



CARTOGRAPHIE DES PEUPLEMENTS MONO- SPECIFIQUES DE GILBERTODIENDRON (*G. dewevrei*) EN AFRIQUE CENTRALE PAR TELEDETECTION

RAPPORT DE STAGE

Léa CHARPENTIER-Université Rennes 2
MASTER 1 Géographie et Aménagement du territoire,
parcours IMAGE

Sous la responsabilité de

Valéry GOND- Chercheur en géographie au Cirad

Sylvie GOURLET-FLEURY- Chercheur en écologie au Cirad

Charles DOUMENGE- Chercheur en botanique et
biogéographie

Johan OSZWALD-Enseignant chercheur en géographie à
Rennes 2

Cirad (*Campus de Baillarguet*) | MONTPELLIER | 2016

Remerciements

Je tiens à remercier vivement mon maître de stage Valéry Gond pour sa bonne humeur, sa patience, sa disponibilité et sa zénitude ! Nos discussions ont été très enrichissantes et d'une grande aide que ce soit pour découvrir les potentialités de la télédétection, comme pour dépasser les difficultés de la recherche.

Je remercie également Guillaume Cornu pour son aide et ses explications en termes de programmation, ainsi que Nicolas Fauvet en ce qui concerne le monde de la géomatique.

Je souhaite également remercier Sylvie Gourlet-Fleury et Charles Doumenge, pour leurs conseils thématiques sur le sujet.

Je remercie grandement toute l'équipe de stagiaires, consultants, et doctorants qui furent des compagnons de travail mais aussi de sorties particulièrement sympathiques !!

Je tiens à remercier mon tuteur professionnel Johan Oswald qui m'a permis de réaliser ce stage au sein du CIRAD.

Merci aux membres de ma famille pour leur soutien et écoute.

Et enfin merci à Agathe Adam et Lény Alverhne dont les rapports de stage furent des supports méthodologiques essentiels.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	4
DONNEES ET METHODES.....	5
Le Gilbertiodendron Dewevrei.....	5
Les images LANDSAT 8	8
Le téléchargement des images.....	8
Bandes spectrales utilisées	11
Méthode.....	12
Tri préliminaire des images selon la nébulosité	12
Tri post téléchargement.....	13
Tests initiaux	15
Méthode finale.....	21
RESULTATS & DISCUSSION.....	27
PERSPECTIVES.....	29
BIBLIOGRAPHIE	30
LISTE DES ILLUSTRATIONS	32
LISTE DES TABLEAUX	32
ANNEXE	33

INTRODUCTION

Si les forêts tropicales ont depuis longtemps suscité l'intérêt des romanciers, explorateurs et scientifiques, elles ont été plus récemment mises au centre des débats environnementaux internationaux [GIEC, IPPC, 2016]. En effet, elles apparaissent comme un enjeu de premier ordre de par leur rôle essentiel dans l'équilibre climatique, la préservation de la biodiversité, ainsi que dans la vie de nombreux peuples autochtones [Mille et al., 2015].

Les forêts tropicales humides d'Afrique centrale constituent le deuxième plus grand massif mondial et s'étendent sur près de 2 millions de km² [Verhegghen *et al.*, 2012]. Ces forêts sont un des écosystèmes terrestres les plus diversifiés de la planète [Hart *et al.*, 1989]. Pour illustrer cette richesse, certains chercheurs ont comparé leur potentiel écosystémique aux forêts des latitudes tempérées. A surface égale les forêts tropicales humides comptent entre 5 à 10 fois plus d'espèces de plantes vasculaires que les forêts tempérées. On y dénombre plus de 200 espèces d'arbre par hectare (une quinzaine en forêts tempérées) avec une densité de peuplement de 600 à 700 individus (diamètre supérieur à 10 cm à 1,3m du sol). Pour une surface équivalente à la superficie de la région Ile de France (10 000km²), on recense en forêts tropicales humides entre 250 et 600 espèces d'oiseaux (10 à 300 en forêts tempérées), 75 à 220 espèces de mammifères (10 à 90 en forêts tempérées). La spécificité des forêts tropicales humides d'Afrique centrale à l'échelle mondiale est marquée par la présence de nombreuses espèces endémiques [Doumenge, 2015].

Bien que l'on connaisse la richesse des milieux forestiers tropicaux humides d'Afrique centrale, leur fonctionnement écologiques et leur organisation géographique demeurent encore largement méconnus. Plusieurs facteurs limitent les investigations scientifiques : l'étendue des forêts tropicales humides, la difficulté d'accès aux terrains d'étude, et les conditions géopolitiques complexes. De ce fait, les connaissances géographiques des forêts tropicales humides restent encore très localisées et peu développées à l'échelle de l'Afrique centrale [Betbeder *et al.*, 2014]. Pour pallier à ces inconvénients la télédétection apparaît de plus en plus comme un outil d'investigation indispensable mais reste encore incomplet dans l'identification des peuplements forestiers (Gond et al., 2013). Dans ce contexte l'analyse d'espèces forestières agrégatives et mono-dominantes est une première étape. D'une part elles représentent un enjeu technique pour être identifiées, localisées et cartographiées. D'autre part elles sont susceptibles d'être exploitées par les compagnies forestières à brève échéance. En effet une espèce particulière comme le *G. dewevrei* risque d'être au cœur d'enjeux économiques de par ses propriétés technologiques et son accessibilité (présence de plaques agrégatives de plusieurs milliers d'individus). Il est probable que cette espèce soit soumise à une forte exploitation dans les années à venir (Sylvie Gurllet-Fleury *communication personnelle*). Il est donc prioritaire de mieux appréhender sa répartition spatiale afin de donner des préconisations d'aménagement et d'exploitation auprès des acteurs de la filière forestière en Afrique centrale.

Notre hypothèse de travail est de savoir s'il est possible par télédétection spatiale de cartographier des peuplements mono-dominants typiques des forêts tropicales humides d'Afrique centrale. Afin de répondre à cette hypothèse nous allons tenter de réaliser une

représentation cartographique des peuplements mono-dominants à *G. dewevrei* à l'échelle de l'Afrique centrale.

Cette étude s'inscrit dans le cadre des projets Dynaffor (Dynamique des Forêts d'Afrique Centrale, <http://www.dynaffor.org/>) et de l'OFAC (Observatoire des Forêts d'Afrique Centrale, <http://observatoire-comifac.net/>). L'étude se base sur un travail préparatoire ayant utilisé des données SPOT, LANDSAT, MODIS et des photographies aériennes pour identifier le *G. dewevrei* au nord de la République du Congo [Alverhne, 2014].

Ce rapport décrit dans un premier chapitre les données utilisées et la démarche méthodologique utilisée, puis expose dans un second chapitre les résultats, suivi dans un troisième chapitre d'une discussion sur les intérêts et les limites de l'étude.

DONNEES ET METHODES

Le Gilbertiodendron Dewevrei

Le *G. dewevrei*, est identifiable sur des images satellites grâce à certaines de ses caractéristiques écologiques [Letouzey, 1985 ; Doumenge, 2012].

On le distingue d'une part grâce à ses traits physiques particuliers :

- notre arbre est **sempervirent**, sa canopée est visible tout au long de l'année, contrairement à un arbre caduc dont les variations dans la feuillaison peut modifier le signal de réflectance capté par satellite selon les saisons de l'année. Ceci nous permet de sélectionner des images seulement en fonction de la présence ou non de nébulosité.

- il est **mono-dominant**. Il pousse de façon grégaire et ses peuplements sont généralement observés sous forme de grandes plaques presque pures¹ qui peuvent couvrir parfois plus de 10 000 ha. Même si sa canopée atteint la même taille que celle de la forêt mixte qui l'entoure, les deux forêts présentent des apparences totalement différentes. *G. dewevrei* est identifiable car **sa canopée est plus sombre** que celle des forêts mixtes environnantes. Sa canopée est homogène, et formée de cimes profondes et étroites, tandis que celles des forêts mixtes environnantes sont plus hétérogènes.

- on peut noter que **la cime** de *G. dewevrei* compte généralement pour plus de la moitié de la taille de l'arbre avec **un diamètre de pas moins de 15 m**, soit une surface visible sur un demi pixel [Hart *et al.*, 1989 ; Gérard, 1960 ; T. Hart, pers. Obs].

- les forêts de *G. dewevrei* possèdent peu de sous bois qui peut venir interférer avec le signal de réflectance. En effet, selon Doumenge, en R.D. du Congo, ces peuplements se composent normalement de 3 strates ; **une strate supérieure arborée continue** formée presque exclusivement de *G. dewevrei*, au milieu de laquelle apparaît par endroits la cime d'une autre

¹ *G. dewevrei* couvre 75–88% de la surface terrière [Doumenge, 2012; Letouzey, 1985]

essence héliophile de grande taille (par ex. *Anthonotha fragrans* (Baker f.) Exell & Hillc., *Dialium corbisieri* Staner, *Irvingia wombolu* Vermeesen, *Prioria oxyphylla* (Harms) Breteler et *Staudtia kamerunensis* Warb.) suivie d'**une strate intermédiaire peu dense** : principalement composée de jeunes *G. dewevrei* mélangés à quelques rares semi-héliophytes (comme *Diogoia zenkeri* (Engl.) Exell & Mendonça, *Garcinia punctata* Oliv. et *Synsepalum subcordatum* De Wild.) et à des arbustes (par ex. *Alchornea floribunda* Müll.Arg. et *Isolona thonneri* (De Wild. & T.Durand) Engl. & Diels), et enfin, **une strate herbacée discontinue** à *Marantaceae* et à *Commelinaceae*.

D'autre part, les connaissances même morcelées de son implantation géographique nous permettent de cibler nos prospections concernant ses peuplements :

-cette **espèce endémique** est présente dans des régions au-dessous de 1000 m d'altitude, dans des zones où la pluviométrie annuelle moyenne est de l'ordre de 1600–1900 mm et où la saison sèche dure 2 mois environ [Doumenge, 2012].

-il pousse principalement dans les dépressions humides, les vallées alluviales, le long des rivières, et également en altitude (plateaux, sommets des collines, interfluves) [Doumenge, Letouzey]. Toutefois les avis d'expert sont partagés là-dessus, pour Letouzey par exemple *G. dewevrei* est présent dans des vallées mais sur sol secs, à l'abri des inondations temporaires ou permanentes et hors de tout terrain marécageux.

- En ce qui concerne sa localisation à une échelle plus large, les forêts dominées par *G. dewevrei* sont principalement situées sur les plateaux entourant le bassin central du fleuve Congo. Elles apparaissent également en petites plaques dans les forêts du centre du bassin lui-même, en Centrafrique, au Cameroun et au Gabon [Lebrun et Gilbert 1954, Letouzey 1970]. En outre, on trouve les peuplements les plus étendus, au nord et nord-est du Bassin du Congo, et en République Démocratique du Congo, où ces forêts sont considérées comme la végétation climacique [Doumenge, 2012].

Tableau 1 -- Intérêt méthodologique des caractéristiques écologiques du *G. dewevrei*

Caractéristiques écologiques	Intérêt méthodologique	Source
Phénologie : Sempervirent	Observable toute l'année, la sélection des images ne dépend que de la nébulosité	Doumenge, 2012 ; Letouzey, 1985
*Monodominant : pousse en plaques de quelques dizaines à 10 000 ha, généralement entouré de forêts mixtes *Canopée large (15 m minimum par arbre) * Feuillage sombre et homogène qui se distingue des cimes de forêts mixtes hétérogènes	Objet identifiable par photo-interprétation, à la résolution des images LANDSAT 8 (pixel=30m), et dont les valeurs de réflectance caractéristiques le rendent potentiellement classifiable grâce à un algorithme	Doumenge, 2012 ; Letouzey, 1985 ; Hart <i>et al.</i> , 1989
Sous-bois peu dense	Peu d'interférences avec les ondes lumineuses notamment infra-rouge (interaction avec le feuillage) qui modifieraient les valeurs de réflectance.	Guyot, Baret, 1988
*Localisation géographique : arbre endémique de l'Afrique centrale. **Petites plaques dans les forêts du centre du bassin du Congo, en Centrafrique, au Cameroun et au Gabon. **Peuplements les plus étendus, au nord et nord-est du Bassin du Congo, et en République Démocratique du Congo	Les images sont sélectionnées dans cette zone pour la prospection.	Léonard, 1953, Rollet, 1963 ; Letouzey, 1985 ; Hart <i>et al.</i> , 1989 ; Viennois, 2000 ; Doumenge, 2012

Les images LANDSAT 8

Le téléchargement des images

Pour réaliser ce travail de prospection nous avons sélectionné des images produites par le capteur LANDSAT 8, grâce au radiomètre OLI (Operational Land Imager). Ces données ont un certain nombre d'avantages, elles sont en accès gratuit sur la plateforme de téléchargement EARTH EXPLORER du **site de l'USGS** (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), tout en ayant une résolution spatiale fine (les pixels représentent une surface de 900m²) [Adam, 2015].

8

LANDSAT 8, est le huitième et le plus récent de sa génération au sein du programme LANDSAT. Ce programme spatial d'observation de la Terre est le premier à être dédié à des fins civiles. Il a été développé par l'agence spatiale américaine civile National Aeronautics and Space Administration (NASA), à l'instigation de l'Institut des études géologiques américain (USGS) et du département de l'agriculture au milieu des années 1960.

Voici ci-dessous les caractéristiques du capteur en question :

Tableau 2 -- Les caractéristiques du capteur OLI (LANDSAT 8)

SATELLITE	DATE DE LANCEMENT	ALTITUDE	BANDES SPECTRALES	INSTRUMENTS	RESOLUTION SPATIALE	RESOLUTION TEMPORELLE
Landsat 8	11 février 2013	705 km	Aérosol : 0,433-0,453 µm Bleu : 0,45-0,515 µm Vert : 0,525-0,6 µm Rouge : 0,63-0,68 µm PIR* : 0,845-0,885 µm MIR* 1 : 1,56-1,66 µm MIR* 2 : 1,36-1,39 µm Cirrus : 2,1-2,3 µm	Radiomètre OLI (Operational Land Imager)	30 m dans le multi-spectrales	16 jours

* PIR : Proche Infrarouge, MIR : Moyen Infrarouge

Source : Adam, 2015

Chaque tuile LANDAST 8 couvre une zone de 180 x 180 km. Ainsi, pour couvrir la zone sur laquelle nous avons prospecté², nous avons dû acquérir 27 tuiles.

² 874 800 km² s'étendant de l'est du Gabon à la part nord-est de la République Démocratique du Congo, nous avons cherché à couvrir la zone délimitée par Charles Doumenge à partir de plusieurs cartes locales (cf Figure 1).

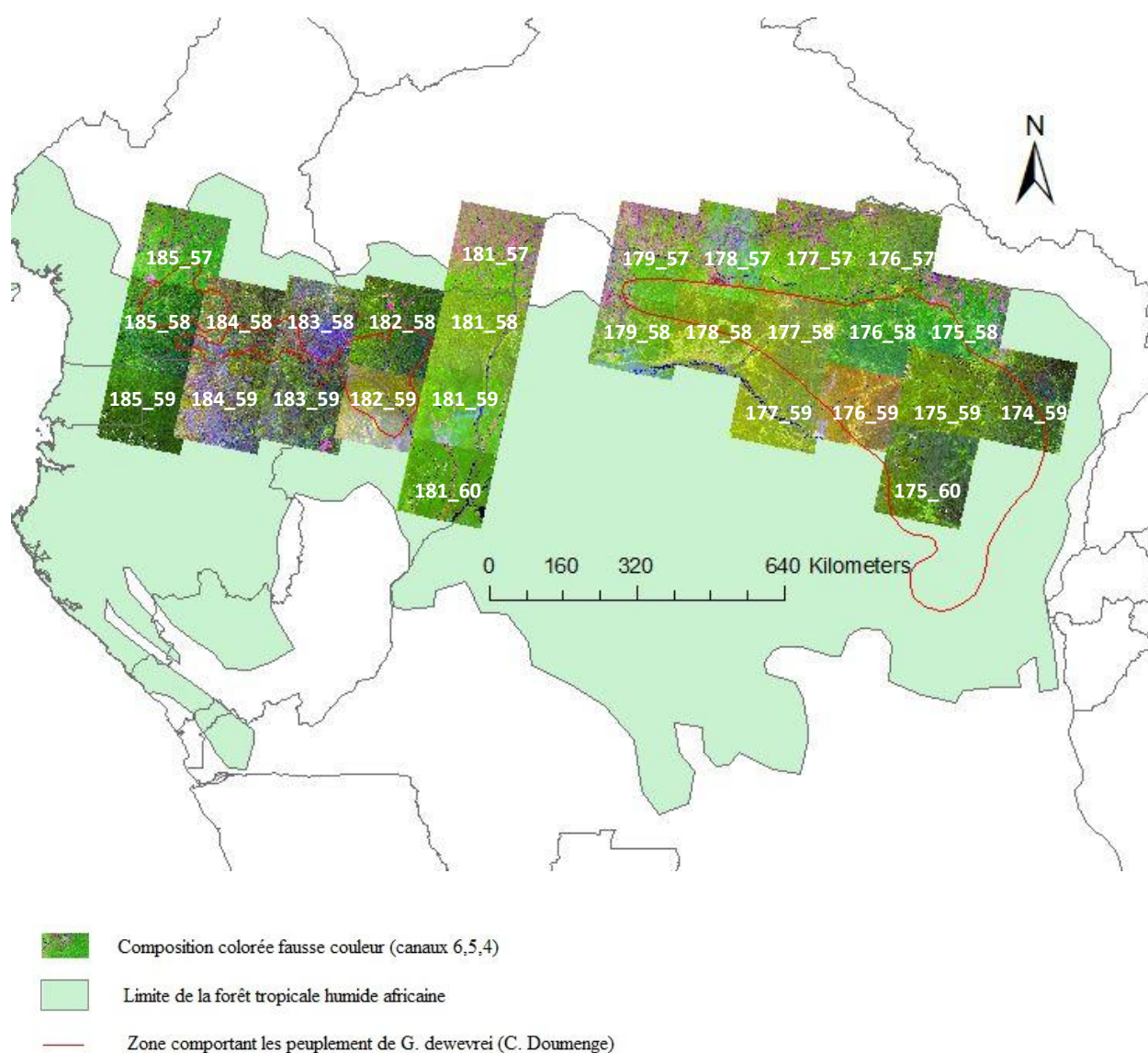
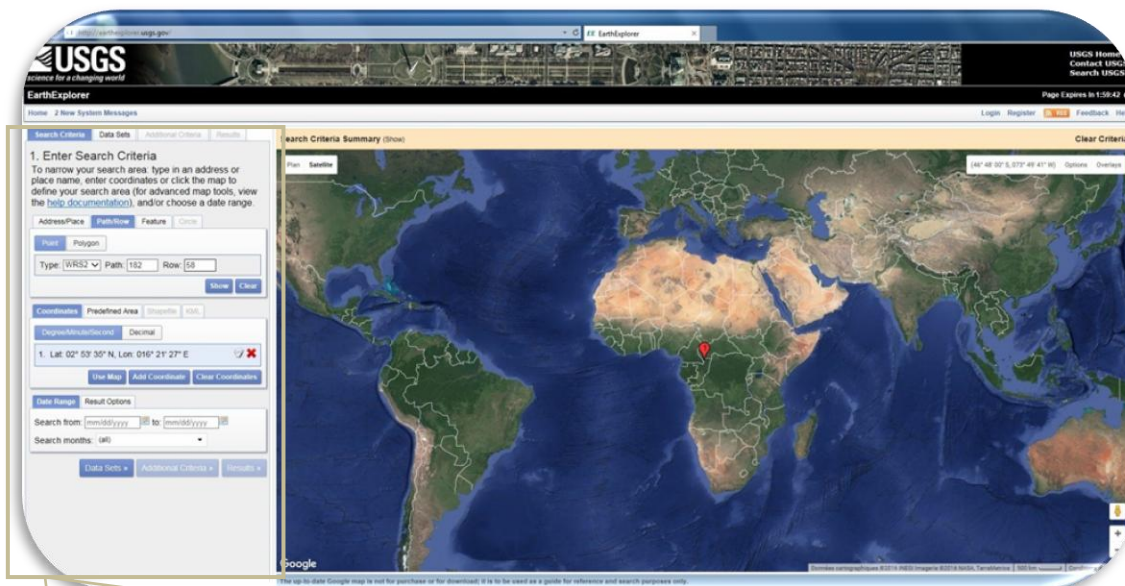


Figure 1 – Ensemble des tuiles LANDSAT8 téléchargées

Cette part du travail est chronophage car le téléchargement via le site de l'USGS se fait en plusieurs étapes ; commande des images scène par scène, validation par l'USGS de la commande, mise à disposition des images grâce à un lien de téléchargement envoyé par mail, et temps de téléchargement final.

Les images que nous avons téléchargées sont déjà prétraitées et les valeurs spectrales correspondent aux valeurs de réflectance au sol. Etant donné le nombre d'images à traiter, il est essentiel de récupérer ces images prétraités (grâce à des modèles élaborés par la NASA) pour deux raisons, les procédés sont automatisés et basés sur le modèle de corrections

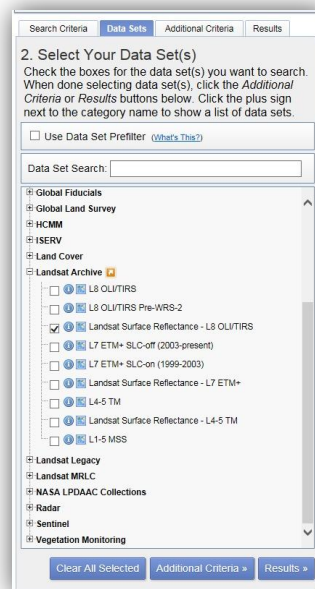
atmosphériques 6S (ce qui évite les erreurs liés à d'éventuels problèmes de calculs), en outre, cette étape de calcul (passage des valeurs de comptes numériques initiaux en réflectance au sol) est relativement longue on économise ainsi un temps précieux.



10

Localisation de la scène

Sélection d'images LANDSAT 8 en réflectance au sol (sr)



Source : <http://earthexplorer.usgs.gov/>, 2016

Figure 2 -- Sélection des tuiles LANDSAT 8 en réflectance au sol (site de l'USGS)

Les informations concernant la localisation géographique de la tuile, la date d'acquisition, l'unité des valeurs de pixels sur l'image (réflectance au sol notamment) ainsi que la bande spectrale concernée sont contenues dans le nom des tuiles. Dans l'image suivante par exemple : LC81820582013353LGN00_sr_band6.tif :

- 182 / 058 correspondent aux coordonnées WRS (respectivement numéro de Path (colonne) et Row (ligne)) du centre de la tuile Landsat dans le système WRS (Worldwide Reference System) développé par la NASA pour référencer les images Landsat collectées. Ces coordonnées dans le WRS correspondent aux coordonnées UTM décimales suivantes : longitude : 16.3576, latitude : 2.8933.³
- 2013/353 correspondent respectivement à l'année et au jour du calendrier julien date à laquelle l'image a été captée.
- « sr » nous assure des valeurs de pixels en réflectance au sol.
- band6 nous renseigne sur la bande spectrale et la longueur d'onde exploitée, ici le moyen infra-rouge (1,57 - 1,65 μm).

Nous avons plus récemment pris connaissance du **site canadien** <https://remotepixel.ca/projects/satellitesearch.html> qui rend l'accès aux images LANDSAT 8 (mais également SENTINEL) plus aisé et intuitif.

Il reste toutefois complémentaire au site de l'USGS car pour le moment il ne donne pas accès aux images dont les valeurs de pixels sont en réflectance au sol, certaines images aux dates les plus anciennes ne sont pas accessibles⁴. De plus les images ne sont pas utilisables directement dans ENVI, il est nécessaire de les calibrer (renseigner les paramètres de numéro de bande, nombre de lignes, colonnes, type de codage...) ce qui rend la manipulation un peu longue lorsqu'elle est réalisée image par image, alors que ceci n'est pas nécessaire pour les images obtenues au format « SR » via le site de l'USGS. Il reste intéressant pour visualiser de manière aisée l'emplacement des tuiles LANDSAT sur le globe.

Bandes spectrales utilisées

Sur l'ensemble des bandes spectrales téléchargées pour chaque tuile nous avons fait usage des suivantes:

Tableau 3 -- Bandes spectrales utilisées

N° de bande	Domaine spectral / type de pollution atmosphérique identifiée	Longueur d'onde
Bande 1	Aérosols	0,43 - 0,45 μm
Bande 2	Bleu	0,45- 0,51 μm
Bande 4	Rouge	0,64 - 0,67 μm
Bande 5	Proche Infra Rouge (PIR)	0,85 - 0,88 μm
Bande 6	Moyen Infra Rouge (MIR)	1,57 - 1,65 μm
Bande 9	Cirrus	1,36 - 1,38 μm

³ http://landsat.usgs.gov/worldwide_reference_system_WRS.php

⁴ Ceci est problématique lorsqu'elles présentent très peu de nébulosité.

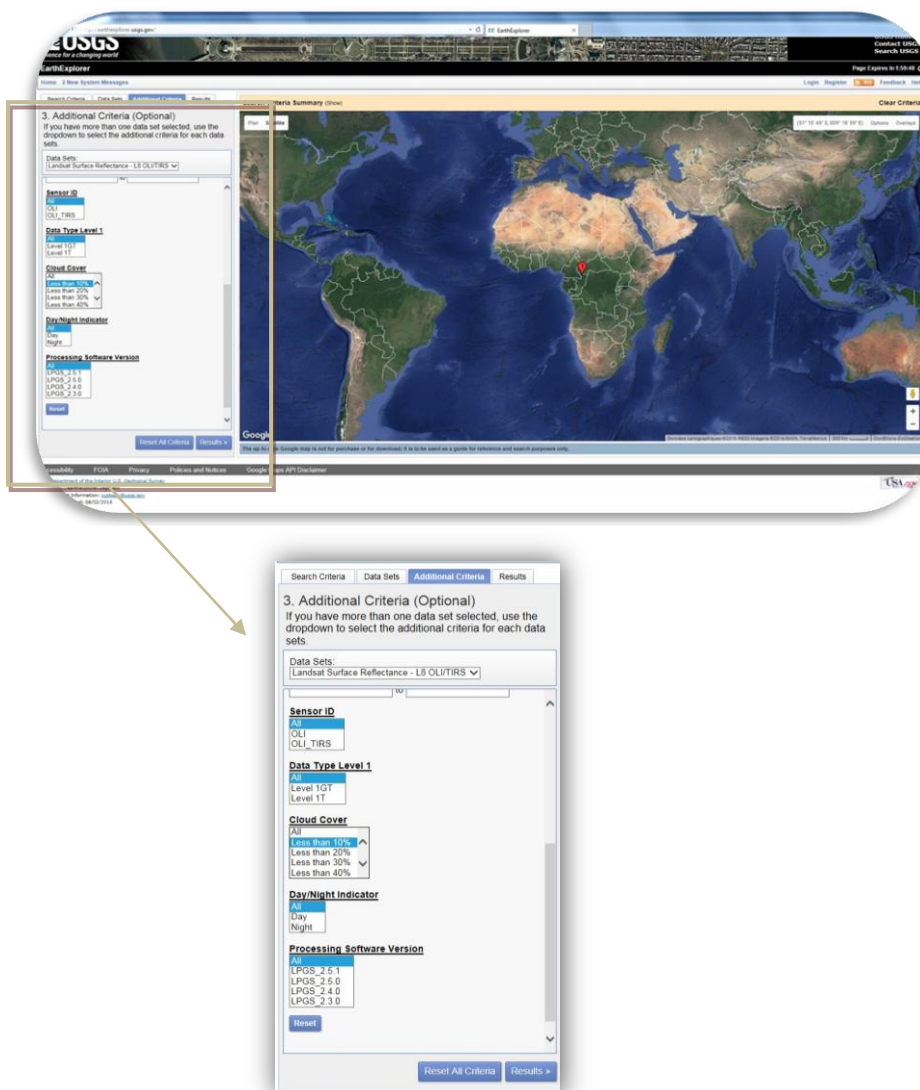
Méthode

Tri préliminaire des images selon la nébulosité

La zone tropicale mais surtout équatoriale, sur laquelle porte notre étude, est connue pour être soumise à une nébulosité importante tout au long de l'année. Cette difficulté doit être prise en compte et limite l'automatisation des traitements. Pour obtenir les images permettant de produire la carte finale, il est nécessaire de réaliser une série de tris successifs des scènes au cours de la méthode que nous avons suivi et obtenir des images dans lesquelles les peuplements de *G. dewevrei* sont susceptibles d'être extraits du mieux possible.

Une premier tri des scènes est effectué, depuis la plateforme de téléchargement de l'USGS. L'onglet « *Add criteria* » permet par exemple de sélectionner les images possédant moins de 10% de nébulosité.

12



Source : <http://earthexplorer.usgs.gov/>, 2016

Figure 3-- Sélection des tuiles avec peu de nébulosité (site USGS)

Tri post téléchargement

Nous avons ensuite réalisé un tri post-téléchargement pour ne garder que les images les moins parasitées par les aérosols et de la vapeur d'eau en visualisant pour les différentes scènes les bandes cloud (canal 9), aérosol (canal 1) et la bande bleue (canal 2).

La bande cloud affichée en palette « Gray Scale » permet de visualiser les pixels contenant de la vapeur d'eau et/ou des aérosols (

Figure 4 -- Visualisation de la nébulosité sur la tuile :

LC8182582013353LGN00_sr_bandcloud.tif, ci-dessous), à partir d'un codage des valeurs de pixel en 2 bit (la valeur du pixel correspond à la valeur 2 exposant de la valeur du code cirrus (soit une valeur comprise entre 0 et 6) (Tableau 4 – Correspondance code cirrus codage en bit ci-dessous).

13

Sous ENVI 4.7 > Available Bands List > Gray Scale > Band1 : LC8182582013353LGN_sr_bandcloud.tif> New Display> Load Band

La bande 1 permet également de voir en quantité la présence d'aérosols en fonction des valeurs de réflectance des pixels. Plus les aérosols sont présents plus les valeurs de réflectance sont fortes plus la couleur du pixel tend du gris vers le blanc (Figure 5 – Visualisation.

Sous ENVI 4.7 > Dans la fenêtre #1 Band1 : LC8182582013353LGN_sr_band1.tif> Tools>Cursor Location/ Value....

Tableau 4 – Correspondance code cirrus codage en bit

Code cirrus	Code en 2 bit
0= cirrus	$2^0=1$
1=cloud	$2^1=2$
2=adjacent to cloud	$2^2=4$
3=cloud shadow	$2^3=8$
4=aerosol	$2^4=16$
5=aerosol	$2^5=32$
6=unused	$2^6=64$

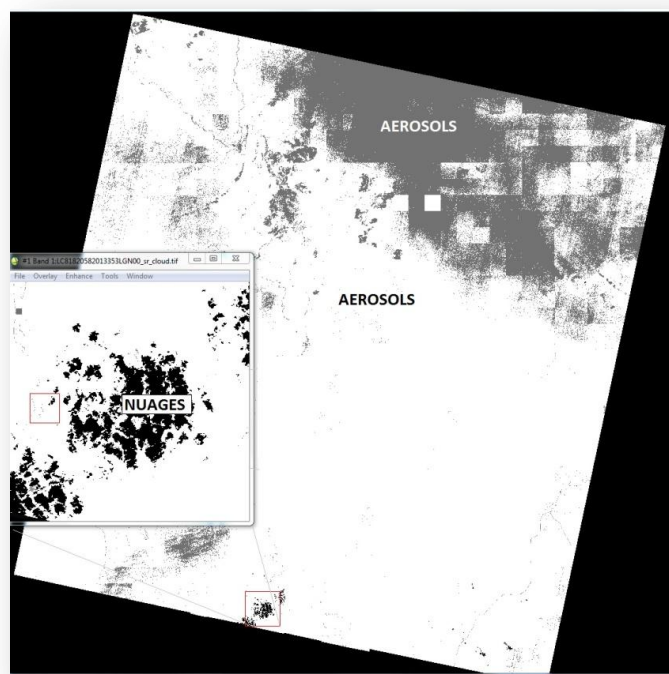


Figure 4 -- Visualisation de la nébulosité sur la tuile :
LC8182582013353LGN00_sr_bandcloud.tif

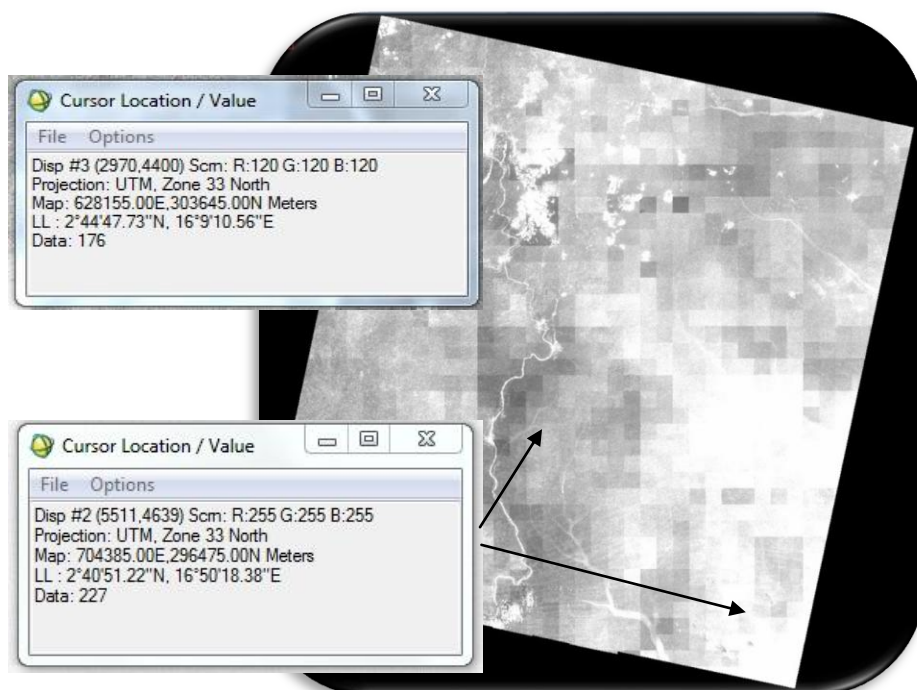


Figure 5 – Visualisation de l'épaisseur d'aérosols sur la tuile :
LC8182582013353LGN00_sr_band1.tif

La méthode la **plus efficace s'avère de comparer le canal du MIR d'une même tuile à différentes dates après qu'il ait été traité selon la méthode de mise en évidence des contrastes internes de l'image (cf partie Méthode finale)** et de ne retenir que le canal MIR à la date où les contrastes internes à l'image sont les plus importants (de sorte que les peuplements de *G. dewevrei* soient bien visibles) et où les nuages apparaissent le moins. En effet **nous avons retenu la bande 6 (MIR) comme indicateur unique de la présence du *G. dewevrei*** [Alverhne, 2014].

Tests initiaux

Photo-interprétation

Avant de parvenir à la méthode finale, nous avons testé plusieurs pistes méthodologiques en nous concentrant sur la zone préalablement étudiée par Alverhne, Heinzh et Roth (tuile LANDSAT 8 *LC8182582013353*). Nous recherchions une procédure qui soit à la fois simple et rapide dans le traitement des images.

Nous avons d'abord cherché à identifier les plaques de *G. dewevrei* par **photo-interprétation** à partir de composition colorée fausse couleur permettant d'analyser la végétation en associant les canaux 6, 5 et 5 (Figure 6 – **Composition colorée alliant les canaux 6, 5 et 4 de la tuile LANDSAT 8: *LC8182582013353LGN00***). Nous nous sommes appuyés pour cela sur le travail effectué par Lény Alverhne⁵, localisation des peuplements de *G. dewevrei* également identifiés par Heinzh et Roth en 2009 (

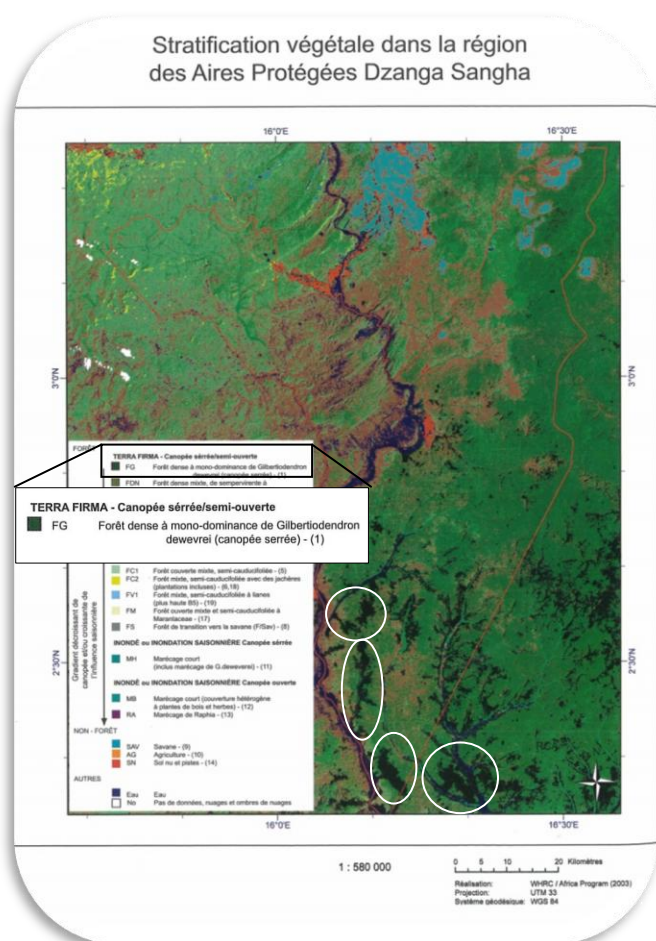
Figure 7 – Cartographie du *G. dewevrei* par Heinzh et Roth, 2009). Nous avons ensuite cherché à établir des critères de teinte, texture-structure (que nous détaillons plus bas dans le tableau) afin de pouvoir élargir notre méthodologie à l'ensemble de la zone d'étude.

Sous ArcGIS 10.2 > ArcToolbox > Data Management Tool > Raster > Raster Processing > Composite Bands

⁵ L'étude réalisée par Lény Alverhne portait alors sur une zone de 180 km² située à la jonction entre l'extrême est du Cameroun, le parc national de Dzangha-Ndoki au sud-ouest de la Centrafrique et le nord de la République du Congo (Figure 8 – **Cartographie des peuplements de *G. dewevrei* par Lény Alverhne en 2014 (à partir d'une image SPOT-5)**).



Figure 6 – Composition colorée alliant les canaux 6, 5 et 4 de la tuile *LANDSAT 8*: *LC8182582013353LGN00*



Repérage des plaques
de *G. dewevrei*
sur la composition colorée 6,5,4,
validé par la carte de Heinz et
Roth (2009) et par celle de Lény
Alvernhe (2014)

Figure 7 – Cartographie du *G. dewevrei* par Heinz et Roth, 2009

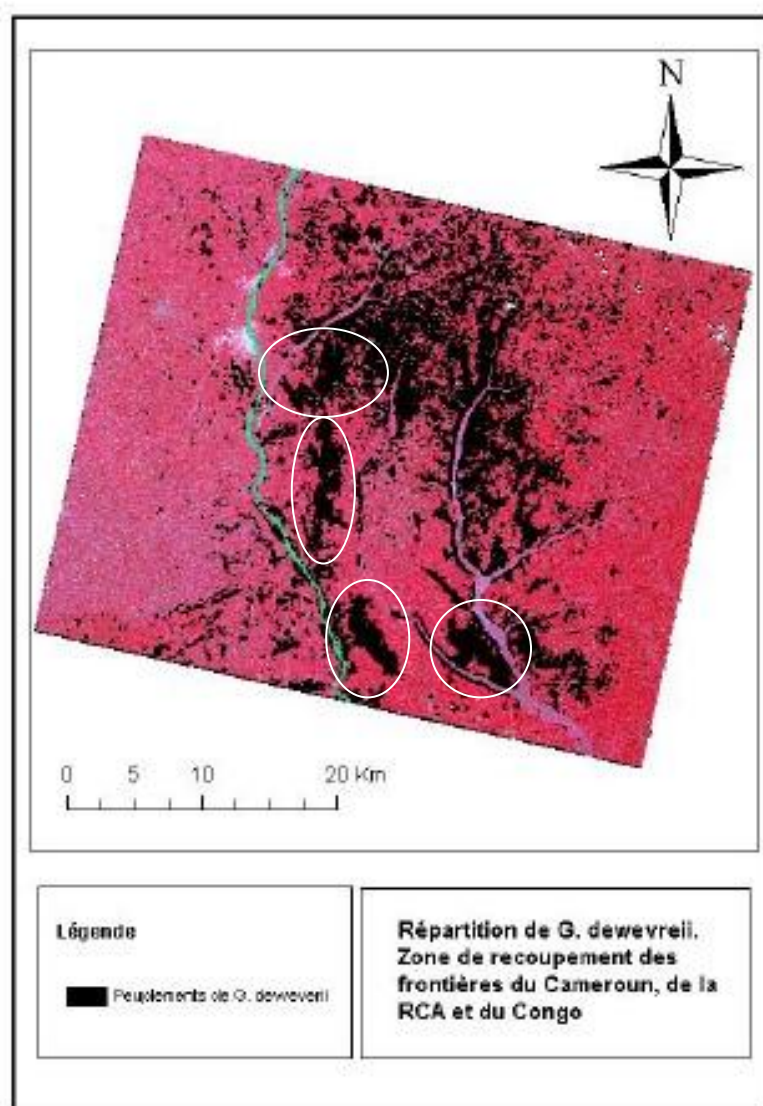


Figure 8 – Cartographie des peuplements de *G. dewevrei* par Lény Alvernhe en 2014 (à partir d'une image SPOT-5)

Nous avons ensuite testé différentes **méthodes de seuillage** visant à extraire la signature spectrale des peuplements de *G. dewevrei*. Le seuillage permet d'éliminer de l'image l'ensemble des pixels dont la valeur de réflectance (ou d'indice) n'est pas comprise entre les bornes retenues.

Seuillage spectral et d'indice

Le seuillage a été effectué à la fois sur les canaux 5 et 6, en excluant le canal 4 qui est trop sensible à la vapeur d'eau.

*Sous ENVI 4.7 > Available Bands List > R: LC8182582013353LGN_sr_band4.tif
G: LC8182582013353LGN_sr_band5.tif
B: LC8182582013353LGN_sr_band6.tif*

*Dans la fenêtre > #1 R: LC8182582013353LGN_sr_band4.tif;
G:LC8182582013353LGN_sr_band5.tif ; B: LC8182582013353LGN_sr_band6.tif > Enhance > Interactive Stretching.*

On place les bornes sur l'histogramme des valeurs de pixels de sorte à ne garder que les objets spatiaux qui nous intéressent sur la bande affichée.

Seuils retenus: Bande 5: [1975-2551], Bande 6: [873-1123]

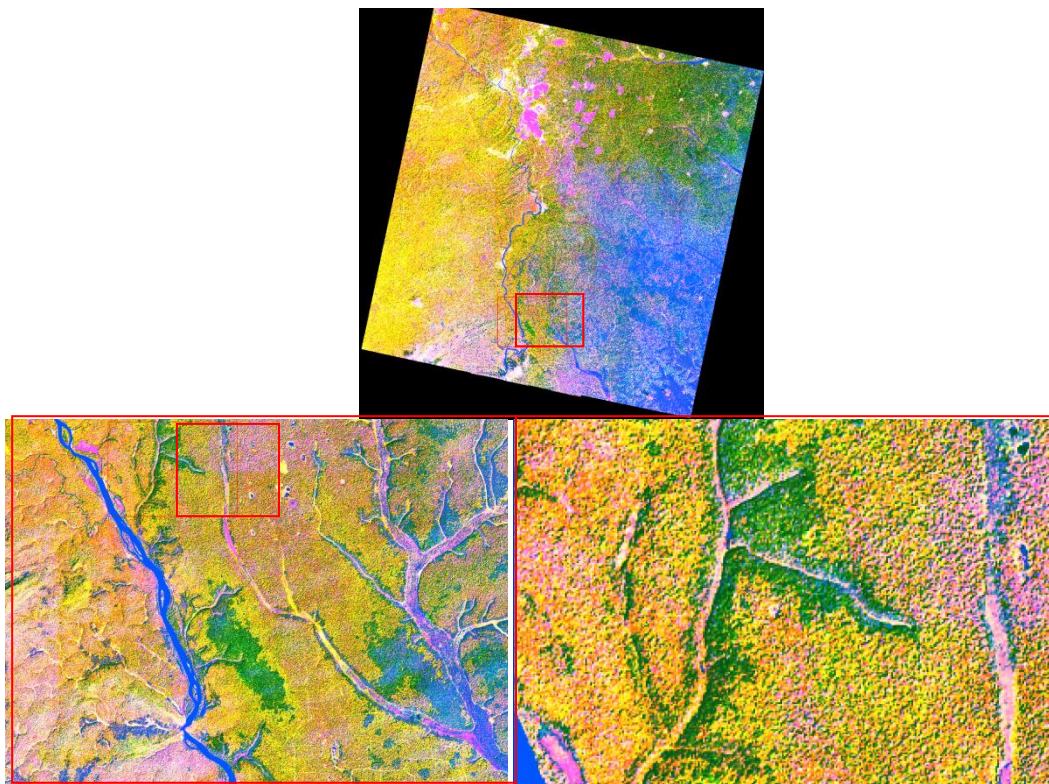


Figure 9- Composition colorée (6,5,4) obtenue suite au seuillage

Seuillage d'indice

Sachant que le *G. dewevrei* est sempervirent et mono-dominant nous avons supposé qu'il pouvait présenter une activité chlorophyllienne différente de celle des forêts mixtes alentours. Nous avons donc essayé de seuiller un indice de NDVI ($\text{PIR} - \text{R} / \text{PIR} + \text{R}$) connu pour mettre en évidence l'activité photosynthétique de la surface observée. Les valeurs négatives de NDVI correspondant aux zones de sols nu et celles positives à de la végétation chlorophyllienne dont l'activité est plus ou moins intense.

Sous ENVI 4.7 > Basic Tools > Band Math >

"(float (b1) – float (b2))/(float (b1) – float (b2))"

avec b1 = LC8182582013353LGN_sr_band4.tif (rouge)

et b2= LC8182582013353LGN_sr_band6.tif (PIR)

Ces différentes méthodes se sont avérées peu concluantes puisque elles dépendent des valeurs spectrales de chaque image. Ainsi, il semble difficile d'automatiser le seuillage puisque les seuils retenus pour une image ne seront pas les même d'une image à l'autre (les valeurs de réflectances pour un même objet peuvent varier de plusieurs unité selon la date de captation de l'image). D'autre part ces bornes ne permettent pas d'extraire parfaitement le *G. dewevrei* et incluent généralement des objets spatiaux différents des peuplements mono-dominants recherchés.

Critères de photo interprétation retenus

Nous avons établi une grille de critères qui nous a servi de référence au cours de cette étude. Comme nous le montrons précédemment dans la partie seuillage spectral et seuillage d'indices, il n'est pas possible d'établir des repères basés sur des valeurs d'indices ou de réflectance qui soient transversaux aux différentes tuiles puisque les valeurs varient d'une captation à l'autre.

Nous basons donc nos critères de photo-interprétation sur des caractéristiques de teinte/texteure/structure (plus modulables) définis à partir de la tuile LC8182582013353LGN00 pouvant s'adapter aux variations des valeurs⁶ de réflectance pour un même objet d'une tuile à l'autre.

⁶ Ces variations peuvent être liées à différents paramètres ; la nébulosité mais aussi à l'angle d'ensoleillement de la scène qui crée un biais sur les valeurs de réflectance des objets observables (un différentiel d'ombrage (est-ouest)).

Tableau 5 – Critères de photo-interprétation retenus pour identifier les plaques denses de *G. dewevrei*

Objet	Plaques denses de <i>G. dewevrei</i> (taux de recouvrement important avoisinant les 80%) d'une superficie d'au moins un ha.
Teinte	Aspect plus foncé et homogène que la végétation alentours considérée comme principalement de la forêt mixte ○ Peuplements de <i>G. dewevrei</i> entouré de forêt mixte de teinte plus claire : Visualisation sur le canal du MIR ; Tuile : LC81820592015007 Composition colorée (6,5,4) ; Tuile : LC81810582015016 Composition colorée (6,5,4) ; Tuile : LC81820592015007
Texture	Les plaques présentent un aspect cotonneux souvent plus rugueux que les milieux alentours.
Struture	Les plaques s'organisent en formes agrégatives qui vont de 11 pixels (1ha) minimum à 3000 pixels (300 ha) pour les plus grosses plaques. Ces agrégats ne sont pas toujours continus et peuvent se présenter sous la forme de petites tâches incluses dans une autre forêt (cf illustration ci-dessus).

Méthode finale

Nous nous sommes arrêtés sur la méthode que nous décrivons à présent, pour produire la cartographie finale. Celle-ci se veut simple, semi-automatisée mais repose toutefois sur une grande part de photo-interprétation. Elle nécessite une longue période de prise en main des images pour comprendre et analyser les différents milieux visibles à la résolution des images LANDSAT 8.

Il faut noter pour cela que les connaissances du milieu forestier tropical africain restent limitées, au regard des données disponibles. Il existe peu de cartes permettant d'identifier de manière précise les différentes composantes paysagères de l'Afrique centrale à une large échelle, celles-ci sont très détaillées mais à une échelle locale concernant des territoires réduits et dispersés au sein du bassin du Congo. Nous avons appuyé notre compréhension des différents types de milieux forestiers présents sur la zone en utilisant la carte « Tropical forests diversity in Central Africa using MODIS data », ainsi que la carte « Central Africa forested wetlands ».

La méthode peut être divisée en 4 étapes ; une première partie basée sur le concept de réhaussement des contrastes locaux au sein des images, une deuxième consistant à réaliser une classification non-supervisée sur les images filtrées, une troisième qui vise à sélectionner la classe contenant les peuplements de *G. dewevrei* [Lény Alverhne, 2014] et enfin une dernière durant laquelle nous avons converti la classe sous format raster en un fichier vecteur et avons réalisé un tri parmi les polygones obtenus sur la base de critères de photo-interprétation (Tableau 5 – Critères de photo-interprétation retenus pour identifier les plaques denses de *G. dewevrei*)

Voici en détail le déroulé de chaque étape.

Première étape : amélioration des contrastes locaux

Cette méthode basée sur le passage de filtres successifs a été élaborée précédemment par Lény Alverhne et s'avère particulièrement efficace. Ce dernier l'a appliquée à un nombre réduit d'images SPOT par le biais du logiciel ENVI, dans notre cas, le traitement d'un nombre important de scènes LANDSAT a nécessité l'automatisation de ces traitements. Cette automatisation a été rendue possible en réalisant un code de commande sous R (cf script 1_annexe), nous donnons ici en italique la procédure manuelle sous ENVI.

1. Un filtre « Low pass » avec une fenêtre de calcul de 45 pixels par 45 pixels, est appliqué à la bande du Moyen Infra-Rouge (MIR) soit la bande 6.

Sous ENVI 4.7 > Filter > Convolution and Morphology > Convolutions> LowPass

Ce filtre est basé sur la moyenne. Il consiste à faire passer sur l'ensemble de l'image une fenêtre de calcul de taille variable. Plus la fenêtre de calcul est grande plus l'image obtenue sera floue et aura des valeurs moyennes représentatives de l'ensemble des contrastes de l'image et non pas des variations locales. Le pixel situé au centre de la fenêtre de calcul obtient la valeur équivalente à la moyenne de l'ensemble des pixels compris dans la fenêtre de calcul. Le choix de la fenêtre de calcul a été un compromis entre la nécessité d'une grande fenêtre et un temps de

calcul plutôt réduit. On obtient ainsi une image qui représente les valeurs moyennes de la bande MIR initiale.

2. On soustrait l'image des valeurs moyennes obtenue précédemment à la bande MIR initiale.

*Sous ENVI 4.7 > Basic Tools > Band Math > "float (b1) – float (b2)"
avec b1 = MIR_initiale et b2= MIR_filter_low_pass_1*

Ceci permet de gommer les valeurs moyennes de la bande MIR et de mettre davantage en évidence les éléments qui se démarquent par leurs valeurs spectrales extrêmes (renforcement des contrastes de l'image et mise en évidence des micro-variations de l'image). En termes statistique on augmente ainsi la variance inter groupe des pixels.

22

3. On applique à nouveau le filtre « Low pass » avec la fenêtre de calcul de 45 pixels par 45 pixels à l'image obtenue via la soustraction.

Les valeurs obtenues sur l'image correspondent aux valeurs moyennes de la bande MIR initiale mais supérieures à celles pris en compte lors du premier passage de filtre.

4. On soustrait à nouveau cette image des valeurs moyennes (plus hautes) obtenue précédemment à la bande MIR initiale.

*Sous ENVI 4.7 > Basic Tools > Band Math > "float (b1) – float (b2)"
avec b1 = MIR_initiale et b2= MIR_filter_low_pass_2*

On élimine ainsi les valeurs centrales (plus hautes) de l'image MIR initiale et on renforce ainsi encore les contrastes (la variance spectrale inter-groupe de pixels augmente).

5. On fait passer un filtre « Median » sur l'image obtenue avec une fenêtre de calcul de 9 pixels par 9.

*Sous ENVI 4.7 > Basic Tools > Band Math > "float (b1) – float (b2)"
avec b1 = MIR_initiale et b2= MIR_filter_low_pass_1*

La taille de la fenêtre de calcul a été choisie de manière à réduire les temps de traitements, car la réalisation d'un filtre de la sorte est chronophage. Ce filtre consiste à attribuer au pixel situé au centre de la fenêtre de calcul la valeur médiane des pixels de la fenêtre de calcul. Cette manipulation permet de lisser les variations spectrales internes aux objets distincts et ainsi de diminuer la variance intra-groupe.

L'ensemble de ces manipulations vise ainsi à faciliter l'étape suivante de classification via l'algorithme de classification dont le principe de base est de maximiser la variance des valeurs de pixels inter-classe et de minimiser celle intra-classe.

Deuxième étape : Réalisation d'une classification de Type K-MEANS

Sachant que *G. dewevrei* est connu pour être absent des milieux en eau permanente, nous avons choisi de masquer les zones de fleuve (eau libre) à partir de la réalisation d'un masque binaire obtenu grâce au seuillage de l'indice DWV (automatisation de la création du masque sous R cf annexe). En effet, l'indice de DWV (NDVI-NDWI⁷) est connu pour avoir des valeurs négatives dans les zones en eau libre [Gond et al., 2004].

Sous ENVI 4.7 > Fenêtre # Image DWV > Tools > Build Mask... > Options > Import Data Range > Data min value : 0 ___ Data max value : 1

Nous appliquons ensuite une classification non-supervisée de type K-MEANS⁸ (retenue car la classification ISODATA donne de moins bon résultats) sur l'image masquée, en demandant 15 classes et 20 itérations. Après plusieurs tests, nous avons pu valider ce nombre de classes et d'itérations qui permettent à la fois d'obtenir une classe de *G. dewevrei* de façon précise tout en évitant des traitements trop longs.

Cette étape n'a pas été automatisée car les temps de traitements sont beaucoup plus important sous R pour réaliser une classification de type K-MEANS que sous ENVI.

Sous ENVI 4.7 > Classification > Unsupervised > K-Means

Les classifications peuvent être réalisées les unes après les autres (en mode « batch ») via l'option « Queue⁹ » proposée avant de lancer la fin de la manipulation. Les classifications seront effectuées les unes après les autres en lançant le batch :

Sous ENVI 4.7 > File > ENVI Queue Manager > File > Select All > Execute selected

Nous avons testé pour certaines images des techniques visant à limiter les problèmes d'hétérogénéité interne qui pouvait fausser la classification et ainsi parvenir à extraire l'ensemble des plaques de mono-dominance qui pouvaient apparaître sur des tuiles hétérogènes:

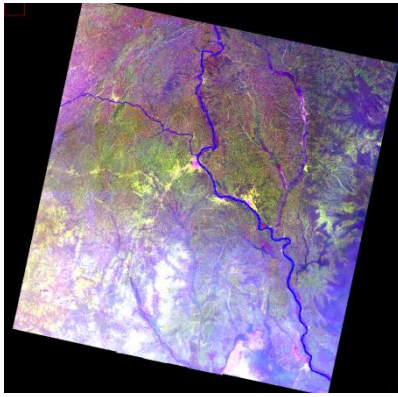
- En effet deux cas de figure se sont présentés de façon générale :

- 1> Les plaques de mono-dominance présentaient des réflectances différentes d'une partie à l'autre de l'image en fonction de la présence de nébulosité ou d'aérosols (partie sud de l'image ci-dessous):

⁷ NDWI= ((R-MIR)/(R+MIR))

⁸ Nous avons exclu dès le début l'utilisation d'une classification supervisée puisqu'elle qui s'avère peu reproductible peut générer de l'erreur (intervention extérieure pour définir les classes de calibration et de validation), et coûteuse en temps.

⁹ Il s'agit alors de prédéfinir l'ensemble des images que l'on veut classer (et les masques associés) en spécifiant le nombre de classes, d'itérations, l'emplacement du fichier de sortie et de finaliser la manipulation par « Queue »



LC81820592015007LGN00_sr_band6.tif

- 2> Les plaques de mono-dominance se confondaient avec des éléments qui n'en étaient pas car ils prenaient des valeurs de réflectance similaires. C'est le cas par exemple des forêts humides de la cuvette du Congo (tuile : LC81810592015016), où les plaques de mono-dominance qui sont potentiellement des peuplements de *G. dewevrei* prennent des valeurs de réflectance proches d'autres types de végétation présente dans la cuvette.

Nous avons essayé pour pallier à cela de découper les images et de lancer une classification sur chaque zone découpée séparément afin d'extraire les plaques de mono-dominance en excluant les éléments confondus de la zone ou en traitant séparément la zone avec pollution atmosphérique et la zone sans. Ce procédé n'a pas donné de bons résultats. Nous avons également testé une classification orientée-objet via le logiciel ENVI-EX qui n'a pas non plus été très concluante.

Les techniques ayant permis d'extraire au mieux les plaques ont été les suivantes :

- 1> Nous avons croisé les résultats de classifications obtenues sur deux dates différentes car d'une date à l'autre la présence d'aérosols n'était pas située au même endroit. Ceci permet ainsi à l'algorithme d'identifier des peuplements à la date T2 non extraits à la date T1.

LC81820592015007LGN00_sr_band6.tif

- 2> Nous avons cherché à masquer la zone (à partir de la carte « Central Africa forested wetlands ») qui présentait des valeurs de réflectance proche des peuplements mono-dominants.

LC81810592015016LGN00_sr_band6.tif.

Troisième étape : Réalisation de la classification supervisée de type K-MEANS

Une fois les classifications obtenues sous forme raster nous les transférons sous ArcGIS pour pouvoir les comparer aux compositions colorées fausse couleur permettant de localiser les peuplements de *G. dewevrei*.

NB : Les fichiers raster ENVI au format .HDR doivent alors être convertis en format .tif pour pouvoir être ouverts sous ArcGIS. Attention lorsque l'on converti un .HDR en .tif, il faut veiller à ne pas enregistrer le .tif directement dans le même dossier que le fichier sans extension et .HDR (comme le propose automatiquement ENVI) car le logiciel écrase de manière automatique le fichier sans extension et le remplace par le .tif. ceci est problématique si l'on veut réaliser d'autres traitements sur la classification par la suite (conversion de la classe raster vers vecteur, filtre post-classification ...) car ENVI ne gère pas le format Tif pour les traitements.

Sous ENVI 4.7 >File>Save file as...> TIFF/Geo TIFF

Nous avons ensuite sélectionné pour chaque image la classe dans laquelle les peuplements mono-dominants sont contenus et avons fait passé un filtre de type érosion-dilatation (clump) de fenêtre (9 x 9 pixels) afin de corriger les effets de pixels isolés et ainsi rendre le processus de vectorisation de la classe plus court. En effet, malgré les prétraitements appliqués aux images satellites, il subsiste toujours du bruit symbolisé par la présence de pixels mal classés. Pour corriger ces effets, l'algorithme clump réalise l'examen des pixels de voisinage (topologie des objets). Il tient compte des classes des pixels voisins pour déterminer la classe du pixel ou du groupe de pixels, à partir de similarités morphologiques.

Sous ENVI 4.7 >Classification > Post Classification> Clump classes > Choisir les classes concernées et la fenêtre retenue.

La classe est ensuite convertie en vecteur.

Sous ENVI 4.7 >Classification > Post Classification> Classification to Vector > Choisir la classe retenue

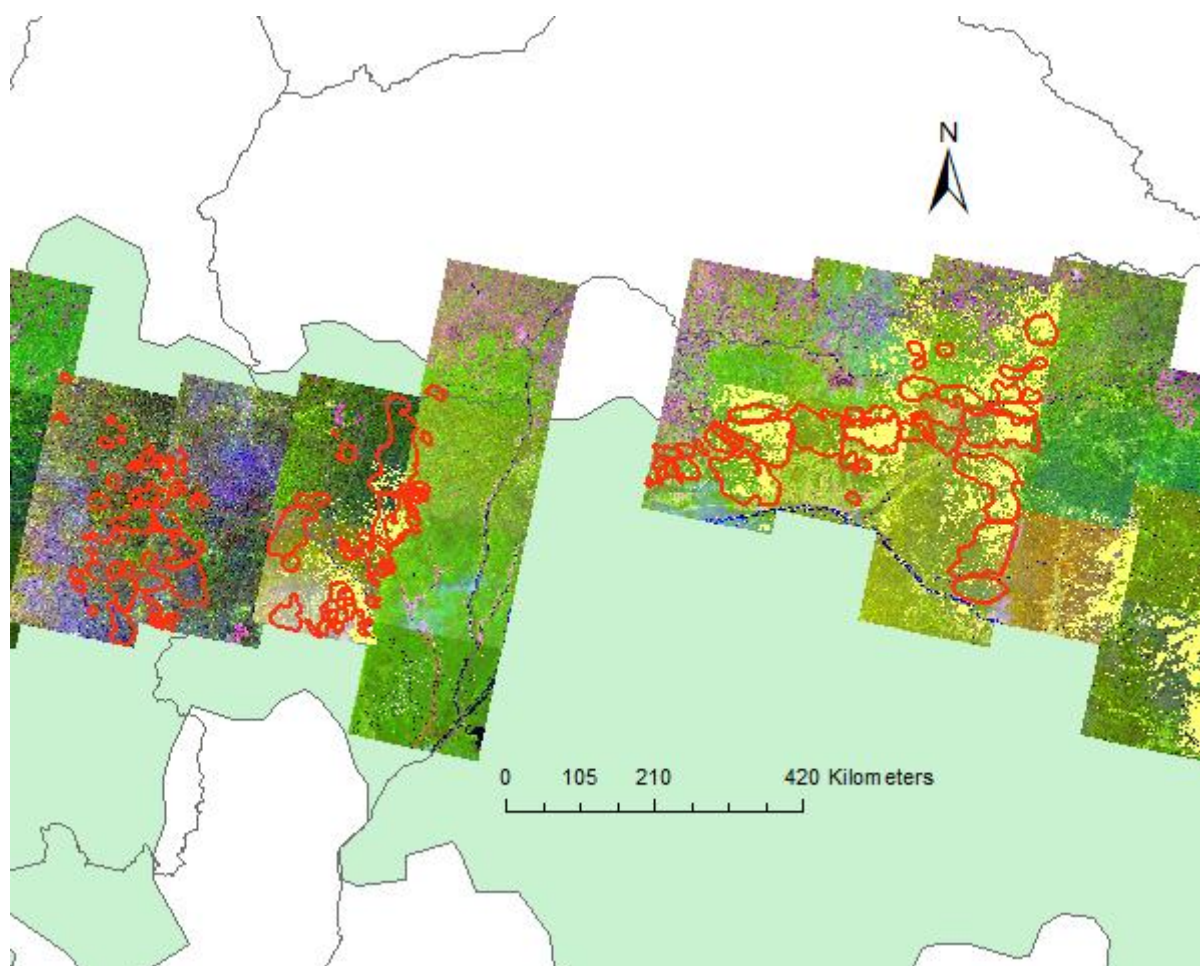
Ce traitement a été réalisé pour l'ensemble

Quatrième étape : Sélection parmi les couches vecteur obtenues

Les différentes couches de vecteur obtenues¹⁰ sont ensuite à nouveau nettoyées pour réduire tant que possible l'erreur de classification. Pour limiter le risque d'erreur, nous n'avons choisi de conserver que les peuplements supérieurs à 1 hectare via une requête attributaire sous ArcGIS. Ce nettoyage final s'est appuyé essentiellement sur de la photo interprétation (cf figure ci-dessous¹¹), et sur la comparaison avec les placettes de relevés terrains en notre possession.

¹⁰ Mosaïc 1, annexe.

¹¹ Zones ou des peuplements de *G. Dewevrei* ont été repérés, annexe. La digitalisation plus ou moins précise de ces zones (dans Arcgis 10.2: Drawing > Polygon) peut permettre en convertissant le dessin, en couche shape (Convert Graphics to Feature...) de découper la classe si celle-ci inclus des éléments plus large que le peuplement en lui-même (Toolbox>Analysis Tool>Extract>Clip).



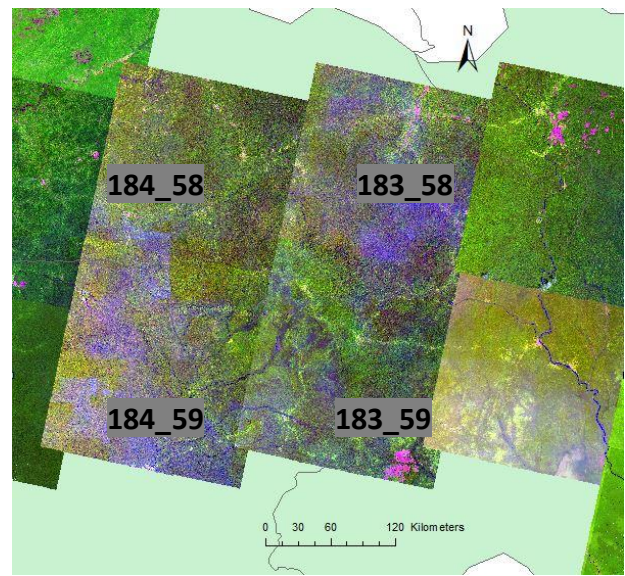
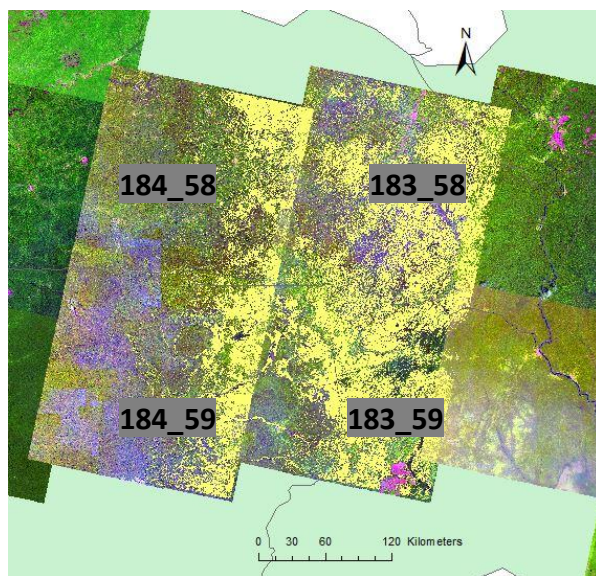
-  Classe retenue contenant les peuplements de *G. dewevrei*
-  Composition colorée fausse couleur (canaux 6,5,4)
-  Limite de la forêt tropicale humide africaine
-  Zone de délimitation grossière de peuplements de *G. dewevrei*

Figure 10 - Méthode de sélection des classes et des polygones

RESULTATS & DISCUSSION

En analysant les classifications obtenues nous constatons des résultats très contrastés.

Les classifications obtenues à partir des tuiles 183_58, 183_59, 184_58 et 184_59, se sont avérées bien trop erronées pour être exploitées (du fait de la pollution atmosphérique visible en bleuté ci-dessous) nous n'avons donc pas voulu les conserver dans la carte finale.



-  Composition colorée fausse couleur (canaux 6,5,4)
-  Limite de la forêt tropicale humide africaine
-  Classe retenue contenant les peuplements de *G. dewevrei*

Nous avons fait le choix de retenir deux types de zonages, car nous n'avons pas pu nettoyer l'ensemble des tuiles contenant les polygones associés aux peuplements de *G. dewevrei*.

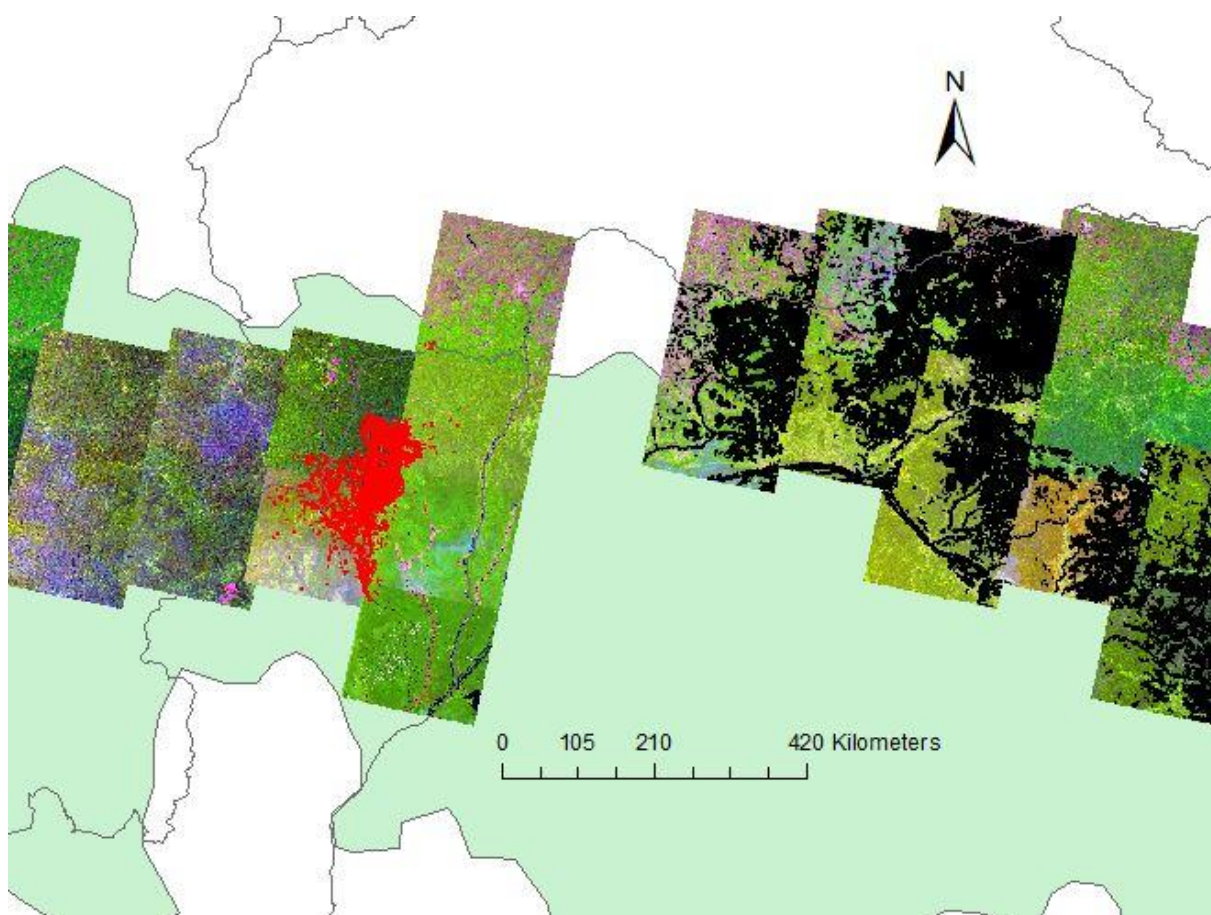


Figure 11-Carte des zonages obtenus

Le zonage figurant en rouge (tuiles : 182_58, 182_59, 181_58, 181_59) comprend uniquement les peuplements denses et purs de *G. dewevrei*, l'autre en noir (tuiles ; 185_57, 185_58, 185_59 ainsi que les reste des tuiles s'étendant de 179_57 à la tuile 174_59) inclus des peuplements plus diffus ou des peuplements inclus dans des zones de forêt mixte.

Le zonage en rouge (partie ouest de la carte (Gabon, Cameroun, République du Congo)) représente des peuplements dont la délimitation a été validée visuellement à partir des inventaires terrains, ainsi que de la cartographie réalisée par Gaëlle Viennois alors que le zonage noir correspond à une localisation moins précise qui regroupe à la fois des plaques de *G. dewevrei* moins denses et des zones incluant de la forêt mixte et des plaques de *G. dewevrei* qui n'ont pas pu être dissociées par l'algorithme de classification. On peut estimer ce zonage comme une localisation de *G. dewevrei* potentielle un peu plus fine que les délimitations existantes précédentes¹² mais non exclusive.

Cette méthode permet de mettre en évidence les zones forestières de mono-dominance. Il reste toutefois une large part d'erreur dans la classification liée à de nombreux paramètres, que ce soit les problèmes de nébulosité qui affectent les valeurs de réflectance sur lesquelles se base l'algorithme, ou encore l'angle d'ensoleillement qui un décalage de réflectance entre la partie Est et Ouest des images.

¹² Zonage large délimité par Nicolas Fauvet et Charles Doumenge (cf carte des tuiles Landsat)

Les moyens à notre disposition pour valider la classification (Cartes de Gaëlle Viennois, de Letouzey, de Roth et Heinz, ainsi que les relevés terrains parsemés sur la zone d'étude) ne nous permettent d'évaluer que partiellement la validité de notre classification.

La classification n'a pas pu être aussi précise en ce qui concerne la partie Nord et Nord-est de la République Démocratique du Congo. En effet, la structure même du milieu beaucoup plus hétérogène et contrastée (interface forêt- savane, reliquats forestiers inclus dans des zones forestières anthropisées) rend la méthode de réhaussement des contrastes moins efficace, l'algorithme de classification a alors tendance à regrouper au sein de la classe qui contient les peuplements de *G. dewevrei* d'autres éléments qui n'en sont pas (*G. dewevrei* et forêt mixte, reliquats forestiers, ...).

Ainsi la méthode utilisée reste coûteuse en temps et nous n'avons pas pu l'automatiser complètement. Notre connaissance insuffisante d'ArcGIS et notamment de l'outil Model Builder, ne nous a pas permis d'automatiser réellement¹³ la phase de classification de la méthode, ainsi que les processus de création de compositions colorées. Ceci aurait permis de gagner du temps nécessaire à la phase de nettoyage de la couche vecteur contenant les peuplements de *G. dewevrei* après classification.

Par ailleurs, cette méthode repose sur une large part de photo-interprétation qui nécessite de bien connaître le milieu forestier d'Afrique centrale pour être en mesure de discerner les peuplements de *G. dewevrei* d'éléments qui peuvent présenter un aspect similaire (reliquat forestier dans des zones de forêt anthropisée, peuplement forestiers mono-dominant hygrophile...). Cette phase de compréhension des hétérogénéités de la forêt d'Afrique centrale doit-être prise en compte. La réalisation d'un masque à partir de la carte « Tropical forests diversity in Central Africa using MODIS data » pourrait permettre de limiter les erreurs de classification (cf tableau de proposition de masque en annexe).

PERSPECTIVES

Le vecteur de zonage potentiel obtenu sur la partie Nord, Nord-Est de la République démocratique du Congo peut permettre de réaliser une prochaine classification qui se baserait sur un masque binaire issu de ce zonage à l'intérieur duquel il serait possible d'essayer d'extraire les peuplements mono-dominants.

La difficulté d'acquisition d'images nettes dans cette partie du globe rend la méthodologie basée sur l'utilisation de canaux optiques limitée. La perspective du couplage de cette méthode avec des données radar à 200m de résolution issues potentiellement de la mission Biomass¹⁴ peut-être une piste intéressante, comme le traitement d'images Sentinel 2, dont l'emprise spatiale est plus grande que celles des images LANDSAT8 avec 290km de est équivalent et une résolution spatiale de 10m pour les bandes du bleu, vert, rouge et proche infra-rouge. Si certains modules de traitement raster permettent de réaliser les corrections atmosphériques, l'Agence Spatiale Européenne ne met pas à disposition les images corrigées (en réflectance au sol) comme la Nasa peut le faire pour les images LANDSAT notamment.

¹³ Nous avons seulement réalisé un batch (réalisation des processus à la suite) sous ENVI mais l'insertion des différents paramètres (image, masque, nombre de classes, nombre d'itération) devait être fait à chaque fois manuellement contrairement à l'automatisation via le Model Builder.

¹⁴ Futur satellite radar qui sera envoyé dans l'espace par l'Agence Spatiale Européenne et qui à vocation à sonder les forêts tropicales du globe à partir de 2020.

BIBLIOGRAPHIE

Adam A., 2015, Cartographie des massifs forestiers au Nord de l'Iran, Rapport de Stage de M1, 52p.

Alverhne L., 2014, Cartographie et caractérisation des peuplements mono-spécifiques de *Gilbertiodendron dewevreii* dans le bassin du Congo par télédétection, Mémoire de Master 2, 44p.

Bwangoy J-R B., *et al.*, 2010, Wetland mapping in the Congo Basin using optical and radar remotely sensed data and derived topographical indices, *Remote Sensing of Environment* 114, 14p.

Betbeder J., *et al.*, 2014, Mapping of Central Africa Forested Wetlands Using Remote Sensing Mapping of Central Africa Forested Wetlands Using Remote Sensing.

Doumenge, C., 2012. *G. dewevreii*, fiche de protabase 14p.

Doumenge, in Mémento du forestier tropical Coord. D. Louppe, G. Mille Ed. Quae, 2015

Girard, M.C., 1999, Traitement des données de télédétection, *Dunod Ed. Paris*, 328-333.

Gond *et al.*, 2004, Surveillance et cartographie des plans d'eau et des zones humides et inondables en régions arides avec l'instrument VEGETATION embarqué sur SPOT-4, *INT. J. REMOTE SENSING*, VOL. 25, NO. 5, 987-1004

Guyot, G., Baret, F., 1988, Utilisation de la Haute Resolution Spectrale pour Suivre L'état des Couverts Végétaux, Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Proceedings of the conference held 18-22 January, 1988 in Aussois (Modane), France. Edited by T.D. Guyenne and J.J. Hunt. ESA SP-287. European Space Agency, 1988., p.279

Hart T. B., *et al.*, 1996. *Changes in forest composition over the last 4000 years in the Ituri bassin, Zaire*, 9p.

Hart, T.B., Hart, J.A. & Murphy, P.G., 1989. Monodominant and species-rich forests of the humid tropics: causes for their co-occurrence. *The American Naturalist* 133(5): 613–633.

Letouzey R., 1985. *Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1 : 500 000*, 4p.

Verhegghen, A., Mayaux, P., de Wasseige, C. & Defourny, P. 2012 Mapping Congo Basin forest types from 300m and 1km multi-sensor time series for carbon stocks and forest areas estimation. *Biogeosciences Discuss.* 9, 7499-7553. ([DOI:10.5194/bgd-9-7499-2012](https://doi.org/10.5194/bgd-9-7499-2012))

Viennois G., N. Barbier, I. Fabre, P. Couteron, 2013. *Multiresolution quantification of deciduousness in West central African forests* In: *Biogeosciences Discussions* 10, 7171-7200, 30p.

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 – Ensemble des tuiles LANDSAT8 téléchargées	9
Figure 2 -- Sélection des tuiles LANDSAT 8 en réflectance au sol (site de l'USGS)	10
Figure 3-- Sélection des tuiles avec peu de nébulosité (site USGS)	12
Figure 4 -- Visualisation de la nébulosité sur la tuile :.....	14
Figure 5 – Visualisation de l'épaisseur d'aérosols sur la tuile : <i>LC8182582013353LGN00_sr_band1.tif</i>	14
Figure 6 – Composition colorée alliant les canaux 6, 5 et 4 de la tuile <i>LANDSAT 8</i> :.....	16
Figure 7 – Cartographie du <i>G. dewevrei</i> par Heinz et Roth, 2009	16
Figure 8 – Cartographie des peuplements de <i>G. dewevrei</i> par Lény Alvernhe en 2014 (à partir d'une image SPOT-5).....	17
Figure 9- Composition colorée (6,5,4) obtenue suite au seuillage	18
Figure 10 - Méthode de sélection des classes et des polygones	26
Figure 11-Carte des zonages obtenus.....	28

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 -- Intérêt méthodologique des caractéristiques écologiques du <i>G. dewevrei</i>	7
Tableau 2 -- Les caractéristiques du capteur OLI (LANDSAT 8)	8
Tableau 3 -- Bandes spectrales utilisées.....	11
Tableau 4 – Correspondance code cirrus codage en bit	13
Tableau 5 – Critères de photo-interprétation retenus pour identifier les plaques denses de <i>G. dewevrei</i>	20

ANNEXE

Tropical forests diversity in Central Africa using MODIS data			
	Classes incluses dans le masque	Classes exclues du masque	Numéro de classe
Wetland forests	/	Forests subjected to relatively stable water level, average elevation of 304m, 20 m maximal canopy height	
	Forests subjected to seasonal flood pulse, located alongside rivers	/	
	Forests subjected to seasonal short lasting flood pulse, with low amplitude, average elevation of 306 m, 30 m maximal canopy height	/	
	Non-flooded forests, average elevation of 311 m, 40 m maximal canopy height	/	
Terra Firme forests	/	Secondary and degraded deciduous forests	Classe_10
	/	Secondary and degraded deciduous forests under the influence of northern climat	Classe_7
	/	Mid-altitude evergreen forests under the influence of costal or sub-montane climate	Classe_2
	/	Evergreen forests under the influence of costal or sub-montane climate	Classe_4
	/	Deciduous and gallery forests under the influence of southern climate	
	Evergreen forests under the influence of southern climate	/	Classe_6
	Semi-deciduous forests under the influence of southern climate	/	Classe_9
	Mixed evergreen and semi-deciduous forests	/	Classe_8
	Evergreen forests and old-growth secondary	/	Classe_5

	<i>semi deciduous forests under the influence of northern climate</i>	
	<i>Evergreen cloud forests</i>	/

Scripts R

```
#####
#Chaine de traitements pour mise rehaussement des contrastes internes a l'image###
#####
```

```
####Packages necessaires pour les traitements
#####
```

```
library('raster')
require('sp')
require('rgdal')
```

```
####Localiser le fichier de travail dans lequel
#####
```

```
setwd("D:/bandes")
```

```
#### Creer une liste correspondant aux dossiers comprenant l'ensemble des bandes 6
#### auxquelles on veut appliquer les traitements
#####
```

```
images<- list.files(".", "*.tif")
```

```
####Creer des repertoire dans le dossier de travail dans lequel il
#### va mettre les resultats intermediaires et le resultat final
```

```
dir.create("resultats")
dir.create("etapes_intermediaires")
```

```
#####
##### Charger la fonction #####
#####
```

```
calc_image <- function(x) {
```

```
#### Debut du traitement
message("image ",x)
b6_E0<-raster(x)
b6_E0
```

```

####Convertir les valeurs des pixels situés sur le poutour de l'image en NA
message(" E0")

#### filtre low pass
b6_E1<-focal(b6_E0,w=matrix(1/(45*45),45,45))

writeRaster(b6_E1,filename=paste("etapes_intermediaires/",x,"_E1.HDR",sep=""),datatype='
INT2S',overwrite=TRUE)
message(" E1")

#### etape 2
b6_E2<-b6_E0-b6_E1

writeRaster(b6_E2,filename=paste("etapes_intermediaires/",x,"_E2.HDR",sep=""),datatype='
INT2S',overwrite=TRUE)
message(" E2")

#### etape 3
b6_E3<-focal(b6_E2,w=matrix(1/(45*45),45,45))

writeRaster(b6_E3,filename=paste("etapes_intermediaires/",x,"_E3.HDR",sep=""),datatype='
INT2S',overwrite=TRUE)
message(" E3")

#### etape 4
b6_E4<-b6_E0-b6_E3

writeRaster(b6_E4,filename=paste("etapes_intermediaires/",x,"_E4.HDR",sep=""),datatype='
INT2S',overwrite=TRUE)
message(" E4")

#### etape 5 #### filtre median
b6_E5<-focal(b6_E4,w=matrix(1,9,9),fun=median)

writeRaster(b6_E5,filename=paste("resultats/",x,"_E5.tif",sep=""),datatype='INT2S',overwrit
e=TRUE)
message(" E5")

}

#####
#####
#### Pour appliquer la fonction a une seule image (dans le dossier de travail courant)
#####

calc_image("LC81750572014355LGN00_sr_band6.tif")

```

```
#####
#####
```

```
#### Pour appliquer la fonction a une liste nommee "images" correspondant au dossier
rassemblant
```

```
#### les bandes 6 de plusieurs scenes (liste cree plus haut dans le dossier de travail courant)
#####
```

```
lapply(images, calc_image)
```

```
#####
##### Creation de DWV #####
#####
```

```
### Packages necessaires pour les traitements
```

```
library('raster')
```

```
require('sp')
```

```
require('rgdal')
```

```
### Indique les chemins d'accès à R pour les dossiers de travail et les documents a utiliser
#####
```

```
#setwd("D:/TRAVAIL")
```

```
#setwd("/mnt/data/home/images/lea/TRAVAIL/")
```

```
setwd("C:/TRAVAIL")
```

```
#####
```

```
### NB: le dossier de travail doit contenir 3 dossiers
```

```
## un R (contenant les b4 landsat pour chaque scene), un PIR (b5,idem), un MIR (b6, idem)
```

```
#####
```

```
#### Cree les dossiers dans lesquels vont etre stockes les resultats
```

```
#####
```

```
dir.create("DWV")
```

```
dir.create("NDVI")
```

```
dir.create("NDWI")
```

```
#### Charge la liste des scenes auxquelles ont applique la fonction
```

```
##### (adapter en fonction de la zone etudiee)
```

```
scenes <- list(
  "LC81790572015018LGN00",
  "LC81790582015018LGN00",
  "LC81760572013135LGN01",
  "LC81830572015014LGN00",
  "LC81830582015014LGN00",
  "LC81830592015014LGN00",
```

```
"LC81770572014353LGN00",
"LC81770572015020LGN00",
"LC81770582013350LGN00",
"LC81770582014017LGN00",
"LC81770592013350LGN00",
"LC81840582013351LGN00",
"LC81840592013351LGN00",
"LC81810572015048LGN00",
"LC81810582015016LGN00",
"LC81810592015016LGN00",
"LC81810602015032LGN00",
"LC81810602015048LGN00",
"LC81850572015012LGN00",
"LC81850582015012LGN00",
"LC81850592015012LGN00",
"LC81820582013353LGN00",
"LC81820592015007LGN00",
"LC81780572015027LGN00",
"LC81780582013357LGN00",
"LC81750572014355LGN00")
```

```
scenes <- list('LC81820592014004LGN00')
```

```
#####
#####Charge la fonction#####
#####
```

```
creation_DWV<- function(x) {
```

```
### cree les bandes raster necessaires dans la fonction a partir des scenes
#####
```

```
PIR<-raster(paste("PIR/",x,"_sr_band5",".tif",sep=""))
R<-raster(paste("R/",x,"_sr_band4",".tif",sep=""))
MIR<-raster(paste("MIR/",x,"_sr_band6",".tif",sep=""))
```

```
#### Creation NDVI
#####
```

```
NDVI<-((PIR-R)/(PIR+R))
```

```
writeRaster(NDVI,filename=paste("NDVI/",x,"_NDVI.envi",sep=""),datatype='FLOAT4S',o
verwrite=TRUE,NAflag=-9999)
```

```
#### Creation NDWI
#####
```

```
NDWI<-((R-MIR)/(R+MIR))
```

```
writeRaster(NDWI,filename=paste("NDWI/",x,"_NDWI.envi",sep=""),datatype='FLOAT4S',
overwrite=TRUE,NAflag=-9999)
```

```
### Creation DWV
DWV<-NDVI-NDWI
```

```
writeRaster(DWV,filename=paste("DWV/",x,"_DWV.envi",sep=""),datatype='FLOAT4S',ov
erwrite=TRUE,NAflag=-9999)
```

```
}
```

```
#####
#####
##### Lance la fonction
#####
#####
#####
```

```
lapply(scenes,creation_DWV)
```

```
#####
##### NB:la boucle lapply ne fonction qu'avec une seule liste
##### (d'ou la necessite de creer une liste de scenes au debut)
```

```
#####
#####
##### Masque eau libre a partir du DWV
#####
#####
#####
```

```
#### Packages necessaires
```

```
library('raster')
require('sp')
require('rgdal')
```

```
#### Localise le repertoire de travail
```

```
#setwd("D:/TRAVAIL")
```

```
#setwd("/mnt/data/home/images/lea/TRAVAIL/")
```

```

setwd("F:/TRAVAIL")

##### cree la liste des DWV

liste_DWV<-list.files("DWV","*.envi")

####cree un dossier pour mettres les masques obtenus
dir.create("Masque_eau_libre")

#####
##### Charge la fonction de calcul du masque #####
#####

creation_mask_eau<-function(x) {

  ###creation raster DWV
  DWV<-raster(file.path("DWV",x))

  ###encodage masque binaire elimination eau libre (eau libre ->0, reste->1)
  mask_eau <- DWV>=0

  #####creer les masques

  writeRaster(mask_eau,filename=paste("Masque_eau_libre/",x,"_msk_eau.envi",sep=""),datatype='INT1U',overwrite=TRUE,NAflag=255)
}

#####
##### Applique la fonction a la liste d'images DWV #####
#####

lapply(liste_DWV,creation_mask_eau)

```