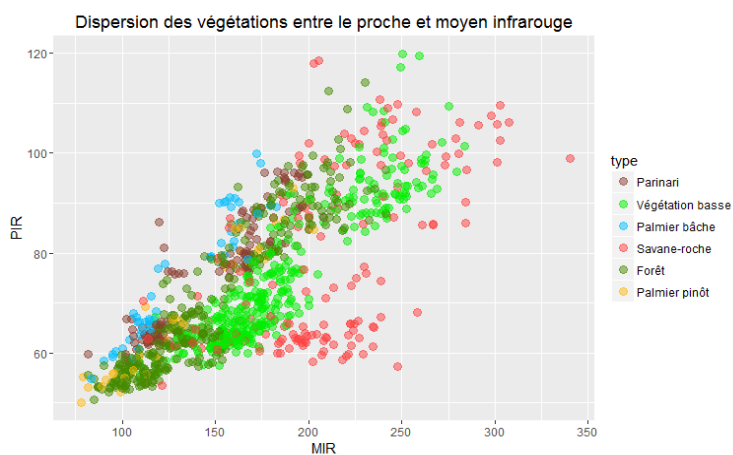
Ce premier graphique représente l'amplitude spectrale moyenne de chaque végétation pour chaque bande, sur l'ensemble du territoire et sur l'ensemble des dates d'acquisition (de 2007 à 2014). La végétation basse est celle qui a le plus de réflectance dans les verts, suivie par les palmiers pinot et la forêt. La savane roche a une intensité plus faible dans les verts, mais plus forte dans la moyen infrarouge.

Afin de comparer les classes entre elles, il a été représenté la dispersion des végétations pour chaque bande spectrale. Cela permet de visualiser l'indépendance des végétations identifiées et ainsi de voir si elles sont spectralement différenciables.

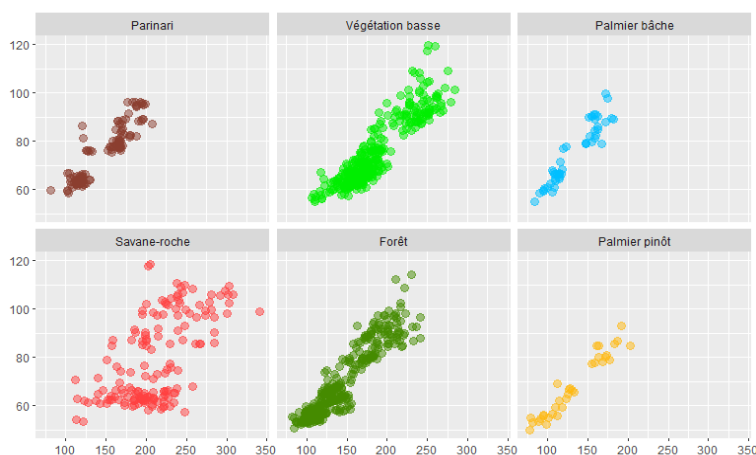
ANNEXES



On observe ainsi que la végétation basse et la savane-roche sont spectralement différentes avec des valeurs de vert au minimum dans les 300 d'intensité pour la première et au maximum de 300 pour la seconde. Il y a certaines confusions avec les 48 échantillons de palmier bâche qui se confondent ici légèrement avec les parinaris et la forêt même si on peut observer une certaine différence spectrale.



ANNEXES



A la différence du vert et du rouge, les canaux proche et moyen infrarouge montre une plus grande homogénéité spectrale ne permettant pas de mieux différencier les végétations particulières du parc.



L'analyse du vert et du proche infrarouge montre que la Savane-roche et la végétation basse se différencient relativement aisément des autres classes, contrairement aux parinaris, palmier bêche et palmier pinot.

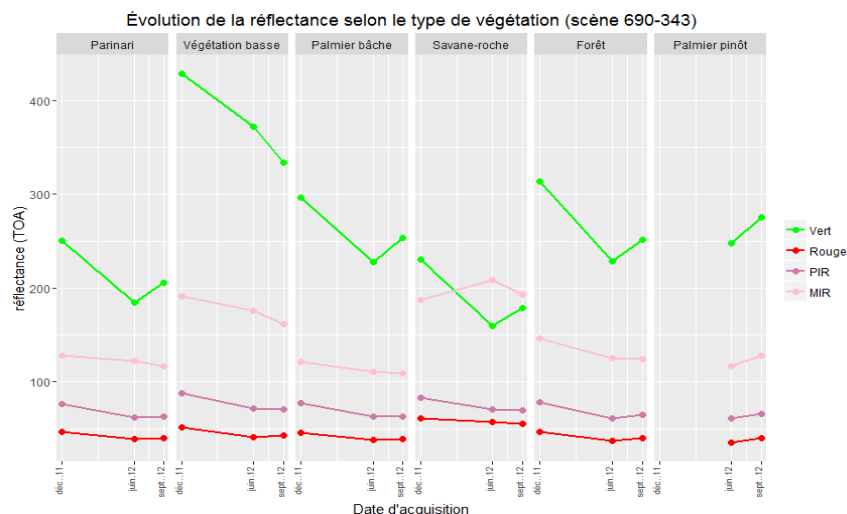
La moyenne spectrale des végétations sur l'ensemble des dates et des localisations ne permet donc pas de séparer spectralement de manière optimale les parinaris, les palmiers bèches ou pinots.

La différence par zone géographique ou par date devrait permettre de mieux séparer les végétations.

## Évolution dans le temps des signatures spectrales

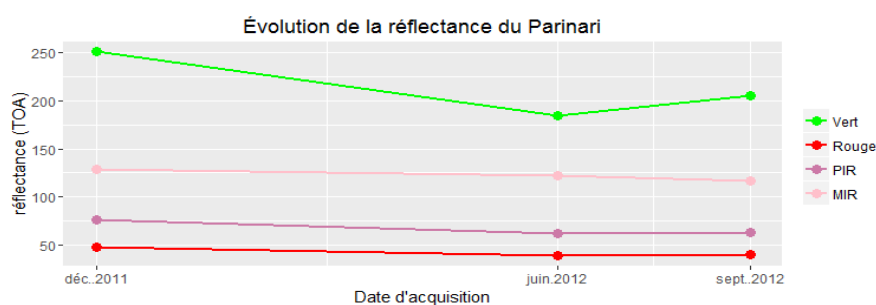
Les spécificités de certaines végétations les rendent plus intenses en saison sèche, ce qui est le cas par exemple du parinari. Il semblerait qu'il y ait plusieurs facteurs expliquant ce phénomène comme les sols hydromorphes (de type djogoun pété) qui en fin de saison sèche favoriseraient la photosynthèse et la croissance de nouvelles pousses pour les parinaris.

La zone étudiée pour comparer l'évolution des végétations particulières est la scène SPOT5 690-343 située au centre du Parc amazonien de Guyane. Trois dates sont disponibles, décembre 2011, juin et septembre 2012.



Il s'avère que plus on entre dans la saison sèche (septembre 2012), plus l'intensité du signal sera fort dans le vert pour l'ensemble des végétations à l'exception de la végétation basse. A la différence de l'ensemble des végétations, le palmier pinot est la seule essence où le moyen infrarouge augmente à cette période. Le phénomène de verdissement de la canopée a été étudié par Emil Cherrington (Cherrington et al. BRDF-corrected vegetation indices confirm seasonal pattern in greening of French Guiana's forests, 2016).

### Le parinari

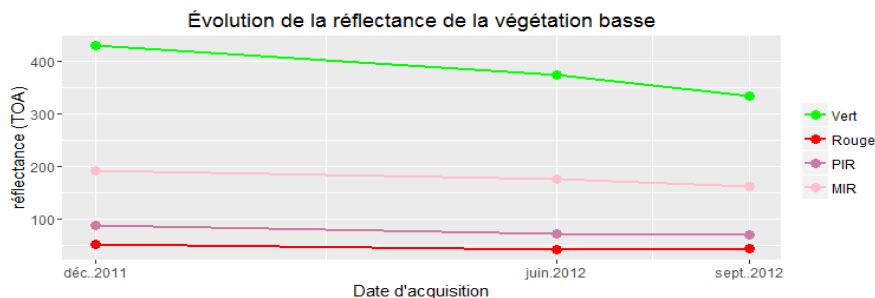


Les parinaris sont des arbres présents sur un sol de type djogoun pété, c'est-à-dire de "micro-dépressions d'une mètre de diamètre sur 30 à 50 cm de profondeur, parfois remplis d'eau en saison des pluies" selon l'ONF. La canopée (parinari et tachigalie) y est très ouverte et elle se repère donc en photo-interprétation. Cependant, on peut se demander quelle est l'influence de la saison dans la signature spectrale de ce type de végétation. On observe que leur signature spectrale dans la bande verte est très élevée en fin d'année (251 en moyenne), pour un minimum de 185 en fin de saison des pluies (juin). Dans le moyen infrarouge le maximum est de 116 pour juin contre 129 vers la fin de l'année.

Par rapport à la forêt, le parinari en décembre a une réflectance dans les verts plus faibles de 62, en fin de saison des pluies plus faible de 44.

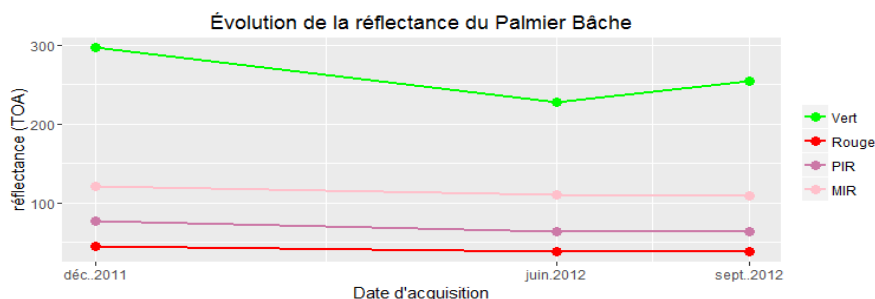
ANNEXES

**La végétation basse**



La végétation basse a une réflectance assez constante de juin à décembre dans le rouge et le proche infrarouge, mais une réflectance en baisse dans le vert et le moyen-infrarouge vers septembre, vers le début de la saison sèche.

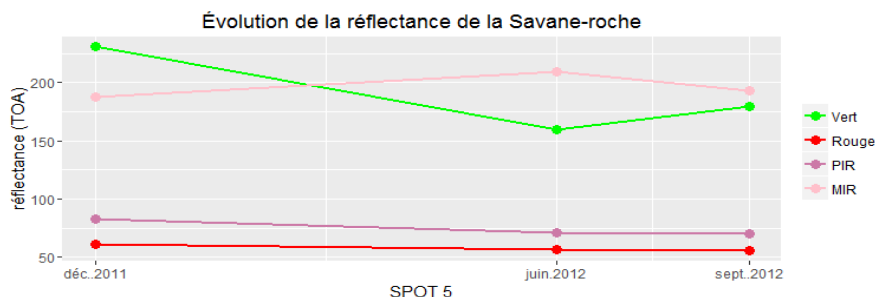
**Le palmier bêche**



Le palmier bêche est assez constant dans le rouge et les infrarouge à la différence du vert qui fluctue selon la saison avec un minimum de 228 en moyenne en juin, pour un maximum de 297 en moyenne en décembre. Dans le moyen infrarouge le maximum est de 109 pour juin contre 121 vers la fin de l'année.

Par rapport à la forêt, le palmier bêche en décembre a une réflectance dans les verts plus faible de 16, en fin de saison des pluies plus faible 1 donc très proche. La différence est donc beaucoup plus marquée en début de saison des pluies.

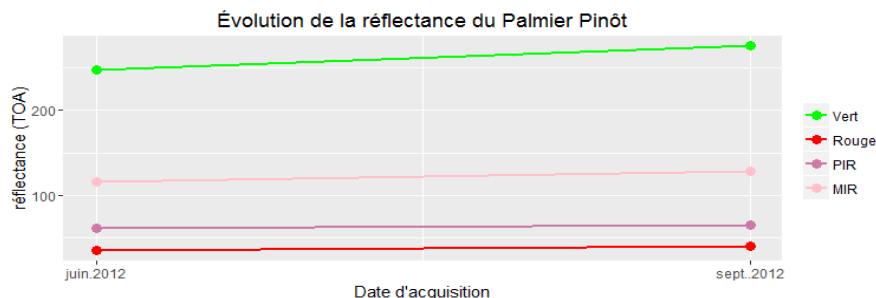
**La savane-roche**



Le savane-roche est cartographiée en ne sélectionnant que les dalles rocheuses, leur séparabilité spectrale est donc aisée. C'est la seule classe à cartographier qui a une plus forte réflectance du moyen infrarouge que dans le vert (49 de différence en juin 2012).

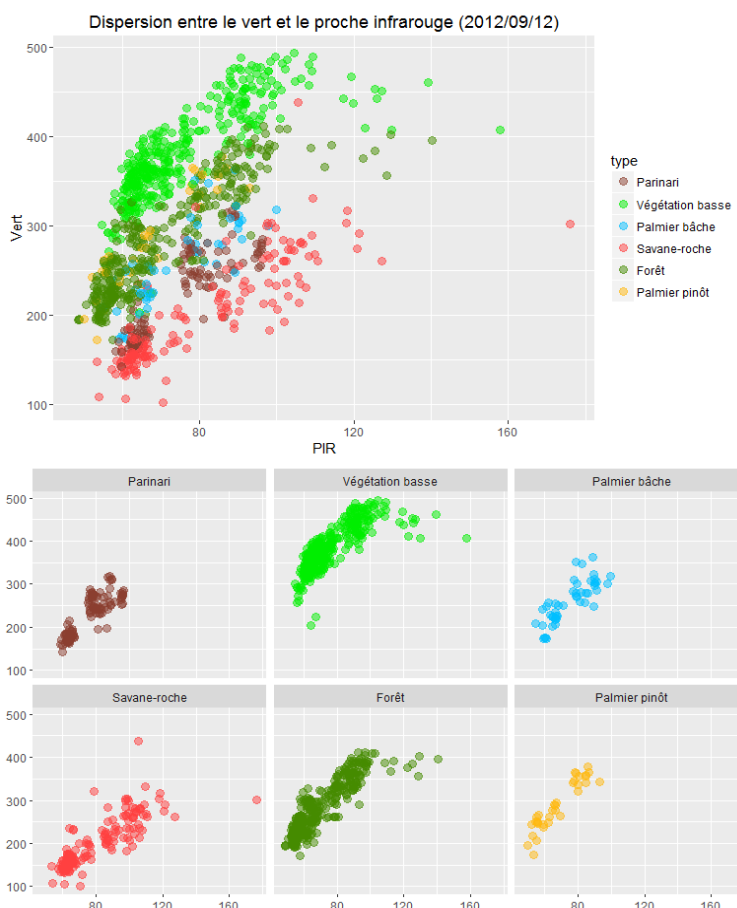
ANNEXES

**Le palmier pinôt**



Le palmier pinot est peu présent sur cette zone, il n'y a donc que deux dates pour suivre son évolution. On note toutefois un verdissement en saison sèche (+69 d'intensité) ainsi qu'une augmentation des infrarouges par rapport à juin (+12 d'intensité en MIR et +14 en PIR) en moyenne en juin, pour un maximum de 297 en moyenne en décembre. Dans le moyen infrarouge le maximum est de 109 pour juin contre 121 vers la fin de l'année.

L'analyse spectrale des images montre que les canaux vert et moyen infrarouge sont primordiaux pour effectuer une bonne classification des types de végétations. Pour le palmier pinot on observe une augmentation du moyen infrarouge en juin et septembre, pour la savane roche une différence très forte entre le moyen infrarouge et le vert en juin. Selon les végétations il convient donc de privilégier certaines dates, ou de créer des images multitemporelles afin de les cartographier au mieux.



En ne gardant que la moyenne de la réflectance des végétations sur une seule date, les végétations deviennent spectralement plus distinctes. Il convient donc de ne pas mélanger les dates entre elles car elles diminuent séparabilité des essences.

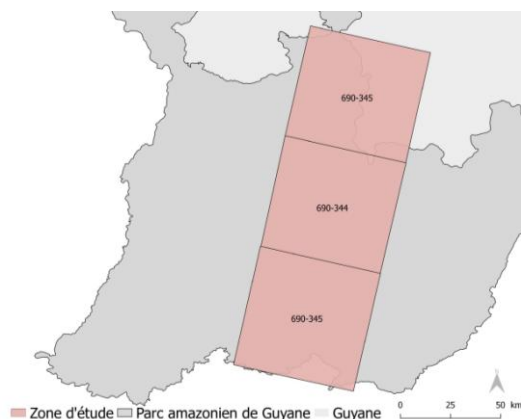
Cependant ces végétations se trouvent sur plusieurs zones géographiques distinctes. Il convient de regarder l'influence de leur localisation sur leur réflectance.



### L'effet biogéographique des végétations

Une des spécificités de la zone d'étude est son étendue et son nombre important de scènes SPOT5 afin de couvrir le territoire. Il existe en effet des disparités qu'on appelle l'effet biogéographique, c'est-à-dire que le même type de végétation n'aura pas la même réflectance spectrale selon sa localisation.

Afin de comparer les végétations, la date du 12/09/2012 a été sélectionnée car elle avait le plus grand nombre de scènes disponibles (3).



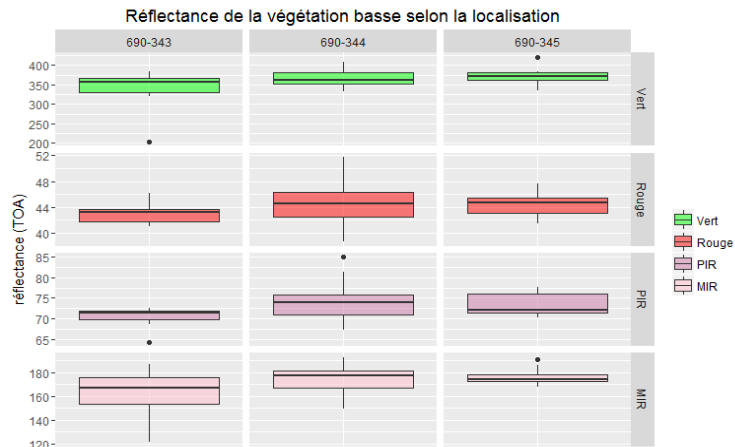
### Le parinari



Pour les parinaris, la moyenne dans le vert est de 206 pour la scène 690-343 contre 179 pour la scène 690-344. Cependant le faible nombre de données aux mêmes dates peut fausser ces résultats. Seulement 12 parcelles sont disponibles pour la zone 690-343 et 40 pour la zone 690-344.

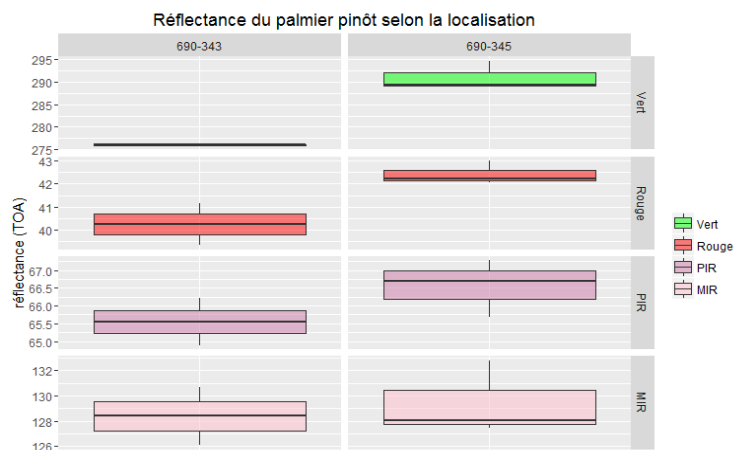
ANNEXES

**La végétation basse**



Pour la végétation basse, la moyenne dans le vert est de 334 pour la scène 690-343 contre 372 pour la scène 690-345. Il semble donc y avoir un verdissement dans les scènes les plus au sud, ce qui pourrait s'expliquer par exemple par une avance dans la saison sèche.

**Le palmier pinot**



Le palmier pinot a la réflectance spectrale de l'ensemble de ses bandes qui augmente plus il est vers le sud La zone plus au nord (690-343) n'a que 8 parcelles d'entraînement et 12 pour la scène 690-345.

**Conclusion de l'analyse**

L'analyse repose sur l'analyse des végétations particulières de l'ensemble du Parc amazonien de Guyane avec SPOT5. Ce travail a permis de mettre en avant l'importance de la bande du proche et du moyen infrarouge. L'utilisation de ces bandes est indispensable à la bonne séparabilité des essences étudiées. Cependant, le palmier bêche, le palmier pinot et les parinaris étant relativement proches, il peut être intéressant d'utiliser des images multitemporelles (une image contenant plusieurs bandes pour chaque date), ce qui devrait permettre d'améliorer la séparabilité spectrale des végétations étudiées. Pour ce qui est de l'effet biogéographique, le nombre limité d'images permet de conclure à un certain verdissement de la canopée vers le sud pour les parinaris, et au contraire à un verdissement vers le nord pour les végétations basses et les palmiers pinot. Ces premiers résultats restent à nuancer compte tenu du nombre limité de données.

Annexe 4

## Comparatif des images à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) pour la détection des végétations particulières du Parc amazonien de Guyane

Nicolas Karasiak

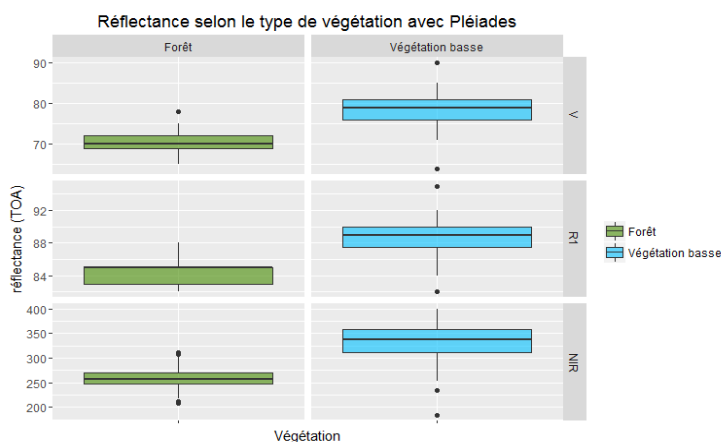
### Zone d'étude



La zone d'étude d'environ 50 000km<sup>2</sup> se situe au nord-ouest du Parc amazonien de Guyane. Cette zone abrite plusieurs types de végétations particulières comme les palmiers bâches, palmiers pinots, les parinaris ou des végétations basses comme les bambous épineux ou héliconias.

### Analyse des images Pléiades

Les statistiques pour Pléiades ont été calculées en utilisant une image du 30 novembre 2014 avec 245 parcelles d'entraînement. Compte tenu de la nébulosité importante, seules deux types de végétations y sont comparés : la forêt (134) et la végétation basse (107).



La non présence des végétations particulières (hormis la végétation basse) ne permet pas de tirer des conclusions quant à l'utilité de Pléiades mais sa très haute résolution spatiale (THRS) et son manque de données dans les infrarouge ne semble pas convenir à la télédétection des essences particulières de la forêt amazonienne, en tout cas en utilisant une méthode classique. L'utilisation d'images multitemporelles ou alors d'indices de texture comme SFS ou Haralick permettrait

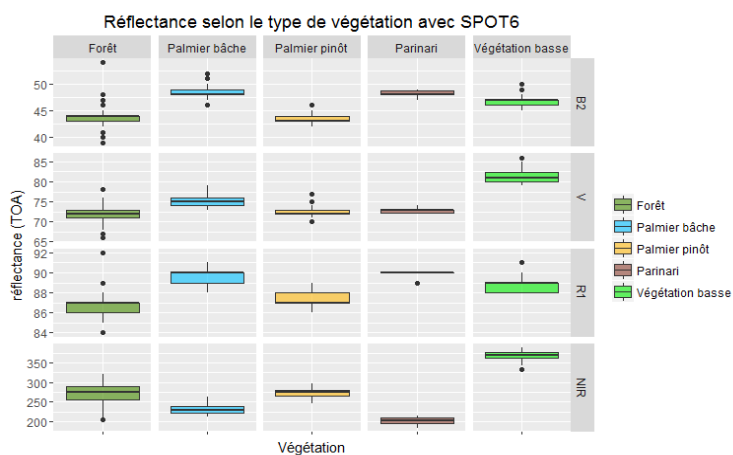
ANNEXES

d'exploiter la THRS mais des travaux sont nécessaires pour approfondir cette méthodologie.

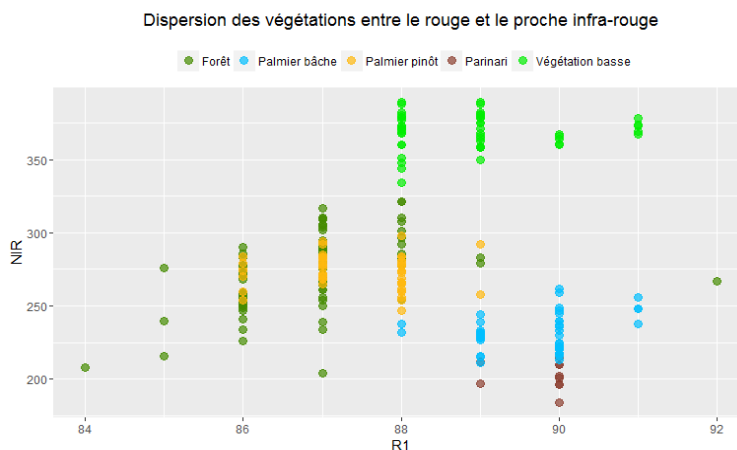
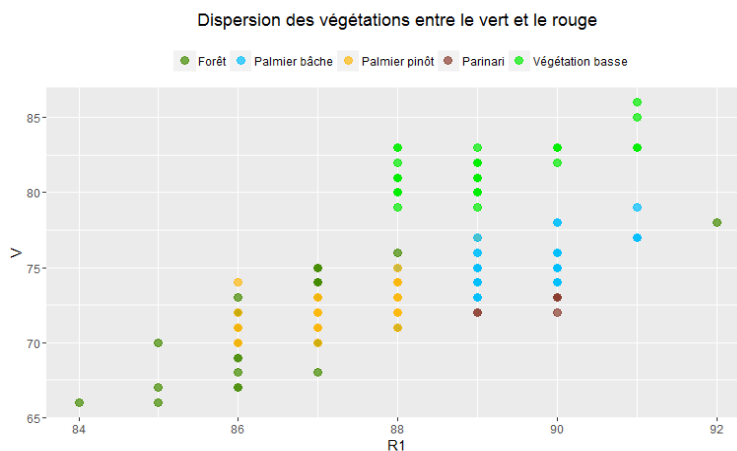
**Analyse des images SPOT6**

Les précédents travaux de cartographie des végétations particulières du Parc amazonien de Guyane ont été réalisé avec SPOT5 qui n'était pas doté d'une bande bleue mais capturerait le moyen infrarouge (absent dans la nouvelle génération).

Les statistiques pour SPOT6 ont été calculées en utilisant une image du 12 septembre 2015 et à partir de 251 parcelles d'entraînement, dont 98 de forêt, 45 de palmier bêche, 50 de palmier pinôt, 10 de parinari et 48 de végétation basse.



L'amplitude spectrale est la plus importante dans le proche infrarouge (NIR) et permet de mieux séparer les végétations (notamment le palmier bêche et le parinari) alors que dans le visible la réflectance des végétations est très proche. On observe tout de même que la bande verte est très efficace pour la végétation basse et le rouge pour le palmier bêche.



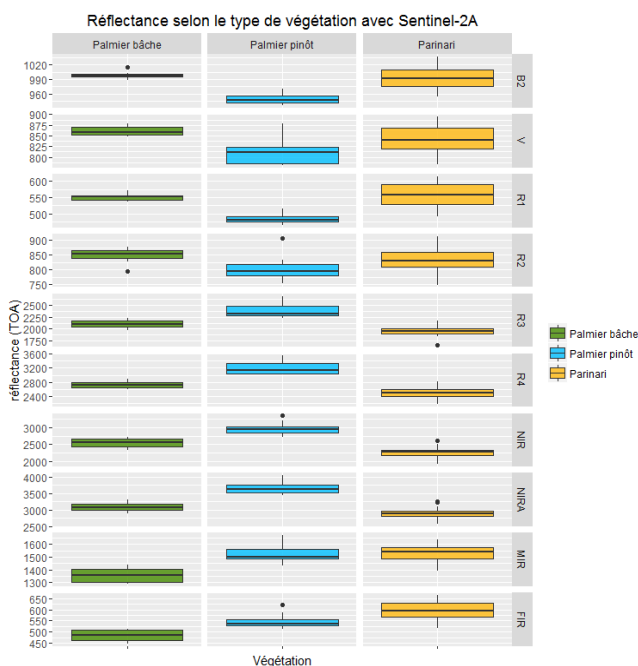
ANNEXES

La comparaison des parcelles d'entrainement entre deux bandes spectrales nous montre la limite du satellite SPOT6 : l'amplitude très limitée dans les bandes visibles. Ainsi, les échantillons sont très proches spectralement et le taux de confusion risque d'être important. Par exemple dans le rouge les valeurs des végétations sélectionnées s'échelonnent seulement de 84 à 92 et des confusions ont lieu avec les palmiers ou les parinaris. En revanche dans l'infra-rouge l'amplitude est plus importante et permet de mieux séparer les essences.

**Analyse des images Sentinel-2**

Sentinel-2 offre une grande étendue de bandes spectrales. Du bleu (433 - 453 nm) utilisé pour la détection des aérosols à l'infrarouge lointain (2100 - 2280nm), les 13 bandes doivent permettre de mieux séparer spectralement les différentes essences forestières.

Les statistiques pour Sentinel-2 ont été calculées en utilisant une image du 8 juin 2016 et à partir 315 parcelles d'entrainement, dont 159 de forêt, 10 de palmier bêche, 8 de palmier pinot, 31 de parinari et 107 de végétation basse.



Le faible nombre de parcelles d'entrainement ne permet pas d'observer de manière optimale les différences pour tous les types de végétation dans ce graphique. Pour cela, un graphique regroupant les palmiers et le parinari bande par bande

**Amplitude selon les bandes**

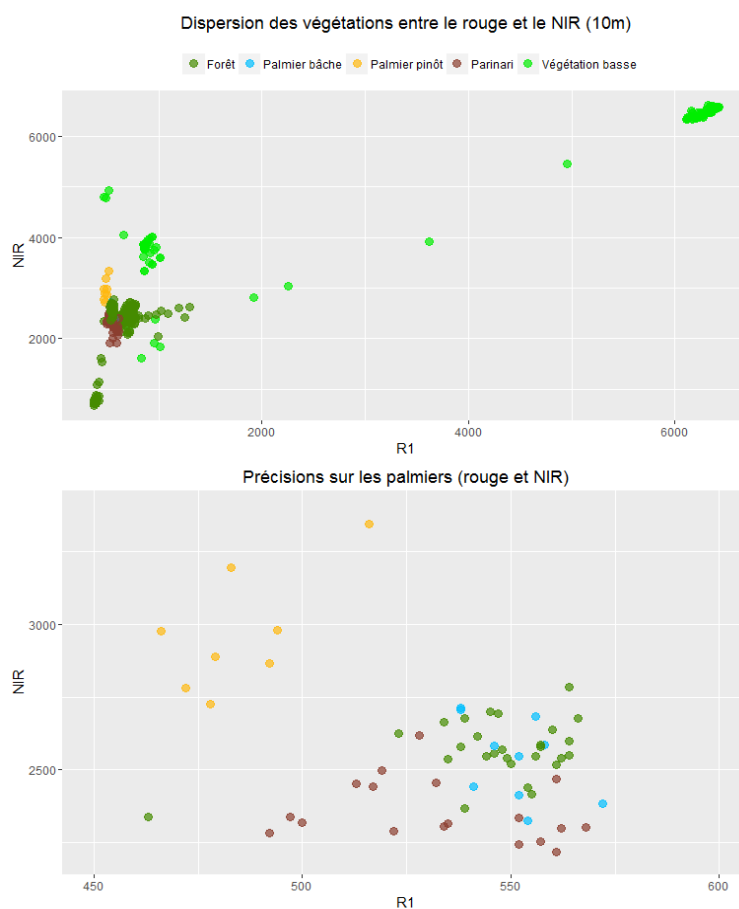
Afin de comparer les classes entre elles, il a été représenté la dispersion des végétations pour une combinaison de bandes spectrales. Cela permet de visualiser l'indépendance des végétations identifiées et ainsi de voir si elles sont spectralement différenciables.

ANNEXES



En comparant les essences dans le rouge et dans l'infra-rouge lointain, on observe une très bonne séparabilité spectrale des essences. Il n'y a aucune confusion entre les palmiers pinots, palmiers bâches, ou encore les parinaris. Ce type de végétation a tendance à être semblable dans le visible et à avoir des taux de confusions assez importants du fait de leur ressemblance spectrale dans les bandes bleu, vert et rouge.

ANNEXES



Afin de garder le maximum de la résolution de Sentinel-2, les bandes bleue et proche infra-rouge qui ont une résolution de 10m ont été comparées. On note que le palmier bêche se distingue légèrement moins bien, avec un risque de confusion avec la forêt ou le parinari. Cependant, la résolution sera supérieure et il peut être intéressant de ne garder que les bandes à 10m de résolution spatiale pour les travaux nécessitant ce type de précision.

Les végétations qui sont très proches dans le visible comme le palmier pinôt ou le palmier bêche se différencient particulièrement bien dans l'infra-rouge, d'autant on s'éloigne du spectre du visible (proche (855-875nm), moyen (1565-1655nm) et lointain (2100-2280nm)).

### Conclusion

Ce rapport met en évidence l'importance des bandes infrarouges pour la télédétection des formations végétales particulières de Guyane. La très haute résolution spatiale ne corrige pas le manque de bandes spectrales, en particulier le manque de bandes infrarouges.

Pour des analyses plus approfondies, il aurait été nécessaire d'avoir une plus grande couverture du capteur Pléiades, qui est très similaire à SPOT6/7, mais avec une résolution spatiale de 2,8m contre 6m pour ce dernier.

L'apport des données Sentinel-2 a permis de mettre en évidence que l'infrarouge, en particulier le moyen infrarouge et l'infrarouge lointain étaient primordiaux pour bien différencier spectralement les végétations particulières comme le palmier pinôt ou le palmier bêche, deux essences qui se confondent spectralement dans le visible avec la forêt.