

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Conservatoire National des Arts et Métiers
Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes
1 Boulevard Pythagore - 72000 LE MANS



Mémoire de travail de fin d'études
présenté en vue de l'obtention du
Diplôme d'Ingénieur de l'ESGT

***Analyse rétrospective par télédétection de l'évolution du dépérissement
des Sapins pectinés (abies alba) sur le Mont Ventoux***



Mémoire soutenu par :

«Lavorini Damien»
Le « 30 juin 2010

Membres du jury

Président : *M. Pierre Clergeot*
Professeur référent : *M. Laurent Polidori*
Maîtres de stage : *M. Frédéric Baret*
M. André Chanzy
Mme Marie Weiss
Mlle Marie Nourtier

Remerciements

Je tiens à remercier dans un premier temps, toute l'équipe pédagogique de l'ESGT et les intervenants professionnels responsables de ma formation, pour en avoir assuré la partie théorique.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Laurent POLIDORI pour l'aide et les conseils concernant les missions évoquées dans ce mémoire, qu'il a pu m'apporter lors des différents suivis.

Je témoigne toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'elles m'ont faite vivre durant ces vingt semaines au sein de l'INRA :

Monsieur Frédéric BARET, mon maitre de stage, pour son accueil ainsi que la confiance qu'il m'a accordée dès mon arrivée à l'INRA,

Madame Marie WEISS, Mademoiselle Marie NOURTIER, et Monsieur André CHANZY, mes autres maitres de stages, pour m'avoir intégré rapidement au sein de l'entreprise et m'avoir accordé toute leur confiance ; pour le temps qu'elles m'ont consacré tout au long de cette période, sachant répondre à toutes mes interrogations ; sans oublier leur participation au cheminement de ce mémoire,

Messieurs Maxime CAILLERET, Hendrik DAVI, et Christian PICHOT, de l'Unité Ecologie des Forêts Méditerranéennes de l'INRA, pour l'ensemble des données qu'ils ont pu me transmettre,

Monsieur Sergio CASTILLO pour son aide concernant l'utilisation de certains logiciels (Matlab, ArcGis, ...),

L'ensemble des chercheurs, techniciens, et stagiaires de l'Unité Mixte de Recherche Environnement Méditerranée et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes de l'INRA pour leur accueil sympathique et leur coopération professionnelle tout au long de ces vingt semaines.

Table des matières

Remerciements	2
Table des matières	3
Introduction	5
I) Contexte et stratégie de l'étude	7
1) Contexte de l'étude	7
A) L'INRA.....	7
B) Encadrement.....	7
2) Le projet DRYADE	8
3) Présentation générale et objectifs du stage	8
4) Revue des travaux existants sur le projet	8
5) Quelles sont les corrections à apporter à une image brute ?	10
II) Présentation du site et des données disponibles	12
1) Le site : le Massif du Mont-Ventoux.....	12
2) La flore	13
3) Les données.....	14
A) Les images SPOT	14
B) La BD Altimétrique	16
C) La carte IGN.....	16
D) Les données atmosphériques	16
III) Corrections géométriques : l'orthorectification	17
1) Introduction	17
2) Les différentes étapes de l'orthorectification.....	17
3) Résultats de l'orthorectification.....	18
IV) Les corrections atmosphériques	22
1) Les effets de l'atmosphère	22
2) Obtention des valeurs de réflectance TOA.....	23
3) Analyse sur zones stables.....	24
A) Objectifs de l'analyse et choix des zones stables	24
B) Extraction des valeurs de réflectance sur les ROIs avec Matlab	25
C) Analyse des valeurs de réflectance TOA.....	25
D) Résultats de l'analyse sur les zones stables	26
4) Les corrections des effets atmosphériques	27
A) Principe	27

B)	Estimation de l'épaisseur optique en aérosols τ_{550}	28
C)	Obtention des valeurs de réflectance TOC	33
D)	Résultats des corrections atmosphériques	34
V)	Normalisation.....	37
1)	Objectifs de la normalisation	37
2)	Résultats de la normalisation	37
VI)	Résultats.....	39
1)	Choix des zones d'analyses	39
2)	Résultats	40
A)	Analyse globale.....	40
B)	Analyse sur les années 2001 à 2009.....	41
	Conclusion	45
	Bibliographie	47
	Résumé.....	49
	Les diverses corrections appliquées.....	49
	L'analyse des résultats	50
	Conclusion	51
	Annexe : Carte relative à l'analyse dendrochronologique	52
	Résumé.....	53
	Abstract.....	53

Introduction

Depuis plusieurs décennies, la teneur en dioxyde de carbone et la température ont tendance à augmenter. Ces changements climatiques ont des conséquences directes sur le fonctionnement et la dynamique des peuplements forestiers. Malgré cette tendance, peu d'études ont concerné les effets de ces changements sur la mortalité et le dépérissement. Pourtant ce sont des éléments importants de la dynamique forestière. De plus, étant donné le temps de réponse des forêts aux changements climatiques, il est nécessaire d'anticiper les conséquences sur ce type de milieu pour en adapter la gestion.

Ainsi, cela suscite des interrogations majeures de la part des gestionnaires forestiers, dont les décisions ne peuvent être prises sans connaissance de ces effets. Ces interrogations se posent par exemple, pour les sapinières des zones montagneuses méditerranéennes où des dépérissements ont été observés ces dernières années (depuis 2000). Ces sapinières sont un bon exemple d'étude car elles se situent en limite d'aire de répartition du Sapin pectiné (*Abies alba* MILL.) et en zone méditerranéenne, pour laquelle les scénarios climatiques futurs prévoient une augmentation importante de l'intensité et de la fréquence des sécheresses auxquelles ce type de forêt est vulnérable.

C'est dans cette optique que l'Agence Nationale de Recherche (ANR) a financé le projet DRYADE en 2006. Ce dernier a pour but d'étudier les facteurs et les indicateurs de vulnérabilité de plusieurs essences forestières. Le projet doit aussi modéliser les risques de dépérissement dus aux attaques d'insectes et aux sécheresses.

Dans la continuité de ce projet, il a été confié à l'Institut National de Recherches Agronomiques (INRA) d'Avignon (84), l'étude de l'évolution du dépérissement des Sapins Pectinés, situés sur le massif du Mont-Ventoux (84). L'un des objectifs de cette étude est de cartographier les zones dépérissantes. Il sera aussi nécessaire de confronter ces résultats aux données climatiques.

La télédétection paraît être la méthode d'analyse la plus appropriée à la situation. Cela permettra de suivre l'évolution temporelle de notre zone d'étude avec une résolution adéquate. Pour cette raison, nous disposons d'une série temporelle d'images SPOT (Satellites Pour l'Observation de la Terre) qui s'échelonnent sur une période de plus de vingt ans : de 1988 à 2009.

Afin d'analyser l'évolution du dépérissement des Sapins, il faut obtenir un signal cohérent du couvert végétal entre les différentes images. Il s'agit donc de s'interroger sur les différentes corrections à appliquer à une image brute, et de savoir lesquelles sont nécessaires dans notre analyse. Il faut aussi prendre en compte les contraintes de la zone d'étude, telles que le relief ou la présence de plusieurs espèces d'arbres différentes.

Il est intéressant d'établir une analyse rétrospective par télédétection des Sapins pectinés sur le Mont-Ventoux, afin d'en connaître l'évolution des dépérissements. Quelles sont les différentes étapes à appliquer permettant d'obtenir un signal cohérent du couvert végétal ? Quels sont les outils disponibles pour notre analyse ? Les dépérissements sont-ils détectables par la télédétection ?

Afin de répondre au mieux à ces problèmes, dans un premier temps, il sera nécessaire de présenter le contexte de l'étude et ses objectifs. Dans cette même partie, il sera synthétisé les principaux travaux existants sur le sujet de la l'identification et le suivi par télédétection des dépérissements des forêts. Cela permettra d'en tirer des conclusions et de définir une stratégie d'étude. La seconde partie aura pour but de présenter le site d'étude et les données disponibles. Puis, les différentes corrections apportées seront présentées. Le processus de l'orthorectification des images sera détaillé. Il permet de procéder aux corrections géométriques, en vue de rendre superposables les différentes images. La partie

suivante aura pour but de présenter les effets de l'atmosphère sur le signal du couvert végétal, de les estimer et d'en effectuer les corrections si cela est nécessaire. La dernière partie consistera à analyser le signal obtenu après les diverses corrections, et à présenter les résultats de son évolution en fonction des dépérissements observés.

I) Contexte et stratégie de l'étude

1) Contexte de l'étude

A) L'INRA

L'INRA ou Institut National de Recherches Agronomiques est le premier institut de recherches agronomiques en Europe et le second dans le monde. Placé sous la double tutelle du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, ses recherches s'organisent autour de l'alimentation, de l'agriculture et de l'environnement afin de développer une agriculture compétitive, respectueuse de l'environnement, des territoires et des ressources naturelles, et mieux adaptée aux besoins nutritionnels de l'homme. Sa production scientifique est un support d'aide à la décision et un outil d'expertise très important pour les acteurs du monde économique et politique.

L'INRA constitue un dispositif scientifique de premier plan, puisqu'il rassemble une équipe de 1 820 chercheurs et 1 833 thésards. De plus, il accueille chaque année plus de 1 500 chercheurs et étudiants. Nous retrouvons aussi 2 462 ingénieurs et 4 108 techniciens, ce qui porte le nombre total d'agents titulaire à presque 8 400.

L'INRA est implanté dans vingt centres régionaux et travaille sur quatorze départements scientifiques dans le domaine de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement.

Le centre INRA PACA se place au quatrième rang national et se compose de deux sites : Avignon (Vaucluse) et Sophia-Antipolis (Alpes-Maritimes). Ce centre se structure autour de trois pôles thématiques : le Pôle Production Horticole Intégrée (PHI), Pôle Santé des Plantes (PSP) et Pôle Adaptation au Changement Global (ACG).

Ce dernier pôle abrite entre autre l'UMR EMMAH (Unité Mixte de Recherche Environnement Méditerranée et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes). Les travaux réalisés dans cette unité ont pour buts principaux de quantifier l'impact environnemental des pratiques agricoles sur les ressources hydriques, d'optimiser les ressources pour les cultures, et d'étudier la potentialité des zones de production agricole.

L'UMR EMMAH, en collaboration avec d'autres organismes, participe au projet DRYADE qui est présenté ci-dessous.

B) Encadrement

Le stage est encadré par une équipe de recherches constituée de Frédéric BARET et André CHANZY, directeurs de recherches, Marie WEISS, ingénieur d'études, et Marie NOURTIER, doctorante. Ils font partie de l'UMR EMMAH du site INRA Avignon.

Frédéric BARET a obtenu en 1986 un doctorat sur l'application de la télédétection dans l'agriculture, et travaille depuis cette date avec l'INRA Avignon.

André CHANZY a reçu en 1991 un doctorat en physique de l'environnement à INRA Paris-Grignon.

Marie WEISS est ingénieur d'études en traitement d'images. Elle s'occupe de développer des algorithmes pour le suivi des caractéristiques des couverts végétaux par proxy et télédétection spatiale et aéroportée.

Marie NOURTIER prépare une thèse sur la mesure et la modélisation du contenu en eaux des sols forestiers par analyse du couvert végétal.

2) Le projet DRYADE

Depuis 1750, la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone a augmenté de 31% et la température a augmenté de 0.7°C sur 100 ans. L'augmentation attendue des maxima climatiques et de la fréquence, de l'intensité et de la durée des sécheresses édaphiques et atmosphériques risque d'avoir des effets importants sur le dépérissement des peuplements forestiers, particulièrement en région méditerranéenne et pour les espèces en limite d'aire de répartition. Cela pourrait menacer la pérennité de certaines forêts en France.

Le projet DRYADE, ou « Vulnérabilité des forêts aux changements climatiques : de l'arbre aux aires climatiques » a été proposé à l'Agence Nationale de Recherche (ANR) en 2006. Il s'inscrit dans le programme « Vulnérabilité milieux et Climat ». Il vise à étudier à différentes échelles les facteurs de vulnérabilité aux changements climatiques de cinq essences forestières majeures (chênes sessile et pédonculé, hêtre, sapin et douglas) et à modéliser les risques de dépérissement. L'aléa climatique est principalement la sécheresse, qui selon les divers scénarios de changements climatiques en Europe de l'ouest, devrait se produire avec une fréquence accrue, ce qui est déjà observable dans certaines régions de France.

3) Présentation générale et objectifs du stage

C'est dans le cadre du projet DRYADE qu'il a été confié à l'INRA Avignon (UMR EMMAH et URFM) l'étude de l'évolution du dépérissement des Sapins pectinés (*Abies alba* Mill.) sur le Massif du Mont-Ventoux, et d'en établir les cartes des risques dans une perspective de gestion anticipative. Cette étude est conduite sur le versant Nord du Mont Ventoux où une mortalité accrue des Sapins est observée depuis quelques années.

Un des objectifs est de relier l'évolution des dépérissements avec celle des conditions climatiques. Les enjeux sont donc d'identifier les zones dépérissantes et de caractériser leur dynamique. La confrontation aux données climatiques permettra d'identifier les seuils de sécheresse et les délais de réponses à ces contraintes en fonction des différentes conditions pédologiques rencontrées dans la forêt. Le but, à terme, est d'utiliser ces résultats dans un modèle simplifié d'évolution du stock hydrique du sol sur un cycle annuel en tenant compte du climat, de la position topographique, des propriétés du sol et de la couverture végétale.

Outre le dispositif expérimental présent sur le site depuis quelques années, la télédétection à haute résolution spatiale (quelques dizaines de mètres) est un moyen de suivre le site d'étude sur un plus long terme. Dans cette étude, nous disposons d'une série d'images SPOT échelonnées dans le temps (de 1988 à 2009) que nous souhaitons analyser pour détecter les zones de dépérissements des sapins. La première étape de ce travail, indispensable pour exploiter ces images, est d'apporter les différentes corrections nécessaires (géométriques et atmosphériques) pour extraire de façon précise le signal provenant du couvert végétal. Ensuite, l'objectif est de pouvoir isoler les zones de sapins pour essayer de suivre l'évolution de leur état sanitaire au cours du temps.

4) Revue des travaux existants sur le projet

Ces dernières années, plusieurs études ont été menées sur la détection et la cartographie des changements relatifs à différentes espèces d'arbres, causés soit par des insectes (Wulder et al., 2005), soit par des facteurs climatiques (la sécheresse : McVicar et Jupp, 1998) ; ou encore les dégâts liés à la tempête de décembre 1999 (Stach, 2000), ou par des feux de forêts (Wang, 2008). Ainsi, l'imagerie satellite a prouvé son efficacité dans le cas de phénomènes de dépérissements à caractère massif ou plus précisément de défoliations. De plus, la télédétection présente l'avantage de proposer un éventail de données sources et de

résolutions différentes. Cependant, le succès de son utilisation passe par le choix judicieux du capteur et des méthodes d'analyse des images les plus appropriées à l'étude (Wulder et al., 2005).

Pour avoir la possibilité d'analyser convenablement un changement, tel que les dépérissements, il est important d'apporter un certain nombre de corrections aux images (Teillet et al, 1997). En revanche, ce n'est pas nécessaire si nous sommes en présence de changements abrupts de la végétation (Vicente-Serrano et al., 2008). Dans notre étude, pour obtenir un signal cohérent, il sera essentiel de ne pas négliger cette étape, et de déterminer le plus précisément possible les corrections à effectuer. Elles seront détaillées dans la partie suivante (confère § 1)5).

Les données que fournissent les analyses par télédétection permettent de calculer des indices évoluant avec la dynamique de la végétation. Ils ont été mis au point pour minimiser les effets perturbateurs du sol. Un grand nombre de relations a été établi entre les différents indices de végétation et l'indice foliaire, ou le rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par les végétaux (Baret et Guyot, 1991). Le choix de ces indices est un autre élément important dans l'étude.

Bien que selon les satellites et les capteurs, le nombre de bandes spectrales disponibles varient, les analyses statistiques effectuées sur le contenu de l'information, montrent que plus de 90% de l'information spectrale est contenue dans les bandes spectrales Rouge (B2) et PIR (B3) (Sheffield, 1985 ; Baret et al., 1988). Les indices de végétation qui combinent les données des bandes spectrales Rouge et PIR, permettent alors d'accroître le contraste entre le sol et la végétation, ainsi que de minimiser l'effet du sol sous-jacent (Guyot, 1995).

Il existe deux types d'indices de végétation qui utilisent les bandes spectrales rouge et proche-infrarouge. Ils sont soit basés sur la détermination d'une pente, soit sur le calcul d'une distance. Parmi les indices de végétation basés sur le calcul d'une pente, les plus communément utilisés sont le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et le RVI (Ratio Vegetation Index) (Guyot, 1995). Dans le plan rouge / proche-infrarouge, ces indices correspondent à la pente de la droite qui joint un point représentatif de la végétation à l'origine des axes. Concernant, les indices basés sur le calcul d'une distance, l'idée est de réduire l'information spectrale à la distance orthogonale d'un point correspondant à la végétation à la droite des sols (Guyot, 1995).

Il existe aussi des indices qui traduisent le stress hydrique tel que le NDWI (Normalized Difference Water Index), mais qui nécessitent l'utilisation de la bande spectrale MIR (Moyen-Infrarouge). Or, cette bande n'est pas disponible sur tous les satellites (pour les satellites SPOT, la bande spectrale MIR est seulement disponible pour SPOT 4 et 5).

Les indices NDVI et RVI sont sensibles à la vigueur de la végétation et à l'activité photosynthétique. Ils sont considérés comme des indicateurs liés au recouvrement végétal du sol et l'état général de la végétation. Ils sont tout particulièrement appropriés à notre étude, puisqu'elle va consister à détecter des sapins morts qui perdent leurs aiguilles.

De plus, ce sont des indices qui ont déjà prouvé leur efficacité sur plusieurs études du même type (Soudani et al., 2006 ; Mihai et al., 2006 ; McVicar et al., 1998 ; Chen et al. 1996). De même, d'après Lawrence et al. (1998), le NDVI et le RVI sont les indices les plus performants pour l'analyse de la végétation.

Le NDVI (Rouse et al., 1974) se définit par :

Où ρ_{B3} représente la réflectance dans la bande spectrale B3 (Proche-Infrarouge)
 ρ_{B1} représente la réflectance dans la bande spectrale B1 (Rouge)

Le RVI (Pearson et Miller, 1972) se définit par :

—

Le rapport entre canaux permet de minimiser les effets des conditions d'éclairage et de la géométrie de visée, les effets atmosphériques et les erreurs de calibration (Baret et Guyot, 1991). Il permet ainsi de stabiliser le signal.

Un moyen envisageable pour notre étude serait de réaliser des classifications sur les images mises à notre disposition pour détecter et cartographier des changements. Cette procédure est utilisée pour l'identification de zones « spectralement similaires » d'une image. Le but est d'identifier dans un premier temps des sites références dont nous extrayons la signature spectrale, et à partir desquels nous extrapolons pour le reste de l'image. En revanche, pour notre analyse, il serait très difficile de séparer les sapins et les pins, car ces espèces possèdent des signatures spectrales très proches.

Il sera donc nécessaire de sélectionner des zones d'analyses qui présentent une majorité de sapins afin de pouvoir affecter la dynamique du signal étudié à l'évolution des peuplements du Sapin.

5) Quelles sont les corrections à apporter à une image brute ?

Il est nécessaire de mentionner que les informations contenues dans une image satellitaire brute ne peuvent pas être exploitées directement afin de pouvoir analyser les valeurs de réflectance (ou de luminance) du couvert végétal pour en étudier son évolution.

En présence d'une série temporelle, la première étape consiste à effectuer des corrections géométriques, qui permettent de rendre superposables les différentes images. Ensuite, plusieurs traitements sont nécessaires pour obtenir les valeurs de réflectance au sol. En effet, le signal provenant d'une surface terrestre et capté par un satellite, est enregistré sous forme de valeurs numériques. Il est ainsi indispensable d'effectuer trois séries de traitements pour en déduire la réflectance au sol (Figure 1) :

- Étape 1 : étalonnage absolu qui passe par la connaissance des coefficients de calibration permettant de relier la valeur numérique à la réflectance correspondante ;
- Étape 2 : corrections atmosphériques
- Étape 3 : corrections des effets topographiques

Lors de la réalisation des corrections, nous n'effectuerons pas l'étape 3 consistant en la correction des effets topographiques sur la réflectance de la cible. En effet, comme notre étude porte sur des sapins situés sur une zone restreinte et que la géométrie d'observation est peu variable, ces corrections peuvent être négligées. De même, les corrections dues aux effets directionnels, c'est-à-dire des effets engendrés par les angles de visée et les angles solaires au moment de l'acquisition de l'image, ont été négligées.

Il est important de définir deux types de réflectance. Les valeurs de réflectance que nous obtenons à partir des images SPOT, suite à la conversion du compte numérique en réflectance, correspond à la réflectance TOA (Top Of Atmosphere, appelée ρ_{TOA}). La réflectance TOA correspond à la réflectance apparente (au niveau du satellite), c'est-à-dire qui n'est pas corrigée des effets de l'atmosphère et de l'environnement. Par contre la réflectance TOC (Top of Canopy, appelée ρ_{TOC}) correspond à la réflectance au dessus du couvert végétal, corrigée de ces effets.

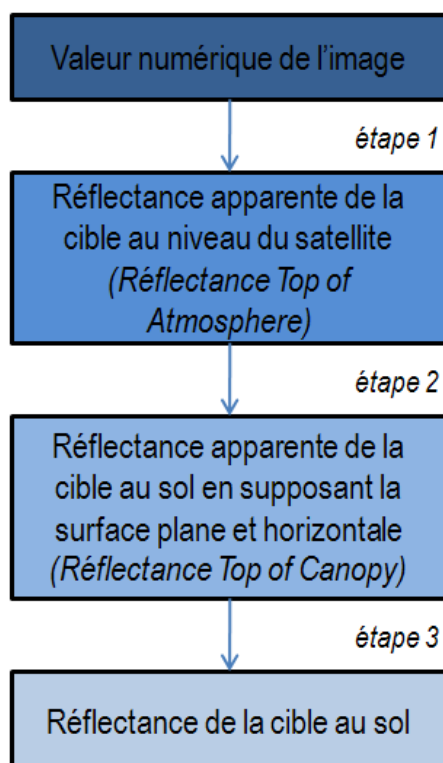


Figure 1 - Les étapes des traitements nécessaires pour déduire la réflectance au sol d'une surface à partir d'une image satellitaire

II) Présentation du site et des données disponibles

1) Le site : le Massif du Mont-Ventoux

Le Mont-Ventoux culmine à 1 912 mètres d'altitude et se situe principalement au nord du département du Vaucluse (84) dans la région PACA (Provence-Alpes-Côte d'Azur).

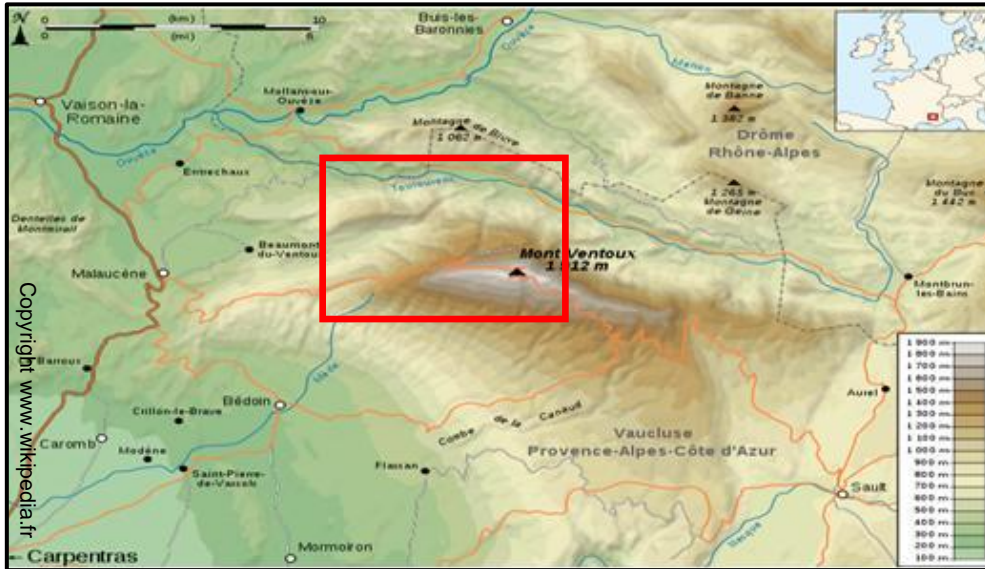


Figure 2 - Plan de situation du Mont-Ventoux

Sur le versant Nord du Mont-Ventoux, il a été délimité une zone d'étude plus restreinte (Figure 3). Ce choix s'explique par la présence accrue de Sapins pectinés. L'altitude de cette zone se situe entre environ 1100 et 1300 mètres sur le versant Nord.

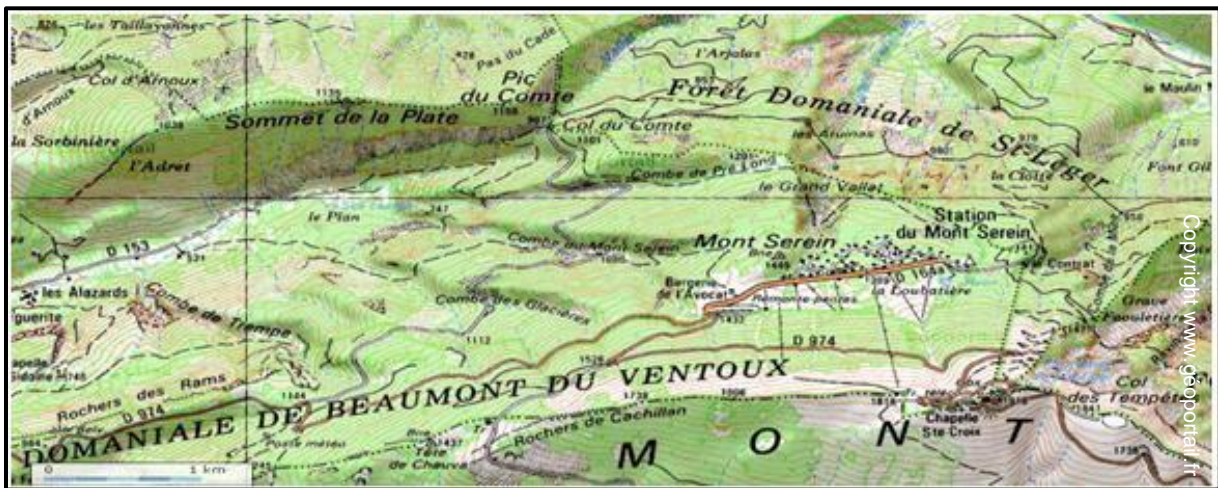


Figure 3 - Plan de situation de notre zone d'étude

2) La flore

Étant donné que l'étude porte sur les dépérissements du Sapin sur le Mont-Ventoux, il est intéressant de présenter la végétation principale qui s'y trouve. Le Mont-Ventoux présente une flore d'une grande diversité, qui varie en fonction de l'altitude, mais aussi en fonction d'autres facteurs (ressource en eau, géomorphologie, ...). Sur la zone d'étude localisée sur le versant nord du Mont-Ventoux, trois espèces principales d'arbres sont présentes : le hêtre, le pin (pin à crochet et pin sylvestre), et le sapin pectiné.

Le hêtre (Figure 4) se différencie assez facilement des autres arbres car il s'agit d'un feuillu à feuilles caduques. C'est-à-dire qu'il possède des feuilles plates parcourues de nervures bien visibles. Alors que les sapins et les pins (Figure 5) sont des conifères. Ces derniers sont des arbres dont les feuilles sont le plus souvent réduites à des aiguilles ou des écailles. Lorsqu'il est effectué un suivi temporel du signal de télédétection, les espèces à feuilles caduques se distinguent aisément des autres car ils perdent leurs feuilles en hiver.



Figure 4 - Hêtre



Figure 5 - Pin

Le Sapin pectiné ou *Abies alba* (Figure 6) est un arbre de grande taille. Il peut atteindre soixante mètres de haut (environ vingt mètres sur le Mont-Ventoux maximum) et deux mètres de diamètre. Il s'agit de la seule espèce de Sapin spontanée en Europe occidentale. Il peut vivre jusqu'à 500 ans.

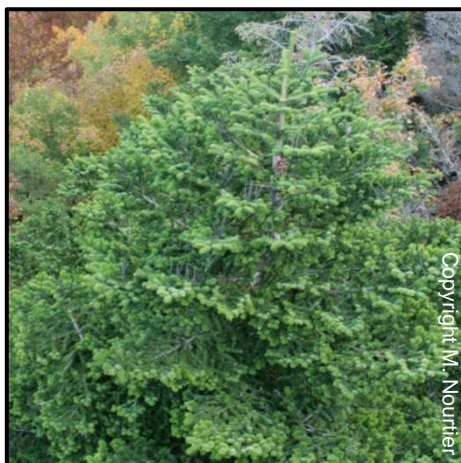


Figure 6 - Sapins pectinés



Figure 7 - Sapins pectinés
morts

Le dépérissement du Sapin pectiné apparaît périodiquement en Europe depuis le XVI^e siècle et s'est accru ces dernières années, mais ses causes demeurent mal connues. Son comportement en climat méditerranéen est intéressant car cette espèce s'y trouve en limite d'aire de répartition ce qui permet d'observer les effets de la sécheresse sur une population vulnérable. Elle sera fortement touchée par les changements climatiques qui s'y produiront : la température moyenne augmentera selon les modèles de 2 à 4°C.

3) Les données

A) Les images SPOT

Comme il a été mentionné plus haut, l'étude se base sur des images issues des satellites SPOT (Satellites Pour l'Observation de la Terre), destinés à l'observation du sol terrestre. Les caractéristiques de ces satellites définissent la résolution et le mode spectral des images. Il faut savoir que le système SPOT est opérationnel depuis février 1986, et qu'il existe plusieurs générations de satellites avec des caractéristiques différentes. Ainsi, en 1986 est lancé le premier satellite. SPOT 2 l'a rejoint en orbite en janvier 1990, suivi de SPOT 3 en septembre 1993, de SPOT 4 en mars 1998 et enfin de SPOT 5 en mai 2002. Il est possible d'obtenir des images de résolution allant de 20 mètres (pour les images multispectrales de SPOT 1, 2, 3 et 4) à 2,5 mètres (pour les images panchromatiques de SPOT 5).

Le principal avantage des images SPOT est leur disponibilité depuis 1986 avec des capteurs similaires. Cela permet ainsi d'analyser l'évolution de certains phénomènes dans le temps (comme le dépérissement).

De plus, les bandes spectrales des satellites SPOT permettent de suivre l'évolution des couverts végétaux.

Les images qui nous intéressent sont des images multispectrales, issues de SPOT 1, 2, 3 ou 4. Nous n'avons pas d'image issue de SPOT 5. Une image multispectrale est une image obtenue à partir de capteurs opérant dans plusieurs bandes spectrales à la fois. Dans le cas de SPOT 1, 2 et 3, le mode multispectral comporte les bandes suivantes :

- B1 : vert (0.50 – 0.59 μm)
- B2 : rouge (0.61 – 0.68 μm)
- B3 : proche-infrarouge (0.78 – 0.89 μm)

Les satellites SPOT 4 et SPOT 5 comprennent une bande supplémentaire B4 en moyen infrarouge (1.58 – 1.75 μm). Les bandes spectrales les plus utilisées dans les analyses sont le Rouge (B2) et l'Infrarouge (B3). Cela paraît logique, car ce sont les bandes dans lesquelles le contraste entre le sol et la végétation est le plus grand (G. Guyot, 1995).

La résolution de nos images est de 20 mètres.

Ces images sont directement disponibles pour les laboratoires de recherche européens auprès de l'ESA (European Space Agency) et de la société SPOT IMAGE, chargée de la production et la commercialisation des différents produits. Il faut savoir que ces images existent sous différents niveaux de prétraitements, selon le niveau de correction qui leur a été appliqué lors de la livraison :

- Niveau 1A : Il s'agit d'un niveau de prétraitements quasiment brut. Il n'y a pas de corrections géométriques appliquées aux images. Seule une correction radiométrique a été appliquée pour éliminer des distorsions dues aux écarts de sensibilité entre les détecteurs élémentaires de l'instrument de prise de vue.

- Niveau 1B : Des corrections sont appliquées prenant en compte les caractéristiques de prise de vue et celles du système satellite / Terre. Les corrections radiométriques sont identiques à celle du niveau 1A. Les corrections géométriques comprennent les corrections des effets systématiques (effet panoramique, courbure et rotation de la Terre).
- Niveau 2A : Les corrections radiométriques sont identiques à celle du niveau 1A. Les corrections géométriques comportent, en plus du niveau 1B, une projection cartographique standard (UTM WGS84 par défaut) sans prise de points d'appui.
- Niveau 2B : Mise en projection cartographique avec prise de points d'appui prélevés sur des cartes ou par mesure sur site type GPS. L'image est corrigée à une altitude moyenne dans une projection et un découpage cartographique standardisés.
- Niveau 3 : Mise en projection cartographique à partir de points d'appui et d'un MNE (Modèle Numérique d'Élévation) issu de Reference3D pour éliminer les distorsions dues au relief. Nous obtenons ainsi une ortho-image.

Deux niveaux de traitements différents ont été commandés : 1A et 3. Les images de niveau 1A étant gratuites, elles sont disponibles pour l'ensemble des acquisitions SPOT sur notre période d'étude. Nous avons préféré ces dernières au niveau 1A de manière à mieux contrôler l'ensemble des corrections. Les images commandées en niveau 3 ont permis de vérifier les corrections que nous avons appliquées aux images de niveau 1A. Étant donné le coût de ces images, il n'était pas possible de couvrir l'ensemble de la période d'étude avec ce niveau de traitements.

Les images de niveau 1A ont été fournies par l'agence spatiale européenne (ESA) dans le cadre d'une demande de type Category-1.

Le choix des images a été fait au travers de plusieurs critères. Dans un premier temps, il faut que l'image soit bien centrée sur le Mont-Ventoux et en particulier sur le versant nord. Ensuite, l'image doit être de bonne qualité, c'est-à-dire qu'elle doit avoir un taux de couverture nuageux nul ou faible (moins de 5%). En effet, les zones de l'image couvertes par des nuages sont inexploitable. La période de l'année de la prise de l'image est également un critère important. Notre objectif premier était de commander deux images pour chaque année de 1986 à 2009 : une en été et une en hiver. L'image prise en hiver aurait permis de différencier facilement les feuillus et les conifères, car à cette période les feuillus perdent leurs feuilles. Mais cela s'est avéré impossible car les images en hiver se trouvent à l'ombre sur le versant Nord et sont donc inexploitable. Nous avons donc décidé de commander les images suivantes :

- Une image prise en été (entre le mois de mai et de septembre), pour chaque année (de 1986 à 2009) en niveau 1A.
- Quatre images échelonnées dans le temps et de bonne qualité en niveau 3 (identiques à celle commandées en niveau 1A)
- Trois images en avril en niveau 1A, période où le versant Nord est ensoleillé mais où les feuillus n'ont toujours pas les nouvelles feuilles de l'année.

Cependant, nous n'avons pas trouvé d'images satisfaisantes concernant cinq années : 1986, 1987, 1995, 1999 et 2002 (images non centrées, ou taux de couverture nuageux trop élevé).

Les images de niveau de traitements 3 sont fournies par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) par le biais d'une demande ISIS (Incitation à l'utilisation Scientifique des Images SPOT). Il faut dans un premier temps faire une demande au CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) qui doit l'accepter, et vérifier que les produits demandés sont disponibles. SPOT IMAGE doit ensuite générer le produit au niveau 3. Ainsi, nous avons obtenu les images SPOT de niveau 3 au bout d'un mois.

B) La BD Altimétrique

Pour effectuer les diverses corrections, la connaissance précise du relief et de ses variations, est indispensable. Ainsi, nous avons en notre possession la Base de Données (BD) Altimétrique du Vaucluse, fournie par l'Institut Géographique National (IGN).

Le produit dont nous disposons concerne les isophyses (courbes de niveau) équidistantes de cinquante mètres. Il s'agit d'une édition de décembre 1998 qui est géoréférencée dans la projection Lambert Zone 3.

Le système altimétrique utilisé est le système IGN 1969.

C) La carte IGN

Pour notre travail, il est nécessaire de posséder un outil permettant de connaître assez précisément les coordonnées de certains points. Ainsi, l'unité « Ecologie des Forêts Méditerranéennes » (URFM) nous a fourni une carte IGN de la zone qui nous intéresse. Cette dernière est à l'échelle 25000^e. La carte est géoréférencée en projection Lambert 93.

D) Les données atmosphériques

Pour réaliser les corrections des effets de l'atmosphère, il est important de connaître la teneur des principaux gaz atmosphériques et la concentration en aérosols.

Les données concernant les aérosols ne sont pas disponibles. Nous verrons dans la partie concernant les corrections atmosphériques (confère § IV)) que nous avons estimé la concentration en aérosols.

Les principaux gaz atmosphériques sont l'ozone et la vapeur d'eau, dont les valeurs varient en fonction du lieu (les coordonnées de nos images) et de la date de l'image. C'est à partir des données METOZ, disponibles sur un site de la [NASA](#), que nous avons pu obtenir les renseignements voulus, concernant les années 1998 à 2009. Le site propose plusieurs types de fichier, que nous avons exploités avec le logiciel MATLAB à partir du programme *lecture_hdf_ozone_vapeur_pression.m*.

Pour chaque année et chaque jour, le serveur METOZ, propose plusieurs fichiers :

- les fichiers EPTOMS qui correspondent aux concentrations en ozone (en unité Dobson DU) mesurées par un capteur satellite dédié (TOMS : Total Ozone Mapping Spectrometer);
- les fichiers NCEP qui donnent la pression (en bar) et la concentration en vapeur d'eau (en kg.m²).

Le programme MATLAB permet de lire ces fichiers et de déterminer pour des coordonnées spatiales données, les concentrations en H₂O et en O₃, ainsi que la pression. Nous avons regroupé ces données dans un tableau.

Pour les années antérieures à 1998, années pour lesquelles les données METOZ ne sont pas disponibles (capteur non lancé), aucune mesure n'était disponible. Dans la mesure où d'une part, les bandes SPOT sont peu sensibles au contenu en ozone et en vapeur d'eau de l'atmosphère (à la différence du contenu en aérosols ; LAUNAY et al., 1993), et d'autre part, les valeurs mesurées sur notre zone au cours du temps sont peu variables, nous avons pris les valeurs moyennes calculées sur les autres dates, sans que cela n'affecte nos résultats de façon significative.

III) Corrections géométriques : l'orthorectification

1) Introduction

La première étape dans le processus de correction à apporter à une image est l'orthorectification. En effet, dans l'objectif d'un suivi temporel de placettes, il est nécessaire de rendre toutes les images superposables.

L'orthorectification est le processus par lequel la géométrie d'une image devient planimétrique en modélisant la nature et l'amplitude des distorsions géométriques de l'image. Des modèles adaptés aux capteurs photographiques ou satellitaires permettent l'élaboration de formules qui génèrent des documents précis, géographiquement corrects et bien orientés.

Le logiciel ENVI permet de rectifier des photographies aériennes et des images SPOT en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT). L'orthorectification utilise des projections géométriques pour corriger les images en vue d'édition cartographique et de mesures.

Ce logiciel propose différentes méthodes pour orthorectifier une image. Ces méthodes sont fonction des données dont nous disposons. Concernant les images SPOT, ENVI propose deux méthodes :

- Soit à partir d'un modèle RPC (Rational Polynomial Coefficients) sur les données de divers satellites proposés. Le processus associe plusieurs jeux de données pour recalculer géographiquement chaque pixel : l'image à orthorectifier, le modèle RPC, et le MNT. Pour les scènes SPOT, le modèle RPC n'est pas exigé : ENVI déduit le modèle à partir des paramètres géométriques contenus dans le fichier de métadonnées associé à la scène SPOT.
- Soit à partir des GCPs (Ground Control Points) : ils permettent d'améliorer la précision du modèle précédent en utilisant des points d'amer.

L'objectif exigé est d'obtenir une précision d'orthorectification entre les images de l'ordre d'une vingtaine de mètres, ce qui correspond à la résolution d'une image. Nous souhaitons une telle précision, car les objets qu'il faudra analyser par la suite, c'est-à-dire les sapins, sont d'une taille inférieure. Globalement, le diamètre moyen d'une couronne de sapins sur le Mont-Ventoux est de 5 à 6 mètres.

La démarche choisie est de corriger dans un premier temps les quatre images SPOT de niveau 1A, dont nous possédons aussi le niveau 3, c'est-à-dire orthorectifiée. Le principe est de comparer les écarts obtenus entre chaque couple d'images pour évaluer la précision de l'orthorectification. Lorsque la précision semble satisfaisante, la même méthode est appliquée à l'ensemble des images.

2) Les différentes étapes de l'orthorectification

Dans un premier temps, nous avons décidé de tester la première méthode, car elle nous a paru moins fastidieuse, puisque la prise de points d'amer est une étape gourmande en temps de travail et doit être effectuée sur chaque image. Mais une fois appliquée, cette méthode ne nous a pas semblée satisfaisante, puisque nous obtenions des écarts de l'ordre de 75 à 100 mètres.

La seconde méthode permet d'améliorer la précision de l'orthorectification en incorporant des points d'amer (ou GCPs : Ground Control Points) choisis sur l'image par l'utilisateur. En contrepartie, elle est beaucoup plus longue et doit être répétée sur chaque image. Cette

méthode se divise en deux étapes : la correction des distorsions géographiques à partir des points d'amer, et l'élaboration de l'image orthorectifiée.

Nous pouvons lancer la première étape à partir du menu d'ENVI « Map → Orthorectification → SPOT → Orthorectify with Ground Control ».

Cette commande permet de construire un fichier points (fichier PTS) qui renseigne plusieurs paramètres :

- Le système de projection dans lequel les points d'amer sont connus, avec ses paramètres. Dans notre cas, il s'agit du système de projection Lambert 93 (E, N) ;
- Les coordonnées des points d'amer dans le système défini auparavant (ici Lambert 93). Il faut aussi renseigner l'altitude, correspondant dans notre cas à l'altitude IGN 69 de la BD Altimétrique de l'IGN ;
- Les coordonnées des points d'amer en système local, correspondant aux pixels de l'image (X, Y) ;
- L'erreur sur chaque point d'amer, ainsi que l'erreur RMS, que nous allons définir ci-dessous.

L'erreur RMS (« Root Mean Square » ou « valeur moyenne quadratique ») correspond au carré moyen des résidus. Il permet d'évaluer la précision des points d'amer. Cette valeur doit bien entendu être la plus faible possible, et proche de zéro. Elle permet aussi de détecter une grosse erreur (faute de frappe par exemple).

Les paramètres de projections donnés par le logiciel ENVI ont été contrôlés avec les paramètres disponibles sur le site de l'[IGN](#). Cette vérification est importante car une erreur dans ces paramètres peut rendre l'orthorectification complètement fautive.

Il est nécessaire de sélectionner suffisamment de points d'amer, correctement répartis spatialement, afin de pouvoir réaliser une correction géométrique précise sur l'ensemble de la zone d'étude. Nous avons donc décidé d'en choisir une vingtaine pour chaque image.

Pour connaître, les coordonnées des points d'amer en système Lambert 93, il a fallu que nous les repérions sur la carte IGN. Le même travail a été effectué sur l'image SPOT à orthorectifier. Ce travail est assez fastidieux, car il doit être fait précisément. De plus, il est nécessaire de « s'appropriier » l'image et la carte IGN pour pouvoir bien se situer sur les deux.

Suite à cela, l'élaboration de l'image orthorectifiée peut débuter. Il faut définir plusieurs paramètres importants :

- La méthode de ré-échantillonnage (nous avons choisi la méthode bilinéaire que nous estimons la plus adaptée).
- Le choix du MNT et sa méthode de ré-échantillonnage (bilinéaire aussi)
- La valeur de compensation du géoïde. Le logiciel demande un MNT qui renseigne une altitude par rapport au géoïde, ce qui est notre cas.
- Le système de projection de sortie (Lambert 93 pour pouvoir comparer l'image de sortie avec la carte IGN)

3) Résultats de l'orthorectification

Après l'élaboration de l'ortho-image, dans un premier temps, elle est comparée à la carte IGN, pour évaluer la précision de l'orthorectification. Sa précision est supérieure à celle de l'orthorectification relative à la première méthode. Nous obtenons des écarts de l'ordre de quinze à vingt mètres, c'est-à-dire inférieurs à la résolution de notre image initiale. Cette précision est donc satisfaisante.

Ci-dessous, nous retrouvons l'image SPOT concernant l'année 1988 sans correction (Figure 8) et après orthorectification (Figure 9). Nous remarquons que le haut de l'image orthorectifiée est coupé. Cela s'explique par l'absence de MNT dans cette zone. Ce n'est pas un élément contraignant car cette zone ne correspond pas à notre zone d'étude (représentée sur la Figure 9 par une ellipse).

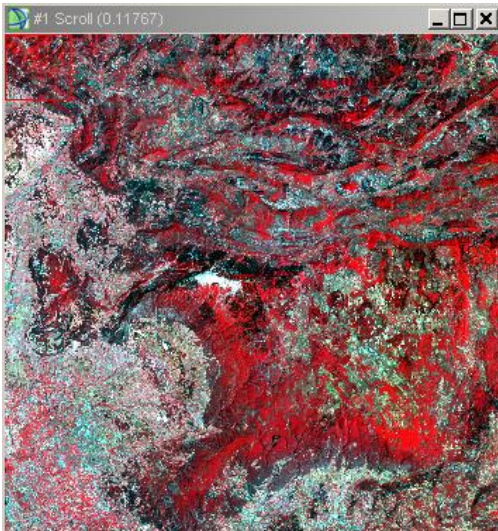


Figure 8 - Image SPOT de niveau 1A (1988)

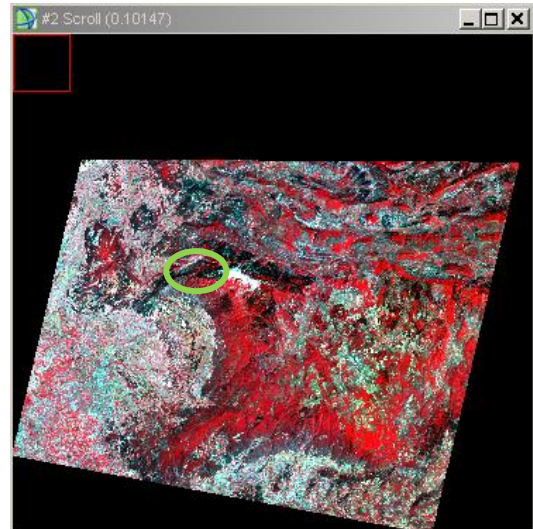


Figure 9 - Image SPOT orthorectifiée (1988)

Ensuite, les quatre images de niveau 3, échelonnées dans le temps (1988, 1993, 2000 et 2009) ont été utilisées pour contrôler les corrections géométriques.

Le principe a été de contrôler tout d'abord les quatre images entre elles pour vérifier leur cohérence. Pour cela, un outil efficace est présent dans ENVI qui permet de lier géographiquement deux images (« *Geographic Link* »). Il est ainsi possible de remarquer aisément des différences de coordonnées entre deux points identiques. Nous en avons conclu que les quatre images ne présentent pas de différences significatives dans leur géoréférencement (écarts inférieurs à un pixel).

La Figure 10 ci-dessous représente un exemple de comparaison :

- À droite, l'image de niveau 3, concernant l'année 1988 ;
- À gauche, l'image de niveau 1A orthorectifiée, relative à l'année 1988.

La fenêtre « *Pixel Locator* » permet de connaître les coordonnées du pixel, représenté sur l'image par la croix rouge. Nous notons un léger décalage (environ un pixel) pour des coordonnées identiques.

De la même façon, nous avons comparé chaque image SPOT de niveau 3 à son homologue orthorectifiée. Ce contrôle s'est effectué sur l'ensemble de l'image et plus précisément sur la zone d'étude. Nous avons ainsi relevé des écarts de l'ordre du pixel pour les images de 1988, 2000 et 2009. Par contre, l'orthorectification de l'image de 1993, nous a semblé de mauvaise qualité, car nous avons obtenu des écarts de presque deux pixels.

En conclusion, excepté pour deux images (concernant les années 1993 et 2005), l'orthorectification est de bonne qualité ; les écarts ne dépassant pas l'ordre du pixel. Pour les deux années 1993 et 2005, nous obtenions des écarts de deux pixels dans certaines zones, ce qui n'est pas satisfaisant.

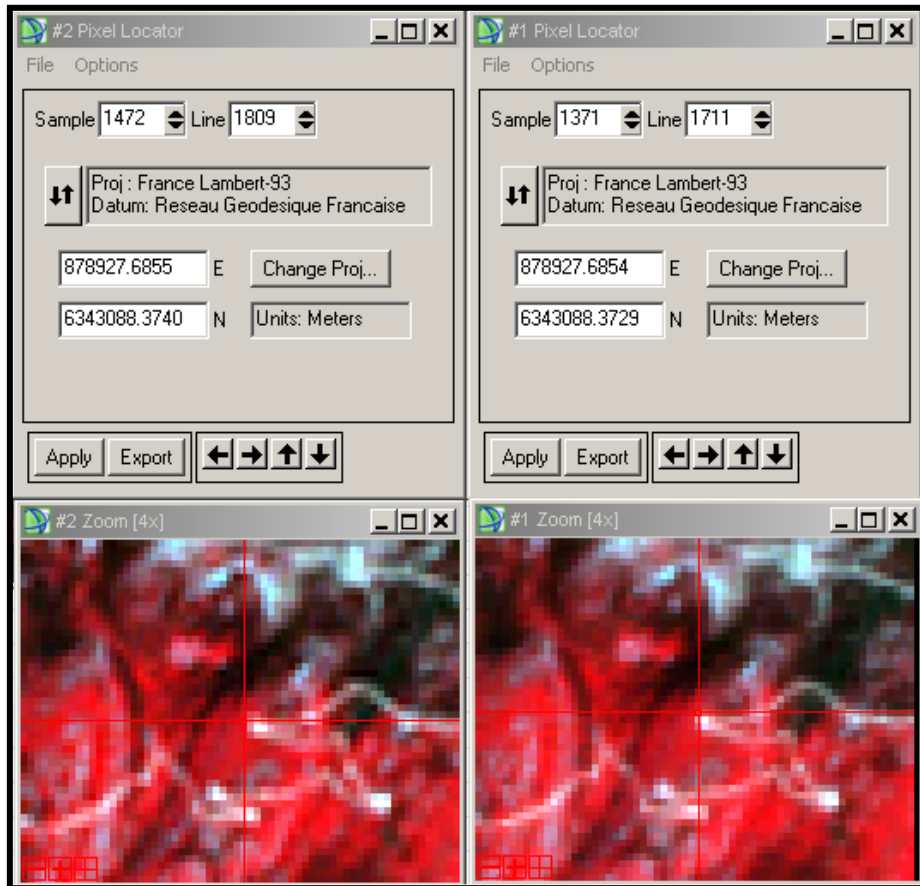


Figure 10 - Estimation de la précision de l'orthorectification

Concernant le RMS de chaque orthorectification (voir la ligne n°2 du Tableau 1), il est d'autant plus élevé que l'inclinaison de prise de vue de l'image est élevée. Par exemple, l'image SPOT correspondante à l'année 1988, a été prise avec une inclinaison de 1°, c'est-à-dire presque à la verticale. Pour son orthorectification, nous obtenons un RMS faible (proche de 1m). Alors qu'au contraire, nous obtenons un RMS de presque 8m, pour l'image SPOT d'avril 2005, dont l'angle de prise de vue est de 30°. De même, l'image de 1993 présente un angle de prise de vue de 22°. Nous pouvons ainsi mettre en corrélation l'angle élevé de prise de vue et les écarts observés (Figure 11). Le coefficient de détermination (R^2) étant proche de 1, cela témoigne de cette corrélation.

Date	31/07/1988	23/06/1989	13/07/1990	17/04/1991	26/06/1991	11/08/1992	28/06/1993	01/07/1994	18/04/1995	05/06/1996	24/09/1997	11/05/1998	03/06/2000	04/01/2001	14/07/2003	25/07/2004	11/04/2005	19/05/2006	19/05/2007	18/06/2008	06/05/2009
RMS (px)	1	4	4	5	6	2	6	3	2	4	5	3	5	5	1	7	7	2	6	2	2
Angle d'incidence (°)	1	15	12	16	24	6	22	13	5	11	18	11	18	18	7	30	30	5	22	6	6
Écarts obtenus (px)	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1

Tableau 1 - Ecart et angle de prise de vue des différentes images

L'unité du RMS est le pixel. Étant donné que la taille d'un pixel est de 20 mètres, le RMS peut paraître élevé. C'est la prise de points en altitude en tant que points d'amer qui a eu pour conséquence d'élever cette valeur. Nous avons préféré les conserver car leur suppression n'abaissait pas les écarts obtenus entre les différentes images.

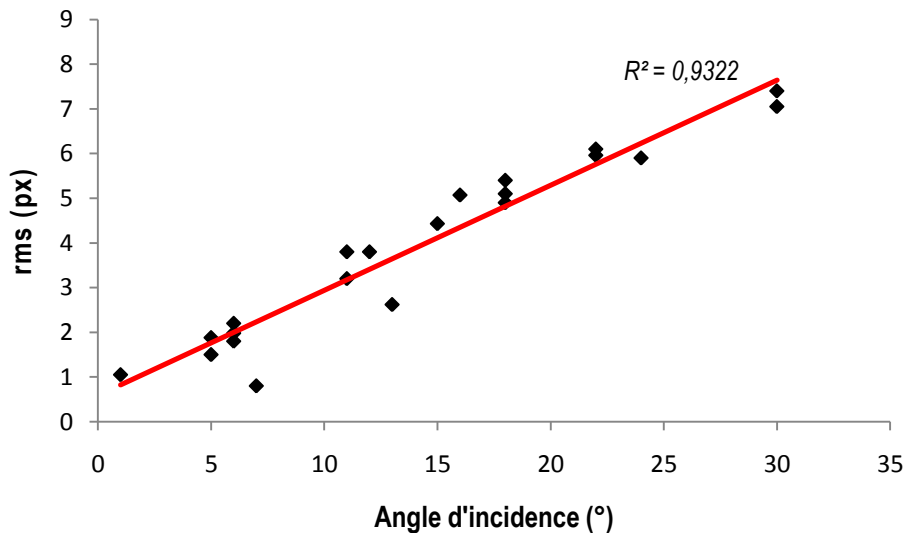


Figure 11 - Courbe de tendance de l'angle d'incidence en fonction du RMS

D'autre part, il est intéressant de se demander si les défauts d'orthorectification obéissent à une logique spatiale ou par rapport à d'autres paramètres (pente, altitude, ...). Il n'est pas aisé de répondre à cette question car pour cela, il faudrait prendre une multitude de points de vérification entre une image orthorectifiée et la carte IGN, et de comparer leurs écarts de coordonnées. Or, cette manipulation n'est pas facile et prend beaucoup de temps. En outre, il est logique de penser que les défauts d'orthorectification augmentent lorsque l'on s'éloigne des points d'amer (pour les points d'amer de bonne qualité). Puisque les points d'amer ont été sélectionnés de façon à ce qu'ils soient répartis convenablement sur l'ensemble de l'image, les défauts doivent être à peu près similaires sur toute l'image. En revanche, comme peu de points ont été choisis sur le sommet (car peu de points durs), la précision de l'orthorectification y est donc plus faible.

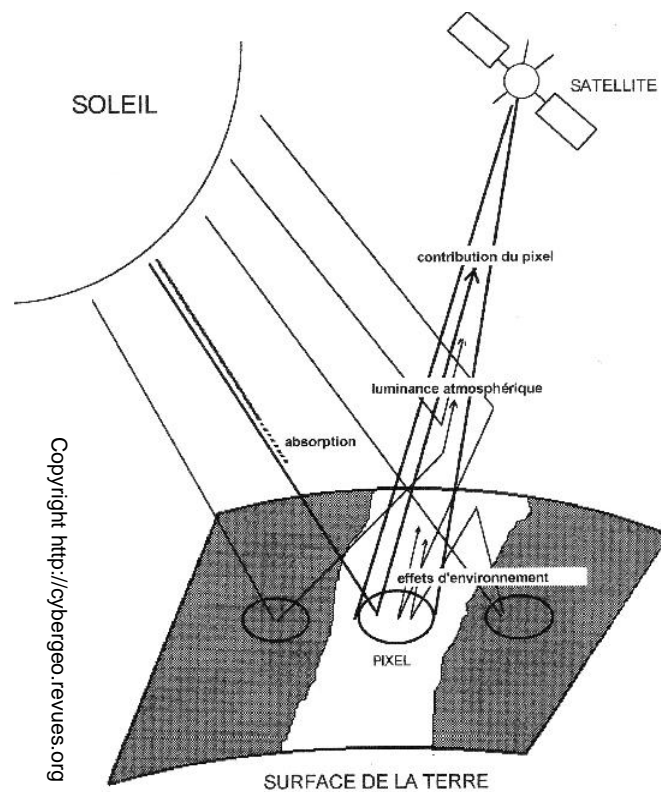
À noter que la précision de l'orthorectification est liée à la précision des données dont nous disposons, comme le MNT. Ce dernier a été élaboré à partir de la BD Altimétrique de l'IGN, dont les courbes de niveau sont équidistantes de cinquante mètres. En revanche, pour la création des images SPOT de niveau 3, la société SPOT IMAGE utilise un MNE d'une précision altimétrique de dix mètres. La société garantit ainsi une précision planimétrique de l'ordre de quinze mètres concernant les ortho-images qu'elle produit. Malgré cette différence de précision au niveau de l'information altimétrique, nous atteignons les objectifs de précision que nous nous étions fixés, c'est-à-dire une vingtaine de mètres.

Pour la suite des corrections, nous avons décidé de ne pas conserver l'image orthorectifiée de 1993, en la remplaçant par l'image SPOT de niveau 3. Concernant les années 1988, 2000, et 2009, nous avons préféré conserver les images orthorectifiées.

IV) Les corrections atmosphériques

1) Les effets de l'atmosphère

Avant de commencer les corrections nécessaires, il est indispensable de connaître l'influence de l'atmosphère sur le signal réfléchi par la végétation dans le domaine visible proche-infrarouge. Les capteurs installés sur les satellites permettent de mesurer la luminance réfléchie par le système Terre/Atmosphère illuminé par le soleil. Ces capteurs opèrent dans le spectre solaire dont les longueurs d'onde s'étalent de 0,2 à 4 μm . Le signal mesuré dépend de la réflectance de la surface terrestre, mais aussi des effets de l'atmosphère. Ces effets interviennent aux cours des deux trajets effectués par le rayonnement du Soleil : descendant du Soleil vers la surface, et montant de la surface vers les capteurs. Le but des corrections est donc de corriger ces effets pour en extraire la véritable information qui nous intéresse : la réflectance de la surface terrestre (Figure 12).



(Source : Tanré et al., 1986).

Figure 12 - Trajet atmosphérique et effets de l'atmosphère sur la mesure radiométrique

Les effets de l'atmosphère se présentent sous deux processus : l'absorption par les gaz et la diffusion par les aérosols. Ces derniers désignent l'ensemble des particules, liquides ou solides, en suspension dans l'atmosphère.

L'absorption du rayonnement solaire par les gaz a pour conséquence un affaiblissement du signal mesuré. Dans le spectre solaire, nous retrouvons comme principaux gaz : l'oxygène (O_2), l'ozone (O_3), la vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O). Alors que l' O_2 , le CO_2 , le CH_4 , et le N_2O sont constants, l' H_2O et l' O_3 varient en fonction du lieu et du temps. Ce sont ces deux derniers gaz qui vont nous intéresser. Toutefois, l'absorption gazeuse reste faible dans les bandes spectrales utilisées

par les capteurs SPOT. Quant à l'absorption due aux aérosols, elle est dans l'ensemble plus faible que l'absorption gazeuse.

La diffusion par les aérosols provient du fait que la lumière non absorbée par une particule, est renvoyée dans toutes les directions de l'espace sans changement de longueur d'onde. Les effets de la diffusion dépendent beaucoup de la concentration des particules responsables et de leur répartition. Cette concentration est mesurée par le biais de l'épaisseur optique des aérosols τ_{550} de l'atmosphère, qui dépend de la longueur du trajet atmosphérique, de la concentration et de la taille des éléments diffusants (molécules et aérosols).

Il est important de rappeler que la réflectance TOA (Top Of Atmosphere, appelée ρ_{TOA}) correspond à la réflectance apparente au niveau du satellite, c'est-à-dire qui n'est pas corrigée des effets de l'atmosphère et de l'environnement. Par contre la réflectance TOC (Top Of Canopy, appelée ρ_{TOC}) correspond à la réflectance au dessus du couvert végétal, corrigée de ces effets.

Les corrections atmosphériques permettront d'obtenir ρ_{TOC} à partir ρ_{TOA} .

Lors d'une première étape, nous allons appliquer les coefficients d'étalonnage des bandes spectrales SPOT qui permettront d'obtenir les valeurs de ρ_{TOA} . Ensuite, nous allons analyser les valeurs de ρ_{TOA} sur des zones stables au cours du temps. Cela permettra de savoir si les corrections atmosphériques sont nécessaires. Suivant, les résultats obtenus nous procéderont aux corrections atmosphériques.

2) Obtention des valeurs de réflectance TOA

Il faut savoir que les images SPOT sont codées en compte numérique (DN, Digital Number) sur chaque bande spectrale afin de réduire la taille du fichier image. Pour chaque pixel, ces valeurs varient de 0 à 255. Il est donc nécessaire de transformer ces comptes numériques en une grandeur plus appropriée qui correspond au signal mesuré.

Les capteurs satellites mesurent en fait un flux de rayonnement, appelé luminance, dans une longueur d'onde donnée. Afin, de transformer le compte numérique en luminance, il est nécessaire d'appliquer un gain (parfois un offset) qui varie en fonction de la bande spectrale considérée. Une fois, la luminance calculée, on détermine ensuite le facteur de réflectance qui est le rapport entre la luminance reçue par le capteur et la luminance reçue par un capteur visant une surface lambertienne éclairée de la même manière (d'après Guyot, 1997) ; une surface lambertienne étant une surface qui réfléchit le rayonnement de la même manière dans toutes les directions. Le passage de la luminance au facteur de réflectance (que l'on réduit en général au terme de réflectance) se fait grâce à des équations prenant en compte les conditions d'éclairement lors de la prise de vue, l'éclairement solaire dans la bande spectrale considérée et la distance terre-soleil.

L'ensemble de ces équations sont détaillées dans le document « SPOT ABSOLUTE CALIBRATION : SYNTHESIS » élaboré par le CNES.

Dans le cas des images SPOT, l'ensemble des données nécessaires est renseigné dans le fichier PDF ou le fichier de métadonnées, qui sont fournis avec les images. Voici la liste de ces données :

- Le type de satellite SPOT (1, 2, 3, 4 ou 5) et le type de capteur HRV (1 ou 2) qui détermine la réponse spectrale du capteur ;

- Les coefficients de calibration sont donnés pour chaque bande spectrale par la valeur « Absolute calibration gain ». Cette valeur correspond au produit « X_k » ;
(« Absolute calibration coefficient ») prend en compte la sensibilité du capteur ;
(« Analog Gain Value) dépend du capteur, de la bande spectrale, et du « Gain Number » (qui varie de 1 à 10) ;
- L'élévation du soleil θ en degrés (angle du soleil par rapport à l'horizontale).

Nous passons du compte numérique X_k à la luminance L_k par cette équation :

$$L_k = \frac{X_k \cdot G_k}{d^2 \cdot \cos(\theta)}$$

où L_k est la luminance en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$
 X_k est le compte numérique
correspondant à la valeur du gain

Ensuite, nous obtenons la réflectance ρ de cette façon :

$$\rho = \frac{L_k \cdot d^2 \cdot \cos(\theta)}{S_0}$$

où L_k est la luminance en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$
 d est la distance Terre/Soleil
 S_0 est la constante solaire en $W/(m^2 \cdot \mu m)$
 θ est l'angle d'éclairement zénithal SZA en radians

Le calcul de d^2 est obtenu à partir du programme MATLAB *SunEarthDistVar.m*, dans lequel il faut renseigner la date de la prise de l'image SPOT.

La constante solaire est différente selon la bande spectrale, le satellite et le capteur. Ces valeurs sont données par le document « SPOT ABSOLUTE CALIBRATION : SYNTHESIS ».

Enfin, pour obtenir l'angle d'éclairement zénithal SZA, il suffit de soustraire l'élévation du soleil θ à 90° .

L'ensemble du code qui réalise les divers calculs détaillés ci-dessus, est stocké dans le programme MATLAB *Convert_SPOT_DN_Ref_Ventoux.m*. Ce code permet d'obtenir les valeurs de ρ_{TOA} pour chaque image et chaque bande.

3) Analyse sur zones stables

A) Objectifs de l'analyse et choix des zones stables

Afin de savoir si des corrections atmosphériques sont nécessaires, nous avons procédé à une analyse préalable sur des zones a priori stables au cours du temps. Le principe que nous avons adopté consiste à analyser les variations temporelles de ces dernières.

Dans cette optique, nous avons sélectionné des zones temporellement stables en terme de réflectance : d'une part des zones localisées sur le sommet du Mont-Ventoux (et constituées uniquement de roches blanches), d'autre part des zones situées à l'ombre. En effet, en

comparant ces zones, nous ne prenons pas en compte les variations de réflectance due à la dynamique de la végétation. Ainsi, nous pouvons en déduire l'évolution des effets atmosphériques entre les différentes images et conclure sur la nécessité ou non des corrections.

Tout d'abord des zones d'intérêt (ROI) ont été sélectionnées sur l'image de 1988 au niveau du versant Nord et ont été ensuite appliquées à toutes les images de l'étude. Nous avons décidé d'en créer deux types regroupant respectivement des pixels de zones d'ombres et des pixels de pierres (sommets du Mont Ventoux). Concernant les zones à l'ombre, nous avons inclus un critère de sélection sur leur altitude. Elles ont été sélectionnées à une altitude proche de la zone d'étude, c'est-à-dire autour de 1200 mètres.

B) Extraction des valeurs de réflectance sur les ROIs avec Matlab

L'utilisation de MATLAB implique que les images soient des matrices de réflectance où chaque pixel est repéré par ses coordonnées ligne (latitude) et colonne (longitude). Ainsi, nous obtenons des matrices de trois dimensions où chaque bande spectrale est assimilée à une dimension. Ce sont sur ces matrices que notre code MATLAB porte.

Le code créé se divise en plusieurs parties :

- définir l'emplacement de chaque type de ROI. Les fichiers obtenus correspondent à des matrices comportant la valeur 1 à l'emplacement de la ROI et la valeur NaN (valeur manquante) pour le reste.
- transformer les valeurs DN des images SPOT en réflectance.
- récupérer les valeurs de réflectance aux emplacements définis dans la première étape (pour les vingt images SPOT et les différentes bandes).

Nous obtenons ainsi une matrice codée en trois dimensions pour chaque type de zone et chaque année, c'est-à-dire 40 matrices. Ces matrices renseignent les valeurs de réflectance sur les trois bandes pour chaque pixel.

C) Analyse des valeurs de réflectance TOA

Afin de savoir si les corrections sont nécessaires, nous avons analysé l'évolution du signal spectral des zones stables en calculant :

- la moyenne des valeurs de réflectance sur les différentes bandes;
- l'écart type des valeurs de réflectance sur les différentes bandes.

Théoriquement, la réflectance des zones à l'ombre est faible, alors que celle des pierres est plutôt élevée. Un filtre des données a été ajouté pour éliminer les pixels dont les valeurs de réflectance extrêmes fausseraient les résultats. Ces valeurs correspondraient à des parties de l'image qui ne sont pas des zones d'intérêt (par exemple, une zone trop éclairée une certaine année ; l'éclairage dépendant de l'heure et du jour de l'année de la prise d'image). Pour l'analyse des zones à l'ombre (ou du sommet), il a donc été nécessaire de connaître les valeurs limites de réflectance en dessous (ou au dessus pour l'analyse du sommet) desquelles nous décidons qu'elles ne sont pas acceptables. Dans cette optique, nous avons tracé les histogrammes de chaque bande spectrale relative à chaque année pour connaître la répartition des valeurs de chaque image. Par exemple, si nous analysons l'histogramme concernant l'année 2006 (Figure 13), nous remarquons que les valeurs de réflectance supérieures à 0.12 ne sont certainement pas des pixels représentant des zones d'ombre.

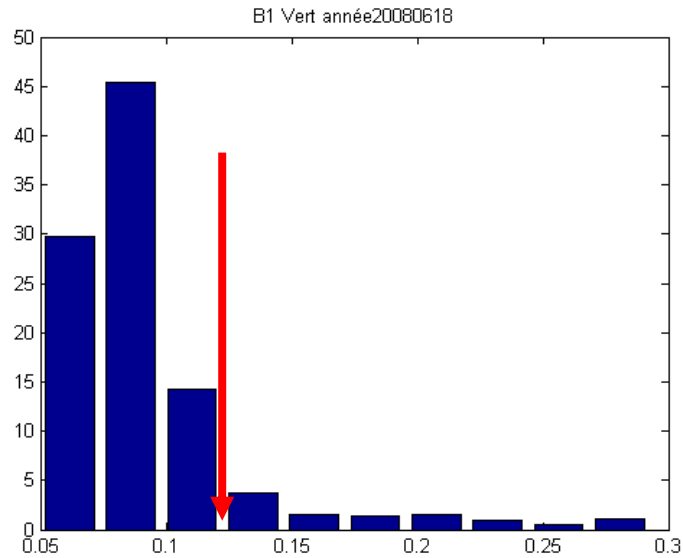


Figure 13 - Répartition des valeurs de réflectance dans la bande spectrale B1 pour les zones d'ombre de l'année 2006

Après analyse de chaque histogramme, nous avons sélectionné les valeurs limites (Tableau 2) au-delà desquelles les pixels n'étaient pas utilisés.

Type de zone	Valeurs de réflectance à éliminer		
	B1	B2	B3
Ombre	0,10	0,085	0,185
Sommet	0,21	0,23	0,32

Tableau 2 - Valeurs limites de réflectance de notre filtre

Un second filtre a été ajouté permettant de garder seulement les valeurs les plus probables, correspondant à 80% des valeurs :

- Les plus faibles pour les zones d'ombre ;
- Les plus élevées pour le sommet.

D) Résultats de l'analyse sur les zones stables

La Figure 14 représente la moyenne des réflectances pour les trois bandes spectrales concernant les zones d'ombre. Nous notons que les courbes relatives aux bandes spectrales du visible (B1 et B2) ne présentent pas d'importantes irrégularités. Celle de la bande proche-infrarouge (B3) possède des variations temporelles sensiblement identiques avec une amplitude plus élevée. Cela est dû au fait que la végétation réfléchit plus dans le proche infrarouge que dans le visible.

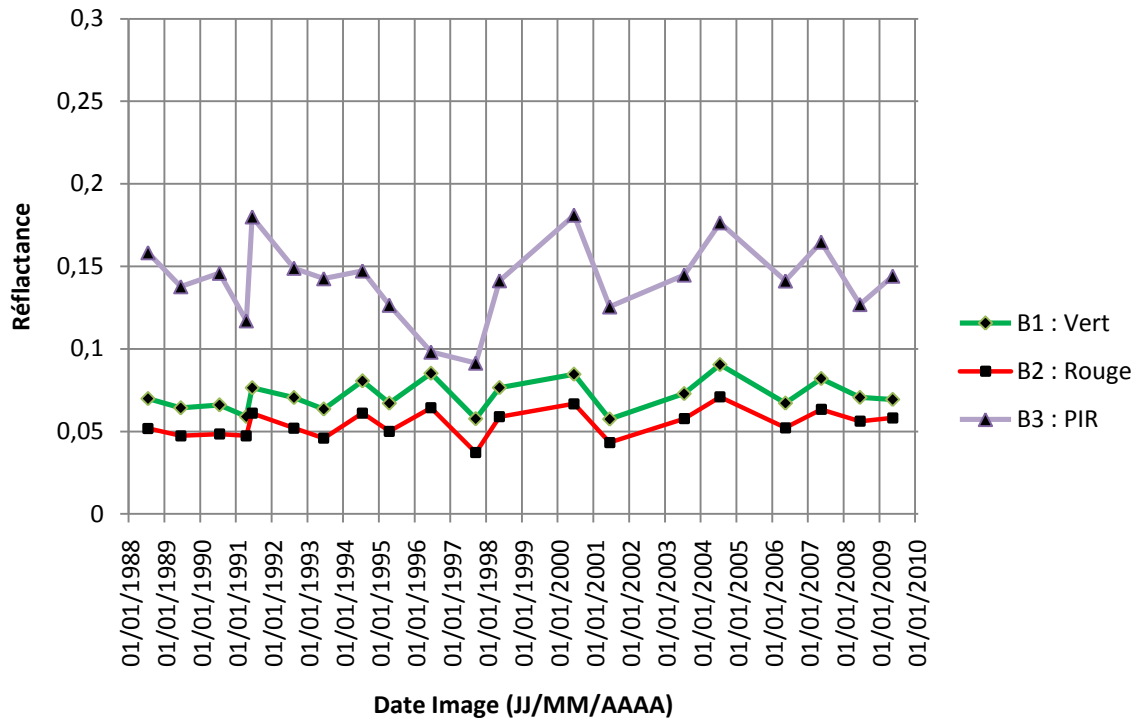


Figure 14. Réflectance TOA moyenne des zones d'ombre en fonction des images

Concernant les données du sommet, il a fallu exclure quatre années : 1994, 1996, 2007, et 2008. En effet pour ces dernières, la présence de nuages au sommet du Mont-Ventoux faussait l'analyse des résultats. Suite à cela, nous avons obtenu des variations similaires aux courbes correspondant aux zones d'ombre.

Malgré une stabilité générale observée, les pics de variations dans les trois bandes nous semblent suffisamment importants pour détecter l'influence des effets atmosphériques. Il est donc nécessaire d'en faire les corrections.

4) Les corrections des effets atmosphériques

A) Principe

Pour corriger les effets atmosphériques il est nécessaire de connaître certaines données de l'atmosphère, tel que la teneur en H₂O et en O₃, et la composante en aérosols.

La composante en aérosols est beaucoup plus difficile à définir que la composante moléculaire (teneur en H₂O et O₃). De plus, l'abondance des particules et leurs propriétés sont très variables d'un endroit à l'autre. En pratique, cette mesure se fait par photomètre solaire. Or, dans notre cas, nous n'avons pas de données à notre disposition. Nous avons donc estimé le contenu en aérosols à partir de données que nous possédions.

C'est le logiciel 6S qui a permis d'estimer la composante en aérosols (τ_{550}). Ensuite, nous avons utilisé le modèle de corrections atmosphériques SMAC (Simplified Model for Atmospheric Correction, Launay, 1999) pour en déduire la réflectance TOC (Figure 15).

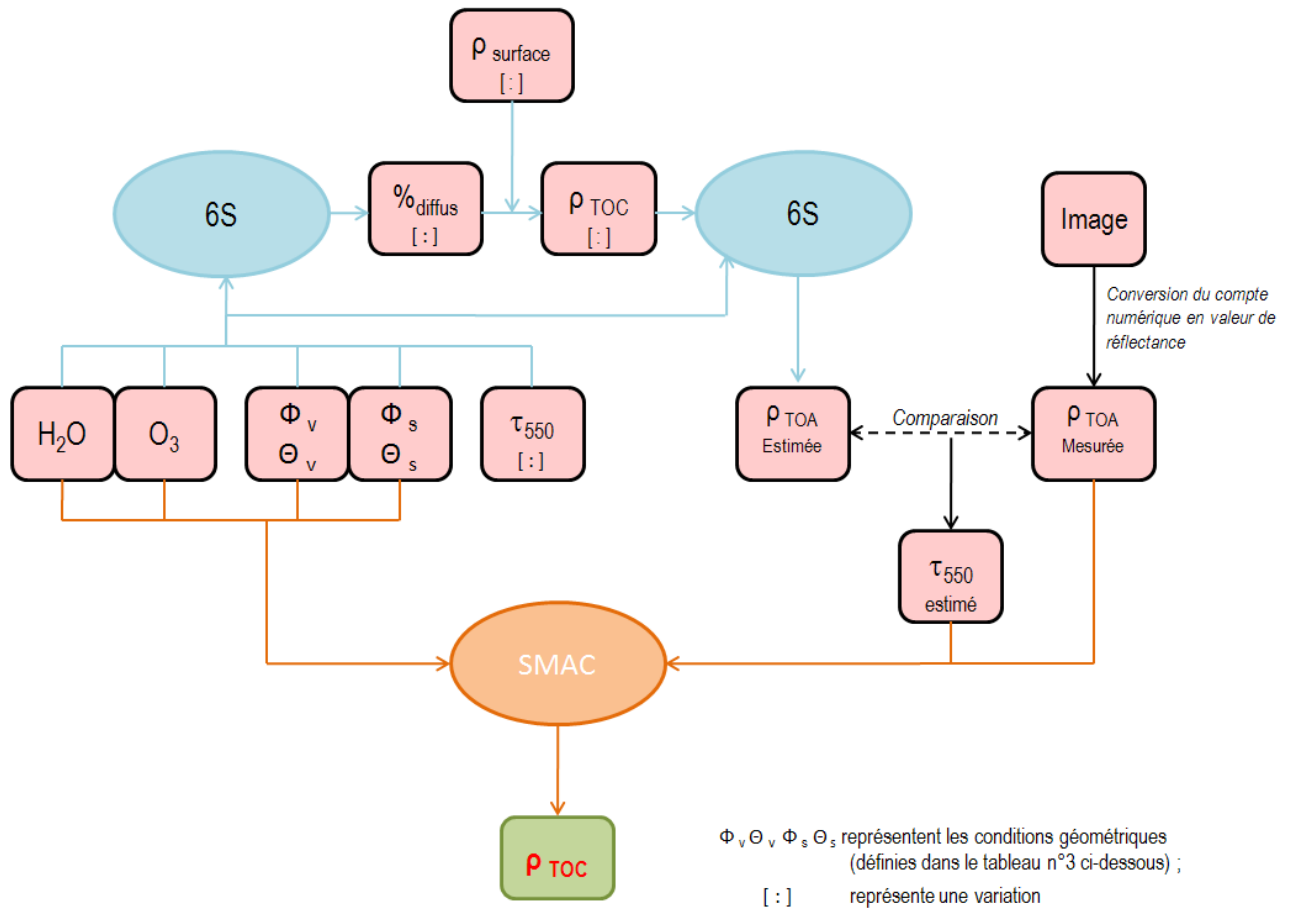


Figure 15 - Déroulement des étapes des corrections atmosphériques

B) Estimation de l'épaisseur optique en aérosols τ_{550}

(a) Introduction

L'épaisseur optique totale des aérosols τ est obtenue par soustraction de l'épaisseur optique de la diffusion moléculaire de l'épaisseur optique globale. Nous pouvons exprimer τ par la formule ci-dessous :

$$\tau(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}$$

Où β est l'épaisseur optique des aérosols à $1\mu\text{m}$, et α est le coefficient d'Angström (Angström, 1961, 1964).

α est inversement proportionnel à la taille des aérosols, et en pratique varie entre 0,5 et 2.

Dans la pratique, on caractérise l'épaisseur optique par le paramètre τ_{550} , c'est-à-dire à la longueur d'onde 550 nm. Ce dernier peut-être déterminé par des mesures faites par photomètre solaire. Cependant ces mesures ne sont pas toujours disponibles, ce qui est notre cas. Pour être considéré comme fiable, ce paramètre ne doit pas dépasser 0,3. Cela signifierait la présence de nuages ou une trop forte quantité d'aérosols, ce qui n'est pas réaliste sur notre zone d'étude.

L'objectif a été d'obtenir une estimation du τ_{550} la plus probable possible en fonction des différentes données atmosphériques (teneur en H_2O et O_3), et des valeurs de réflectance des images SPOT. Pour cela, nous avons effectué cette estimation sur les zones stables que nous avons délimitées auparavant, et en particulier sur les zones d'ombre (confère § 3A)). Les calculs ont été effectués sur la bande spectrale B1, c'est-à-dire la bande réfléchissante dans le vert, pour laquelle la variation de l'épaisseur optique a le plus d'effets.

La première partie du calcul consiste à estimer à partir de divers paramètres la réflectance TOA (appelée ρ_{toa}) que le modèle 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum ; Vermote et al., 1997) va exploiter. Il s'agit d'un modèle de simulation du transfert radiatif à travers l'atmosphère non-nuageuse dans des conditions réalistes. Il permet d'évaluer l'importance des effets de l'atmosphère sur les images satellitaires d'usage courant (SPOT, TM, NOAA, ...) et de les corriger partiellement.

Cette réflectance ρ_{toa} est calculée en fonction de plusieurs valeurs de τ_{550} .

Par la suite, la réflectance ρ_{toa} est comparée à la réflectance TOA des images SPOT (appelée réflectance mesurée ou ρ_{meas}). À noter que ρ_{meas} correspond à la réflectance obtenue après la conversion du compte numérique des images en réflectance. La comparaison entre ρ_{meas} et ρ_{toa} permettra de choisir pour chaque image le τ_{550} le plus probable.

(b) Obtention de la réflectance

Pour lancer le traitement du logiciel 6S, ce dernier demande un fichier d'entrée où sont répertoriés les divers paramètres dont il a besoin. Ces paramètres sont fonction des données d'entrée que nous lui proposons. Dans notre cas, voici les divers paramètres qu'il est nécessaire de renseigner :

- Les conditions géographiques (angles solaires, angles de visée, date de visée) que nous trouvons dans le fichier PDF, fourni par l'ESA et joint à chaque image SPOT. En particulier, nous souhaitons calculer quatre paramètres (confère Tableau 3);
- Les conditions atmosphériques (teneur en H_2O et O_3) obtenues via le site de la NASA (confère § II)3D));
- Le modèle d'aérosols qui permet de définir les proportions des différents constituants possibles (poussières, constituants solubles, particules océaniques et suies de carbone). Nous avons choisi le modèle d'aérosols « Urbain », car il permet de limiter les variabilités d'aérosols (d'après Remer et al., 2005);
- L'épaisseur optique d'aérosols τ_{550} ;
- L'altitude de la cible : altitude moyenne de la zone d'étude, c'est-à-dire 1200 mètres ;
- Informations concernant les capteurs : le modèle requiert quelques informations sur l'altitude des capteurs. Dans notre cas, il suffit de l'informer que le capteur est à bord du satellite ;
- La définition de la bande spectrale : les bornes supérieure et inférieure de la bande spectrale, ainsi que sa sensibilité spectrale ;
- Les conditions de surface : nous considérons la surface comme homogène. Il est alors nécessaire de renseigner la réflectance cible. Puisque l'estimation est faite sur les zones d'ombre, nous allons appeler cette réflectance ρ_{meas} .

Par contre, il y a deux paramètres qui sont inconnus, et que nous ne pouvons pas mesurer :

- L'épaisseur optique d'aérosols τ_{550} ;
- La réflectance cible ρ_{meas} .

Paramètre	Signification	Mode de calcul
Θ_s	Angle zénithal d'éclairement	$\Theta_s = 90 - \text{angle d'élévation du soleil}$
Φ_s	Angle azimutal d'éclairement	$\Phi_s = \text{azimut du soleil}$
Θ_v	Angle zénithal de visée	$\Theta_v = \text{angle d'incidence}$
Φ_v	Angle azimutal de visée	$\Phi_v = \text{angle d'orientation} + 90$ si le satellite est à l'est de la scène (convention « R » pour « Righth ») $\Phi_v = \text{angle d'orientation} + 270$ si le satellite est à l'ouest de la scène (convention « L » pour « Left »)

Tableau 3 - Description des angles de visée et des angles solaires

Pour nous affranchir de ces deux inconnues, nous allons les faire varier entre des intervalles de valeurs qui nous semblent cohérents.

Ainsi, nous allons faire osciller l'épaisseur optique d'aérosols τ_{550} de 0.005 à 0.545 avec un pas de 0.02. Nous obtenons 28 valeurs pour τ_{550} .

Les zones d'étude étant situées à l'ombre leur réflectance provient de l'éclairement diffus du ciel :

$$=$$

Où ρ_{diff} représente la fraction diffuse
 ρ_{surf} représente la réflectance de la surface

Afin de calculer la fraction diffuse (ρ_{diff}), un premier lancement du logiciel 6S est nécessaire. Les valeurs de la ρ_{diff} varient en fonction des différentes valeurs de τ_{550} . À noter que la fraction diffuse ne dépend presque pas de la réflectance cible, mais principalement des conditions atmosphériques et géographiques. Il n'est donc pas nécessaire de renseigner une valeur de réflectance cible très précise lors de cette première étape.

Ce traitement fonctionne avec le programme *MATLAB Run_6S_1er_run.m*, qui crée pour chaque image le fichier d'entrée nécessaire à 6S. Ce même programme lance le logiciel 6S, qui par la suite crée un fichier de sortie.

Suite à ce premier calcul, nous extrayons du fichier de sortie, la fraction diffuse pour chaque année et pour chaque valeur de τ_{550} . Nous stockons ces valeurs dans une matrice (appelée *Info_fraction_diffuse.mat*).

Lors du second traitement de 6S, nous entrons la valeur de la réflectance cible, c'est-à-dire la réflectance ρ_{cible} , calculée à partir de la ρ_{diff} (issue de la matrice *Info_fraction_diffuse.mat*) et de ρ_{surf} . Le traitement s'effectue pour des valeurs de ρ_{cible} comprises dans un intervalle de 0.05 à 0.50 avec un pas de 0.05, soit un total de dix valeurs.

C'est à partir du programme *Run_6S_2nd_run.m* qu'il est lancé le second calcul. Il diffère du premier programme au niveau des valeurs de la réflectance cible.

Ce second traitement permet d'extraire du fichier de sortie de 6S, la valeur estimée de la réflectance apparente au niveau du satellite, c'est-à-dire ρ_{λ} . Pour chaque image, le logiciel calcule ρ_{λ} en fonction de τ_{550} , et de $\rho_{\lambda}^{\text{TOC}}$.

(c) Bilan : comparaison de la réflectance ρ_{λ} et de la réflectance $\rho_{\lambda}^{\text{TOC}}$

L'étape suivante consiste à comparer les valeurs de réflectance ρ_{λ} et $\rho_{\lambda}^{\text{TOC}}$ afin de déterminer pour chaque image l'épaisseur optique d'aérosols τ_{550} qui paraît la plus adaptée. Cette analyse est effectuée à partir du programme *Run_6S_comparaison.m*, élaboré sous MATLAB.

Le code du programme se divise en plusieurs étapes :

- pour chaque pixel, nous déterminons le τ_{550} qui correspond à l'écart minimum entre la réflectance ρ_{λ} et la réflectance $\rho_{\lambda}^{\text{TOC}}$, et cela pour chaque valeur de τ_{550} ; (1)
- nous stockons dans une nouvelle matrice les valeurs de réflectance $\rho_{\lambda}^{\text{TOC}}$ qui sont fonction des différentes valeurs de τ_{550} et du ρ_{λ} déterminé à l'étape 1 ; (2)
- nous calculons le RMSE entre la matrice de réflectance $\rho_{\lambda}^{\text{TOC}}$ et la matrice de réflectance ρ_{λ} obtenue à l'étape 2 ; (3)
- nous sélectionnons la valeur de τ_{550} dont le RMSE est le plus faible pour chaque image.

Le RMSE (ou Root Mean Square Error) correspond à la racine carrée de la moyenne arithmétique des carrés des écarts.

Dans notre code, nous faisons l'hypothèse que pour chaque pixel nous pouvons avoir une réflectance TOC différente. Par contre, l'épaisseur optique des aérosols τ_{550} est forcément identique pour l'ensemble des pixels d'une image.

Le premier constat est la présence de valeurs de RMSE faibles : les valeurs oscillent entre 0.00098 (pour l'année 2001) et 0.0014 (pour l'année 2000). Ces faibles valeurs sont un point positif pour notre traitement. La Figure 16 présente le graphique de ces valeurs.

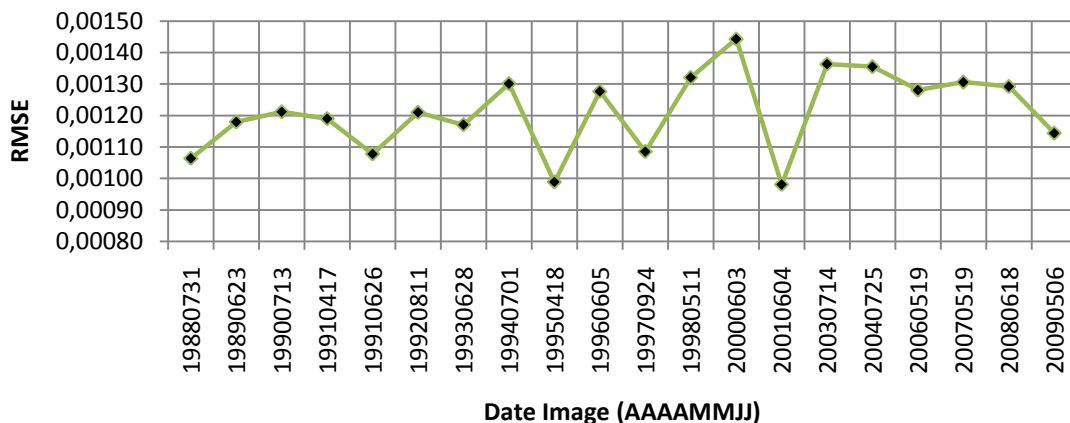


Figure 16 - Courbe du RMSE en fonction des différentes images

Les valeurs τ_{550} varient entre 0.005 et 0.125, ce qui témoigne de la faible influence des effets atmosphériques. Pour comparaison, dans deux villes du département (Avignon et Carpentras) il a été mesuré respectivement un τ_{550} de 0.18 et de 0.17 en plein été. Sachant, que notre zone d'étude est située en altitude et que généralement les dates de visée correspondent à des journées claires, ces valeurs ne semblent pas aberrantes.

Dans le but d'une analyse plus fine et de la validation des résultats, nous avons tracé pour chaque image les courbes du RMSE (calculé à l'étape 3) en fonction des valeurs de τ_{550} . Cela nous permet de contrôler la conformité de notre solution. L'idéal est d'obtenir une courbe en cloche inversée, où la valeur minimale de RMSE correspond à la valeur de τ_{550} la plus adaptée. Ce type de courbe permet de clairement identifier la valeur idéale.

Nous obtenons des courbes semblables et assez satisfaisantes pour 18 images (sur 20). Par exemple, voici la courbe concernant l'image de juin 1991 (Figure 17). Nous remarquons aisément la valeur minimale de RMSE qui correspond à une valeur de τ_{550} de 0.05.

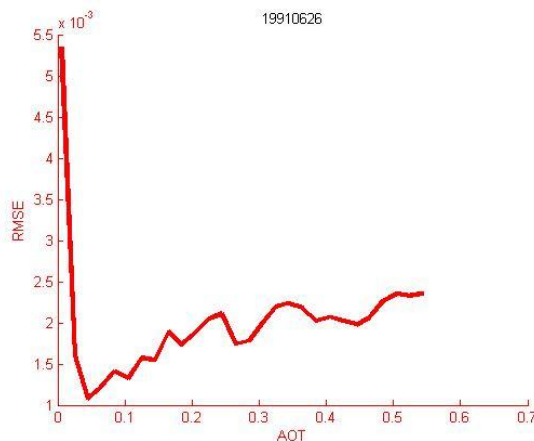


Figure 17 - Courbe du RMSE en fonction de l'épaisseur optique relative à l'image de juin 1991

Par contre, les images concernant deux années (avril 1991 et septembre 1997) présentent des courbes différentes, où nous ne pouvons pas identifier une valeur minimale. En effet, la valeur sélectionnée par le programme, c'est-à-dire celle où le RMSE est minimal, correspond à la valeur de τ_{550} extrême (0.01). Cela témoigne d'une très faible influence de l'atmosphère, où la valeur de τ_{550} est quasiment nulle. La courbe de la Figure 18, relative à l'image d'avril 1991, ne permet pas d'identifier clairement la valeur adéquate.

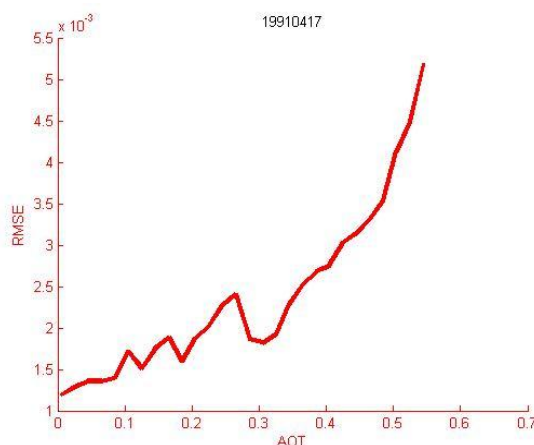


Figure 18 - Courbe du RMSE en fonction de l'épaisseur optique concernant l'image d'avril 1991

Finalement, nous présentons la valeur de l'épaisseur optique des aérosols obtenue pour chaque image, sous forme de graphique (Figure 19). Nous notons des valeurs assez diverses en fonction des années, mais qui restent faibles : la moyenne des valeurs est de 0.065 et l'écart-type de 0.04. Comme les aérosols sont les principaux éléments responsables des effets atmosphériques, les corrections atmosphériques n'auront donc pas d'influence importante sur la variabilité des valeurs de réflectance TOC.

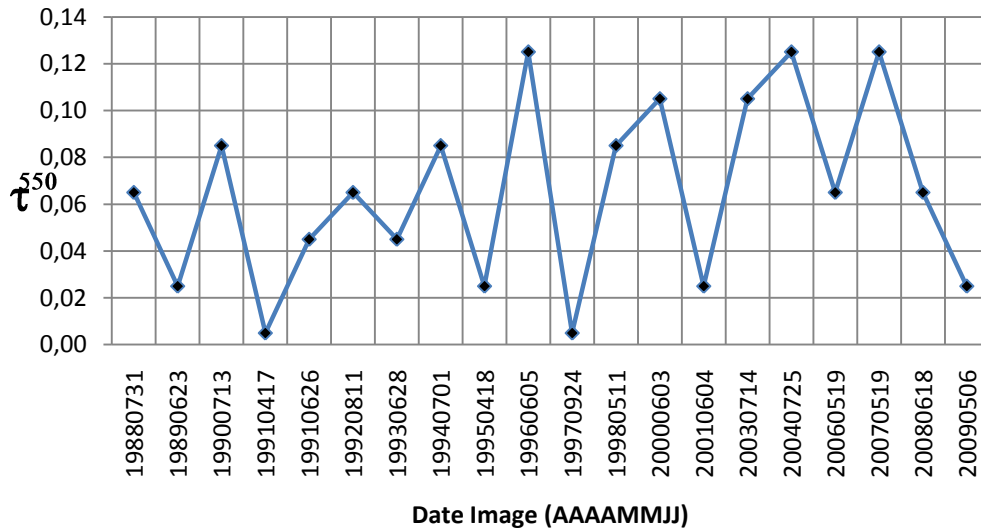


Figure 19 - L'épaisseur optique estimée en fonction des différentes images

C) Obtention des valeurs de réflectance TOC

Suite à l'étape précédente, qui a consisté à estimer l'épaisseur optique des aérosols, l'objectif a été d'obtenir les valeurs de réflectance TOC, c'est-à-dire les valeurs de réflectance au dessus du couvert végétal, corrigées des effets de l'atmosphère.

Dans cette optique, nous allons utiliser le modèle de corrections atmosphériques SMAC (Simplified Method for Atmospheric Corrections ; Rahman et al., 1994). Ce dernier simule, dans le domaine optique, une réflectance bidirectionnelle au sommet de l'atmosphère à partir d'une réflectance bidirectionnelle à la surface terrestre (sens direct) mais permet également d'estimer la réflectance TOC à partir de la réflectance TOA (sens inverse).

Nous faisons quelques hypothèses. Parmi ces dernières, nous supposons une surface de visée lambertienne et nous ignorons les variations verticales des propriétés optiques de l'atmosphère (Atzberger, 1998).

SMAC requiert deux types de paramètres d'entrée :

- ceux caractérisant la géométrie de visée et la géométrie d'éclairement (définis dans le Tableau 3) ;
- ceux caractérisant l'atmosphère moyenne au-dessus de la cible au moment de la mesure : la teneur en H_2O , la teneur en O_3 , et l'épaisseur optique des aérosols à τ_{550} .

À noter que SMAC demande une autre information : la pression (qui varie en fonction de l'altitude). Théoriquement, il faudrait faire varier cette pression en fonction de chaque pixel,

ce qui serait assez long. Par mesure de simplification, nous avons décidé de choisir une valeur moyenne de pression correspondant à l'altitude moyenne de la zone d'étude (c'est-à-dire à 1200 mètres). Ce choix s'explique par :

- La faible influence de la variation de pression sur les résultats. Pour cela, nous avons simulé les corrections atmosphériques pour les valeurs minimum et maximum de pression relatives à la zone d'étude (différence de 25 Hpa).
- La faible influence de la variation de pression sur les bandes spectrales Rouge et Proche-Infrarouge. En effet, dans la suite de l'analyse, ce seront ces deux bandes qui seront utilisées (pour le calcul du RVI et du NDVI), et non la bande spectrale Vert, où la différence de pression a le plus de conséquences.

L'application du modèle SMAC se fait à partir du programme MATLAB *Corr_Atmo_SPOT_Ventoux.m*. Nous obtenons en fichier de sortie les matrices comportant les valeurs de réflectance TOC des images SPOT.

D) Résultats des corrections atmosphériques

Pour analyser les variabilités des valeurs de réflectance TOC obtenues, nous nous sommes focalisés sur les zones stables précédemment définies (confère § 3A)). De la même manière, nous avons isolé les zones d'intérêts pour calculer les moyennes et les écarts types des valeurs de réflectance pour chaque année. Les mêmes filtres relatifs à la sélection des valeurs de réflectance ont été appliqués.

Le premier constat au vu de la Figure 20 est la présence d'un signal assez stable entre les différentes années pour les bandes spectrales du visible (B1 et B2). Par contre, le signal est plus variable concernant la bande spectrale du proche-infrarouge. Comme expliqué précédemment, cela est dû au fait que le signal est plus sensible à la présence de végétation dans le proche-infrarouge que dans le visible.

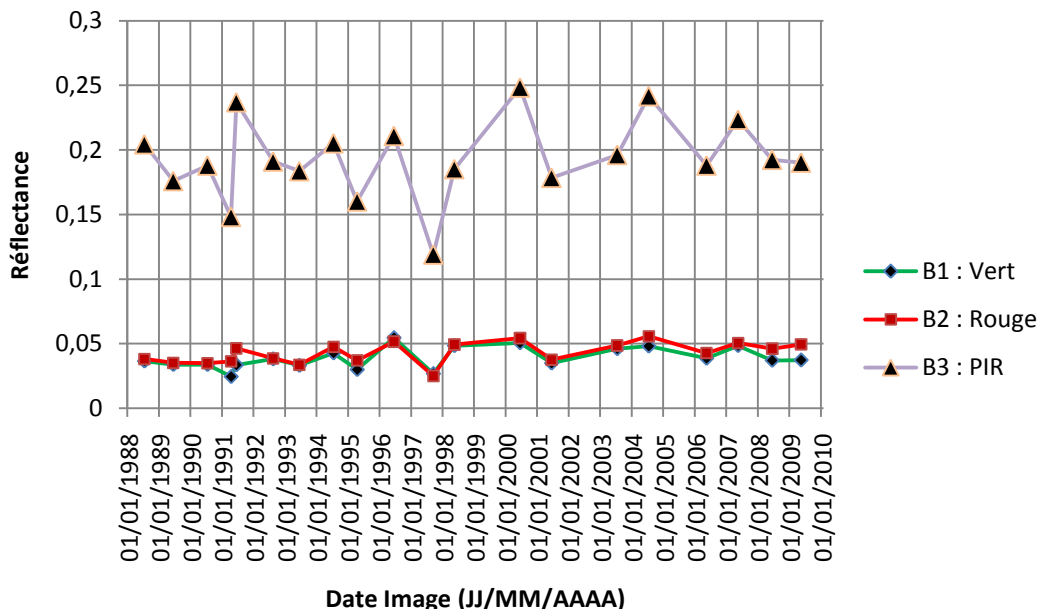


Figure 20 - Réflectance TOC moyenne des zones d'ombre en fonction des images

Si nous comparons les courbes de la Figure 20 (réflectance TOC), aux courbes de la Figure 14 (réflectance TOA), nous remarquons des similitudes. Cela s'explique par le faible impact des effets atmosphériques sur les rayonnements émis (τ_{550} faible), et ensuite captés par les satellites.

Malgré ces similitudes, nous constatons des changements entre les valeurs de réflectance TOA et les valeurs de réflectance TOC.

Concernant les bandes spectrales du visible, pour les zones d'ombre nous relevons :

- des valeurs de réflectance TOA qui se situent autour de 5 à 7% ;
- des valeurs de réflectance TOC qui se situent autour de 3 à 5% ;

Concernant la bande spectrale du proche-infrarouge, pour les zones d'ombre nous notons :

- des valeurs de réflectance TOA qui se situent autour de 15 % ;
- des valeurs de réflectance TOC qui se situent autour 17 % ;

Ainsi, lors du passage de la réflectance TOA à la réflectance TOC, nous constatons une baisse de réflectance dans le visible et une hausse dans le proche-infrarouge.

En effet, d'après Guyot et al. (1995), selon la réflectance de la canopée (ρ_{TOC}), les effets au niveau du satellite sont différents :

- si la réflectance de la cible est faible (<15 %), ce qui est le cas pour les bandes du visible relatives aux zones d'ombre, l'absorption atmosphérique qui affecte un signal de faible amplitude, joue un rôle secondaire. Le signal au niveau du satellite est alors plus élevé qu'au niveau du sol ;
- Si la réflectance de la cible est moyenne ou forte, le signal est plus faible au niveau du satellite qu'au niveau du sol. Cela est le cas pour la bande spectrale du proche-infrarouge.

Pour les courbes correspondantes aux valeurs de réflectance du sommet, il a été établi les mêmes constats. La Figure 21 présente les courbes des valeurs de réflectance moyennes. Les années présentant des nuages au sommet ont été exclues.

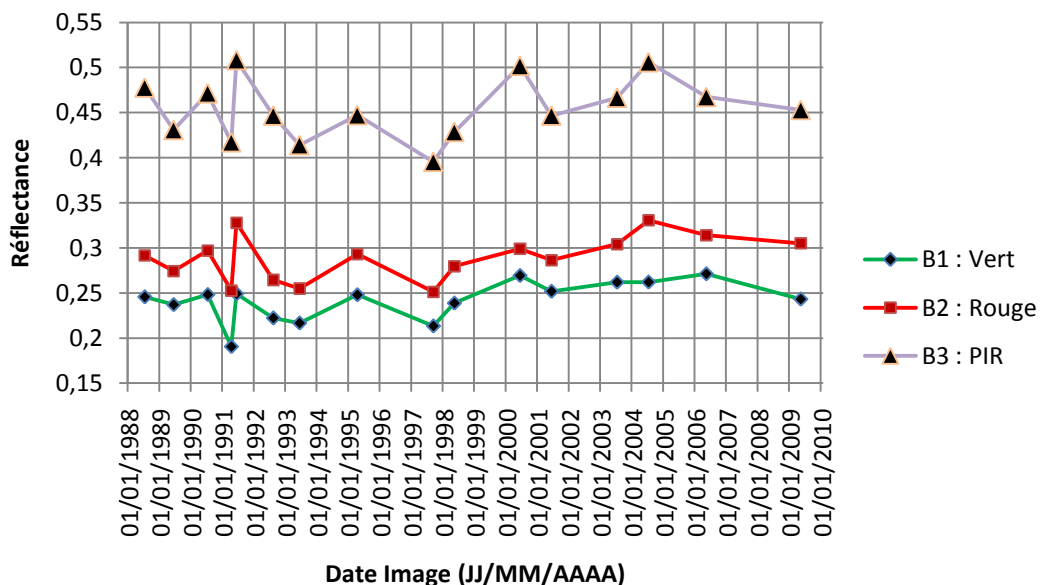


Figure 21 - Réflectance TOC moyenne du sommet en fonction de la date des images

Si cette fois-ci nous comparons les valeurs de réflectance TOA aux valeurs de réflectance TOC sur l'ensemble de la zone d'étude, et pas seulement sur les zones stables, nous pouvons mettre en évidence la relation de Guyot et al. (1995), précédemment mentionnée.

Sur la Figure 22 et la Figure 23 sont tracées les courbes de réflectance TOC en fonction des réflectance TOA dans les bandes verte et PIR. Les bissectrices sont tracées en couleur rouge. Ainsi, dans la bande spectrale B1 (Figure 22), nous remarquons que lorsque la réflectance atteint une certaine valeur (entre 15 et 20%) la réflectance TOC devient plus élevée que la réflectance TOA. Dans la bande spectrale B3 (PIR), la réflectance TOC est systématiquement plus élevée que la réflectance TOA.

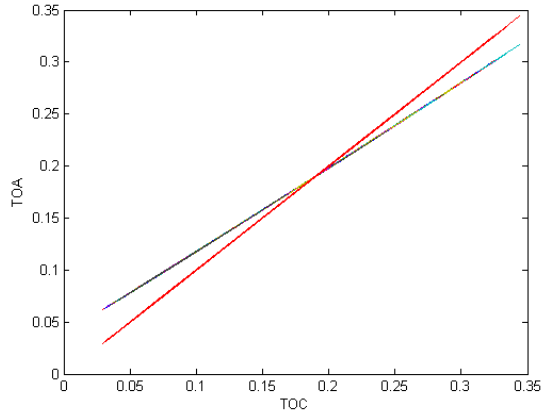


Figure 22 - Réflectance TOC en fonction de la réflectance TOA pour l'année 2003 dans la bande B1

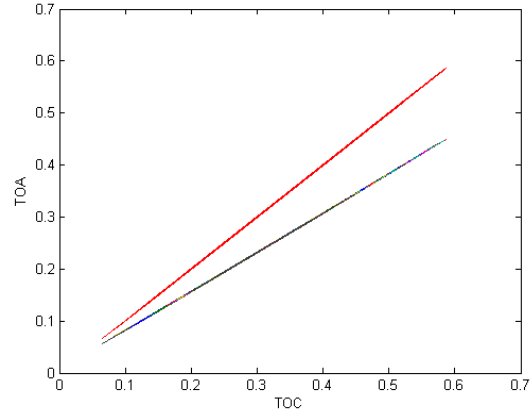


Figure 23 - Réflectance TOC en fonction de la réflectance TOA pour l'année 2003 dans la bande B3

V) Normalisation

1) Objectifs de la normalisation

Les résultats des corrections atmosphériques sur les zones stables (IV)4D)) ont permis d'obtenir un signal de réflectance plus stable pour les bandes spectrales du visible (B1 et B2). À noter que ce signal est encore variable pour la bande spectrale B3 (PIR). Les corrections effectuées ne semblent pas suffisantes pour l'analyse sur les zones de sapins. Une normalisation des valeurs de réflectance des images apparaît donc nécessaire. Elle a été effectuée par rapport aux points invariants au cours du temps :

- les zones d'ombre qui représentent les zones de réflectance minimale ;
- le sommet, constitué uniquement de pierres, qui représente les zones de réflectance maximale ;

Cette normalisation s'est effectuée sur les valeurs de réflectance TOC relatives aux trois bandes spectrales.

Voici l'opération qui permet de définir notre image en réflectance normalisée :

$$= \frac{\text{---}}{\text{---}} +$$

Où

- représente la réflectance TOC normalisée de l'image i ;
- représente la réflectance TOC avant normalisation de l'image i ;
- représente la réflectance TOC du sommet pour l'image i ;
- représente la réflectance TOC des zones d'ombre pour l'image i ;
- représente la réflectance moyenne (ensemble des images) du sommet;
- représente la réflectance moyenne (ensemble des images) des zones d'ombre ;

En revanche, cette normalisation entraîne une perte de données pour les quatre années où les valeurs de réflectance du sommet ne sont pas exploitables (1994, 1996, 2007, 2008).

2) Résultats de la normalisation

Le calcul a été réalisé par le programme MATLAB *Normalisation.m*. Les courbes relatives aux valeurs moyennes de réflectance des zones stables deviennent des droites (Figure 24).

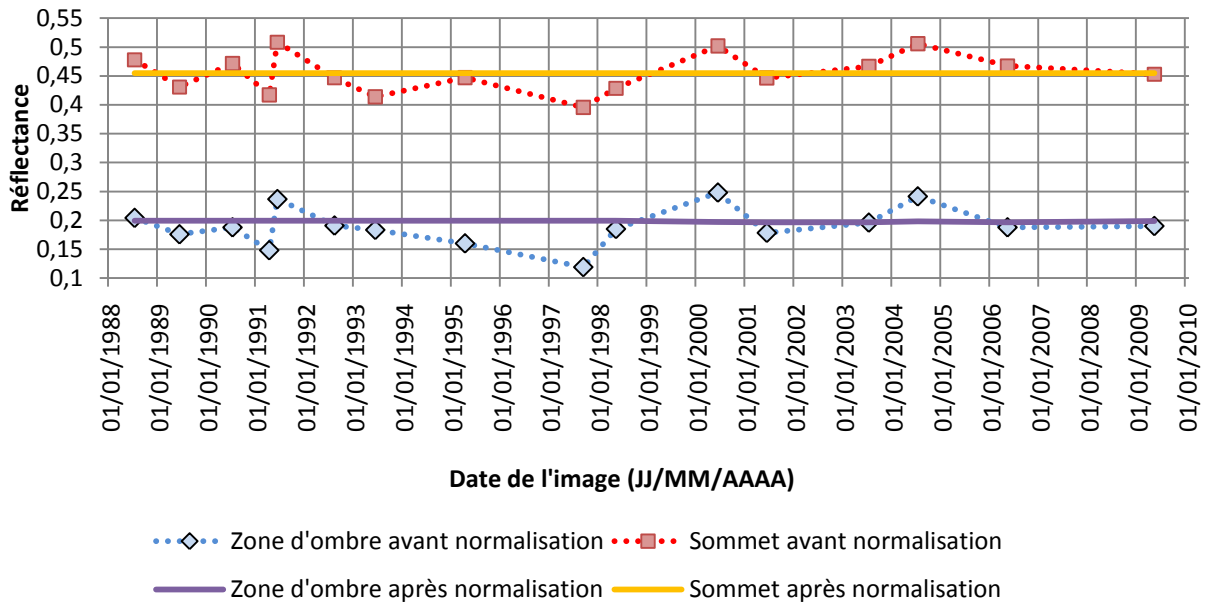


Figure 24 - Courbes des moyennes de réflectance TOC sur la bande spectrale B3 des zones stables, avant et après normalisation, en fonction de la date des images

Pour analyser les effets de la normalisation, il a été délimité, grâce aux indications des forestiers de l'URFM, une nouvelle zone comprenant des Sapins pectinés en bon état de santé générale et où il y a très peu de Sapins morts ou dépérissants. Cette zone est appelée « Sapins en bonne santé ».

Les moyennes des réflectances de cette zone ont été calculées pour l'ensemble des images. La Figure 25 présente les courbes de ces moyennes, avant et après la normalisation, concernant la bande spectrale PIR. Nous en déduisons que la normalisation a permis d'améliorer la stabilité du signal.

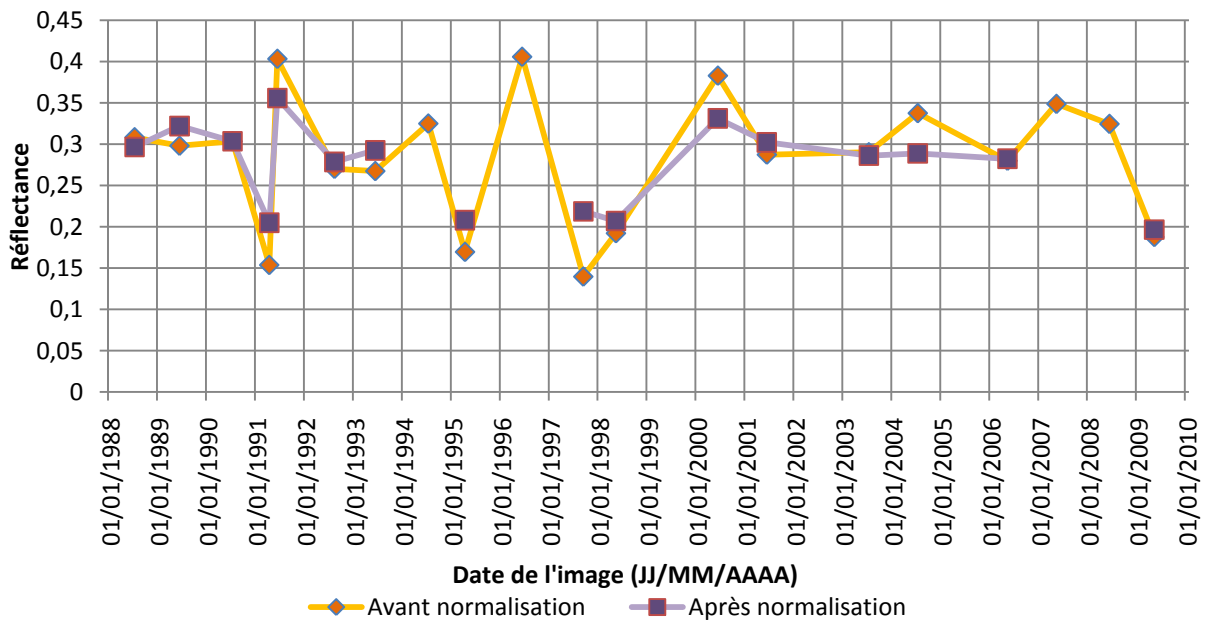


Figure 25 - Courbes des moyennes de réflectance TOC sur la bande spectrale B3 de la zone "Sapins en bonne santé", avant et après normalisation, en fonction de la date des images

VI) Résultats

1) Choix des zones d'analyses

Le but de l'étude étant de pouvoir localiser les zones du dépérissement du sapin, une nouvelle zone, appelée « Présence de sapins morts », a été délimitée. Cette dernière présente une forte mortalité de sapins. Il est important de mentionner que dans cette zone la portion de sapins morts reste bien inférieure à la portion de sapins en bonne santé. Sur la Figure 26 qui est une photographie d'une partie de cette zone, nous remarquons trois types de colorations pour les aiguilles du sapin :

- Vert : le sapin est en bonne santé
- Rouge : le sapin vient de mourir (dans l'année)
- Gris : le sapin est mort depuis quelques années

L'analyse consiste à détecter la présence de sapins ayant des aiguilles de couleur grise ou rouge parmi les sapins en bonne santé.



Figure 26 - Photographie d'une partie de la zone "Présence de sapins morts"

Afin de pouvoir contrôler et valider les prochains résultats, nous avons comparé le comportement spectral des zones « Présence de sapins morts » et « Sapins en bonne santé » (définie § V2)). Dans cette dernière, nous rappelons qu'il y a eu très peu de sapins morts ces dernières années.

L'absence ou la faible présence d'autres espèces d'arbres ont également influencé le choix de ces zones. En effet, leur présence aurait pour conséquence de modifier la dynamique du signal.

D'autre part, il faut noter que l'altitude est différente pour les deux zones : la zone « Sapins en bonne santé » est située à environ 150 mètres plus haut que la zone « Présence de sapins morts ». Nous supposons que cette différence peut avoir une influence sur les valeurs de réflectance, mais aussi que cela influe comme un biais, plutôt qu'un bruit.

2) Résultats

A) Analyse globale

Comme mentionné précédemment (confère § 1)4)), notre étude porte sur l'analyse de l'évolution des indices de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et RVI (Ratio Vegetation Index). Les valeurs de NDVI et de RVI ont été calculées pour les deux zones à partir des valeurs de réflectance TOC normalisées puis moyennées sur chacune des zones. Nous remarquons que les courbes de NDVI et de RVI sont très semblables et fournissent les mêmes informations. En revanche, la courbe de RVI présente des amplitudes plus élevées, ce qui témoigne d'une plus grande sensibilité de cet indice à la présence de la végétation. C'est pour cela que nous présenterons les courbes de RVI dans la suite de l'analyse.

Théoriquement, le RVI doit être plus élevé pour un sapin en parfaite santé, que pour un sapin mort, ou dépérissant. Cela s'explique car cet indice est sensible à la quantité de végétation (plus importante pour une végétation abondante) et donc à l'état sanitaire de l'arbre.

Nous présentons la courbe d'évolution temporelle du RVI sur les deux zones (Figure 27). Les deux courbes sont très similaires, ce qui est satisfaisant étant donné qu'elles représentent toutes les deux des zones de sapins. Globalement, comme il était attendu, la courbe concernant la zone « Sapins en bonne santé » est au-dessus de la courbe relative à la zone « Présence de sapins morts », sauf pour l'image de 2000.

En revanche, les valeurs des indices de végétation pour l'année 2000 sont anormalement hautes. Cette anomalie reste inexpliquée. Elle n'est pas due à des conditions météorologiques particulières ou des conditions de visée.

Nous remarquons pour les deux courbes la présence de valeurs basses au mois d'avril pour deux années (1991 et 1995). En effet, à cette date, les arbres, et particulièrement les feuillus, n'ont pas encore débourrés, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas encore produit leurs nouvelles feuilles de l'année.

À noter que les deux courbes se séparent à partir de 2001, date à laquelle sont apparus les dépérissements. Cette remarque sera détaillée avec la Figure 28.

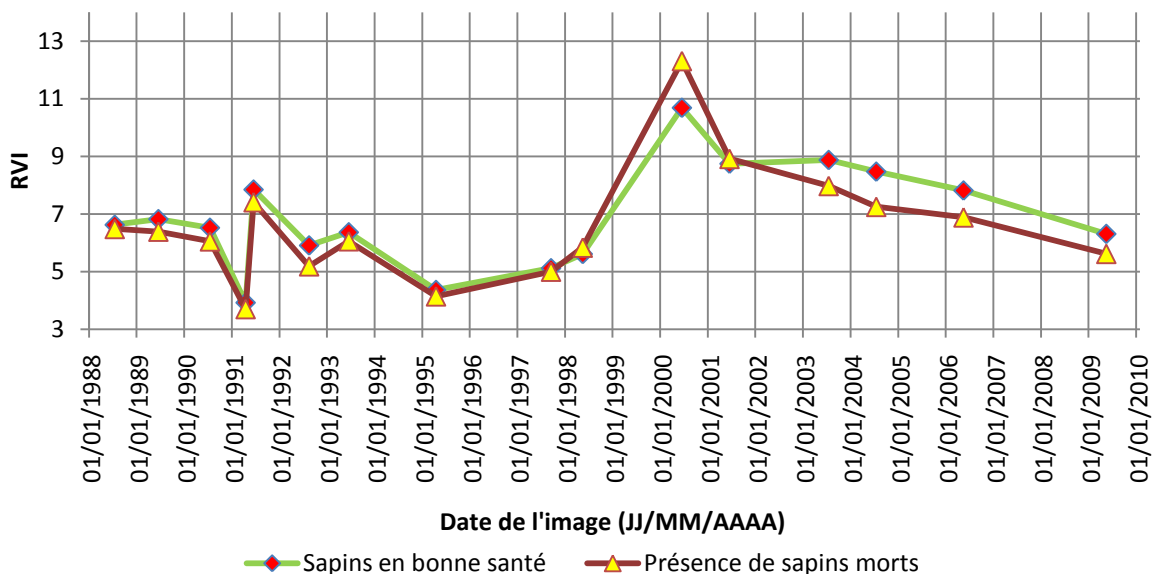


Figure 27 - Courbe du RVI moyen des zones "Sapins en bonne santé" et "Présence de sapins morts" en fonction de la date de l'image

Pour analyser l'apparition des dépérissements du sapin dans la zone « Présence de sapins morts », le RVI moyen de la zone « Sapin en bonne santé » est considéré comme valeur de référence. Ainsi, il a été calculé les écarts entre le RVI moyen des deux zones pour chaque image i par la formule (voir Figure 28):

Où \bar{RVI}_i représente le RVI moyen de la zone « Sapin en bonne santé » concernant l'image i
 \bar{RVI}'_i représente le RVI moyen de la zone « Présence de sapins morts » concernant l'image i

Lorsque la valeur ΔRVI_i est positive, cela induit que le RVI moyen est plus faible dans la zone « Présence de sapins morts ». En analysant la courbe de la Figure 28, malgré l'année 2000 qui est anormalement basse, les valeurs sont globalement positives. Nous remarquons une augmentation à partir des années 2000 (malgré une légère baisse à partir de 2005). Cela concorde avec les dernières études faites par l'URFM, qui concluaient à une augmentation anormale de la mortalité des sapins dans la zone « Présence de sapins morts » à partir de 2002.

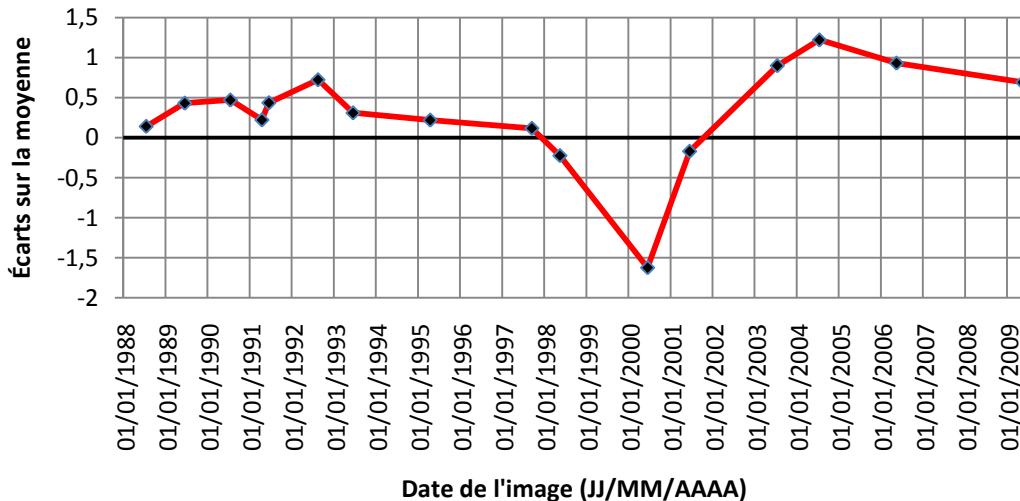


Figure 28 - Courbe des écarts entre le RVI moyen de la zone "Sapins en bonne santé" et du RVI moyen de la zone "Présence de sapins morts" en fonction de la date des images

B) Analyse sur les années 2001 à 2009

Dans la suite de l'analyse, pour deux raisons l'étude est restreinte aux années 2001 à 2009, c'est-à-dire aux images de 2001, 2003, 2004, 2006, et 2009. Tout d'abord, cette période semble être la plus intéressante au vu des conclusions de la Figure 28. D'autre part, nous possédons certaines données seulement sur cette période.

En effet, Maxime Cailleret (URFM) a pu nous fournir la date de mort de certains arbres dans la zone « Présence de Sapins morts ». Dans cette dernière, l'URFM a réalisé une analyse dendrochronologique de presque soixante arbres morts. Cela a permis de connaître leur date de mort, qui s'étale entre 2002 et 2007 (pas de données avant et après). Les coordonnées GPS de ces arbres sont également disponibles. C'est l'année 2005 qui compte le plus d'arbres morts. Il est joint en annexe la carte des différents sapins carottés avec leur date de mort. Il est important de noter que les arbres analysés ne sont pas situés sur

l'ensemble de la zone, mais seulement le long d'une coupe transversale suivant une courbe de niveau.

Nous pouvons ainsi comparer ces données avec les variations interannuelles de RVI de la zone. Pour cela, il a été calculé pour chaque pixel de la zone « Présence de sapins morts » la valeur suivante :

Où

- RVI_{i+1} représente le RVI du pixel pour l'image (i+1)
- RVI_i représente le RVI du pixel pour l'image i
- RVI_{i+1}^{zone} représente le RVI moyen de la zone « Sapin en bonne santé » concernant l'image (i+1)
- RVI_i^{zone} représente le RVI moyen de la zone « Sapin en bonne santé » concernant l'image i

Cette formule permet de soustraire l'offset, lié à l'écart interannuel du RVI moyen de la zone « Sapins en bonne santé » (tendance à la diminution après 2000), qui devrait être théoriquement proche de zéro.

Ensuite, il a été appliqué aux différentes matrices précédemment obtenues, un filtre pondéré. La valeur de chaque pixel est calculée en fonction de sa valeur et de la valeur des pixels qui l'entourent. Cela permet de prendre en compte les éventuels écarts dus aux erreurs d'orthorectification (confère § III)3)). La Figure 29 présente les coefficients qui sont appliqués par le filtre pondéré.

1/8	1/8	1/8
1/8	1	1/8
1/8	1/8	1/8

Figure 29 - Coefficients appliqués par le filtre

Il a été obtenu quatre matrices des écarts de RVI entre les différentes images des années 2001 à 2009. Les résultats sont présentés sous forme de cartographie des écarts, selon une échelle de couleur allant des écarts les plus bas (-3) en bleu, vers les écarts les plus hauts (3) en rouge. Une valeur négative (respectivement positive) sur un pixel est due à une baisse (respectivement augmentation) de RVI sur ce pixel entre les deux images. L'une des raisons de cette baisse peut être la mort d'un ou plusieurs arbres dans la portion que représente le pixel. Normalement, si l'état sanitaire reste inchangé, la valeur du pixel doit être constante.

Les résultats sont validés en comparant les écarts interannuels de RVI avec les dates de morts des sapins carottés par l'URFM. Ainsi, nous avons localisé sur les cartes, les pixels qui contiennent un ou plusieurs sapins morts (15 pixels sur l'ensemble de la zone). Ces pixels ont été mis en évidence sur les différentes cartes en fonction de la date de mort des arbres. À noter que certains pixels peuvent être localisés sur deux cartes : par exemple un pixel d'arbres morts en 2003 peut être représenté soit sur la carte , soit sur la carte . En effet, le mois de la mort de ou des arbres étant inconnu, il est impossible de situer cette date par rapport à celle de la prise de l'image SPOT. Ces pixels sont mis en évidence sur les deux cartes mais avec une symbologie différente. Ils sont

entourés de la couleur rouge, lorsque les résultats laissent penser que les arbres sont morts pendant la période considérée sur la carte, et en couleur noire lorsque cela n'est pas le cas.

La première carte concerne la matrice (Figure 30). Comme attendu, les pixels encadrés correspondent à des écarts négatifs. Cependant, la carte présente un grand nombre de pixels avec des valeurs négatives (au moins la moitié). La moyenne des écarts sur la zone est de -0.92 . Cela signifierait qu'une grande partie des arbres de la zone sont morts ou étaient dépérisissants entre 2001 et 2003, ce qui n'est pas cohérent avec les données de terrain. Nous avons cherché l'explication auprès des données météorologiques (données de la station météo du Mont Serein). Les précipitations mensuelles fournissent une information intéressante : les trois mois précédant la prise de l'image de juin 2001, il a plu 206 mm de plus que lors des trois mois précédant celle de juillet 2003. Cette différence de précipitations n'a pas de conséquence importante sur les arbres mais cela a des répercussions sur le sous-bois. D'importantes précipitations en 2001 ont eu pour but de développer plus rapidement le sous-bois, et ainsi d'augmenter le RVI de la zone à cette date. Cette constatation explique certainement les valeurs anormalement basses des écarts de RVI entre ces deux années.

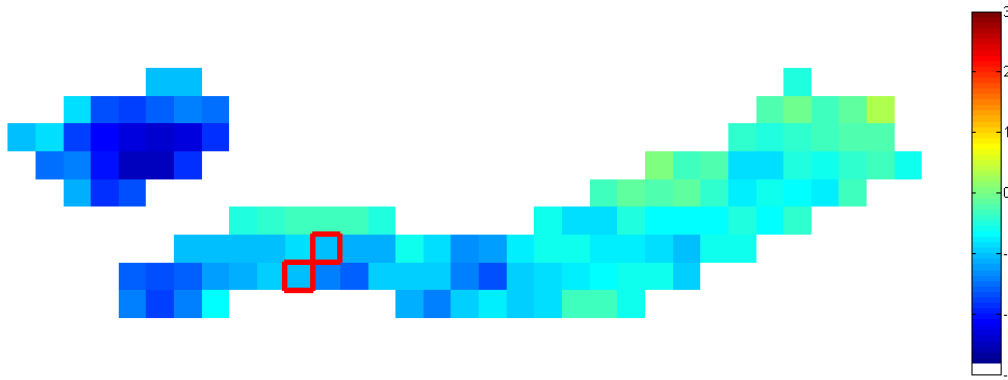


Figure 30 - Carte de la zone « Présence de sapins morts » concernant la matrice qui modélise les écarts de RVI entre 2001 et 2003

La Figure 31 présente les écarts de RVI entre les années 2003 et 2004. Cette carte est plus cohérente que la précédente (Figure 30) puisque la moyenne de ses valeurs est de -0.29 . Les deux pixels relatifs à des arbres morts (encadrés en rouge) ont une valeur négative, ce qui est satisfaisant. Il semble que plusieurs arbres soient morts au nord de la zone. Ceci n'a pas pu être validé, car la coupe (relative aux arbres carottés) n'est pas située sur cette zone. D'autre part, les précipitations relatives aux mois précédents la prise des deux images, sont presque similaires.

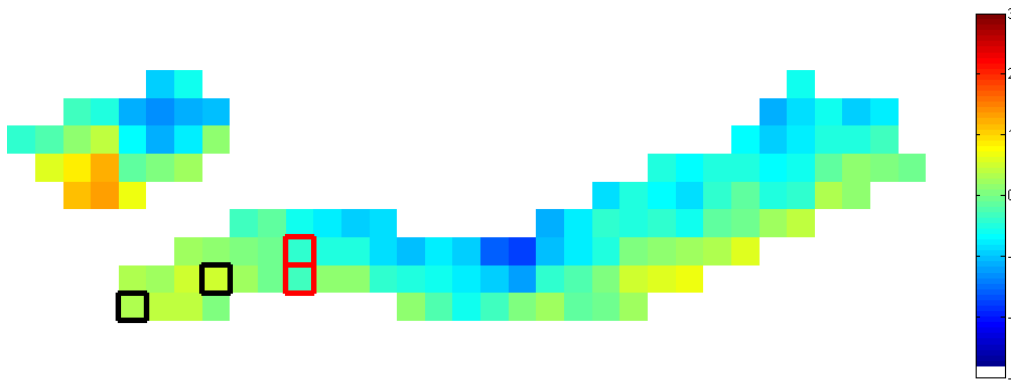


Figure 31 - Carte de la zone « Présence de sapins morts » concernant la matrice qui modélise les écarts de RVI entre 2003 et 2004

La carte la plus intéressante concerne les écarts de RVI de l'image de 2004 à celle de 2006, présentée par la Figure 32. D'après l'étude de l'URFM sur les arbres carottés, c'est l'année 2005 qui présente la mortalité la plus importante de sapins. La comparaison avec la localisation des arbres morts carottés est satisfaisante : sept pixels sur neuf correspondent aux données relevées sur le terrain. Les sapins situés dans la partie ouest de la zone paraissent être très touchés entre 2004 et 2006. Cela peut être mis en relation avec les faibles précipitations relevées lors des années 2004 et 2006, ainsi que les hautes températures estivales constatées entre 2003 et 2005.

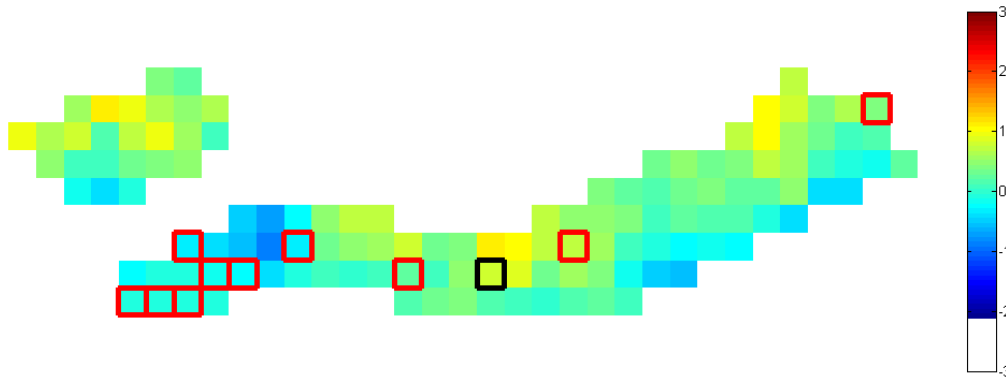


Figure 32 - Carte de la zone « Présence de sapins morts » concernant la matrice qui modélise les écarts de RVI entre 2004 et 2006

Enfin, la Figure 33 présente la dernière carte, relative aux écarts entre 2006 et 2009. Le premier constat qui peut être établi, est la présence d'un nombre élevé de valeurs positives, ce qui n'est pas cohérent. De la même manière que pour la Figure 30, nous avons consulté les données météorologiques pour les années 2006 et 2009. Effectivement, la présence élevée d'écarts positifs de RVI peuvent s'expliquer par de fortes précipitations lors du mois précédent l'image de 2009 par rapport à celles de 2006 (nous relevons une différence de 115 mm). Ainsi, il n'est pas possible d'établir un avis sur les valeurs des pixels où des arbres morts ont été localisés.

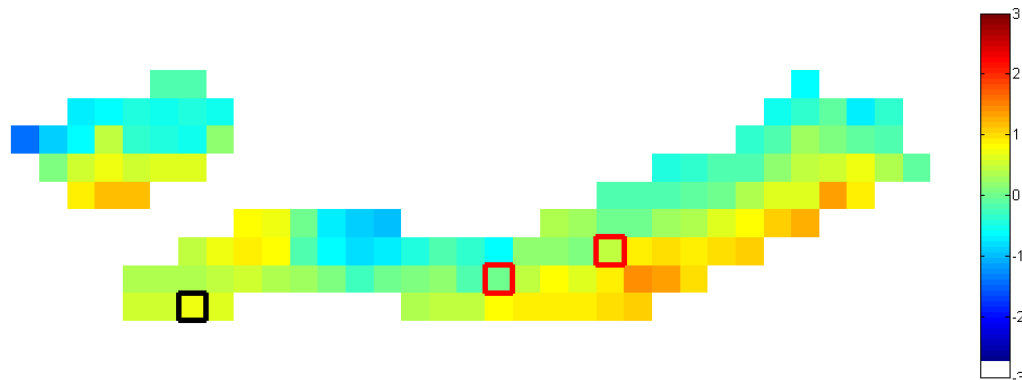


Figure 33 - Carte de la zone « Présence de sapins morts » concernant la matrice qui modélise les écarts de RVI entre 2006 et 2009

Conclusion

Notre principal objectif a été de détecter et cartographier les dépérissements du Sapin pectiné sur le versant Nord du massif du Mont-Ventoux. Nous disposions d'une série temporelle d'images SPOT s'étalant de 1988 à 2009.

Afin d'analyser les images, nous avons effectué un pré-traitement et procédé à diverses corrections.

Dans le but de rendre superposables les différentes images de la série temporelle, nous avons orthorectifié ces dernières. Excepté pour l'image de 2005, nous avons atteint la précision espérée, c'est-à-dire une précision d'environ un pixel. Ainsi, l'image de 2005 a été écartée pour la suite.

Suite à la conversion du compte numérique des images en valeur de réflectance, l'analyse sur des zones temporellement stables en terme de réflectance, nous a convaincu de la nécessité de corriger les effets de l'atmosphère. La première étape a été l'estimation de l'épaisseur optique des aérosols, qui a été faite à partir du logiciel 6S. Le modèle SMAC nous a permis de procéder à l'étape suivante, qui a consisté à la conversion de la réflectance TOA à la réflectance TOC. Ces corrections ont permis d'obtenir un signal stable sur les bandes spectrales du visible, mais encore variable pour la bande spectrale du PIR.

Étant donné que ces corrections ne nous ont pas semblé suffisantes, nous avons décidé de normaliser les valeurs de réflectance de nos images en fonction des zones stables. Cette étape a eu pour but d'améliorer la stabilité du signal et de minimiser les écarts types des réflectances pour chaque image. En revanche, cela a eu pour conséquence de perdre les données pour quatre années où les zones stables n'étaient pas exploitables (1994, 1996, 2007 et 2008).

Nous avons réalisé l'analyse de l'évolution de la mortalité des arbres en comparant les courbes de RVI des zones « Sapins en bonne santé » et « Présence de sapins morts » sur l'ensemble des images.

Nous avons remarqué que les variations des courbes des deux zones sont assez similaires. D'autre part, les valeurs de RVI de la zone « Présence de sapins morts » sont inférieures aux valeurs de celle « Sapins en bonne santé ». Cela semble montrer que nous pouvons détecter les dépérissements à partir du signal de RVI.

L'analyse des écarts interannuels de RVI sur les années 2001 à 2009, a permis d'obtenir des résultats satisfaisants. En effet, sur quinze pixels localisés à partir des données de l'URFM, les deux tiers concordent avec les cartes d'écarts interannuels de RVI élaborées. Cela est un élément probant dans notre analyse qui permet de valider en partie les résultats.

En revanche, les résultats que fournissent ces cartes sont un peu faussés par les conditions météorologiques qui diffèrent en fonction des années. Il est donc difficile de se baser définitivement sur ces cartes.

Ainsi, nous avons essayé de corrélérer les écarts de RVI interannuels et les différences de précipitations interannuelles (Figure 34). Nous notons que le coefficient de corrélation (R^2) de la courbe de tendance est très significatif (même si nous possédons peu de points). Ainsi, nous pouvons penser qu'une partie des écarts interannuels de RVI peuvent s'expliquer par les différences de précipitations. Il serait donc intéressant de normaliser le signal de RVI en fonction des conditions météorologiques pour éliminer le bruit que ces paramètres induisent sur notre signal.

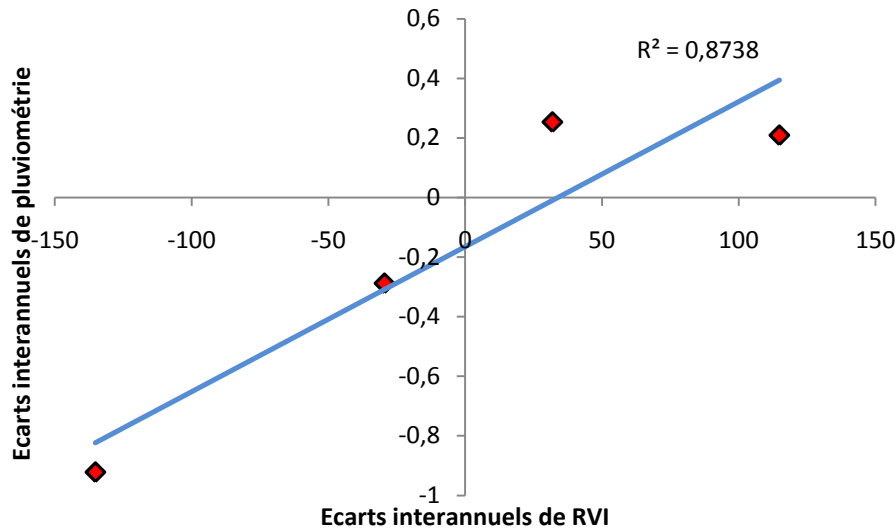


Figure 34 - Ecart interannuel de RVI en fonction des écarts interannuels de pluviométrie de 2001 à 2009

D'un autre côté, concernant la validation des résultats, il pourrait être bénéfique, de carotter d'autres arbres de la zone « Présence de sapins morts » pour connaître leur date de mort et leur localisation. Cela permettrait de valider les cartes des écarts interannuels de RVI élaborés afin de poursuivre les analyses sur l'ensemble des images.

Ensuite, il serait intéressant de travailler sur l'ensemble du versant Nord du massif, et non plus sur une zone spécifique. Pour cela, il faudrait réussir à séparer le signal des sapins de celui des pins, ce qui n'est pas aisé car les deux espèces ont un signal spectral très proche. De plus, il faudrait procéder aux corrections des effets topographiques, que nous avons négligés dans notre analyse.

En conclusion, ces vingt semaines de TFE ont été personnellement très enrichissantes. Cela m'a permis de mettre en pratique certains domaines de la recherche, tels que la télédétection et les traitements des images, que j'avais pu aborder à l'ESGT. Aujourd'hui, je porte beaucoup plus d'intérêt à ces deux domaines, qui me paraissent très utiles.

Un autre élément très important est la découverte du logiciel MATLAB, que je ne connaissais pas du tout avant mon arrivée à l'INRA. Je suis certains que les compétences que j'ai pu acquérir tout long de ces semaines, me seront bénéfiques pour mon avenir professionnel. Même si je n'envisageais pas mon avenir professionnel dans ce secteur, le domaine de la recherche me paraît beaucoup plus attrayant. Ainsi, il est possible que je poursuive mon avenir dans cette branche suivant les opportunités qui me seront proposées.

Il est dommage que je n'aie pas eu la possibilité de poursuivre mes analyses par manque de temps. J'aurais aimé pouvoir obtenir des résultats plus satisfaisants pour le projet DRYADE.

Bibliographie

(a) Ouvrages

ANGSTRÖM A., 1961, Techniques of determining the turbidity of the atmosphere, *Tellus*. 13, p. 214-223.

ANGSTRÖM A., 1964, The parameters of atmospheric turbidity, *Tellus*. 16, p. 64-75.

ATZBERGER C., 1998, Estimates of winter wheat production through remote sensing and crop modelling, Thèse de Doctorat (VWF Verlag für Wissenschaft und Forschung GmbH, Berlin), 261 p.

BARET F., GUYOT G., 1991, Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment, *Remote Sens. Environ.*, 35, p.161-173.

BARET F., GUYOT G., BEGUE A., MAUREL P., PODAIRE A., 1988, Complementarity of middle-infrared with visible and near-infrared reflectance for monitoring wheat canopies, *Remote Sens. Environ.*, 26, p. 213-225.

CHEN J.M. and CIHLAR J., 1996, Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images, *Remote Sensing of Environment*, vol. 55, p. 153-162.

GU X., 1991, Etalonnage et intercomparaison des données satellitaires en utilisant le site de la Crau, Thèse de Doctorat (Université Paris VII), 260 p.

GUERIN C., Production d'indicateurs paysagers sur des territoires agricoles fondés sur l'inversion de réflectances d'images satellite, Mémoire Master de première année (Institut EGID, Université Michel de Montaigne, Bordeaux 3), 89 p.

GUYOT G., GU. X., WIESS M., BARET F., 1996, Du signal satellitaire à la réflectance au sol : problèmes direct et inverse, *Photo-interprétation*, n°1996/2, p. 119-137.

GUYOT G., 1995. Synthèse sur les propriétés optiques des couverts végétaux dans le spectre solaire. 44 p.

LAUNAY M., GUERIF M., DEDIEU G., 1999, Utilisation d'un modèle de correction atmosphérique (SMAC) pour le calcul de réflectances au sol à partir d'images SPOT, *Photo-interprétation*, n°1999/3-4, p. 3-28.

LAWRENCE R.L. and RIPPLE W.J., 1998, Comparisons among Vegetation Indices and Bandwise Regression in a Highly Disturbed, Heterogeneous Landscape: Mount St. Helens, *Washington. Remote Sensing of Environment*, vol. 64, p. 91-102.

MCVICAR T.R., JUPP D.L.B., 1998, The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia: a review, *Agricultural Systems*, vol. 57 n°3, p. 399-468.

MORIN N., 2007, Suivi par télédétection des dépérissements forestiers liés au changement climatique, Rapport de Stage de Master 2 (ONF, Université Paris 7 Denis Diderot), 71 p.

MORIN N., JOLLY A., LEGAY M., KOCHERT T., 2007, Operational prospects in the use of remote sensing for the monitoring of forest decline potentially related to climate change, *ForestSat* du 5 au 7 novembre 2007, Montpellier, 7 p.

MEYGRET A., 2009, SPOT Absolute Calibration: Synthesis, CNES, Editon 3.

MIHAI B., SAVULESCU I., SANDRIC I., OPREA R., 2006, Application de la détection des changements à l'étude de la dynamique de la végétation des Mont de Bucegi (Carpatés méridionales, Roumanie), *Télédétection*, vol. 6, n° 3, p. 215-231.

PERSON R.L., MILLER L.D., 1972, Remonte mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie, Pawnee National Grassland, Colorado, In *Proc 8th Intl. Symp. On Remonte Sensing of Environment*, Ann Arbor, p. 1357-1381.

RAHMAN H., DEDIEU G., 1994, SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum, *International Journal of Remote Sensing*, 15, 1, p. 123-143.

REMER L.A., KAUFMAN Y.J., TANRE D., MATTOO S., CHU D.A., MARTINS J.V., LI R.-R., ICHOKU C., LEVY R.C., KLEIDMAN R.G., ECK T.F., VERMOTE E., HOLBEN B.N., 2005, The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 62, n° 4, p. 947-973.

ROUSE J.W., HAAS R.H., SCHELL J.A., DEERINF D.W., HARLAN J.C., 1976, Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, *NASA/GSFC, TYPE III Final report, Greenbelt MD*, 371 p.

SHEFFIELD C., 1985, Selecting band combination from multispectral data, *Photogram. Eng. Remonte Sens.*, 6, p. 1335-1372.

SOUDANI K., FRANCOIS C., LE MAIRE G., LE DANTEC V. and DUFRENE E., 2006. Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands, *Remote Sensing of Environment*, vol. 102, p. 161-175.

STACH N., 2000, L'IFN cartographie les dégâts de la tempête sur le massif aquitain de pin maritime, *Géomatique Expert*, n° 5, p.15-17

TEILLET P.M., STAENZ K., WILLIAM D.J., 1997. Effects of spectral, spatial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions, *Remote Sensing of Environment*, vol. 61, p.139-149.

VERMOTE E., TANRE D., DEUZE J.L., HERMAN M., MORCRETTE J.J., 1997, Second Simulation of the Satellite Signal in the solar Spectrum (6S), *6S User Guide Version 2*, 218 p.

VINCENTE-SERRANO S.M., PEREZ-CABELLO F., LASANTA T., 2008, Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of Landsat images, *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, p. 3916-3934.

WULDER M.A., DYMOND C.C., WHITE J.C., LECKIE D.G., CARROLL A.L., 2006, Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities, *Forest Ecology and Management*, vol. 221, p. 27-41.

(b) Sites Web consultés

SPOT Image – Images satellite, cartographie et solutions géospatiales. Disponible sur : <http://www.spotimage.com/?countryCode=FR&languageCode=fr>

INRA Avignon. Disponibilité sur : <http://www.avignon.inra.fr>

Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC. Disponibilité sur : <http://cybergeog.revues.org/index1679.html>

Résumé

Les changements climatiques, constatés ces dernières années, ont des conséquences directes sur le fonctionnement et la dynamique des peuplements forestiers. Malgré cette tendance, peu d'études ont concerné les effets de ces changements sur la mortalité et le dépérissement. Pourtant, ce sont des éléments importants de la dynamique forestière. Ainsi, il a été confié à l'Institut National de Recherches Agronomiques (INRA) d'Avignon (84), l'étude de l'évolution du dépérissement des Sapins pectinés, situés sur le massif du Mont-Ventoux (84). L'objectif est de détecter et de cartographier ces dépérissements, en augmentation ces dernières années, et de les relier avec les données météorologiques.

La télédétection à haute résolution spatiale (quelques dizaines de mètres) étant un moyen de suivre le site d'étude sur une longue période, paraît être une méthode d'analyse appropriée à la situation. Nous disposons d'une série temporelle d'images SPOT (Satellites Pour l'Observation de la Terre) qui s'échelonnent sur une durée supérieure à vingt ans (de 1988 à 2009).

Il est intéressant d'établir une analyse rétrospective par télédétection des Sapins pectinés sur le Mont-Ventoux, afin d'en connaître l'évolution des dépérissements. Quelles sont les différentes étapes à appliquer permettant d'obtenir un signal cohérent du couvert végétal ? Quels sont les outils disponibles pour notre analyse ? Les dépérissements sont-ils détectables par la télédétection ?

Afin de répondre au mieux à ces problèmes, dans un premier temps, il sera nécessaire de présenter les différentes corrections apportées aux images. La seconde partie consistera à analyser le signal obtenu après les diverses corrections, et à présenter les résultats de son évolution en fonction des dépérissements observés.

Les diverses corrections appliquées

Afin de pouvoir analyser cette série temporelle, il est nécessaire d'effectuer plusieurs corrections aux différentes images.

Dans le but de les rendre superposables, les images ont été orthorectifiées à partir du module d'orthorectification du logiciel ENVI, qui requiert entre autre un MNT (Modèle Numérique de Terrain) et la saisie de points d'amer. Pour permettre une analyse adéquate des sapins, il a été fixé comme objectif, l'obtention d'une précision d'orthorectification de l'ordre de vingt mètres, c'est-à-dire à la taille d'un pixel de l'image. Excepté pour l'image de 2005, nous avons atteint la précision espérée. Ainsi, l'image de 2005 a été écartée pour la suite.

Étant donné que les images SPOT sont codées en compte numérique (DN, Digital Number) sur chaque bande spectrale, il est nécessaire de convertir ces valeurs en une grandeur plus appropriée à l'analyse : la réflectance.

Suite à cette conversion, le signal spectral relatif à des zones temporellement stables en terme de réflectance (zones constituées de pierres blanches et zones d'ombre) est très variable. C'est pour cette raison qu'il a paru nécessaire de corriger les effets de l'atmosphère. Ces derniers interviennent aux cours des deux trajets effectués par le rayonnement du Soleil : descendant du Soleil vers la surface, et montant de la surface vers les capteurs. Le but des corrections est donc de corriger ces effets pour en extraire la véritable information qui nous intéresse : la réflectance de la surface terrestre. Les effets de l'atmosphère se présentent sous deux processus : l'absorption par les gaz (H_2O et O_3 principalement) et la diffusion par les aérosols. Ces derniers désignent l'ensemble des particules, liquides ou solides, en suspension dans l'atmosphère.

Après avoir estimé la composante en aérosols pour chaque image à partir du logiciel 6S, le modèle de corrections atmosphériques SMAC a permis de corriger les effets de l'atmosphère et d'obtenir les valeurs de réflectance au-dessus du couvert végétal. Ces corrections ont eu comme effets l'obtention d'un signal stable sur les bandes spectrales du visible, mais encore variable pour la bande spectrale du PIR.

Puisque ces corrections ne nous ont pas semblées suffisantes, nous avons décidé de normaliser les réflectances de nos images en fonction des réflectance des zones temporellement stables. Cette étape a eut pour but d'améliorer la stabilité du signal et de minimiser les écarts types des réflectances pour chaque image.

Les images étant corrigées, nous pouvons commencer l'analyse du signal spectral relatif au couvert végétal.

L'analyse des résultats

Les données que fournissent les analyses par télédétection permettent de calculer des indices évoluant avec la dynamique de la végétation. Ils ont été mis au point pour minimiser les effets perturbateurs du sol. Le choix de ces indices est un autre élément important dans l'étude. L'indice RVI (Ratio Vegetation Index) est sensible à la vigueur de la végétation et à l'activité photosynthétique. Il est tout particulièrement approprié à l'étude, puisqu'elle va consister à détecter des sapins morts ou dépérissants, qui perdent leurs aiguilles. De plus, c'est un indice qui a déjà prouvé son efficacité sur plusieurs études du même type.

Dans le but d'analyser les dépérissements du Sapin, il a été délimité deux zones d'études : l'une où les sapins sont en bonne santé générale (appelée « Sapins en bonne santé »), et une autre où la présence de sapins morts est avérée (appelée « Présence de sapins morts »). La première zone sert de référence à la seconde.

Le principe a été de comparer l'évolution des valeurs de RVI entre les deux zones. Nous remarquons que les valeurs de RVI relatives à la zone « Présence de sapins morts » sont inférieures aux valeurs de RVI concernant la zone « Sapins en bonne santé ». Cela semble montrer que nous pouvons détecter les dépérissements à partir du signal de RVI. À noter que les deux courbes se séparent à partir de 2001, date à laquelle sont apparus les dépérissements, d'après les données terrain de l'Unité Ecologie des Forêts Méditerranéennes (URFM).

Dans un second temps, l'analyse a été restreinte aux années 2001 à 2009, qui correspondent à l'augmentation des dépérissements. Il a ainsi été calculé les écarts interannuels de RVI de la zone « Présence de sapins morts ». Les résultats sont présentés sous forme de cartographie des écarts, selon une échelle de couleur allant des écarts les plus bas (3) en bleu vers les écarts les plus hauts (3) en rouge. Une valeur négative (respectivement positive) sur un pixel est due à une baisse (respectivement augmentation) de RVI sur ce pixel entre les deux images. L'une des raisons de cette baisse peut être la mort ou le dépérissement d'un ou plusieurs arbres dans la portion que représente le pixel. Normalement, si l'état sanitaire reste inchangé, la valeur du pixel doit être constante.

D'autre part, nous avons pu recouper ces cartes avec une analyse dendrochronologique effectuée par l'URFM. Cette analyse a permis de connaître les dates de mort et la localisation de presque soixante-dix arbres morts situés dans la zone « Présence de sapins morts ». Cette comparaison a eu des résultats satisfaisants. En effet, sur quinze pixels localisés à partir des données de l'URFM tels que correspondant à des arbres morts, les deux tiers concordent avec les cartes des écarts interannuels de RVI élaborées. Cela est un élément probant dans l'analyse qui a pour but de valider notre démarche.

Conclusion

D'après ces analyses, il paraît possible de détecter les dépérissements à partir des écarts interannuels de RVI.

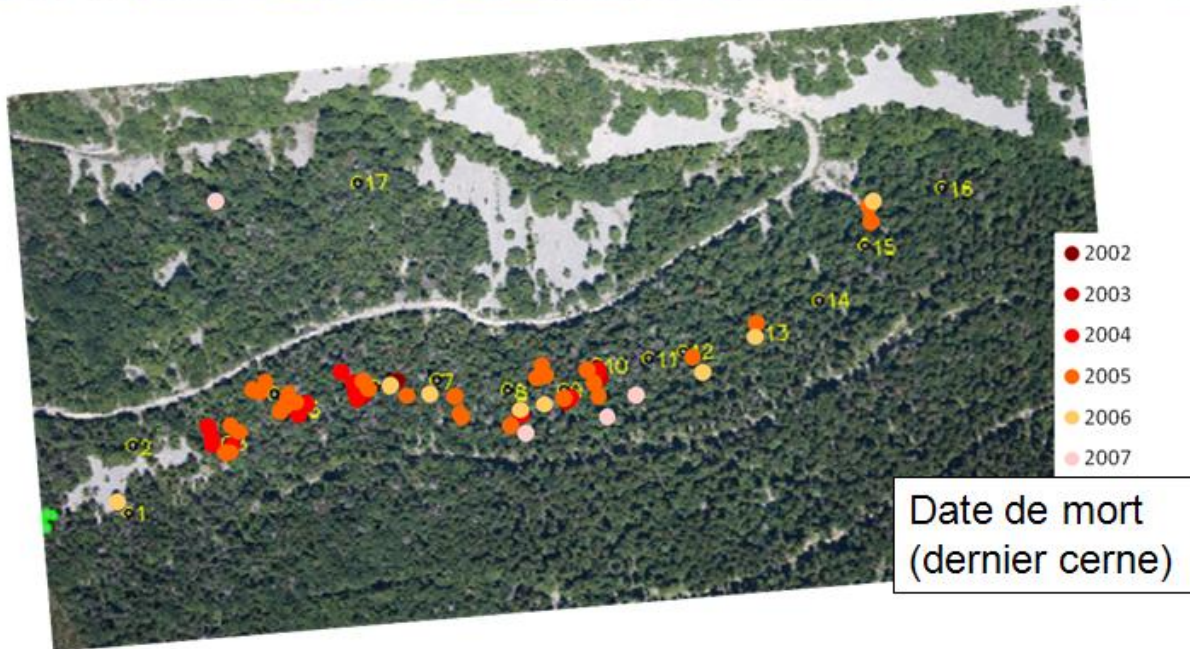
En revanche, ces données sont un peu faussées par les conditions météorologiques, telles que les précipitations, qui diffèrent en fonction des années. Il serait donc intéressant de normaliser le signal de RVI en fonction des conditions météorologiques pour éliminer le bruit que ces paramètres induisent sur notre signal.

D'un autre côté, concernant la validation des résultats, il pourrait être bénéfique, d'étendre l'analyse dendrochronologique à l'ensemble de la zone « Présence de sapins morts ». Cela permettrait de valider les cartes des écarts interannuels de RVI élaborés, afin de poursuivre les analyses sur les images antérieures à 2001.

Ensuite, il serait instructif de travailler sur l'ensemble du versant Nord du massif, et non plus sur une zone spécifique. Pour cela, il faudrait réussir à séparer le signal des sapins de celui des autres arbres, ce qui n'est pas aisé car leur signal spectral est très proche.

Annexe : Carte relative à l'analyse dendrochronologique

Maxime Cailleret, de l'URFM, nous a fourni cette carte, résultant d'une analyse dendrochronologique, effectuée par l'URFM. Cette étude a été effectuée le long d'une coupe transversale, située dans la zone « Présences de sapins morts ». Soixante-dix arbres morts ont été carottés. Cela a permis de connaître leur date de mort, ainsi que leur localisation. Cette carte a pu être confrontée à l'évolution des écarts interannuels de RVI, calculés sur cette même zone (confère § VI)2)B)).



Copyright Cailleret M.; Congrès Ecol Doc Sciences de l'Environnement; Cassis; 29-30 Avril 2010

Résumé

Les changements climatiques de ces dernières années poussent les gestionnaires forestiers à étudier leurs effets sur les peuplements forestiers. Entre autre, cette interrogation se pose pour les sapinières des zones de montagnes méditerranéennes où des dépérissements ont été notés depuis les années 2000.

Le principal objectif de cette étude est de détecter et de cartographier les dépérissements des Sapins pectinés constatés sur le versant Nord du massif du Mont-Ventoux (84), situé dans le Sud de la France. Pour ce faire, la télédétection à haute résolution spatiale est un outil bien approprié puisque qu'elle permet d'observer la répartition spatiale de la végétation sur des périodes relativement longues. Dans cette étude, nous avons exploité une série temporelle d'images SPOT échelonnées sur une période de vingt ans. Les différentes images ont été corrigées en vue d'obtenir un signal spectral du couvert végétal cohérent au cours du temps. Ces corrections sont principalement de deux types : géométriques et atmosphériques.

De ce signal, le calcul des indices de végétation (NDVI et RVI) sur l'ensemble des images ont permis de suivre l'évolution de l'état sanitaire des zones sapinières. Les dépérissements constatés dans ces zones par les forestiers sont bien détectés avec les images. En revanche, la méthode développée dans cette étude reste sensible aux différences de précipitations interannuelles qui modifient le comportement du sous-bois et affectent le signal de réflectance.

Mots-clés : Dépérissement, Sapins Pectinés, SPOT, Télédétection, Corrections géométriques, Corrections atmosphériques, indice de Végétation

Abstract

Recent Climate changes led forest managers to examine their effects on forest stands. Among others, this question arises for the Mediterranean and mountainous fir forests where decline is recorded since the 2000s.

The main objective of this study is to detect and to map silver fir decline recorded on the northern slopes of Mont-Ventoux (84), located in the South of France. The high spatial resolution remote sensing appears as an adequate tool to spatially monitor forests over long temporal periods. This study is performed by processing a time series of SPOT images over a period of twenty years. Images were geometrically and atmospherically corrected to obtain a consistent spectral output of the canopy over the time.

Vegetation indices (NDVI and RVI) were then computed over the period and allowed monitoring the health status of fir areas. Thus, it seems possible to detect the fir decline observed in these areas. However, these results seem to be sensitive to inter-annual rainfall differences that may affect the understory conditions, and therefore, the reflectance signal.

Keywords: Decline, Silver Fir, SPOT, Remote Sensing, Geometrical Corrections, Atmospheric Corrections, Vegetation Index