



HAL
open science

Identification des forêts matures à partir d'images à haute et très haute résolution spatiale

Ghaith Amin

► **To cite this version:**

Ghaith Amin. Identification des forêts matures à partir d'images à haute et très haute résolution spatiale. Géographie. 2018. dumas-02138880

HAL Id: dumas-02138880

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02138880>

Submitted on 24 May 2019

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

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



Identification des forêts matures à partir d'images à haute et très haute résolution spatiale



Mémoire de stage de fin d'études

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master 2
GEOgraphie Information interface Durabilité
EnvironnementS (GEOIDES)

Ghaith AMIN

Organisme d'accueil : Irstea – centre de Grenoble

Année de soutenance : 2018

Identification des forêts matures à partir d'images à haute et très haute résolution spatiale

Mémoire de stage de fin d'études

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master 2 GEOgraphie Information interface
Durabilité EnvironnementS (GEOIDES)

Ghaith AMIN

Organisme d'accueil : Irstea – centre Grenoble

Année de soutenance : 2018

Maîtres de stage :

- Marc FUHR, Université de Grenoble Alpes, Ingénieur-Chercheur, Irstea Centre de Grenoble
- Samuel ALLEAUME, Université de Montpellier, Ingénieur de recherche, Irstea, Maison de la télédétection, Montpellier

Mémoire préparé sous la direction de :

- Mélanie BERTRAND, Université de Grenoble Alpes, Ingénieur de recherche, Irstea Centre Grenoble

Devant le jury :

- Sylvain BIGOT, Professeur, Université de Grenoble Alpes, Institut de Géographie Alpine.
- Mélanie BERTRAND, Ingénieur de recherche, Université de Grenoble Alpes.
- Marc FUHR, Ingénieur-Chercheur, Université de Grenoble Alpes.

RESUME

Les forêts matures abritent une biodiversité spécifique. Pour cette raison, les politiques publiques encouragent la création ou le maintien de forêts matures dans la mosaïque forestière, à différentes échelles.

Ce stage a pour objectif de développer une méthode qui permette au gestionnaire forestier de localiser à moindre coût les forêts matures. A partir d'images à haute et très haute résolution spatiale, en utilisant de données multi-sources et multi-temporelles, nous cherchons à construire un modèle statistique qui servira à établir une cartographie de ces forêts sur des grands territoires.

Deux hypothèses sont testées : la première est que, en raison de leur structure, les forêts matures ont une signature radiométrique ou structurale différentes de celles des forêts non matures ; la seconde est que la signature radiométrique des forêts matures (non gérées) change moins au cours du temps que celle des forêts non matures (régulièrement exploitées).

L'étude s'appuie sur une base de données de placettes de terrain précisément géoréférencées, constituée des Hêtraies-Sapinières des massifs préalpins des Alpes du Nord françaises. Pour chaque placette, nous avons calculé un indice de maturité (variable à prédire) puis extrait les variables radiométriques et texturales sur les images correspondantes (variables prédictives). Ensuite nous avons effectué une analyse multivariée (ACP) à partir de variables retenues afin de construire un modèle statistique qui sert à l'identification de forêts matures. Nous avons obtenu un modèle très peu significatif ($R^2=0,12$), dans la deuxième partie de stage nous allons ajouter les variables temporelles pour améliorer notre modèle.

Mots clés : [forêts matures ; télédétection ; très haute résolution spatiale ; signature spectrale ; texture ; Préalpes françaises]

ABSTRACT

Identification of mature forests based on high and very high spatial resolution images

Overmature forests harbor a specific biodiversity. For this reason, public politics encourage the creation or maintaining of overmature forests in the forest mosaic, in different scales.

The objective of this training is to develop a method that allows forest managers to localize overmature forests with the lowest cost. Based on high and very high spatial resolution imagery, using multi source and multi temporal data, we aim at building a statistical model useful to map these forests in large territories.

Two hypotheses are tested; the first is that, because of their structure, overmature forests have a radiometric or structural signature different from those of non-mature forests, the second is that the radiometric signature of overmatured forests (unmanaged) changes less over time than the radiometric signature of non-mature forests (regularly logged). The study relies on a database of field plots precisely georeferenced, constituted for the Beech-Fir forests of the prealpine mountain ranges of the French Northern Alps. For each plot, we calculated a maturity index, then extracted the radiometric and textural variables in the corresponding images. Then we performed a multivariate analysis (PCA) based on deducted variables to build a static model which serves to the identification of mature forests.

We obtained a model with a low significantly ($R^2 = 0.12$), in the second part of the internship we will add the temporal variables to improve our model.

Key words: [overmature forests; remote sensing; very high spatial resolution; spectral signature; texture; French Prealps]

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier mes maitres de stage, Marc FUHR et Samuel ALLEAUME, avec qui j'ai beaucoup aimé travailler. Mr FUHR de m'avoir accueilli comme stagiaire au sein d'Irstea de Grenoble et pour sa disponibilité. Mr ALLEAUME pour ses très bons conseils pendant mes déplacements à la maison de la télédétection de Montpellier.

Je remercie également ma référente pédagogique Mélanie BERTRAND, pour ses apports méthodologiques.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement le responsable de master 2 GEOIDES Pr. Sylvain BIGOT pour son encadrement, et sa disponibilité tout au long de l'année universitaire.

Je tiens également à remercier mes amis stagiaires d'Irstea pour l'ambiance tout au long du stage, et toutes les personnes que j'ai rencontrées en France pour leur aide linguistique.

Je veux aussi adresser quelques mots à ma famille ; La guerre nous a séparés, mais elle reste toujours dans mes pensées.

TABLE DES MATIERES

RESUME	2
ABSTRACT	3
REMERCIEMENTS	4
TABLE DES MATIERES	5
LISTE DES FIGURES	6
LISTE DES TABLEAUX.....	6
AVANT-PROPOS	7
Introduction	8
Partie I - LA TELEDETECTION ET LA DETECTION DES CHANGEMENTS EN FORET : ETAT DE L'ART	10
1. L'intérêt de la télédétection pour l'étude de la végétation	10
2. La télédétection pour l'identification des changements en forêt.....	11
Partie II- MATERIEL ET METHODES	12
1. Contexte de la zone d'étude	12
2. Données utilisées.....	13
3. Méthode de traitement	17
4. Construction d'un modèle statistique	24
5. schéma méthodologique	25
Partie III - RESULTATS ET DISCUSSION	26
1. Résultat issu de Photo-interprétation	26
2. Résultat issu de la modélisation	27
3. Perspectives	29
Partie V - CONCLUSION	30
Bibliographie	31
Sitographie	33

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation schématique du cycle sylvicole et du cycle biologique d'un arbre..	9
Figure 2 : Présentation de la Zone d'étude	13
Figure 3 : La mesure du bois mort sur une placette	16
Figure 4 : la mesure de la surface terrière	16
Figure 5 : La distribution de la valeur d'indice de maturité selon la placette	17
Figure 6 : Les effets de perspective	17
Figure 7 : L'élévation du relief	19
Figure 8 : Orthorectification en ligne de commande	19
Figure 9 : Le réflectance sur les bandes rouge et proche infrarouge	19
Figure 10 : Bande panchromatique avant le Masque	21
Figure 11 : Masque issu de calcul	21
Figure 12 : Masque appliqué à l'NDVI	21
Figure 14 : Forêt de feuillus	22
Figure 15 : Forêt de conifères	22
Figure 16 : Exemple de matrice de cooccurrence	23
Figure 17 : les axes de l'AFC	28
Figure 18 : la distribution des relevés selon les axes 1 et 2	28
Figure 19 : Les variables statistiques selon les axes 1 et 2	29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des images photo- aérienne de IGN.....	14
Tableau 2 : Liste des images Spot 6/7	14
Tableau 3 : Liste des images Spot 5	15
Tableau 4 : Les statistiques descriptives calculées	23

AVANT-PROPOS

L'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea) a été créé en 1981 sous le nom de Cemagref. L'Irstea est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST). Il est placé sous la double tutelle du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR) et du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF). Irstea regroupe neuf centres régionaux répartis sur tout le territoire français et 19 Unités de Recherche (Irstea, 2015), dont le centre de Grenoble et l'UR LESSEM au sein de lequel mon stage s'est déroulé. Depuis le 1^{er} janvier 2016, le centre de Grenoble est associé à la Communauté Université Grenoble Alpes UGA, il a également rejoint l'Observatoire des Sciences et de l'Univers de Grenoble OSUG.

Introduction :

La forêt couvre une large proportion du continent européen (33 % de la surface) mais seule 4 % de la surface forestière est considérée comme non perturbée par l'homme (Forest Europe, 2015).

Depuis une quarantaine d'années, de nombreuses études soulignent l'importance des forêts non (ou peu) perturbées pour la biodiversité forestière. En effet, ces forêts non perturbées développent des attributs spécifiques dits de maturité (d'où l'appellation forêts matures), dont les principaux sont : un important volume de bois mort à divers stades de dégradation, une importante diversité des dimensions des arbres (diamètres et hauteurs), la présence de très gros arbres et une diversité de taille des ouvertures du couvert (Gao et al., 2014; Lassauce et al., 2011; Lindenmayer et al., 2000; Nascimbene et al., 2013b; Paillet et al., 2009). De nombreuses espèces animales ou végétales dépendent de ces attributs au cours de leur cycle de vie, et les forêts matures sont considérées comme une source d'habitats (arbres à cavités, bois mort en décomposition, ...) rarement disponibles dans les forêts gérées. Elles permettent la préservation d'espèces comme certains insectes (Nilsson et Baranowski, 1997), lichens (Öckinger et al., 2005, in JANSSEN Philippe, 2016), bryophytes (Spitale et Mair, 2015 in JANSSEN Philippe, 2016), et oiseaux (Bütler et al., 2004, in JANSSEN Philippe, 2016).

Dans notre travail, le terme maturité désigne la maturité biologique des peuplements, en référence au cycle de développement naturel d'une forêt (phases de vieillissement et de sénescence).. (Figure 1, JANSSEN Philippe, 2016). Elle se distingue de la maturité sylvicole, liée à l'âge ou au diamètre.

Ce travail de stage vise à développer une méthode pour l'identification des forêts matures à partir des techniques de la télédétection en utilisant des données multi-sources et multi-temporelles, afin de construire un modèle statistique qui servira à cartographier ces forêts sur des grands territoires dans l'objectif de constituer une trame fonctionnelle (trame des vieux bois).

Notre approche exploratoire teste deux hypothèses :

- La première suppose que les forêts matures, en raison de leur structure particulière liée aux attributs de maturité, ont des signatures radiométriques et texturales différentes de celles des forêts non matures,

- La deuxième suppose laquelle la signature radiométrique des forêts matures (non ou peu exploitées) change moins au cours du temps que celle des forêts non matures (régulièrement exploitées chaque 10-15 ans).

Nous allons effectuer ce travail dans les Préalpes françaises, sur un territoire incluant deux Parcs Naturels Régionaux (PNR de la Chartreuse et PNR du Massif des Bauges), pour lesquels nous disposons des données de terrain permettant de caractériser la maturité des forêts (environ 1000 placettes de relevé).

Dans une première partie, nous présentons un état de l'art justifiant l'intérêt des données de la télédétection pour détecter les changements en forêt. Puis nous détaillerons la méthodologie utilisée pour caractériser la maturité des forêts à partir des données de terrain, extraire les variables de télédétection appropriées et construire un premier modèle statistique permettant de relier les données de terrain aux variables extraites. Nous terminerons en présentant les résultats du modèle et les perspectives envisagées pour continuer ce travail.

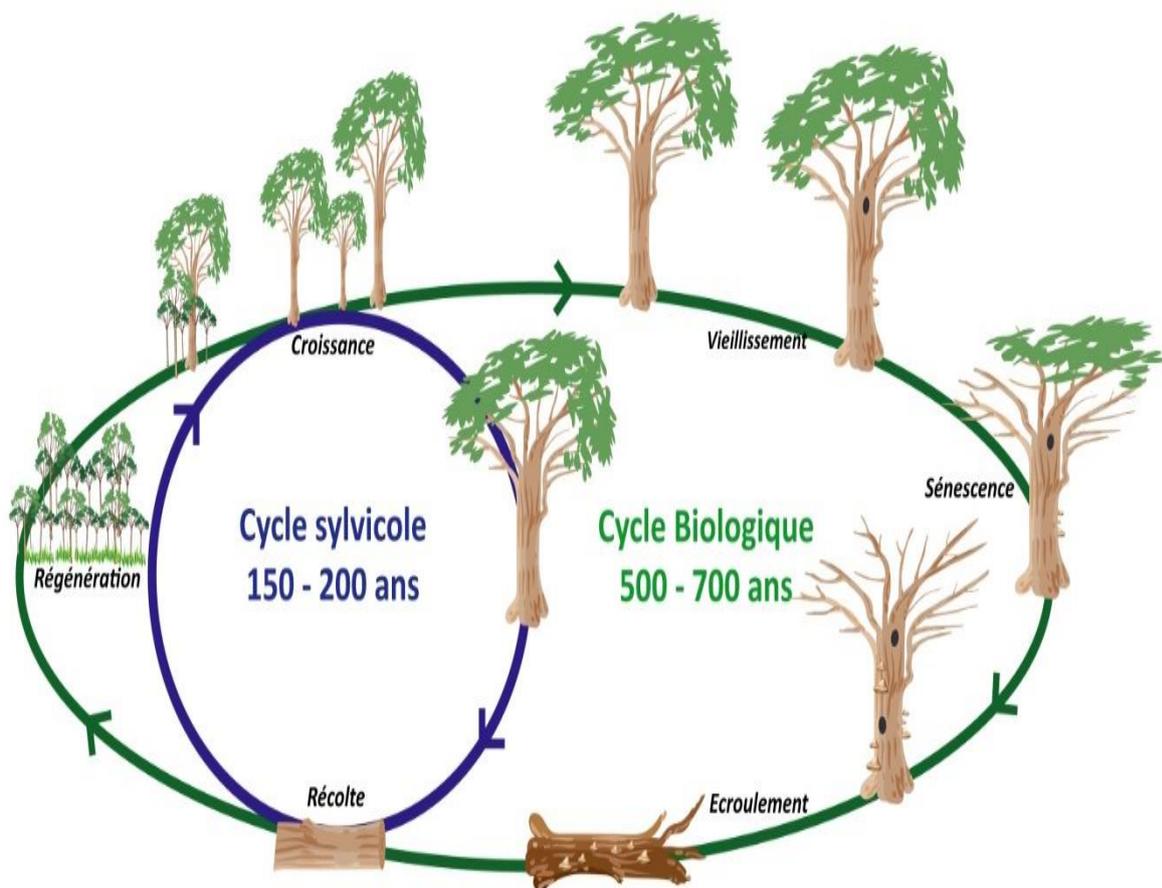


Figure 1. Représentation schématique du cycle sylvicole et du cycle biologique d'un arbre.

I- La télédétection et la détection des changements en forêt : état de l'art

1.1 L'intérêt de la télédétection pour l'étude de la végétation

"La télédétection spatiale permet d'observer le système terre / océans / atmosphère en s'appuyant sur des méthodes d'acquisition de l'information à distance basées sur les propriétés du rayonnement électromagnétique". (<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/rayonnement/index.html>)

De nos jours, la télédétection s'avère être un outil approprié dans l'étude de la terre, et ses utilisations dans le domaine de la végétation sont très variées et nombreuses, par exemple : cartographier les couverts végétaux, estimer des superficies forestières, surveiller l'évolution des incendies de forêts, identifier des types de forêts... En utilisant plusieurs images de la même zone géographique avec un intervalle temporel, on peut aussi détecter les changements intervenus en forêt et préciser l'évolution des caractéristiques des peuplements.

La précision des informations dépend des caractéristiques du capteur utilisé (résolution spatiale, spectrale, radiométrique, fréquence de revisite). Plus spécifiquement, l'utilisation d'images multispectrales à très haute résolution spatiale est utile pour différents types d'études sur la végétation. A titre d'exemples :

- Johansen et al., (2007) ont distingué les stades structuraux de la végétation dans les écosystèmes riverains et forestiers adjacents en Colombie-Britannique, à partir d'une image QuickBird à haute résolution spatiale capturée en juin 2005,
- Thierion et al., (2014) se sont intéressés à la cartographie physiologique de la végétation des milieux ouverts prairiaux et pastoraux dans le département de l'Isère en utilisant les images THRS Pléiades (0.7 m en panchromatique et 2.7 m en multispectral).
- Hamrouni (2015) a montré l'intérêt de l'utilisation d'indices de texture pour discriminer les types physiologiques des végétations naturelle. En utilisant les indices de texture de Haralick (Haralick et al., 1973) et de texture de Structural Feature Set (SFS) sur les deux bandes du rouge et du proche infrarouge de la BD ORTHO®IRC© et des images SPOT 6/7, elle a comparé les performances des données ortho-photo IGN (résolution 50 cm) et des données SPOT 6/7 (résolution 1.5 m à 6 m) pour extraire des métriques de texture permettant la caractérisation de la végétation naturelle.

1.2- La télédétection pour l'identification des changements en forêt

L'utilisation de la résolution spatiale fine est toujours face à un défi du développement d'une méthode de traitement efficace qui pourrait profiter d'informations spatiales et spectrales. (Zhang et Xie, 2012) C'est justement ce sur quoi l'accent est mis dans la présente étude.

Les images à résolution spatiale fine contiennent beaucoup d'informations et permettent de détecter des changements assez fins du couvert forestier : Durrieu et Deshayes (1994) ont analysé l'évolution radiométrique pixel à pixel entre des images Landsat TM prises à 1 et 2 ans d'intervalle (août 1988, 1990 et 1991). Les images ont été sélectionnées en été, quand la stabilité phénologique est grande, ce qui permet de supposer que le couvert a le même comportement spectral d'une année à l'autre. Les résultats obtenus par application de cette méthode ont été comparés afin de connaître les types de changements détectables et, pour vérifier si les endroits détectés comme ayant changé radiométriquement correspondent à un changement réel au niveau du peuplement.

Ils ont obtenu des résultats très encourageants : 95 % des peuplements où des changements avaient été détectés avaient été éclaircis au cours de la période. La majorité des changements a été détectée sur TM4 (proche infra-rouge). Pourtant les zones incendiées sont mieux détectées à partir de TM5 (moyen infra-rouge).

Il est intéressant dans certains cas d'études de la végétation d'utiliser deux types de variables (radiométriques et texturales) pour obtenir un meilleur résultat. Les indices spectraux sont la combinaison mathématique de canaux bruts, ces indices peuvent rajouter une information complémentaire à celle contenue dans les canaux originaux. Dans le domaine de la végétation un indice radiométrique adéquat peut être utilisé : le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) qui combine les canaux rouges et proche infrarouge. Et les indices de texture permettent d'obtenir les informations relatives à la distribution spatiale des variations de tons de gris pour une bande d'une image (Haralick et al., 1973) souvent utilisée en télédétection, par exemple :

Richet al., (2010) ont extrait les informations spectrales de l'imagerie IKONOS des bandes (MS,1-4, à résolution spatiale de 4 m) et la bande panchromatique (à résolution spatiale de 1 m) à une seule date, autour de placettes de terrain géoréférencées.

La valeur DN moyenne et l'écart-type pour toutes les bandes IKONOS ont été obtenus. De plus, l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) a été calculé. Les caractéristiques de texture ont été dérivées de la bande panchromatique. La combinaison des caractéristiques texturales et spectrales a conduit à un modèle de régression multiple qui expliquait 68% de la variance, et prédisait la sévérité des perturbations. Les résultats suggèrent l'utilité de combiner des données spatiales et spectrales pour détecter les différences dans la structure de la forêt causées par des processus écologiques tels que les perturbations.

II- Matériel et Méthodes

1. Contexte de la zone d'étude

Les Préalpes françaises constituent un ensemble de massifs montagneux de moyenne altitude du sud-est de la France. Notre zone d'étude (figure 2) est située dans le nord des Préalpes. Elle comprend les massifs de la Chartreuse, des Bauges et des Montagnes de l'Ain. Elle inclut deux Parcs Naturels Régionaux (Massif des Bauges, Chartreuse). Intégralement localisés dans la région Auvergne - Rhône-Alpes, ces massifs se trouvent à cheval sur les départements de la Haute-Savoie et de la Savoie pour les Bauges et l'Ain, de la Savoie et de l'Isère pour la Chartreuse. Les Préalpes du Nord se caractérisent par un climat océanique montagnard : hiver froid et avec des précipitations notamment neigeuses, été relativement frais. La température moyenne annuelle y est de 8,8°C et les précipitations moyennes annuelles y sont de 1417 mm par an (Bigot et Rome, 2010) Actuellement, la forêt couvre environ 60 % de la superficie des trois massifs étudiés (Janssen, 2016).

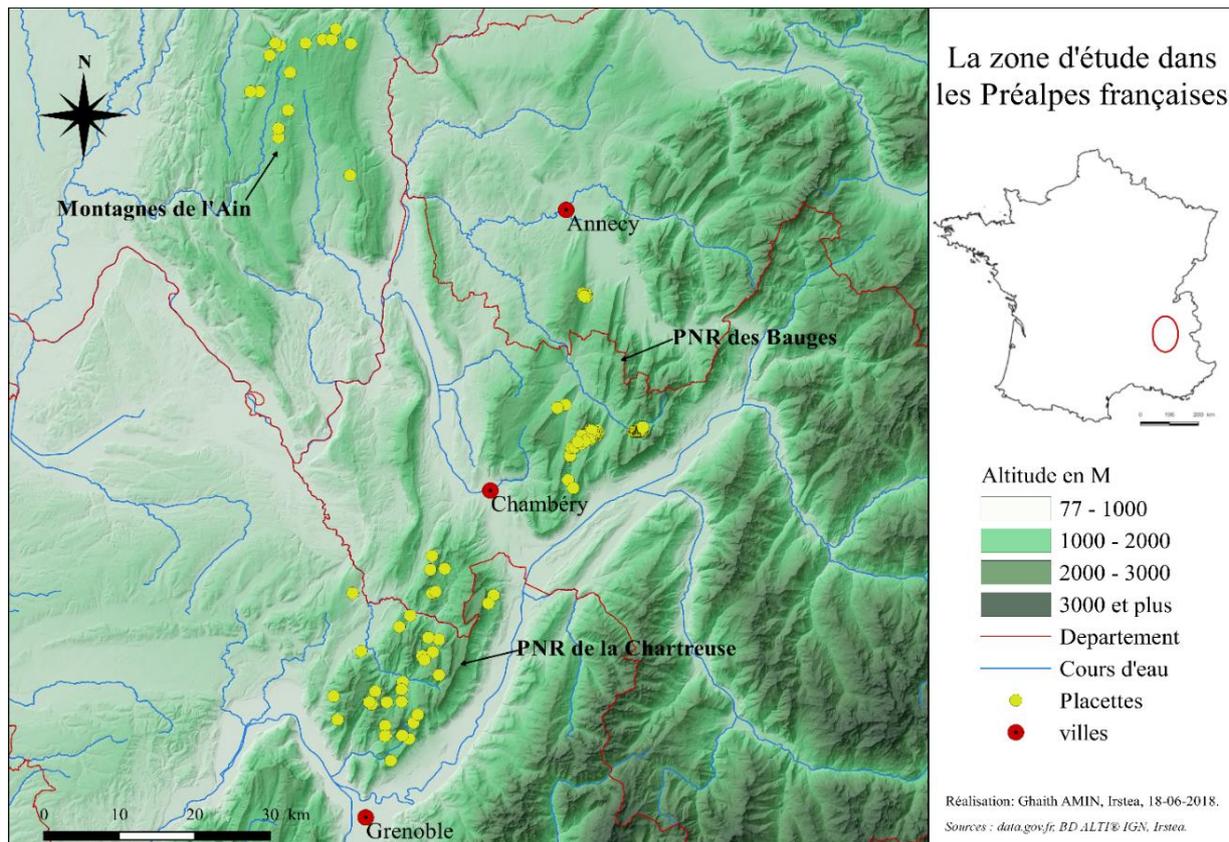


Figure 2 : Présentation de la zone d'étude

2. Données utilisées

Dans une première étape préalable, nous avons utilisé les photographies aériennes de l'IGN pour d'une part, vérifier la qualité des données de terrain, d'autre part détecter visuellement des différences entre forêts matures et forêts non matures (taille des houppiers, arbres morts sur pied, ouverture du couvert).

Pour tester notre première hypothèse (signatures radiométrique et texturale spécifiques aux forêts matures), nous avons cherché des images avec la meilleure résolution spatiale possible. Dans un premier temps, nous avons choisi de travailler sur les images SPOT 6/7 ; dans la deuxième partie du stage, nous travaillerons avec La BD OrthoIRC® de l'IGN© pour extraire les statistiques à partir des bandes rouge, infra-rouge et NDVI car ces images disposent trois bandes (verte, rouge et infrarouge) de très haute résolution spatiale (50 cm).

Pour tester notre deuxième hypothèse, nous avons cherché des images avec un intervalle temporel de l'ordre de la rotation (intervalle de temps entre deux exploitations forestières, environ 10-15 ans) pour étudier la différence d'évolution radiométrique entre forêts matures et non matures. Nous avons retenu des images SPOT5 datant de 2005.

2.1 Photo-aérienne IGN

C'est une base de données d'images numériques en vraies couleurs composée de trois bandes : rouge, verte et bleu. Ces images sont produites par l'IGN©, elles sont orthorectifiées et projetées en Lambert 93. Leur résolution spatiale est de 20 cm et elles sont fournies en dalles de 1 km par 1 km au format ECW. Les orthophotographies utilisées datent de 2013 et 2015 (tableau 1). Malgré la résolution spatiale très fine de ces images, la fréquence d'acquisition est relativement faible, car elles sont mises à jour tous les trois à cinq ans. Les photos aériennes sont fournies gratuitement.

Département	Description	Nombre d'images utilisé	Année
01	Ain	21	2015
38	Isère	32	2015
73	Savoie	26	2013
74	Haute-Savoie	2	2015

Tableau 1 : Liste des images photo-aérienne de l'IGN©

2.2 Données satellites de Spot 6/7

Les images acquises par les satellites SPOT 6/7 ont une fauchée de 60 km. Les images utilisées dans le cadre de cette étude sont orthorectifiées et fournies gratuitement sur le site internet du projet EQUIPEX GEOSUD. Les images SPOT 6/7 utilisées datent de 2016 (tableau 2). Ces satellites disposent deux types d'images (une acquisition en deux modes) :

panchromatique (0,45 μ m à 0,745 μ m, une résolution 1,5 m) et multispectrale (une résolution 6 m, 4 bandes : Bleu 0,450 μ m – 0,520 μ m,

Vert 0,530 μ m – 0,590 μ m,

Rouge 0,625-0,695 μ m, et

Proche infrarouge 0,760 μ m 0,890 μ m. (<https://www.intelligence-airbusds.com/en/147-spot-6-7-satellite-imagery>)

Image	Description	Type	Date
Images multispectrales			
Image 1	S6X_2016062237356290CP	Ortho	22-06-2016
Image 2	S6X_2016062436480422CP	Ortho	24-06-2016

Image 3	S7X_2016070736405684CP	Ortho	07-07-2016
Image 4	S7X_2016070736413385CP	Ortho	07-07-2016
Images Panchromatiques			
Image 1	S6P_2016062237356289CP	Ortho	22-06-2016
Image 2	S6P_2016062436480421CP	Ortho	24-06-2016
Image 3	S7P_2016070736405684CP	Ortho	07-07-2016
Image 4	S7P_2016070736413384CP	Ortho	07-07-2016

Tableau 2 : Liste des images Spot 6/7

2.3 Données satellites de Spot 5

Les images acquises par les satellites SPOT 5 ont une fauchée de 60 km. Les images utilisées dans le cadre de cette étude ne sont pas orthorectifiées et fournies gratuitement sur le site internet du projet EQUIPEX GEOSUD (tableau 3). Ce satellite dispose deux types d'images (une acquisition en deux modes), panchromatique : 0,48 – 0,71 μm d'une résolution de 5 m et multispectral qui contient de 4 bandes :

Vert : 0,50 – 0,59 μm d'une résolution de 10 m, Rouge : 0,61 – 0,68 μm d'une résolution de 10 m, Proche infrarouge : 0,78 – 0,89 μm d'une résolution de 10 m, et Court infrarouge : 1,58 – 1,75 μm à 20 m de résolution. (<https://www.intelligence-airbusds.com/en/4388-spot-1-to-spot-5-satellite-images>)

Nombre	Description	Mode	Type
Image 1	5 049-256/9 05/08/10 10:40:12 1 J Level 1A SAT 9	MS	Brute
Image 2	5 051-258 05/08/05 10:36:39 1 J Level 1A SAT 0	MS	Brute
Image 3	5 049-258 05/08/31 10:36:19 1 A Level 1A SAT 0	MS	Brute
Image 4	5 049-259 05/10/17 10:31:49 2 A Level 1A SAT 0	MS	Brute

Tableau 3 : Liste des images Spot 5

2.4 Relevés de terrain

Nous avons utilisé une base de données regroupant les relevés réalisés dans les Alpes du Nord qui permettent de calculer un indice de maturité forestière en utilisant la méthode proposée par Fuhr et al., (2018).

Les relevés de terrain sont réalisés sur une placette de rayon 20m (figures 3 et 4).

L'indice de maturité, compris entre 0 et 1, se calcule comme suit :

$$IMAT = \frac{1}{4} \left(\frac{G_{TTGB}}{G_{TTGB\max}} + \frac{G_{BMD}}{G_{BMD\max}} + \frac{V_{BMS}}{V_{BMS\max}} + \frac{ND_{BMS}}{ND_{BMS\max}} \right)$$

Avec :

- (G_{TTGB}) Surface terrière des très très gros bois
- (G_{BMD}) Surface terrière des gros bois morts sur pied
- (V_{BMS}) Volume des gros bois morts au sol
- (ND_{BMS}) Nombre de stades de décomposition des gros bois morts au sol

Afin de travailler sur un type de peuplement homogène, nous avons sélectionné les Hêtraies Sapinières fertiles montagnardes (peuplement le plus représenté dans les Préalpes du Nord), pour lesquels les seuils de précomptage sont les suivants :

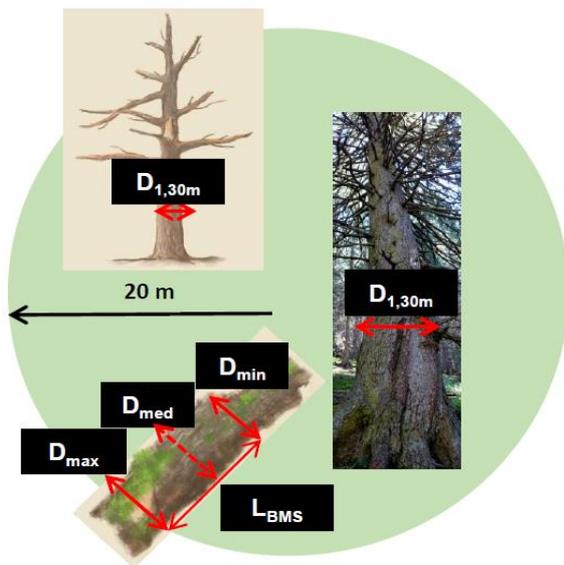


Figure 3 : Le mesure de bois mort sur une placette.

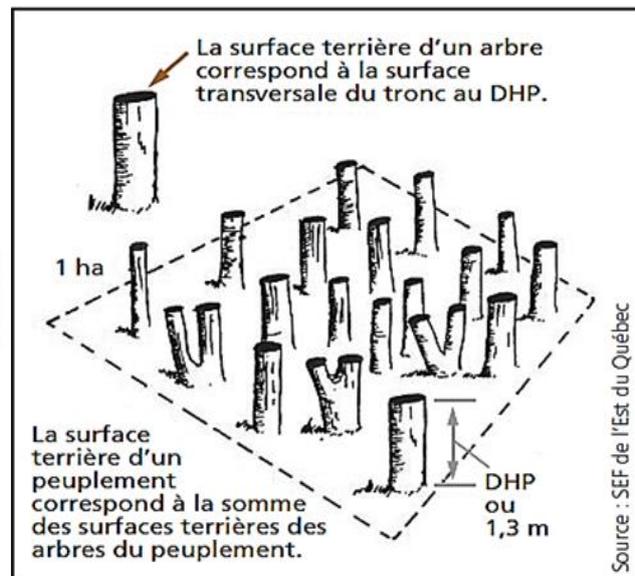


Figure 4 : Le mesure de la surface terrière.

Très très gros bois vivants : ($d_{1,30m} \geq 77,5$ cm).

Gros bois mort sur pied : ($d_{1,30m} \geq 30$ cm).

Gros bois mort au sol : ($d_{min} \geq 30$ cm).

Ce type de peuplement est représenté par 158 placettes dans la base de relevés.

A noter : Toutes les variables extraites sur les images ont été extraites dans un rayon de 30 m autour du centre des placettes de terrain. Ceci correspond au rayon de la placette (20 m), auquel on ajoute une bande tampon de 10 m.

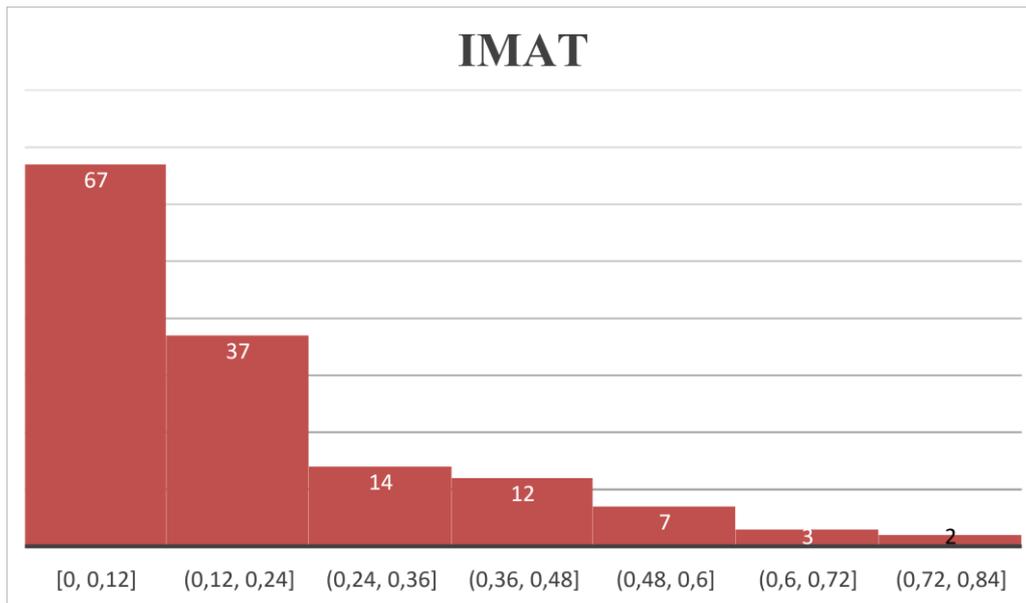


Figure 5 : La distribution de la valeur d'indice de maturité selon la placette.

3. Méthode de traitement

3.1 Photo-interprétation

En préalable, nous avons examiné visuellement les photos aériennes à 0.20m où se situent les placettes de Hetraie-sapiniere, en découpant des cercles de 30m de rayon autour des placettes, pour voir s'il est possible de remarquer des différences de structure entre forêts matures et non matures. Pour cela, nous avons réparti les placettes selon leur valeur d'indice de maturité en trois catégories (A : IM=0, B : IM=0,3 et C : IM > 0,5) puis choisi aléatoirement 10 placettes de chaque catégorie.

3.2 Prétraitement des données satellites

Le prétraitement change selon le type de données utilisées et il regroupe toutes les étapes qui sont faites avant l'analyse d'images pour optimiser la qualité des images initiales.

3.2.1 Correction radiométrique

Les corrections atmosphériques peuvent être très importantes dans notre étude car il y a des variations dans l'illumination des scènes et des effets atmosphériques. La réflectance Top Of Atmosphere TOA donne la part d'énergie solaire réfléchié par la surface terrestre et par l'atmosphère au niveau du capteur et l'utilisation de TOA va permettre d'obtenir des valeurs continues comprises entre 0 et 1 (Cresson et Gaetano, 2017), et des meilleurs résultats

qu'avec les nombres numériques (bits) et de rendre les images comparables entre elles. Il est donc nécessaire de convertir les informations en valeurs de réflectance afin de faciliter la comparaison entre les données.

La correction au Top Of Atmosphere TOA a été réalisée grâce à l'extension **Geosud Reflectance TOA** sur QGIS pour les images SPOT5/6/7 multi-spectrales.

A noter : Dans notre étude il est moins important de convertir la bande panchromatique en TOA. L'extension **Geosud Reflectance TOA** n'est pas adaptée à la bande panchromatique d'images SPOT, il faudra donc réaliser la correction en appliquant la formule de conversion manuellement sous l'application (OTB **OpticalCalibration**) utilisée en ligne commande.

3.2.2 Mosaïque d'images

Nous avons créé une mosaïque à partir d'images SPOT 6/7 orthorectifiée sous **ArcMap**, qui sert à l'orthorectification d'images SPOT 5 brute.

3.2.3 Correction géométrique (Orthorectification).

L'objectif de l'orthorectification d'une image satellite consiste à la présenter comme si elle avait été acquise à la verticale (au nadir) pour pouvoir la superposer à une carte (plat). Le but de ce traitement est d'enlever les effets de perspective (Figure 6), et de relief (Figure 7). L'image orthorectifiée permet d'effectuer une mesure directe et précise des distances, des angles, et des surfaces. (Cresson et Gaetano, 2017).

Normalement, une image satellite brute ne possède ni métadonnées ni système de coordonnées. Après orthorectification, un datum (système géodésique) lui est associé, avec des métadonnées relatives à l'information spatiale de l'image. Par exemple : la projection de référence, la taille du pixel dans les deux dimensions. (Cresson et Raffaele, 2017)

Pour réaliser l'orthorectification de nos images satellites SPOT5 de 2005, nous avons utilisé la méthode « Orthorectification avec points d'amer » qui permet d'obtenir une meilleure précision. Le traitement a été effectué à partir d'une image de référence de la même zone déjà orthorectifiée (SPOT6/7-Ortho) et d'un modèle numérique de terrain MNT de l'IGN© à 25 m.

L'orthorectification se fait en trois étapes, (application utilisée en ligne commande, Figure 7) :

1-Jeté de points, application OTB **HomologousPointExtraction**

2-Affinage du modèle de capteur, application OTB **RefineSensorModel**

3-Orthorectification à partir de modèle de capteur affiné dans l'étape précédent, application

OTB Orthorectification

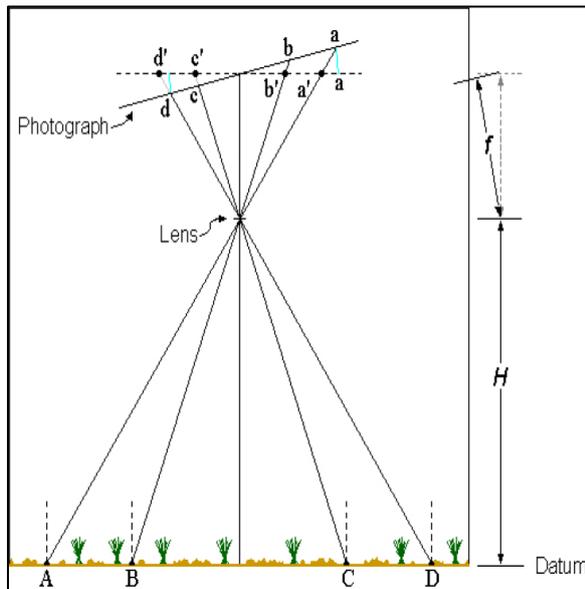


Figure 6 : Les effets de perspective sont causés par l'inclinaison du capteur par rapport à la surface observée. Le schéma (1) ci-dessus montre que les distances A-B et C-D sont identiques dans le plan du datum, mais leurs représentations correspondantes dans le plan de l'image ne le sont pas (Source : Cresson et Raffaele, 2017).

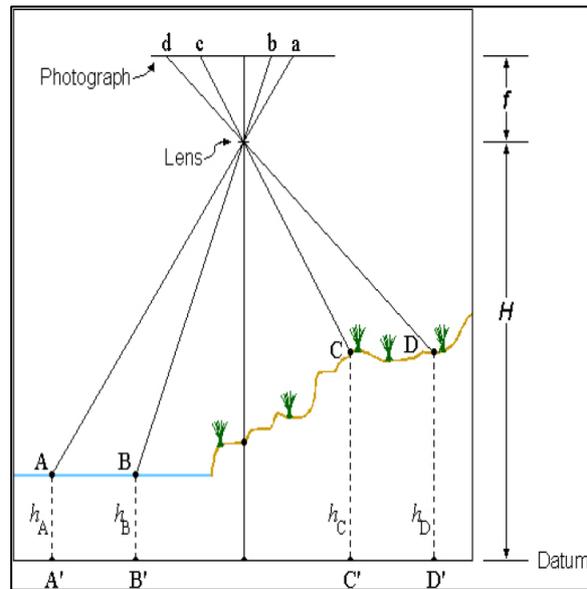


Figure 7 : L'élévation du relief au dessus du datum crée un déplacement de la positions des objets dans le plan de l'image. Le schéma ci-dessus montre que les distances AB et C-D sont identiques dans le plan du datum, mais leur représentations correspondantes dans le plan de l'image ne le sont pas (Source : Cresson et Raffaele, 2017).

Complete documentation: <http://www.orfeo-toolbox.org/Applications/OrthoRectification.html>

```

Parameters:
  -progress <boolean> Report progress
MISSING -io.in <string> Input Image (mandatory)
MISSING -io.out <string> [pixel] Output Image [pixel=uint8/uint16/int16/uint32/int
  -map <string> Output Cartographic Map Projection [utm/lambert2/
  -map.utm.zone <int32> Zone number (mandatory, default value is 31)
  -map.utm.northhem <boolean> Northern Hemisphere (optional, off by default)
  -map.epsg.code <int32> EPSG Code (mandatory, default value is 4326)
  -outputs.mode <string> Parameters estimation modes [auto/autosize/autospa
MISSING -outputs.ulx <float> Upper Left X (mandatory)
MISSING -outputs.uly <float> Upper Left Y (mandatory)
MISSING -outputs.sizeX <int32> Size X (mandatory)
MISSING -outputs.sizeY <int32> Size Y (mandatory)
MISSING -outputs.spacingX <float> Pixel Size X (mandatory)
MISSING -outputs.spacingY <float> Pixel Size Y (mandatory)
  -outputs.lrx <float> Lower right X (optional, off by default)
  -outputs.lry <float> Lower right Y (optional, off by default)
  -outputs.ortho <string> Model ortho-image (optional, off by default)
  -outputs.isotropic <boolean> Force isotropic spacing by default (optional, on
  -outputs.default <float> Default pixel value (optional, on by default, dei
  -elev.dem <string> DEM directory (optional, off by default)
  -elev.geoid <string> Geoid File (optional, off by default)
  -elev.default <float> Default elevation (mandatory, default value is 0)
  -interpolator <string> Interpolation [bco/nn/linear] (mandatory, default
  -interpolator.bco.radius <int32> Radius for bicubic interpolation (mandatory, defe
  -opt.rpc <int32> RPC modeling (points per axis) (optional, off by
  -opt.ram <int32> Available RAM (Mb) (optional, off by default, dei
  -opt.gridspacing <float> Resampling grid spacing (optional, on by default, dei
  -inxml <string> Load otb application from xml file (optional, off

```

Figure 8 : Orthorectification en ligne commande

3.3 L'analyse des images satellites

3.3.1 L'analyse radiométrique

Deux méthodes peuvent être appliquées afin d'extraire des informations d'une image satellite en télédétection : utiliser directement les informations radiométriques brutes (enregistrées au niveau de chaque pixel dans l'image et pour chaque bande), ou calculer des indices spectraux. Le calcul des indices repose sur les écarts de réflectance dans les différentes bandes spectrales, et sur la variabilité des réflectances dans la même bande spectrale, qui traduisent différents types de surfaces. Pour étudier la végétation, on utilise souvent les caractéristiques dans les domaines spectraux du rouge et du proche infrarouge : les réflectances dans le proche infrarouge. En effet, plus la couverture végétale est dense, plus les valeurs de réflectance augmentent dans le PIR (forte réflexion par le parenchyme lacuneux, univ-paris1.fr) et plus elles diminuent dans la bande rouge (pic d'absorption de la chlorophylle). Le sol nu ou sans végétation présente un réflectance qui varie selon leur teneur en eau. (Figure 9, ci-dessous). (<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/vegetation/indices/principe.html>)

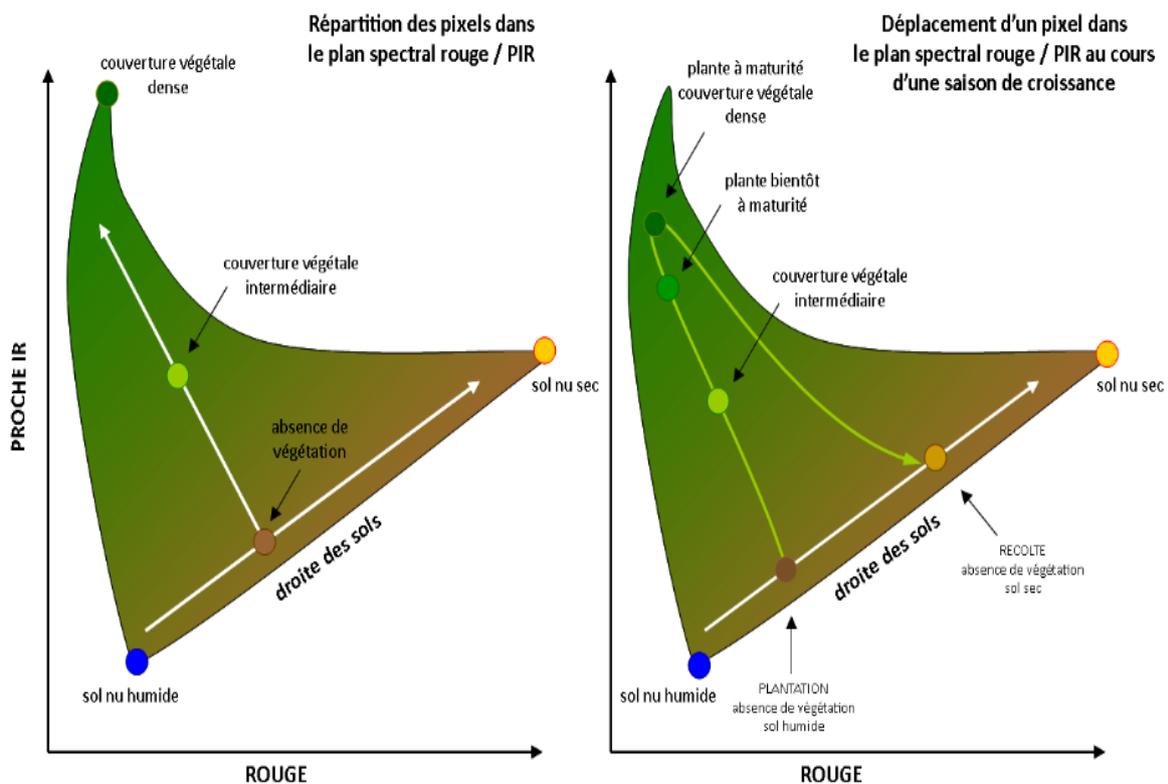


Figure 9 : Le réflectance sur les bandes rouge et proche infrarouge.

Un indice très souvent utilisé pour la végétation est le le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), qui combine les canaux (bandes) rouge (faible réflectance) et proche infrarouge (forte réflectance). Il se calcule ainsi :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}} \quad \begin{array}{l} \text{NIR} = \text{proche infrarouge.} \\ \text{R} = \text{rouge} \end{array}$$

Où NIR est la réflectance mesurée dans le domaine proche infrarouge, et R est la réflectance mesurée dans le domaine visible de la couleur rouge.

Nous avons calculé le NDVI avec l'application OTB **Radiometric Indices** sur toutes les images de SPOT6/7. Nous les calculerons sur les images SPOT5 orthorectifiées dans la suite du stage.

Pour éviter les effets d'ombre, nous avons également calculé un NDVI sans ombre (NDVO) pour chaque placette, de la manière suivante :

La première étape consiste à déterminer un seuil (valeur de pixel) au-dessous duquel toutes les valeurs sont considérées comme des ombres (valeurs au-dessus considérées comme des végétations ou des surfaces naturelles). Grâce à l'application OTB **Band Math** nous avons appliqué une formule sur la bande panchromatique pour construire un masque d'ombre (figure 10) applicable sur la bande NDVI de l'image. **Im1b1<valeur?0 :1.**

La deuxième étape consiste à multiplier la bande masque par la bande NDVI pour convertir les pixels ombre à zéro (figure 11). Cela s'est fait sous QGIS en utilisant l'extension Calculatrice Raster. La troisième étape consiste à appliquer ce masque pour convertir les valeurs de pixels ombre = 0 à sans données (Nodata), grâce à l'application OTB **No Data management**. (Figure 12).

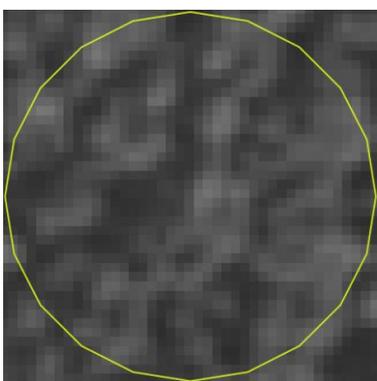


Figure 10 : Panchromatique

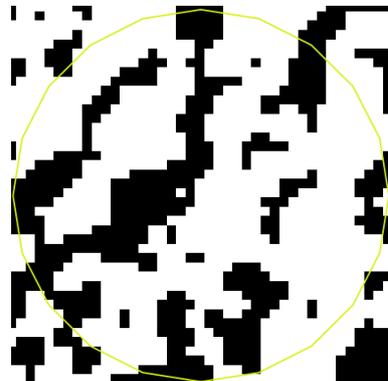


Figure 11 : Masque

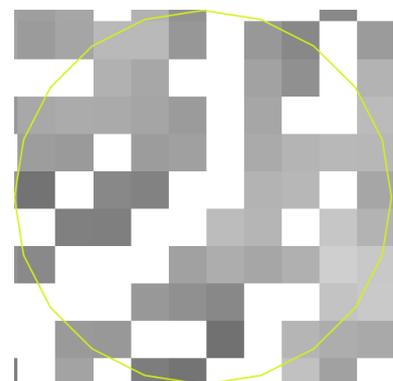


Figure 12 : NDVI plus Masque

3.3.2 L'analyse texturale

‘La texture décrit l'effet visuel qui est produit par une surface ayant des variations du ton de gris qui présente une apparence d'homogénéité sur l'ensemble ‘ (Collet, 2001 ; in Yousra HAMROUNI, 2015). L'analyse de texture est une méthode qui décrit l'information spatialisée souvent utilisée en télédétection (Thierion et al., 2014). L'analyse de texture produit une variabilité spatiale qui peut être couplée aux données spectrales dans certaines méthodes de télédétection (Zhang et Xie, 2012).

Sur une image satellite de très bonne résolution spatiale (ex : bande panchromatique de spot6/7 à 1,5m) ou mieux sur une image aérienne de très haute résolution spatiale à 50 cm, la notion de texture peut être tout de suite détectée, en prenant l'exemple de Hamrouni, (2015) sur la différence de texture entre des forêts de feuillus et de conifères qui est évidente dans les images suivantes (figure 12 et 13).

Haralick et al., (1973) ont proposé de nombreux indices pour décrire la structure des images. L'application OTB regroupe ces indices en trois niveaux (simple, avancé et élevé).

Dans cette première partie de stage, nous avons calculé le niveau simple : il regroupe huit indices calculés à partir de la matrice des niveaux de gris appelée matrice de cooccurrence (GLCM pour Grey Level Cooccurrence Matrix) (Figure 14) et selon un voisinage prédéfini.

- 1- énergie (uniformité de texture)
- 2- entropie (mesure du caractère aléatoire de l'image d'intensité)
- 3- corrélation (corrélation entre un pixel et son voisinage)
- 4- moment de différence inverse (mesure de l'homogénéité)
- 5- inertie (contraste d'intensité entre un pixel et son voisinage)
- 6- Cluster Shade, 7- Cluster Prominence, 8- Haralick Correlation. (www.orfeo-toolbox.org).

Le calcul a été effectué sous l'application OTB **Haralick Texture Extraction** sur les images panchromatiques de SPOT6/7 de 2016.



Figure 13 : Forêt de feuillus,
Source : Ortho®IRC IGN©, 2010

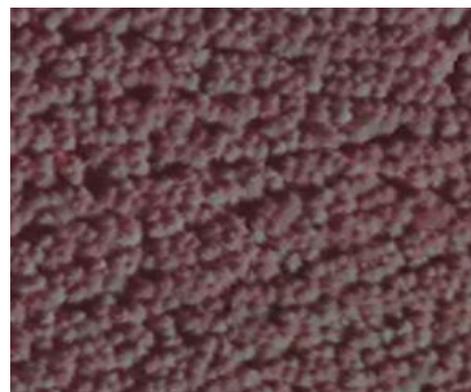


Figure 14 : Forêt de conifères,
Source : Ortho®IRC IGN©, 2010

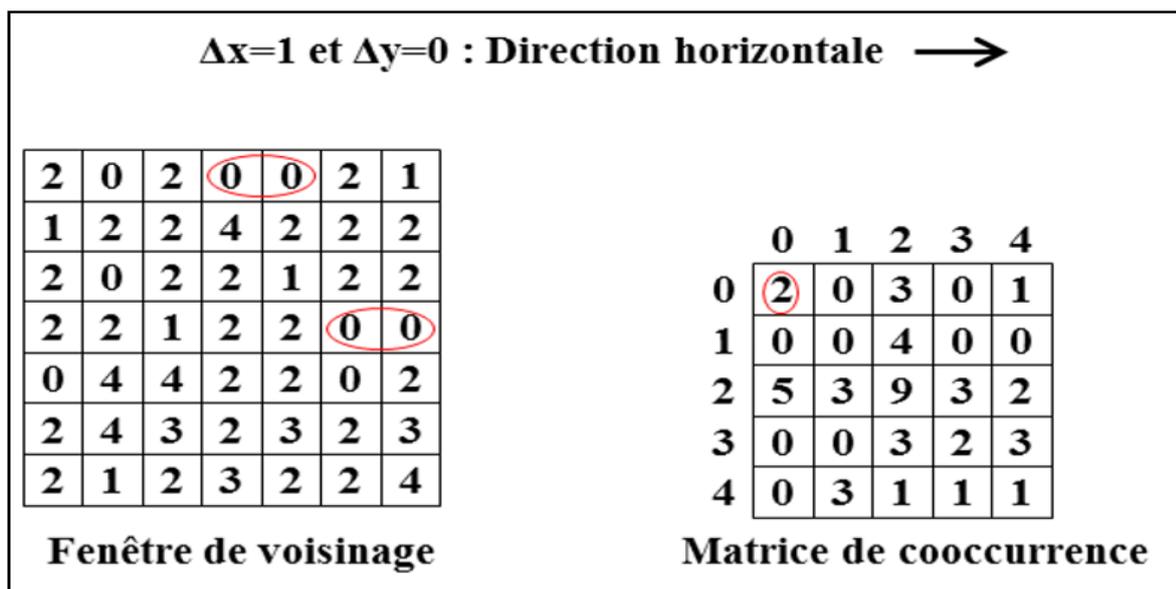


Figure 15 : Exemple de matrice de cooccurrence. Source : Hamrouni, (2015)

3.4 L'extraction des données et le choix de valeurs statistiques à prendre en compte.

Nous avons calculé les statistiques descriptives (tableau 3) sur toutes les bandes de toutes les images SPOT6/7 avec l'extension **Statistiques de zones** de QGIS, en utilisant un fichier shapfile qui est la zone tampon (placette) de 30 m géoréférencée avec un système de projection Lambert 93. Les variables en rouge sont les variables retenues pour le modèle pour toutes les bandes spectrales, et pour les bandes d'Haralik nous avons retenu que la moyenne.

Type de bande		Statistique descriptive	Indice de terrain
Bleu, B1	Haralik-B5	min	GTTGB
Verte, B2	Haralik-B6	max	GBMD30
Rouge, B3	Haralik-B7	sum	VBMS30
Infrarouge, B4	Haralik-B8	count	IMAT
NDVI		Mean (moyenne)	
NDVI Sans ombre		Std (Écart type)	
Panchromatique		unique	
Haralik-B1		range	
Haralik-B2		Var (variance)	
Haralik-B3		median	
Haralik-B4		mode	

Tableau 4 : statistiques descriptives calculées

4. Construire un modèle statistique

L'objectif de la modélisation est de relier une variable à prédire (l'indice de maturité) à des variables prédictives (toutes les variables retenue de l'analyse des images SPOT6/7, 43 variables). En première approche dans le cadre du stage, nous avons choisi de construire un modèle linéaire généralisé, du type :

$$\text{IMAT} = a \times \text{var1} + b \times \text{var2} + \dots + R$$

Nous procédons en deux étapes :

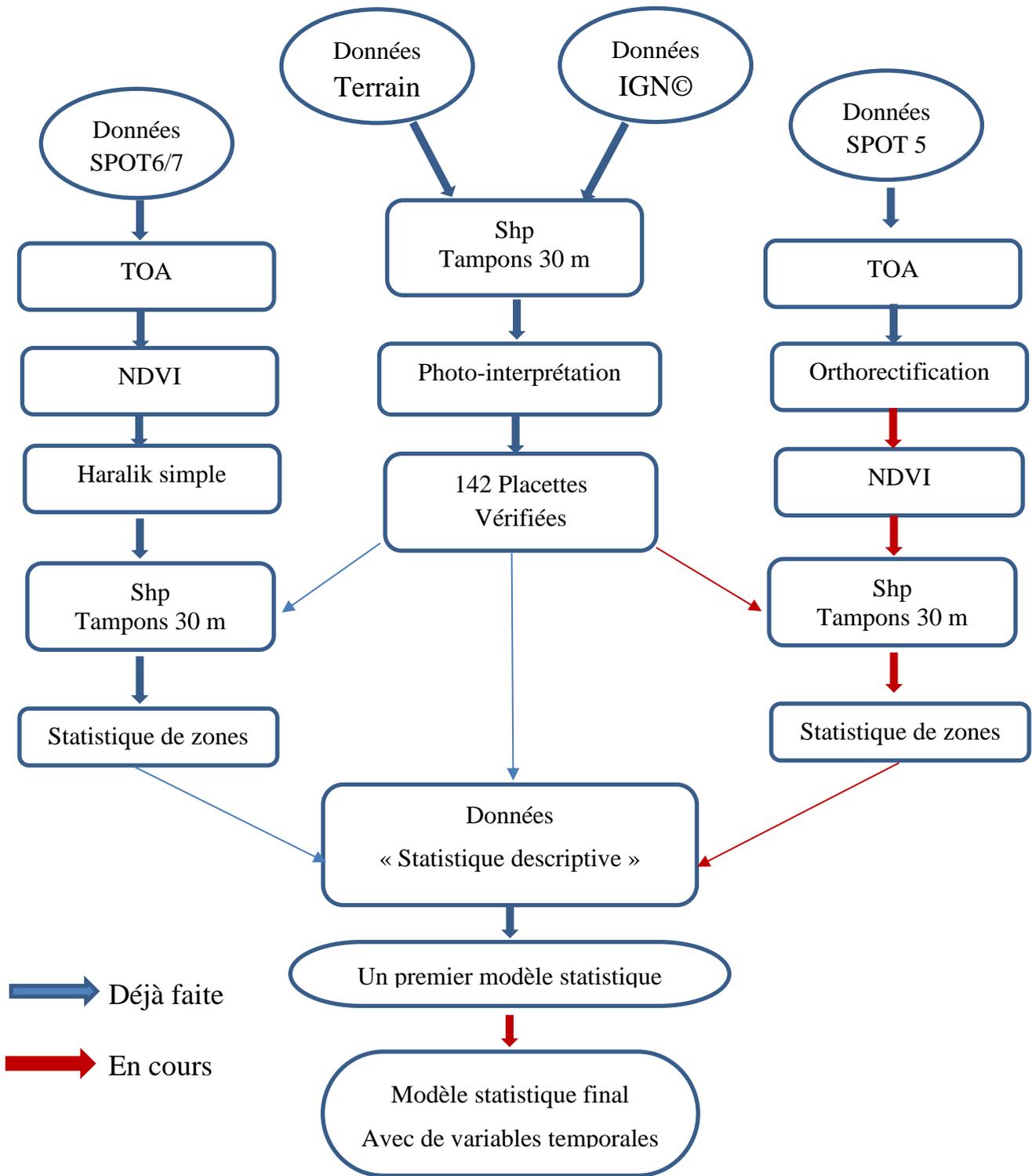
Étape 1 : sélection de variables à inclure dans le modèle

On a trop de variables explicatives candidates, on va donc sélectionner celles qui semblent le plus pertinentes pour les inclure dans le modèle. Il existe plusieurs méthodes pour faire cela. Nous avons réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP). Ceci consiste à placer nos relevés (142) dans un espace à 43 dimensions (toutes les variables explicatives), à rechercher les axes qui structurent cet espace, puis à identifier les variables qui contribuent le plus à ces axes. Lorsque ces variables sont très corrélées (« l'une prédit l'autre »), nous choisissons d'utiliser l'une d'entre elles (celle qui contribue le plus à l'axe ou celle qui est la plus facile à interpréter).

Étape 2 : nous construisons le modèle pas à pas à partir des variables sélectionnées, en testant pas à pas l'effet de chaque variable sur la qualité du modèle (R²).

Tous les calculs ont été réalisés avec le **logiciel R**.

5. Schéma méthodologique



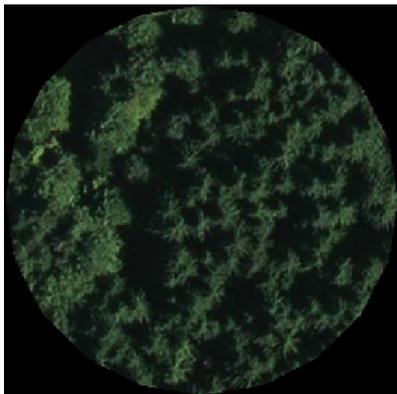
Partie III - RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Photo-interprétation préalable

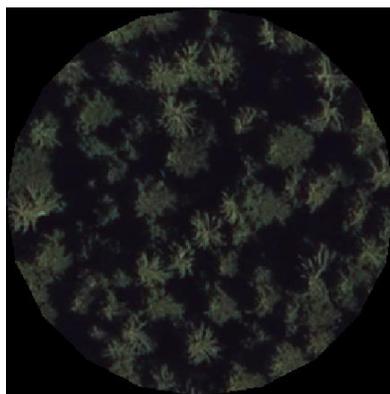
L'analyse visuelle des photographies aériennes fait ressortir les points suivants :

- 1- Il y a une grande hétérogénéité des textures dans chaque classe de maturité (Ex : A : IM=0).
- 2- Le bois sur pies s'observe fréquemment dans les catégories B (IM=0,3) et C (IM > 0,5)
- 3- Par contre, nous n'observons pas de différence notable au niveau de la taille des arbres ni entre les catégories ni dans la même catégorie (cela n'augmente pas avec l'indice de maturité).

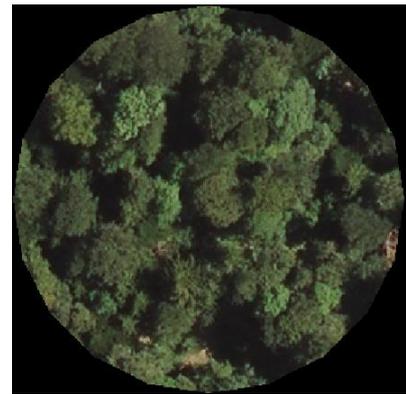
Au cours de cette photo-interprétation préalable phase, nous avons détecté 16 placettes à enlever de notre base de données (placette traversée par une route, un sentier ; présence d'une pelouse ex : placette B4 ci-après). Il reste donc 142 placettes dans notre base de relevés de terrain.



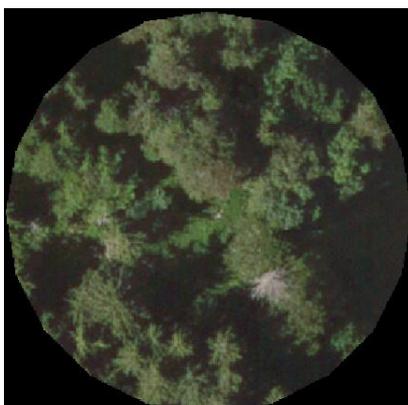
Placette A6



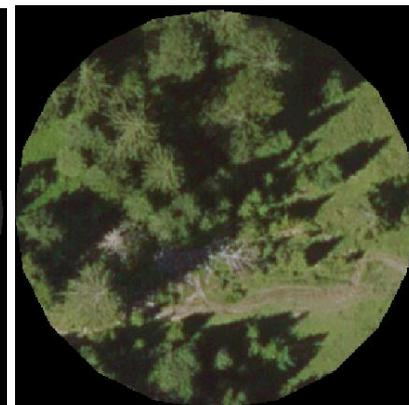
Placette A7



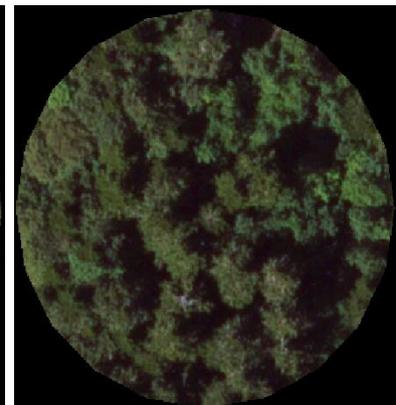
Placette A8



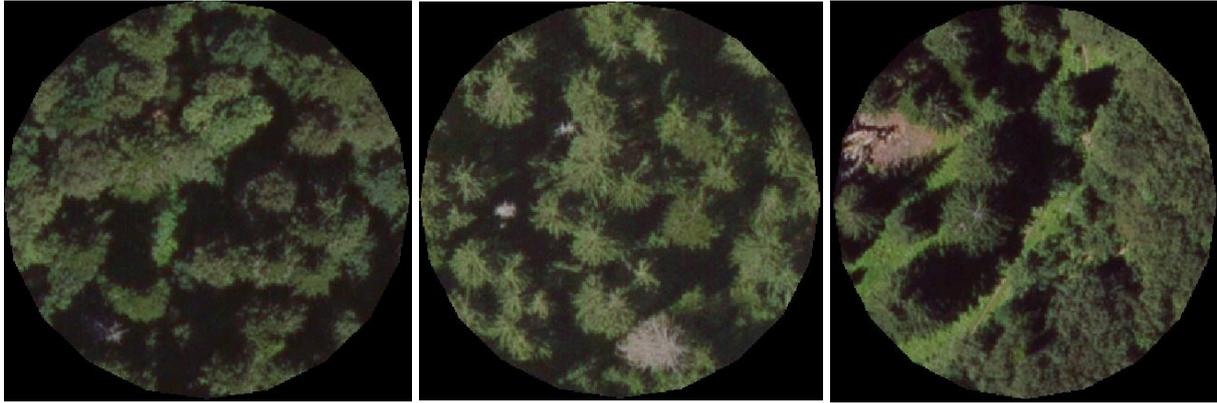
Placette B3



Placette B4



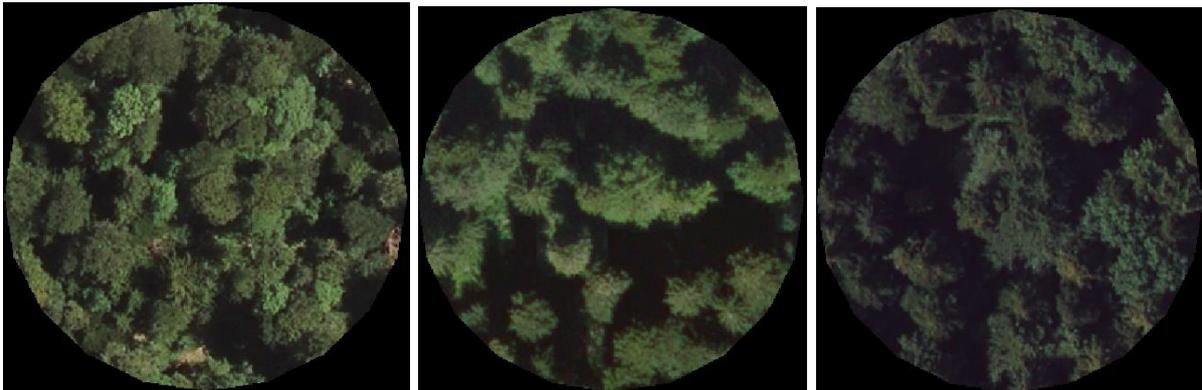
Placette B7



Placette C1

Placette C5

Placette C7



Placette A6

Placette B4

Placette C9

3.2 Résultat issu de la modélisation

Nous avons retenu les 3 premiers axes de l'ACP qui expliquent près de 90 % de la variance totale de l'espace des variables : L'axe 1 explique 65% de variance, les axes 2 et 3 expliquent chacun 12% de variance, nous n'avons pas retenu l'axe 4 car il explique moins de 4% (Figure 17).

Les variables qui contribuent le plus à l'axe 1 correspondent principalement aux maxima des réflectances dans les différentes bandes spectrales (B1_max, B2_max, B3_max) auxquelles s'ajoutent B3_med, P_med, et une grande partie des indices d'Haralick. Elles sont très fortement corrélées entre elles, sauf pour H7_mean. Nous avons conservé **B3_max** et **H7_mean**.

Les variables qui contribuent le plus à l'axe 2 correspondent principalement aux écarts types des réflectances dans les différentes bandes spectrales. Nous avons conservé **B2_std**.

Pour l'axe 3, nous avons respectivement conservé la variable **NDVIO_mean**.

Le modèle obtenu est pour l'instant très peu explicatif (R^2 multiple = 0,12 pour les deux variables retenues) et (R^2 ajusté = 0.1046 quand nous intégrons deux variables dans le modèle, et le R^2 diminue à 0,1041 quand nous rajoutons la troisième variable **B2_std** et à 0,0981 à l'ajout de quatrième variable **NDVIO_mean**). Il fait cependant ressortir un effet positif significatif de deux variables sur l'indice de maturité : le maximum de réflectance dans la bande 3 (rouge) et la valeur moyenne de l'indice d'Haralick 7 (Cluster Prominence). (Figures 18 et 19)

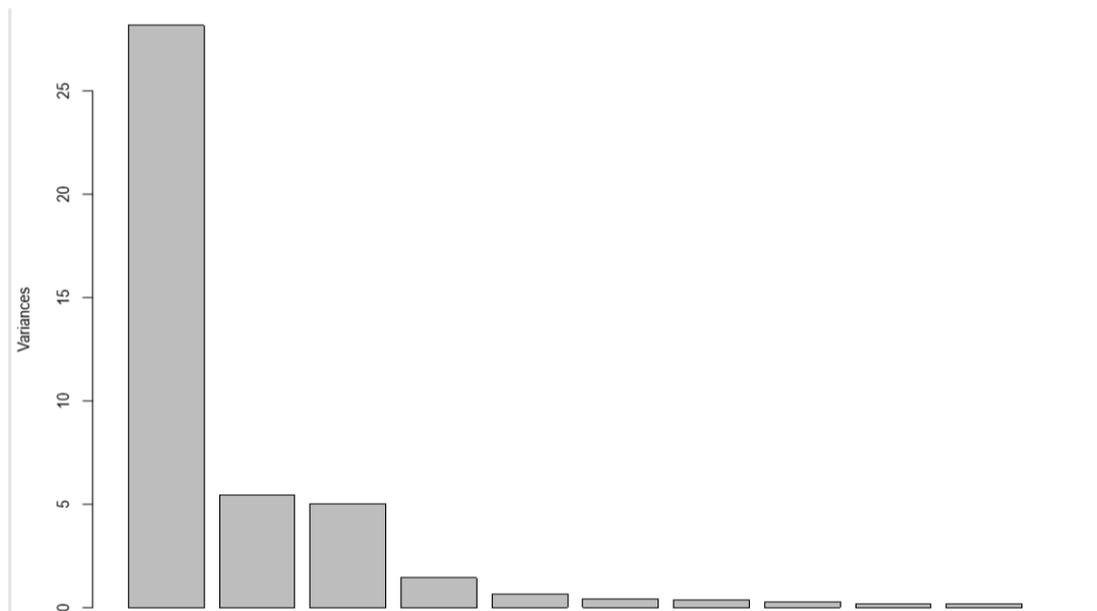


Figure 17 : Les axes de l'ACP

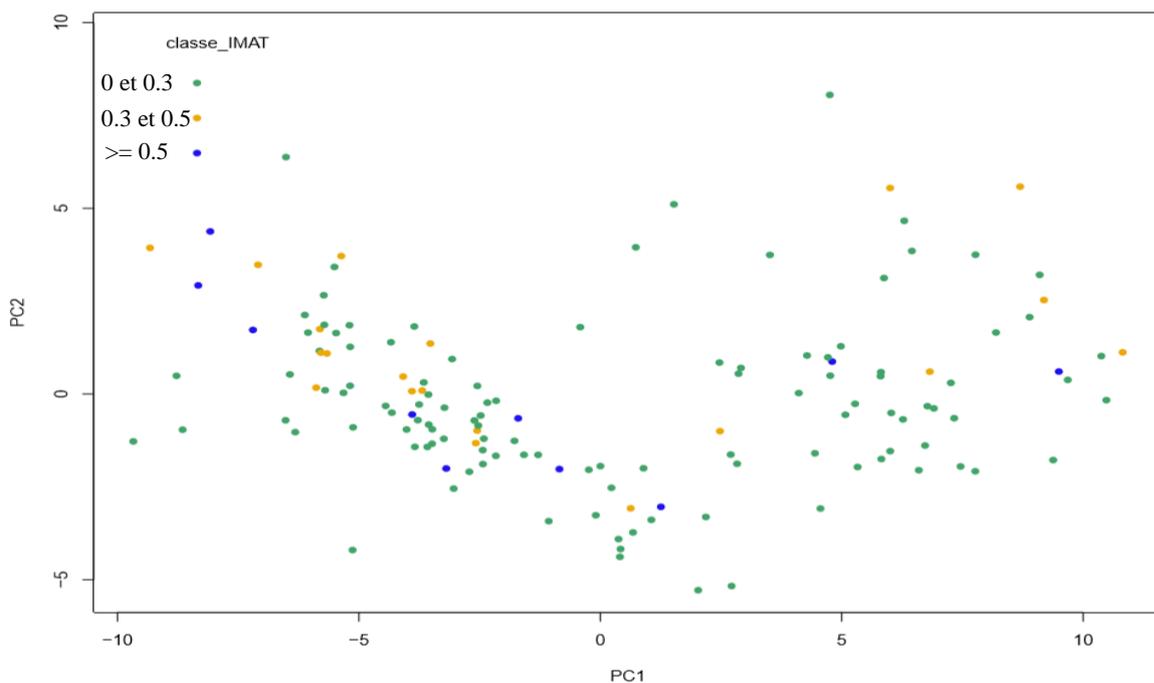


Figure 18 : La distribution des relevés selon les axes 1 et 2.

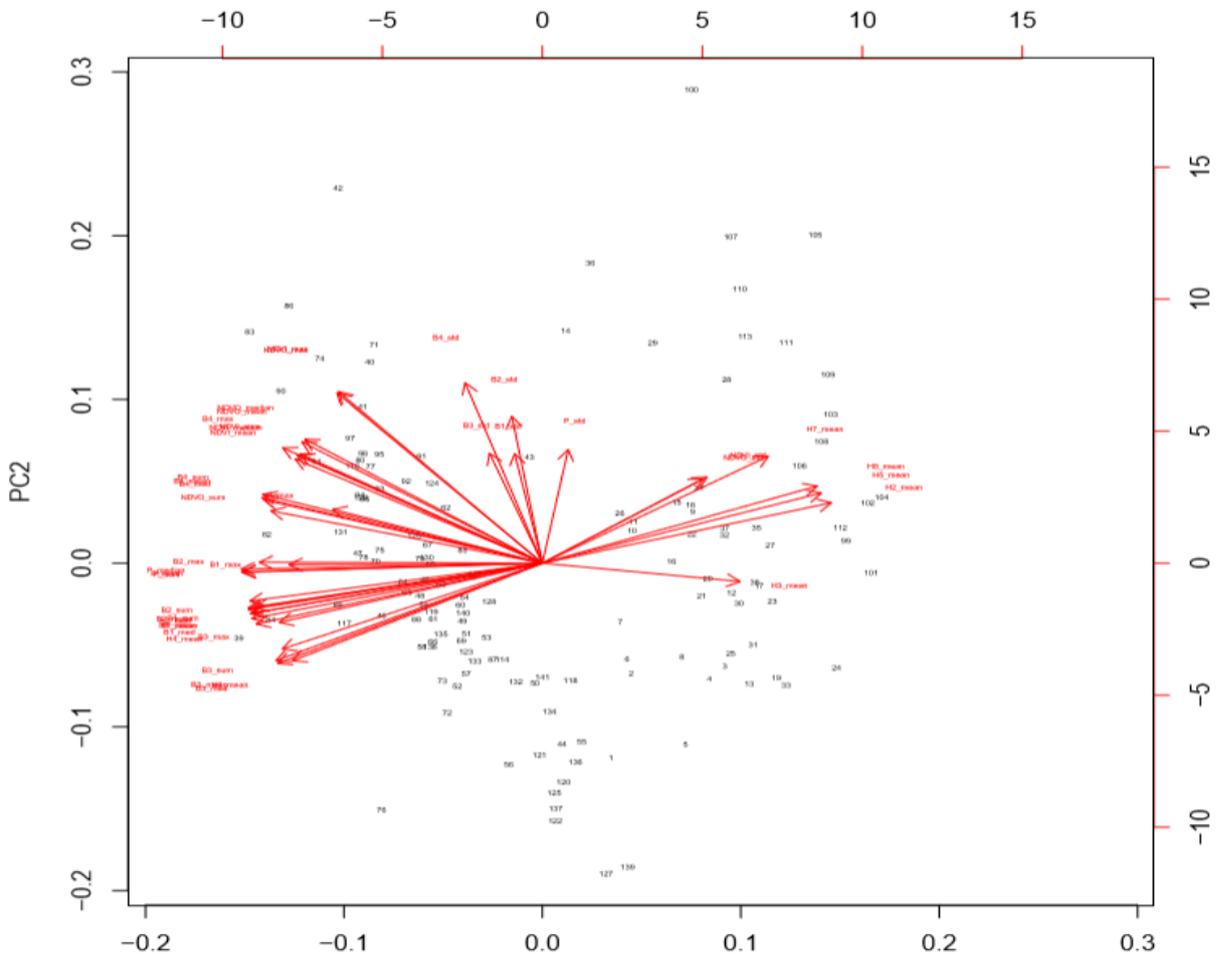


Figure 19 : Les variables statistiques selon les axes 1 et 2.

3. Perspectives

Dans la deuxième partie de ce stage, nous allons extraire de nouvelles variables pour tenter d'améliorer la qualité du modèle. Ces nouvelles variables sont :

les données des images Spot 5 de 2005 pour inclure l'évolution temporelle des signatures radiométriques,

un NDVI plus précis calculé à partir de la base de données IRC® de l'IGN© de 2013 à 50 m, des indices de texture supplémentaires (Haralick Advanced) sur un certain nombre d'images IRC®, à savoir :

- 1- Moyenne (Mean), 2- Variance (mesure l'hétérogénéité de la texture), 3- Dissimilarité (Dissimilarity), 4- Somme moyenne (Sum Average), 5- Variance de somme (Sum Variance), 6- Somme entropie (Sum Entropy), 7- Différence d'Entropies (Difference of Entropies), 8- Différence de variances (Difference of Variances), 9- Indice de

coloration (IC1), 10- Indice de coloration (IC2). (Source : https://www.orfeo-toolbox.org/CookBook/Applications/app_HaralickTextureExtraction.html)

Puis nous construirons un modèle avec une démarche rigoureuse de validation (70 % des relevés de terrain pour construire le modèle, 30 % pour valider).

Partie V – CONCLUSION

Ce travail exploratoire a permis de mettre au point une méthode d'extraction de variables issues d'images à haute et très haute résolution spatiale potentiellement intéressantes pour construire un modèle de prédiction de la maturité des forêts. Le modèle obtenu est pour l'instant très peu explicatif ($R^2 = 0,12$). Pourtant il fait ressortir un effet positif significatif de deux variables sur l'indice de maturité : le maximum de réflectance dans la bande 3 (Rouge) et la valeur moyenne de l'indice d'Haralick 7 (Cluster Prominence).

De nouvelles variables sont en cours d'extractions (données temporelles, images à plus haute résolution) pour poursuivre cette démarche afin de construire un modèle plus explicatif.

Bibliographie

- Bigot, S., Rome, S., 2010. Contraintes climatiques dans les Préalpes françaises : évolution récente et conséquences potentielles futures. *EchoGéo* 14, 1–21.
- Cresson R., Gaetano R. Formation aux applications de l'Orfeo ToolBox (OTB), Version 2.2, Maison de la Télédétection, 23-25 Novembre 2017.
- Durrieu S., Deshayes M., 1994. Méthode de comparaison d'images satellitaires pour la détection des changements en milieu forestier. Application aux monts de Lacaune (Tarn, France). *AnnSciFOR*, 51, 147-161.
- Forest Europe, 2015. State of Europe's forests. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe.
- Fuhr M. et al. (2018). Protocole terrain d'identification des forêts matures, Projet PSDR OUI-GEF, Rhône Alpes, Série Focus PSDR4.
- JANSSEN P., 2016. Influences relatives de l'ancienneté et de la maturité sur la biodiversité implications pour la conservation en forêts de montagne, Thèse de doctorat, Université de Grenoble Alpes, 253 p.
- Johansen K., Coops N.C. Gergel S.E., Stange Y., 2007. Application of high spatial resolution satellite imagery for riparian and forest ecosystem classification. *Remote Sensing of Environment*, 29–44.
- Hamrouni Y. 2015. Utilisation de l'analyse de texture sur des images de très haute résolution spatiale pour la cartographie physiologique de la végétation : comparaison des images SPOT 6/7 aux orthophotographies de l'IGN. Mémoire de fin d'études, Diplôme d'Ingénieur Agronome, AgroTIC, Montpellier SupAgro. 91.
- Haralick, R.M., Shanmugam, K., and Dinstein, I., 1973. Textural Features for Image Classification. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 3, 6, 610–621.

- Gao, T., Hedblom, M., Emilsson, T., Nielsen, A.B., 2014. The role of forest stand structure as biodiversity indicator. *Forest Ecology and Management* 330, 82–93.
- Lassauce, A., Paillet, Y., Jactel, H., Bouget, C., 2011. Deadwood as a surrogate for forest biodiversity: Meta-analysis of correlations between deadwood volume and species richness of saproxylic organisms. *Ecological Indicators* 11, 1027–1039.
- Lindenmayer, D.B., Margules, C.R., Botkin, D.B., 2000. Indicators of biodiversity for ecologically sustainable forest management. *Conservation Biology* 14, 941–950.
- Nascimbene, J., Thor, G., Nimis, P.L., 2013b. Effects of forest management on epiphytic lichens in temperate deciduous forests of Europe – A review. *Forest Ecology and Management* 298, 27–38.
- Nilsson, S.G., Baranowski, R., 1997. Habitat predictability and the occurrence of wood beetles in oldgrowth beech forests. *Ecography* 20, 491–498.
- Paillet, Y., Bergès, L., Hjalten, J., Ódor, P., Avon, C., Bernhardt-Römermann, M., Bijlsma, R.-J., De Bruyn, L., Fuhr, M., Grandin, U., Kanka, R., Lundin, L., Luque, S., Magura, T., Matesanz, S., Mészáros, I., Sebastià, M.-T., Schmidt, W., Standovár, T., Tóthmérész, B., Uotila, A., Valladares, F., Vellak, K., Virtanen, R., 2009. Biodiversity Differences between Managed and Unmanaged Forests: Meta-Analysis of Species Richness in Europe. *Conservation Biology* 24, 101–112.
- Rich R.L., Frelich L., Reich P.B., Bauer M.E., 2010. Detecting wind disturbance severity and canopy heterogeneity in boreal forest by coupling high-spatial resolution satellite imagery and field data. *Remote Sensing of Environment* 114 (2), 299-308.
- Thierion, V., Alleaume, S., Jacqueminet, C., Vigneau, C., Renaud, J.R., Michel, K., Breton, V., and Luque, S., 2014. The potential of Pléiades imagery for vegetation mapping : an example of grasslands and pastoral environments. *Rev. Fr. Photogrammétrie Télédétection* 6.

- Zhang, C., and Xie, Z., 2012. Combining object-based texture measures with a neural network for vegetation mapping in the Everglades from hyperspectral imagery. Remote Sensing of Environment, 142, 310–320.

Sitographie

<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/vegetation/indices/principe.html> ,
consulté le 10/06/2018.

<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/index.html>, consulté le
10/06/2018.

https://www.orfeo-toolbox.org/CookBook/Applications/app_HaralickTextureExtraction.html,
consulté le 10/06/2018.

<https://www.intelligence-airbusds.com/en/4388-spot-1-to-spot-5-satellite-images>, consulté le
10/06/2018.

<https://www.intelligence-airbusds.com/en/147-spot-6-7-satellite-imagery> , consulté le
10/06/2018.