

Suivi spatio-temporel des surfaces incendiées pour l'évaluation des dommages après l'incendie de forêt de Fontanès (34)

Gabrielle MATTEI, Marlène LONG-FOURNEL, Denis MORGE,
Johann BLANPIED, Fabien GUERRA, Rolland ESTEVE,
Christian RIPERT, Marielle JAPPIOT

UR Ecosystèmes méditerranéens et Risques

Novembre 2012



TABLE DES MATIERES

1. Introduction	7
1.1. Contexte et objectifs	7
1.2. Les dommages causés par les incendies de forêt.....	7
1.3. Apport de la télédétection dans la cartographie des incendies de forêt.....	8
1.3.1. Les indices de végétation.....	8
1.3.2. La comparaison d'images	10
1.3.3. Les classifications d'images	10
1.3.4. Les niveaux de dommage	11
2. Matériel et méthode.....	12
2.1. Le site d'étude.....	12
2.2. Les outils.....	13
2.2.1. Les données satellitales	13
2.2.2. Les données de terrain.....	13
2.2.3. Les logiciels utilisés.....	14
2.3. La caractérisation des dommages après l'incendie	14
2.3.1. Sur le terrain	14
2.3.2. En télédétection	15
3. Les résultats.....	17
3.1. Les résultats des levés terrain.....	17
3.1.1. Les dommages en fonction du type de combustible	17
3.1.2. Les dommages en fonction des hauteurs des strates.....	18
3.1.3. Les dommages en fonction de la structure verticale du combustible	19
3.2. Les résultats des classifications	21
3.2.1. La détection des types de combustibles à partir de l'image avant feu	21
3.2.2. La détection des niveaux de dommages à partir de l'image après feu.....	24
4. Interprétation et discussion.....	28
4.1. L'analyse du terrain.....	28
4.1.1. Les combustibles	28
4.1.2. Les strates	29
4.1.3. La structure verticale du combustible	29
4.1.4. Les autres facteurs pouvant influencer les résultats : la pente et l'exposition	29
4.2. L'analyse des classifications	30
4.2.1. La classification de l'image avant feu	30

4.2.2. La classification de l'image après feu	30
4.3. Les limites et les améliorations de la méthode	31
5. Conclusion	32
6. Bibliographie	34
7. Sites Internet	37
8. Annexes	38

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Présentation de la zone d'étude. A gauche, vue satellite à partir de Google Earth. A droite, image LANDSAT après l'incendie de Fontanès du 30/08/2010.	12
Figure 2 : Tuiles traitées par le CESBIO (Source: Manuel d'utilisateur des données produites au CESBIO).....	13
Figure 3 : Répartition des échantillons en fonction du type de combustible	17
Figure 4: Dommage en fonction de la typologie du combustible	18
Figure 5 : Dommage en fonction des strates de végétation	18
Figure 6 : Occurrences des configurations (à gauche) et dommages en fonction des combinaisons de strates.....	20
Figure 7 : Répartition des dommages sur l'ensemble des données de terrain	21
Figure 8 : Visualisation de la répartition des classes sur les types de combustibles	22
Figure 9 : Profils spectraux des parcelles d'entraînement des points de type G.....	23
Figure 10 : Pourcentage des niveaux de dommages en fonction des classes de combustibles	26

LISTE DES TABLES

Tableau 1 : Répartition des échantillons en fonction du type de combustible et du code de configuration	19
Tableau 2: Première matrice de confusion: croisement des données terrain avec les 9 types de combustibles avec les 6 nouvelles classes.....	22
Tableau 3 : Table de correspondance entre des types de combustibles identifiés sur le terrain et les types d'occupation du sol issus de la classification d'image	23
Tableau 4 : Matrice de confusion finale de l'image avant feu.....	24
Tableau 5: Première matrice de confusion de l'image après feu	25
Tableau 6 : Deuxième matrice de confusion de l'image après feu obtenue par application de la tolérance d'intensité	25
Tableau 7 : Matrice de confusion finale de l'image après feu après l'application des deux tolérances (intensité et espace)	26

1. Introduction

1.1. Contexte et objectifs

En 2001, pour le compte du Ministère de l'Environnement et en partenariat avec la société GSC Consultant et Météo France, le Cemagref d'Aix-en-Provence a élaboré une échelle d'intensité des incendies de forêt. Cette échelle permet d'évaluer *in-situ* le degré de l'incendie *a posteriori*, sur la base de paramètres physiques de l'incendie (vitesse de propagation du feu, couleur de la fumée, présence de sautes de feu et surface menacée – Lampin *et al.*, 2002) mais surtout sur l'estimation des dommages observés sur des enjeux spécifiques tels la végétation et le bâti. Elle compte six niveaux (très faible, faible, moyennement élevé, très élevé, exceptionnel) et est indépendante du site et de sa vulnérabilité.

En 2009, dans le cadre du projet européen Fireparadox (Baudel *et al.*, 2009), une méthode basée sur le terrain et le traitement d'images satellites HR et THR a permis de cartographier les dommages après incendie selon l'échelle d'intensité à partir d'analyses multi-temporelles et de calculs d'indices (Chuvieco *et al.*, 2002) sur le feu de 2003 de Vidauban (Var).

L'application de séries temporelles d'images Landsat doit permettre de réaliser un suivi des zones incendiées en mettant en relation les niveaux de dommages cartographiés avec la végétation présente avant le feu (Hammill et Bradstock, 2006 ; Verbyla *et al.*, 2008) à partir de différences entre les indices, de données de terrain (Coke *et al.*, 2005 ; Murphy *et al.*, 2008), etc.

1.2. Les dommages causés par les incendies de forêt

Le feu de forêt est dévastateur et a des répercussions dans différents domaines. «Il s'accompagne dans tous les cas d'endommagements, au minimum l'espace naturel et forestier est affecté » même si ce dernier, dans la lutte, n'est pas prioritaire (Lapin *et al.*, 2002).

Lorsqu'un incendie de forêt se produit, la localisation et l'étendue du feu sont essentielles car elles permettent de calculer les pertes économiques, d'observer l'impact sur l'environnement et de constater les changements dans la couverture du territoire (Gitas *et al.*, 2007).

Concernant l'impact environnemental, les pertes de faune et flore constituent une modification du paysage et une réelle destruction du milieu (www.prim.net). Le guide technique de protection des forêts (Colin, 2001) distingue :

- l'impact sur le peuplement : les effets sur l'espèce végétale se traduisent par un dommage sur les éléments structuraux (feuillage, tronc, racine) dont la forte intensité peut entraîner sa mort. Il y a alors disparition de l'activité photosynthétique.
- l'impact sur l'environnement au niveau du sol, au niveau de la dynamique de la végétation et au niveau de la faune.

Au niveau du sol, cet impact se traduit :

- sur la structure : l'instabilité des agrégats rend étanche le sol (pores des sols comblés par des particules) ;
- sur la composition : la minéralisation rapide des strates végétales favorise une fertilisation du sol ;
- sur les micros organismes : le feu a emporté la micro faune ;
- sur le risque d'érosion : on assiste à une augmentation de ce risque accentué par les paramètres suivants : la pente (plus elle est forte, plus le risque de ravinement est important), de la nature du sol et des types de précipitations.

Au niveau de la dynamique de végétation, de manière générale, la reprise de la végétation après un incendie se fait naturellement par rejets ou germination. Cela dit, celle-ci dépend de l'intensité et de la fréquence des feux : plus le feu est intense, plus la régénération se fera difficilement et, par ailleurs, la répétition des feux dans une zone diminue les chances de repousses.

Au niveau de la faune, les animaux peuvent ne pas survivre à l'incendie ou y échapper. Cela dépend de l'intensité du feu et de la période. Une répétition du phénomène peut occasionner un appauvrissement faunistique (les ressources alimentaires font défaut, les habitats détruits).

Le feu engendre une calcination du paysage, une marque ancrée temporairement dans une zone qui peut être aussi bien observée sur terre que depuis l'espace grâce aux satellites. La télédétection est un outil puissant pour la visualisation de ces phénomènes dévastateurs.

1.3. Apport de la télédétection dans la cartographie des incendies de forêt

La télédétection appliquée au domaine des risques, et en particulier à celui des incendies de forêt, est un outil précieux. L'approche multitemporelle (avant, pendant et après l'incendie) permet de constater l'évolution du phénomène dans le temps : état de la végétation, dommages, repousse après feu, évolution du feu.

1.3.1. Les indices de végétation

Le NDVI permet un bon suivi de la végétation. Dans le cas de la détection des surfaces brûlées, il permet de distinguer une végétation saine d'une végétation brûlée. En analyse multitemporelle, la soustraction des images avant et après incendie met en exergue la surface brûlée (Viedma & Chuvieco, 1993).

Chafer *et al.* (2004) utilisent cette soustraction d'images, le dNDVI, pour observer l'intensité et la sévérité du feu dans une végétation de type savane en Australie à l'aide d'images SPOT. Ils obtiennent grâce à cette méthode une grande précision dans sa classification (88%) en 6 niveaux de sévérité.

Fernandez *et al.* (1997) ont travaillé sur des images NOAA en les combinant à l'indice NDVI à l'aide d'un algorithme dans le but d'automatiser la cartographie des surfaces brûlées. Ce couplage se révèle d'une grande efficacité car il peut être utilisé sur des feux à surface variable, et le protocole peut être appliqué à des images à haute voire très haute résolution.

le NDVI est sensible à la réflectance du sol ce qui prouve ses limites dans son usage, notamment dans les zones méditerranéennes où le sol calcaire est très présent. Dans leur étude, Escafadal et Huette (1991) précisent que « les propriétés spectrales des sols peuvent modifier le contraste réflectance R/ réflectance IR dans le cas très fréquent où ils ne sont que partiellement recouverts par la végétation ».

Garcia et Chuvieco (2004) montrent une amélioration dans la discrimination des zones brûlées par l'utilisation de l'indice BAI en comparaison avec les indices NDVI, GEMI et SAVI. Cela dit, des confusions persistent notamment sur la différenciation des surfaces en eau et des ombres de nuage. Il préconise pour une amélioration future des analyses l'intégration du moyen infrarouge par l'emploi de l'indice NBR. Heredia *et al.* (2003) confirment ces résultats concernant les confusions du BAI et l'amélioration de la discrimination en multitemporel de l'indice NBR, le mono temporel créant des confusions dans les zones intérieures au feu.

Le tableau ci-dessous illustre les différents indices de végétation utilisés pour extraire les surfaces incendiées.

Indice	Définition	Formule
NDVI (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>)	Calculé à partir des bandes rouge (R) et proche infrarouge (PIR), il permet de décrire l'état de la végétation. Une végétation saine va absorber les radiations dans le rouge et réfléchir de manière plus importante les radiations dans l'infrarouge.	$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$
SAVI (<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>)	Cet indice complète le NDVI en prenant en compte la brillance du sol (L). Cela rapproche plus encore le rendu à la réalité.	$\text{SAVI} = (1+L) \cdot \text{NDVI}$ où L varie entre 0 et 1 et intègre la quantité de sol visible. L = 0 quand la végétation est dense
GEMI (<i>Global Environment Monitoring Index</i>)	Il a pour objectif de minimiser les effets induits par la présence de l'atmosphère. Il est plus pertinent que le NDVI.	$\text{GEMI} = \eta \cdot ((1 - 0,25 \cdot \eta) - (\text{R} - 0,125)) / (1 - \text{R})$ où $\eta = 2 \cdot ((\text{NIR}^2 - \text{R}^2) + 1,5 \cdot \text{NIR} + 0,5 \cdot \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R} + 0,5)$
BAI (<i>Burnt Area Index</i>)	Il a été conçu spécifiquement pour la détection de zones brûlées. Il est donné par l'inverse de la distance euclidienne entre chaque pixel et un point de référence.	$\text{BAI} = 1 / ((\text{pcR} \cdot \text{R})^2 + (\text{pcNIR} \cdot \text{NIR})^2)$ où pcR et pcNIR sont respectivement les réflectances dans le rouge et proche infrarouge et valent 0,06 et 0,1
NBR (<i>Normalized Burn Ratio</i>)	Alors que le NDVI utilise la bande spectrale rouge, le NBR remplace cette bande par celle du moyen infrarouge. Il offre un très bon contraste entre la végétation brûlée et l'activité photosynthétique du couvert.	$\text{NBR} = (\text{NIR} - \text{MIR}) / (\text{NIR} + \text{MIR})$

1.3.2. La comparaison d'images

Des études orientées sur la problématique des feux de forêt ont choisi de comparer différents produits entre eux. C'est le cas de Saldivia et Chuvieco (2007) qui avancent que le choix de l'image initiale est déterminant : ils comparent ainsi plusieurs produits MODIS à une même image CBERS. Dans leurs conclusions, il apparaît que les corrélations peuvent être très bonnes comme médiocres (allant jusqu'à 85% d'erreurs). La comparaison se fait par la mise en place d'un algorithme de discrimination : il consiste à prendre pour référence un pixel représentant une zone brûlée et de comparer celui-ci aux pixels voisins. L'algorithme parcourt donc toute l'image de cette manière. Il en résulte que les produits MODIS corrigés des effets bidirectionnels sont les plus performants.

Une autre comparaison possible, celle de l'utilisation d'un capteur récent dans l'acquisition d'image et de produits de satellite déjà vastement utilisés dans la cartographie des surfaces brûlées. C'est l'objet de l'étude de Garcia et Chuvieco (2004) qui comparent les produits du capteur MMRS du satellite SAC-C avec les images LANDSAT. De cette étude, il en découle que la corrélation entre les canaux respectifs des produits est excellente, autrement dit, il peut y avoir une très bonne cohérence des produits même s'ils ne proviennent pas d'un même satellite.

Ces théories s'affrontent et montrent que, de manière évidente, il peut y avoir des corrélations médiocres entre images acquises par un même satellite et de très bons résultats avec des produits d'origine différente.

1.3.3. Les classifications d'images

La classification d'images correspond à un regroupement de pixels ayant des propriétés similaires.

La classification orienté-objet prend en considération plusieurs critères pour créer les classes : la couleur, la texture, la taille et tous les éléments contextuels pouvant aider à la description des objets. Elle est adaptée aux images de très haute résolution spatiale et aux objets géométriques tels les bâtis, les routes, etc.

Dans la cartographie des dommages après incendie à partir d'images de haute résolution spatiale, les classifications par pixel sont mieux adaptées. Dans ce cas seule la radiométrie est prise en compte.

Une classification d'image peut être validée par des données levées sur le terrain ou encore par de la photo-interprétation. La majorité des études emploient le Composite Burn Index (CBI) pour les validations terrain : la végétation est découpée en strates (substrat, herbes/buissons < 1 m, buissons et arbres compris entre 1 et 5 m, arbres entre 5 et 20 m et ceux de plus de 20 m) et chaque strate est évaluée en fonction des dommages qu'elle a subis. Le CBI est une méthode adaptée à tout traitement d'image satellite, notamment l'utilisation d'indices comme le NBR (Key et Benson, 2002).

1.3.4. Les niveaux de dommage

Dans la bibliographie, on trouve de manière générale quatre classes de dommages. Différents indices de végétation peuvent être utilisés. Viedma *et* Chuvieco (1993) utilisent l'indice dNDVI avec des images LANDSAT, tandis que Navarro *et al.* (2007) font appel au dNBR pour des classifications toutes deux supervisées. Les deux études atteignent 80% pour la validation.

Hammill *et* Bradstock (2006) ont travaillé sur une image LANDSAT et une image SPOT-2 (respectivement 30 m et 10 m de résolution spatiale) par analyse NDVI. Les résolutions spatiales et époques d'acquisition d'image différentes leur ont permis de cartographier les dommages en six niveaux : cinq niveaux de brûlés et un de non brûlé.

Trois niveaux de dommages sont mis en évidence dans l'étude de Mitri *et* Gitas (2006) qui proposent eux une analyse orienté-objet sur l'image post-incendie IKONOS-THR. L'étude valide la classification à 80 %, la canopée dense étant la cause principale des confusions.

Quoi qu'il en soit, les confusions spectrales récurrentes dans toutes les méthodes mises en œuvre concernent :

- la végétation touchée par le feu et sol nu ;
- la surface située en interface brûlée / non brûlée et végétation lâche ;
- les ombres de la végétation non brûlée et celle de la végétation brûlée ;
- la végétation brûlée peu dense et les zones non végétales.

2. Matériel et méthode

2.1. Le site d'étude

La présente étude prend pour support l'incendie qui s'est déroulé durant l'été 2010 dans la région montpelliéraine. Un incendie comptant parmi les plus importants de la région Languedoc-Roussillon car il a brûlé 2590 hectares de végétation. L'incendie a touché 8 communes mais plus particulièrement les communes de Saint-Bauzille-de-Montmel et Guzargues.

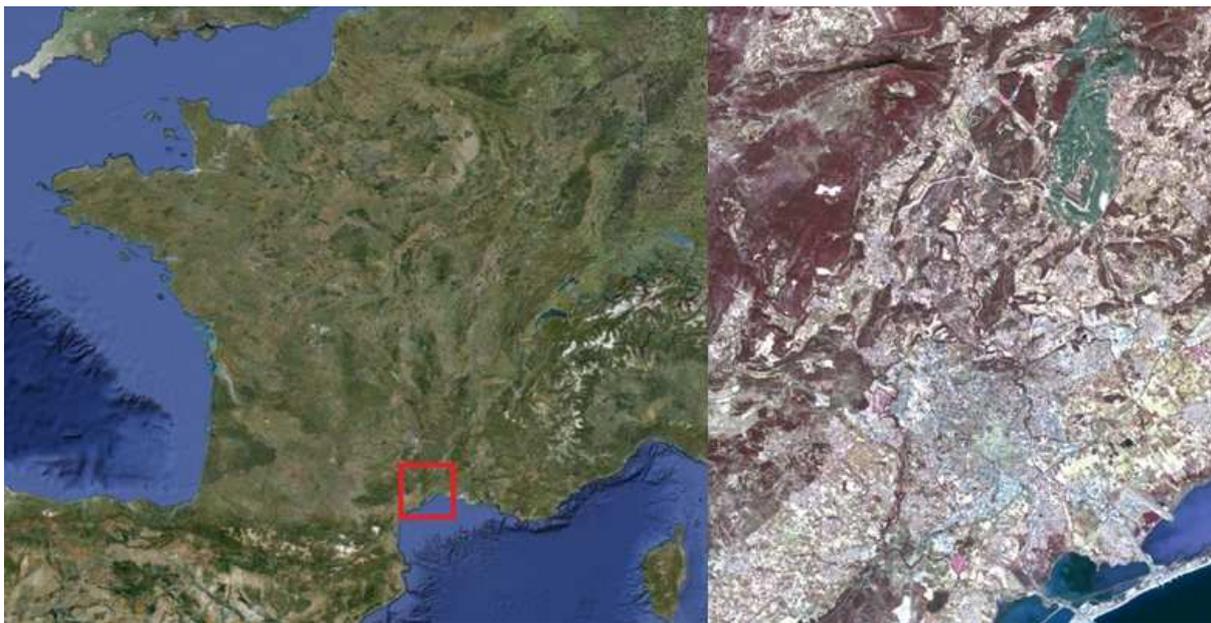


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude. A gauche, vue satellite à partir de Google Earth. A droite, image LANDSAT après l'incendie de Fontanès du 30/08/2010.

Il s'agit d'une zone subissant régulièrement des incendies de forêt, le dernier en date ayant eu lieu le 27 juillet 1989 à Guzargues. En effet, la région est caractérisée par un climat de type méditerranéen prononcé à cette saison : des étés très secs dus aux rares précipitations et aux hautes températures. Par ailleurs, les essences pyrophiles telles que le pin d'Alep ou le chêne kermès composant la végétation méditerranéenne ainsi que l'orographie complexe favorisent l'ignition des feux de forêt à cette époque de l'année.

Le 30 Août 2010 fut un « lundi noir ». En effet, quatre départs de feu se sont déclarés dans la région montpelliéraine quasi simultanément : l'un dans la commune de Villeveyrac, un autre à Juvignac, un à Aumélas et un dernier sur la commune de Fontanès. Ce dernier a débuté sa course aux alentours de 16 h et a mobilisé plus de 1000 sapeurs-pompiers pendant deux jours.

Météo-France ce jour-là indiquait 12 % d'humidité, une température de 27°C et un vent de secteur nord et nord-ouest d'environ 40 km/h ; des conditions météorologiques propices à la propagation du feu. Enfin, la cause de l'incendie de Fontanès a été déclarée d'origine malveillante.

2.2. Les outils

Après cette brève mise en situation, voyons à présent les données et logiciels utilisés pour le projet.

2.2.1. Les données satellitales

Les images mises à disposition du programme TOSCA proviennent du satellite LANDSAT 5. Deux images sont traitées : l'une datant du 12 septembre 2009 (environ un an avant l'incendie) et l'autre du 15 septembre 2010, soit 16 jours après l'incendie.

Une chaîne de traitement multitemporel a été développée par le CESBIO (Hagolle *et al.*, 2010). Cette chaîne permet la détection des nuages, de l'eau et de la neige, mais elle apporte aussi les corrections des effets atmosphériques. La chaîne est appliquée aux deux images. Les tuiles 07-63 sont utilisées. La résolution spatiale des images LANDSAT est de 30 m et ces dernières sont codées sur 16 bits.

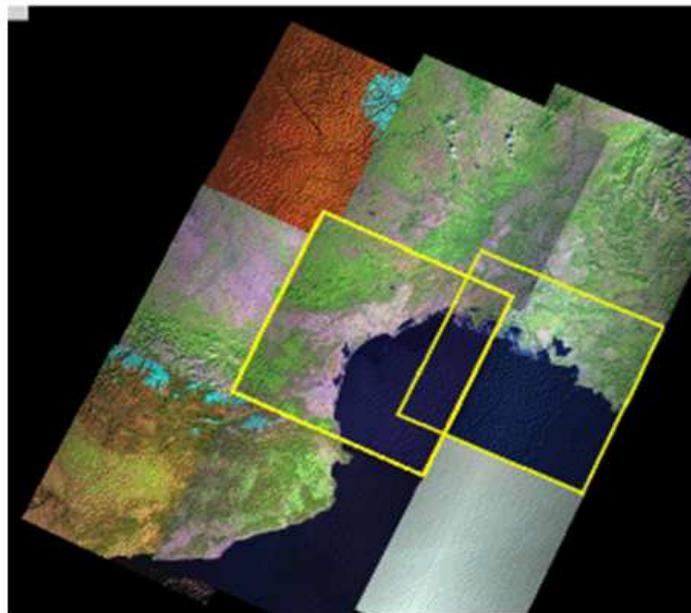


Figure 2 : Tuiles traitées par le CESBIO (Source: Manuel d'utilisateur des données produites au CESBIO)

On trouve 6 bandes par image dans le jeu de données fourni : B10 (bleu), B20 (vert), B30 (rouge), B40 (Proche infrarouge), B50 (Moyen infrarouge 1) et B70 (Moyen infrarouge 2).

2.2.2. Les données de terrain

Un protocole basé sur des protocoles existants (CBI, échelle d'intensité) a été adapté au site étudié pour caractériser les dommages après l'incendie en fonction des types de combustible : ce protocole tient compte à la fois de la résolution spatiale des données satellitaires avec lesquelles il est mis en relation mais également des besoins des gestionnaires devant recueillir après l'incendie des données précises concernant les dommages sur la végétation.

11 journées de terrain ont été prévues pour collecter en tout 90 points répartis sur les 2590 hectares de surface brûlée. Il est à noter que, deux ans après le feu, nous pouvons observer une forte reprise de la végétation devant être considérée dans le protocole.

2.2.3. Les logiciels utilisés

Le logiciel Erdas Imagine 2010 a été utilisé pour traiter les images satellites : calcul de NDVI, ACP, classifications d'images, etc.

Le logiciel ArcGis 10 a été utilisé pour l'analyse spatiale des bases de données ainsi que la comparaison entre les données issues des traitements d'images et des données de terrain.

2.3. La caractérisation des dommages après l'incendie

2.3.1. Sur le terrain

Sur le terrain, l'objectif est de caractériser l'état d'endommagement de la végétation après l'incendie. Pour cela des placettes homogènes en terme de combustible et en terme de dommage ont été caractérisées. Ces placettes doivent avoir une surface supérieure à 1 pixel de l'image Landsat (> 900 m²). Chaque placette est repérée géographiquement à l'aide d'un GPS ; pente, exposition et localisation topographique sont renseignées.

Le type de combustible présent sur la placette est déterminée à partir de la typologie de combustible élaborée par Irstea (Lampin *et al.*, 2004) en prenant en compte en particulier la nature du combustible (peuplement forestier, garrigue), sa hauteur (plus ou moins 10 m) et son recouvrement horizontal (plus ou moins 60 %). Cette typologie compte 9 types de combustible.

Les dommages sont ensuite évalués par strate de hauteur de la végétation – sur la strate de 0 à 1 m, sur la strate de 1 à 4 m, sur la strate de 4 à 10 m et sur la strate supérieure à 10 m – ainsi que pour chaque élément structurant l'espèce – tronc, branches, rameaux, aiguilles, feuilles et fruits. Plusieurs niveaux de dommages sont ensuite attribués en fonction des degrés d'endommagement identifiés : 0 pour sain, 1 pour partiellement noirci, 2 pour complètement noirci et 3 pour dommages profonds. 4 niveaux de dommages sont identifiés pour les feuilles, 4 pour les rameaux, 4 pour les branches, 4 pour le tronc et 3 pour les fruits (0 : sain, 1 : partiellement ou complètement noircis, 2 : dommages profonds). Pour chaque strate, la somme des dommages est notée sur 12 ou 14 selon que les fruits soient présents ou non (ces derniers apparaissant généralement à partir des strates supérieures à 1 m).

De manière à prendre en compte ce que perçoit le satellite, c'est-à-dire les strates les plus hautes, les dommages évalués sur ces dernières sont affectés d'un poids deux fois plus important que les strates inférieures. Enfin, afin de comparer les dommages de différents types de combustibles entre eux, la note des dommages a été ramenée à 4 niveaux.

Par exemple, le levé 2 a pour dommages respectivement dans les strates de 0 à 1 m, de 1 à 4 m et de 4 à 10 m : 10/12, 8/14 et 9/14.

Le calcul est donc le suivant :

$$\text{Dommage}_{0-1\text{ m}} = 10 / 12 = 11.67 / 14 ;$$

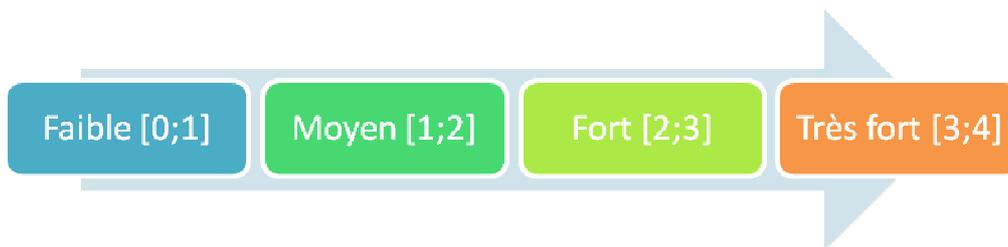
$$\text{Dommage}_{1-4\text{ m}} = 8 / 14$$

$$\text{Dommage}_{4-10\text{ m}} = 9 / 14$$

Somme Dommage = $(11.67 + 8 + 2 * 9) / 4 = 9.42 / 14$ (pondération de la strate la plus haute : strate 4 – 10 m)

Note de dommage sur 4 : $9.42 * 4 / 14 = 2.69$ (dommage fort selon l'échelle ci-dessous)

Nous obtenons l'échelle de 4 niveaux suivante :



Les détails de ce protocole figurent en Annexe 1 de ce mémoire. En Annexe 2 apparaît la fiche terrain. L'Annexe 3 présente la clé de détermination du combustible. Enfin, l'annexe 4 représente l'ensemble de la table attributaire.

2.3.2. En télédétection

Les classifications des images avant et après feu ont des objectifs différents. La première classification réalisée sur l'image avant feu a pour objectif de cartographier les grands types de combustibles présents avant l'incendie. La seconde classification réalisée sur l'image après feu a pour objectif de caractériser les dommages sur les différents types de combustible.

La méthodologie se décompose en trois étapes :

- d'abord l'extraction de la surface incendiée à partir de la différence de NDVI entre les deux images avant et après feu ;
- ensuite l'extraction de la végétation présente avant l'incendie à partir de d'une classification supervisée de l'image avant feu ;
- enfin l'extraction des niveaux de dommages à partir d'une classification non supervisée (méthode itérative ISODATA) de l'image après feu.

Les descriptions de terrain servent à valider ces classifications.

En amont des classifications d'image, une analyse en composantes principales a été a été réalisée aussi bien sur l'image avant feu que sur l'image après feu. Cette analyse permet ainsi

d'afficher et de visualiser l'ensemble de la variabilité spectrale contenue dans les 6 bandes des images LANDSAT sur 3 composantes principales.

La classification supervisée réalisée sur l'ACP de l'image avant feu a considéré un nombre de classes supérieur au nombre de classes souhaité afin de pouvoir les regrouper ensuite en 6 grandes classes d'occupation du sol (dont 5 classes de combustibles). L'apprentissage s'est appuyé sur 2 supports : une carte d'occupation du sol réalisée par le bureau d'études MTDA et l'orthophoto de l'IGN de 2005 (résolution spatiale : 0,5 m). Ces 2 supports permettent de conserver les 90 points issus l'échantillonnage de terrain pour la validation de la classification.

Une classification non supervisée en 20 classes a été réalisée sur l'ACP de l'image après feu en considérant la méthode itérative ISODATA. Ces 20 classes ont été regroupées en 5 classes selon les niveaux de gris. Les 90 points issus l'échantillonnage de terrain ont été là encore utilisés pour la validation de la classification.

3. Les résultats

3.1. Les résultats des levés terrain

L'échantillonnage de terrain se compose de 90 relevés sur lesquels les paramètres suivants ont été notés : topographie, exposition, pente, recouvrement de sol nu, recouvrement de la reprise de végétation, sommes des dommages par strates et total des dommages. L'Annexe 5 présente la répartition des 90 points sur le terrain.

Les niveaux de dommages évalués sur le terrain ont été comparés selon :

- les types combustibles ;
- les hauteurs des strates ;
- les strates présentes matérialisant la structure verticale du combustible.

3.1.1. Les dommages en fonction du type de combustible

La figure ci-dessous présente la répartition des relevés de terrain en fonction des types de combustible.

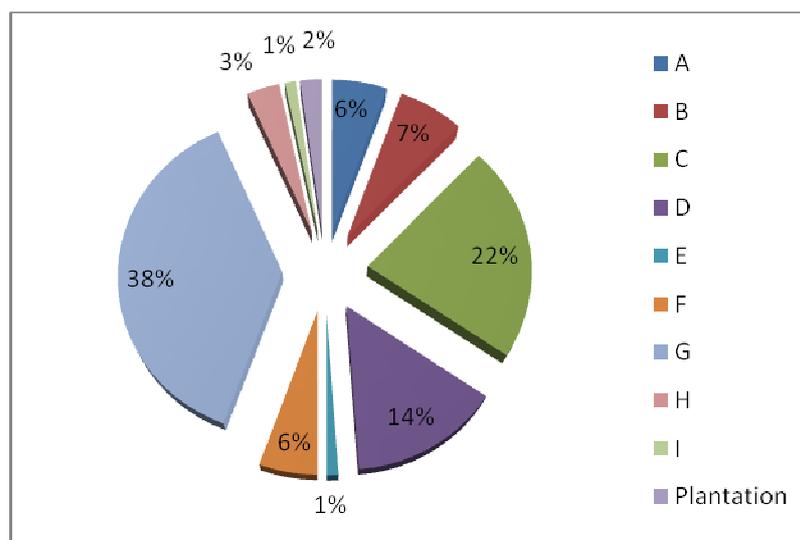


Figure 3 : Répartition des échantillons en fonction du type de combustible

Sur ces 90 placettes, les combustibles les plus présents sont les types G, C et D, correspondant respectivement à un peuplement arboré dense de hauteur inférieure à 10 m, une garrigue haute et une garrigue basse. L'environnement est en effet propice à l'apparition de ces types de combustibles : un milieu calcaire combiné au climat méditerranéen.

Le graphique ci-dessous présente, pour chaque type de combustible rencontré sur le terrain, le niveau de dommage minimal, le niveau de dommage maximal et le niveau de dommage moyen.

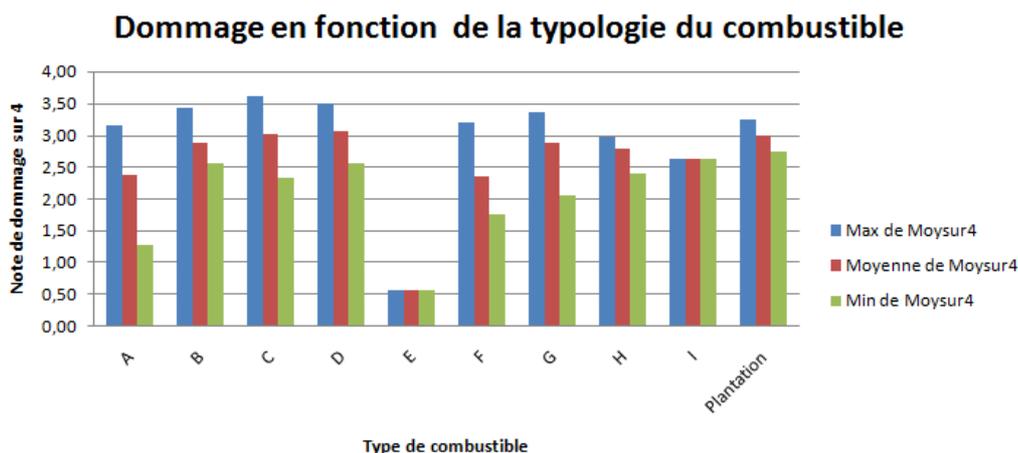


Figure 4: Dommage en fonction de la typologie du combustible

De manière générale, les moyennes des dommages des combustibles varient dans l'intervalle [2 ; 3] correspondant à un dommage fort. Deux classes n'entrent pas dans cette catégorie : les types de combustibles E et D. Le type E, caractérisé par la hauteur de son peuplement supérieur à 10 m ainsi que sa strate basse éclaircie, témoigne d'un faible dommage. Pour le type D, correspondant à une garrigue basse, les dommages sont très forts en moyenne.

On observe que l'on peut regrouper dans les mêmes niveaux de dommages les types [A ; F], [B ; G ; H] et [C ; D ; Plantation].

Tandis que les combustibles B, C, D, H et Plantation s'équilibrent autour de la moyenne, les autres combustibles offrent une variabilité importante dans les dommages. Les types A et F peuvent présenter des dommages moyens comme des dommages très forts. Le type G, quant à lui oscille entre dommages forts et très forts.

La typologie des combustibles semble donc influencer sur les dommages : certains types, comme les garrigues, sont en moyenne très fortement endommagés ; d'autres, comme le type E, faiblement. Cela dit, un même combustible peut subir des dommages différents.

3.1.2. Les dommages en fonction des hauteurs des strates

La figure ci-dessous présente les niveaux minimum, maximum et moyens des dommages en fonction des strates de hauteur des combustibles.

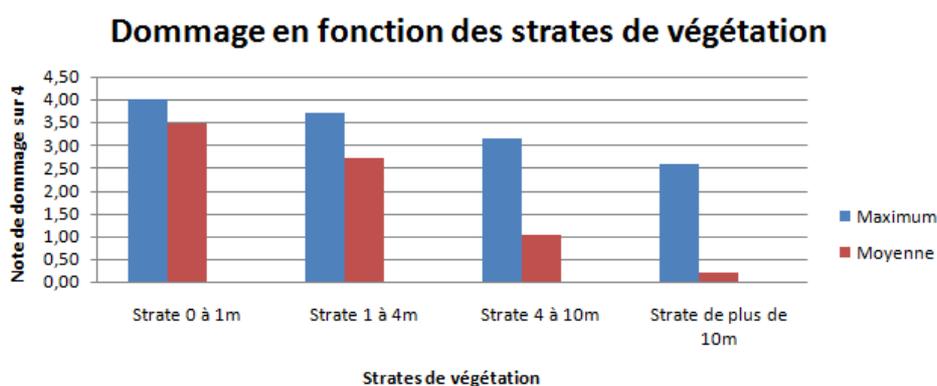


Figure 5 : Dommage en fonction des strates de végétation

Les strates les plus basses (strate de 0 à 1 m et strate de 1 à 4 m) présentent, en moyenne, des dommages forts voire très forts. Les strates supérieures à 4 m sont généralement caractérisées par des dommages moyens ou faibles.

Il est à noter que la valeur des maxima décroît avec la hauteur mais de manière moins significative que la valeur des moyennes. Autrement dit, pour un type de combustible donné, les dommages diminuent dans les strates hautes.

3.1.3. Les dommages en fonction de la structure verticale du combustible

Afin de traduire la structure verticale du combustible, les différentes hauteurs de strate ont été codées à 0 ou 1 selon leur absence ou leur présence dans le relevé de terrain. Un même type de combustible peut être constitué d'une à quatre strates. De plus neuf combinaisons de strates possibles ont été recensées parmi les 90 relevés de terrain. Plusieurs combinaisons sont possibles pour un même type de combustible. Le tableau suivant présente le nombre de relevés pour chaque configuration de combustible.

Nombre d'occurrences	Code configuration										
	Type combustible	0001	0100	0110	0111	1000	1100	1101	1110	1111	Total général
A				1				1		3	5
B							2		4		6
C							15		5		20
D						2	11				13
E	1										1
F		1					1		3		5
G			1				12		21		34
H								1		2	3
I								1			1
Plantation							2				2
Total général	1	1	1	1	2	43	3	33	5	90	

Tableau 1 : Répartition des échantillons en fonction du type de combustible et du code de configuration

Les configurations les plus fréquemment rencontrées correspondent à la présence des 2 voire des 3 premières strates de hauteur (1100 : présence des strates 0 – 1 m et 1 – 4 m, 1110 : présence des strates 0 – 1 m, 1 – 4 m et 4 – 10 m). La présence des 2 premières strates de hauteurs (1100) concerne essentiellement les types de combustibles C, G et D (garrigue et peuplement arboré dense). Cependant le type G reste le plus représenté par la présence des 3 premières strates de hauteur (1110).

Certaines configurations sont particulières. Par exemple, les configurations 0100, 0110 et 0111 traduisent l'absence de la strate 0 – 1 m.

La figure ci-dessous présente les niveaux de dommages observés en fonction de la structure verticale du combustible.

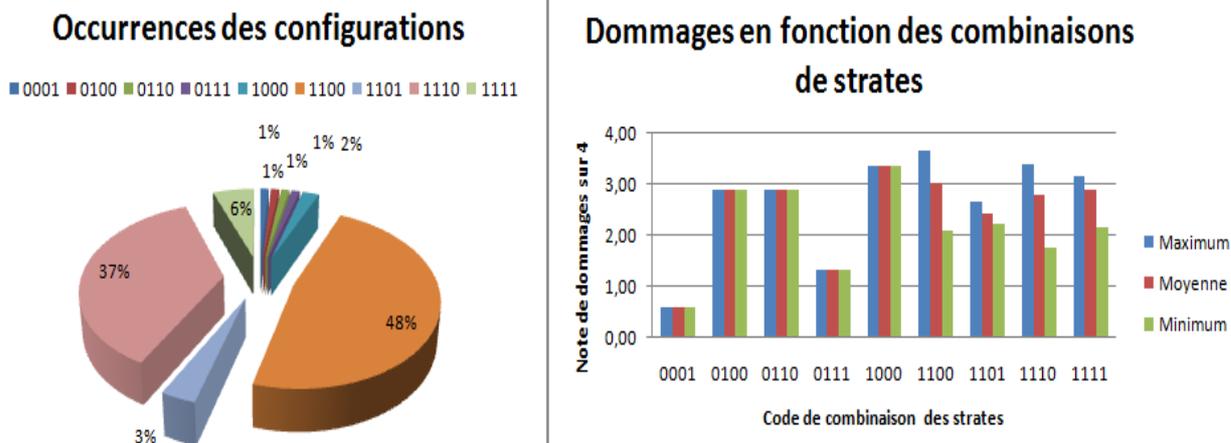


Figure 6 : Occurrences des configurations (à gauche) et dommages en fonction des combinaisons de strates

Les configurations de strates les plus présentes sont les strates 1100 et 1110 c'est-à-dire les types de combustible constitués des strates 0 à 1 m et 1 à 4 m et avec, au plus la présence de la strate 4 à 10 m.

En présence de strates de plus de 10 m, 6% des relevés de terrain comptent toutes les strates (configuration 1111), et 3% pour lesquels la strate de 4 à 10 m est absente.

Les types de combustible comportant la strate 0 à 1 m et la strate 1 à 4 m (configuration 1100) sont en moyenne caractérisés par un dommage très fort : de manière générale, le niveau de dommage oscille entre fort et très fort, frôlant parfois l'exceptionnel (3.62, maximum absolu de tous les levés).

Les types de combustible comportant les strates 0 à 1 m, 1 à 4 m et 4 à 10 m (configuration 1110) présentent le même profil dans l'étendue des valeurs moyenne, maximum et minimum. Cela dit, cette combinaison atteint 3 types de dommages : moyen, fort et très fort. C'est la seule catégorie pouvant subir autant de dommages distincts. En moyenne, sa note de dommage reste tout de même dans le type « fort ».

Les types de combustible comportant l'ensemble des 4 strates de hauteur (configuration 1111) offrent les mêmes caractéristiques que les types de combustible ne comportant que les 2 strates de hauteur les plus basses (configuration 1100) dans le sens où les dommages sont forts et très forts. Néanmoins, il apparaît que le dommage maximal est moins important dans la configuration 1111 que dans la configuration 1100 (3.14 contre 3.62) et, qu'en moyenne, les dommages sont forts.

Enfin, la configuration 1101 a pour particularité de ne pas posséder de strate de 4 à 10 m. Même si les relevés sont peu nombreux (3 relevés), il est à noter que globalement les dommages y sont forts (à 2.41). De plus, cette combinaison possède la plus faible moyenne de dommages des 4 principaux cas.

Enfin, la figure ci-dessous montre sur la majorité des relevés de terrain du site étudié des dommages forts et très fort sur les types de combustible.

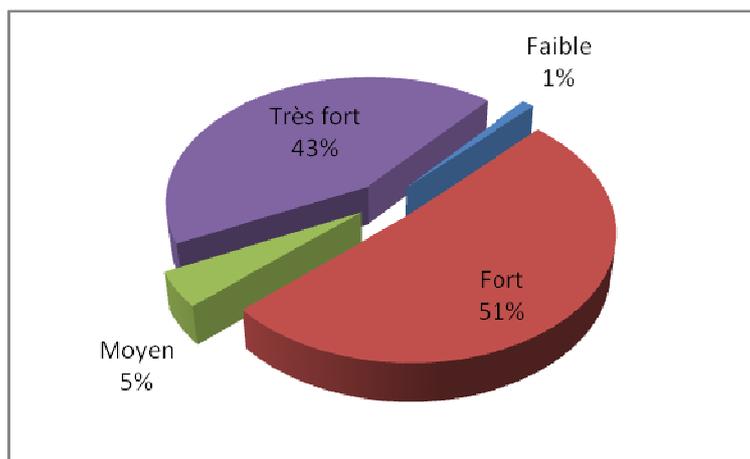


Figure 7 : Répartition des dommages sur l'ensemble des données de terrain

3.2. Les résultats des classifications

3.2.1. La détection des types de combustibles à partir de l'image avant feu

L'image avant feu a permis de distinguer 6 classes d'occupation du sol, dont 5 correspondent à des types de végétation différents :

- résineux matures ;
- résineux jeunes ;
- feuillus dominants ;
- garrigue haute ;
- garrigue basse ;
- sol nu – bâti – minéral.

La validation des types de végétation issue de la classification avec les 90 relevés de terrain a été effectuée sous ArcGis.

La matrice de confusion rend compte de la corrélation entre les données de terrain et celle de télédétection. La difficulté ici a été de faire correspondre les 9 types de combustibles identifiés sur le terrain aux 6 classes mises en évidence par la classification non supervisée sur l'ACP de l'image avant feu. En effet, les types de combustibles identifiés sur le terrain sont basés sur les structures verticale et horizontale de la végétation alors que la classification d'image tient compte des réponses spectrales des objets qui permettent notamment de différencier les peuplements résineux, des feuillus ou encore des garrigues. La matrice ci-après rend compte des corrélations entre les types de combustibles identifiés sur le terrain (colonnes) et les types de végétation identifiés par la classification (lignes).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Plantation	Minéral	Total
Résineux matures	4	1	0	1	1	0	4	1	0	0	0	12
Résineux jeunes	1	3	1	1	0	2	5	2	0	2	0	17
Garrigue Haute	0	0	10	2	0	0	10	0	0	0	0	22
Feillus dominant	0	0	3	0	0	2	7	0	0	0	0	12
Garrigue basse	0	1	6	6	0	1	7	0	1	0	0	22
Minéral-Sol nu - Bâti	0	1	0	3	0	0	1	0	0	0	13	18
Total	5	6	20	13	1	5	34	3	1	2	13	103

Tableau 2: Première matrice de confusion: croisement des données terrain avec les 9 types de combustibles avec les 6 nouvelles classes

13 points de validation ont été rajoutés pour la classe « minéral » à partir de l'orthophoto.

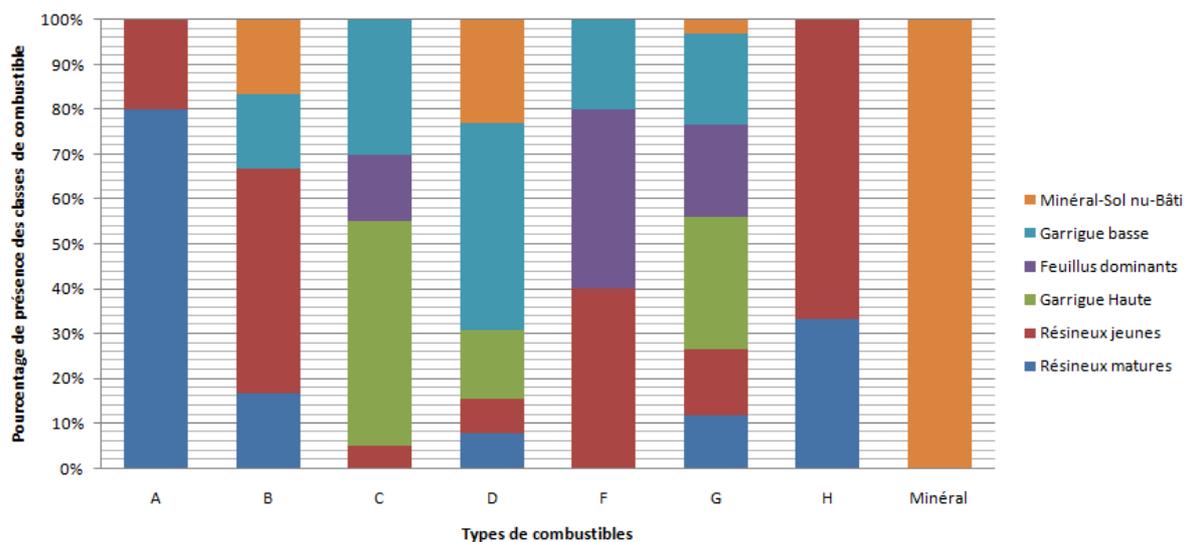


Figure 8 : Visualisation de la répartition des classes sur les types de combustibles

Un même combustible peut être représenté par différentes classes de végétation. Le type A correspond principalement à des « résineux matures », le type B est composé principalement de résineux jeunes, le type C met en avant les garrigues hautes et le type D les garrigues basses. Le type F, quant à lui, est constitué à proportion égale de résineux jeunes et de feuillus. Le type H, sur les trois relevés de terrain, correspond à la classe « résineux jeunes ». Le type G est plus complexe car il est présent dans toutes les classes. Pour redistribuer les échantillons mal classés et pour affiner les résultats, des parcelles d'entraînement ont été réalisées près des points de type G sous ERDAS. Il en ressort l'analyse spectrale suivante.

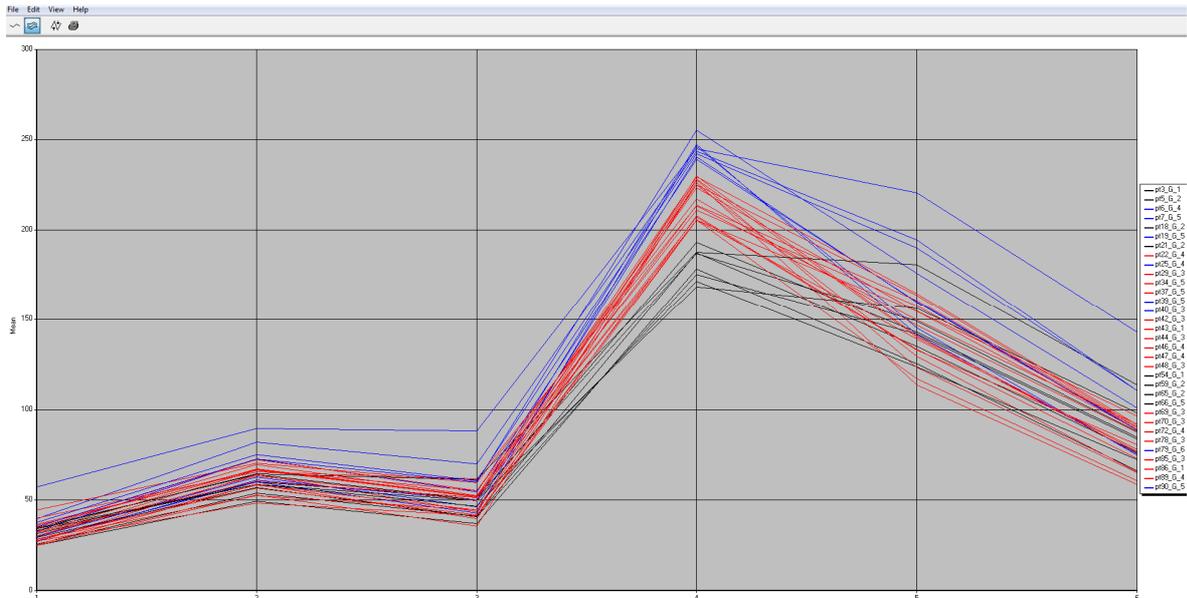


Figure 9 : Profils spectraux des parcelles d'entrainement des points de type G

Dans la bande 4, correspondant au proche infrarouge, 3 grands regroupements peuvent être observés. Après avoir vérifié l'appartenance des points dans la classification, les points ont été redistribués dans la matrice de confusion.

Le tableau suivant présente la correspondance entre les types de combustibles identifiés sur le terrain et les types d'occupation du sol issus de la classification d'image. La nature de chaque relevé a été respectée conformément à la typologie du combustible.

	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E	Type F	Type G	Type H	Type I	Plantation
Résineux matures	✓				✓			✓	✓	✓
Résineux jeunes		✓					✓			
Feuillus dominants						✓				
Garrigue haute			✓				✓			
Garrigue basse				✓			✓			

Tableau 3 : Table de correspondance entre des types de combustibles identifiés sur le terrain et les types d'occupation du sol issus de la classification d'image

Le tableau ci-dessous détaille la matrice de confusion de l'image avant feu, avec un indice de précision globale de 62,14 % et un indice Kappa s'élevant à 52,75 %.

		Terrain						Total général
		Résineux matures	Résineux jeunes	Garrigue Haute	Feuillus dominants	Garrigue basse	Minéral-Sol nu-Bâti	
C l a s s i f i c a t i o n	Résineux matures	60,00%	17,65%	5,41%	0,00%	4,76%	0,00%	11,65%
	Résineux jeunes	30,00%	58,82%	2,70%	40,00%	4,76%	0,00%	16,50%
	Garrigue Haute	0,00%	5,88%	62,16%	0,00%	14,29%	0,00%	26,21%
	Feuillus dominants	0,00%	0,00%	13,51%	40,00%	9,52%	0,00%	8,74%
	Garrigue basse	10,00%	11,76%	16,22%	20,00%	47,62%	0,00%	19,42%
	Minéral-Sol nu-Bâti	0,00%	5,88%	0,00%	0,00%	19,05%	100,00%	17,48%
	Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Tableau 4 : Matrice de confusion finale de l'image avant feu

L'Annexe 6 présente la classification de l'image avant feu.

3.2.2. La détection des niveaux de dommages à partir de l'image après feu

La classification de l'image après feu met en évidence 6 classes, dont 5 correspondent à des niveaux de dommage différents en fonction de la nature du combustible :

- non brûlé ou faible dommage ;
- dommage moyen ;
- dommage fort pour les garrigues ;
- dommage très fort pour les garrigues ;
- dommage fort pour les résineux et feuillus arborés ;
- dommage très fort pour les résineux et feuillus arborés.

La matrice de confusion suivante fait état des corrélations entre les classes. Les données brutes du terrain, ne sont pas satisfaisantes au vu de l'indice global de précision ($P_g = 43.33\%$) et de l'indice Kappa ($\kappa = 29.58\%$). Les confusions sont nombreuses même si la corrélation des classes « Moyen », « Fort garrigue » et « Très fort » est correcte.

		Terrain						Total général
		Faible	Fort	Fort G	Moyen	Tres fort	Tres fort G	
Classif	Faible	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,11%
	Fort	0,00%	34,78%	4,35%	50,00%	14,29%	12,00%	17,78%
	Fort G	0,00%	0,00%	60,87%	0,00%	14,29%	40,00%	28,89%
	Moyen	0,00%	26,09%	8,70%	50,00%	7,14%	4,00%	13,33%
	Très fort	0,00%	39,13%	17,39%	0,00%	64,29%	24,00%	31,11%
	Très fort G	0,00%	0,00%	8,70%	0,00%	0,00%	20,00%	7,78%
	Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Tableau 5: Première matrice de confusion de l'image après feu

Les notes de dommage issues des données terrain étant parfois trop précises (classant en niveau « fort » une note de 2.98 alors que cette note est en limite du dommage « Très fort »), une tolérance sur la note de dommage de ± 0.15 a été appliquée. Le tableau ci-après présente la matrice de confusion tenant compte de cette tolérance.

		Terrain						Total général
		Faible	Fort	Fort G	Moyen	Tres fort	Tres fort G	
Classif	Faible	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,11%
	Fort	0,00%	50,00%	3,45%	0,00%	12,50%	15,00%	17,78%
	Fort G	0,00%	0,00%	82,76%	0,00%	0,00%	10,00%	28,89%
	Moyen	0,00%	30,00%	3,45%	100,00%	0,00%	5,00%	13,33%
	Très fort	0,00%	20,00%	3,45%	0,00%	87,50%	45,00%	31,11%
	Très fort G	0,00%	0,00%	6,90%	0,00%	0,00%	25,00%	7,78%
	Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Tableau 6 : Deuxième matrice de confusion de l'image après feu obtenue par application de la tolérance d'intensité

L'indice global de précision est à présent de 64.44% et l'indice Kappa de 54.92%. La tolérance sur la note des dommages permet d'améliorer la corrélation entre le terrain et la classification de manière générale, mais est plus significative dans la corrélation des dommages « Moyens ». Force est de constater que des confusions persistent et essentiellement dans les classes « Fort » et « Très fort Garrigue ». Dans la catégorie « Fort » du terrain, il semble qu'il y ait des confusions avec la classe « Moyen » et la classe « Très fort » de la classification. En regardant la classification de plus près, nous nous rendons compte que les pixels terrain sont parfois à la limite entre deux classes, à un pixel près. Il est décidé d'appliquer une deuxième tolérance : la tolérance spatiale d'un pixel. En effet, les recalages de points terrains dus aux projections ont pu occasionner une erreur de positionnement spatial.

Ainsi, après avoir appliqué cette tolérance spatiale, nous obtenons la matrice de confusion suivante offrant des indices de précision satisfaisants : $P_g = 83.33\%$ et $\kappa = 78.63\%$.

		Terrain						Total général
		Faible	Fort	Fort G	Moyen	Tres fort	Tres fort G	
classification	Faible	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,11%
	Fort	0,00%	77,78%	0,00%	0,00%	4,55%	6,67%	17,78%
	Fort G	0,00%	0,00%	96,15%	0,00%	0,00%	6,67%	28,89%
	Moyen	0,00%	16,67%	0,00%	100,00%	0,00%	6,67%	13,33%
	Très fort	0,00%	5,56%	0,00%	0,00%	95,45%	40,00%	31,11%
	Très fort G	0,00%	0,00%	3,85%	0,00%	0,00%	40,00%	7,78%
	Total général	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Tableau 7 : Matrice de confusion finale de l'image après feu après l'application des deux tolérances (intensité et espace)

Les confusions dans la classe « Fort » sont améliorées ainsi que dans la classe « Très fort Garrigue ». Finalement, l'image après feu est validée avec deux tolérances : l'une sur la note du dommage et l'autre spatiale.

L'Annexe 7 présente le résultat de la cartographie des niveaux de dommages sur l'incendie de Fontanès.

Afin de pouvoir observer la répartition des dégâts sur la classification des combustibles, la classification de l'image avant feu et la classification de l'image après feu ont été combinées. Le graphique ci-dessous présente la répartition des niveaux de dommage en fonction des classes de combustible.

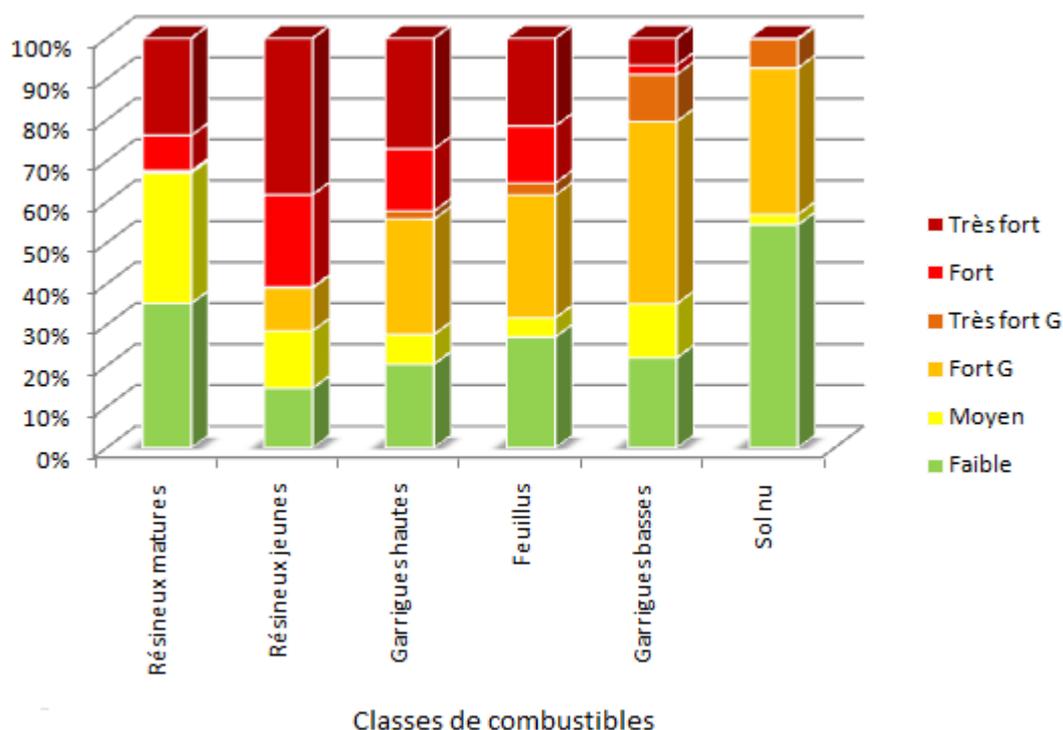


Figure 10 : Pourcentage des niveaux de dommages en fonction des classes de combustibles

Les résineux jeunes et les résineux matures ne présentent presque pas de dégâts associés aux garrigues. Seules les garrigues hautes témoignent de confusions entre garrigues hautes et peuplements arborés vu la présence des dommages « Fort » et « Très fort ». Les garrigues basses, à l'inverse, inscrivent leurs dommages dans ceux qui lui sont naturellement associés. Concernant le sol nu, des confusions subsistent avec le type « Fort Garrigue », mais la grande majorité des échantillons est comprise dans les dommages faibles. Les résineux jeunes et les garrigues hautes subissent les plus forts dommages, tandis que les résineux matures, eux, présentent une majorité de dommages faibles et moyens.

4. Interprétation et discussion

Des résultats fournis dans la partie précédente, il en découle une série d'interrogations : Comment les explique-t-on ? Quels sont les facteurs qui peuvent influencer sur les notes de dommages ? La corrélation entre les données terrain et les classifications permet-elle de justifier la méthode utilisée ? Quelles sont les limites de cette analyse ? Quelles sont les améliorations que nous pourrions apporter ?

Cette ultime partie s'articule donc autour de trois grands axes : l'analyse du terrain, l'analyse des classifications et, enfin, les limites et améliorations de la méthode.

4.1. L'analyse du terrain

Le terrain a apporté des résultats et a permis de valider les classifications. Il apparaît une répartition des dommages assez hétérogène, principalement orientée vers les niveaux « fort » et « très fort ». Les points étant répartis de manière uniforme sur la totalité de la zone d'étude, cela traduit l'exceptionnelle intensité du feu et la haute inflammabilité du couvert végétal en cette fin d'été 2010.

D'autre part, cette étude a permis de mettre en évidence la diversité des dommages à la fois au sein des combustibles mais aussi au sein des strates de végétation.

4.1.1. Les combustibles

Un feu a tendance à se propager plus facilement si la végétation offre une continuité horizontale et verticale. Pour illustrer cette idée de continuité, les garrigues hautes et basses (respectivement C et D) en sont un exemple pertinent. Elles sont denses et les strates basses et intermédiaires sont toutes présentes.

On remarque que les types A et F ont le même profil dans la distribution des moyennes et extrêmes. Ainsi, un peuplement arboré de plus de 10 m et au couvert dense est comparable à un peuplement arboré de moins de 10 m et lâche. Le fait que les combustibles F soient moins denses et que la strate de plus de 10 m pour les combustibles de type A peut être une raison de ce rapprochement.

La moyenne des dommages du type F s'est déplacée vers la moyenne des dommages de type A à cause de la présence de configurations à strates basses (de type garrigue) et donc à très fort dommage.

Les types E, H, I et Plantations ne sont pas représentatifs car ils ne représentent que peu d'échantillons.

Les types B et G sont caractérisés par une hauteur inférieure à 10 m et un recouvrement supérieur à 60 %, la différence étant que le type B est réparti en tâches.

Le type G peut aussi être apparenté au type C. Une garrigue haute peut être structurée de la même manière qu'un peuplement arboré de moins de 10 m et dense. C'est en général l'une des principales sources de confusion dans les classifications.

4.1.2. Les strates

Ce que l'on peut retenir de cette analyse des strates entre elles est que le dommage décroît avec la hauteur. Les feux de cime existent, mais ils sont plus rares. Ces feux ont, en effet, pour caractéristiques de se propager par les houppiers et pas nécessairement en surface.

Nous retrouvons donc le concept de continuité verticale.

4.1.3. La structure verticale du combustible

Initialement, les combustibles les plus présents étaient les types G, C, D, F et A. Les combinaisons de strates les plus rencontrées sont donc principalement 1100, 1110 et 1111 correspondant respectivement à la présence des strates de 0 à 1 m et de 1 à 4 m, la présence des trois strates les plus basses et la présence de toutes les strates.

Du point de vue des dommages, une question se pose : quelle va être l'influence de la présence d'une strate supplémentaire sur la note de dommage ?

Pour obtenir une note de dommage, la note de dommage de la strate la plus haute du combustible considéré a été doublement pondérée. Sachant que les dommages dans les strates hautes sont en général plus faibles, l'ajout d'une strate réduit la note de dommage. La comparaison des points 25 et 29 est un bon exemple (moyenne de 3.32 pour le point 29 à une moyenne de 2.99 pour le point 25). Inversement, l'ajout d'une strate basse peut occasionner l'augmentation du dommage. Le point 5 possède les mêmes dommages que le point 3 dans ses strates intermédiaires. En revanche, le point 3 présente un dommage sur la strate de 0 à 1 m. La moyenne passe de 2.86 à 2.89 si on ajoute la strate la plus basse. On peut donc avoir les deux cas de figure.

4.1.4. Les autres facteurs pouvant influencer les résultats : la pente et l'exposition

Lors de la présentation de la zone d'étude, il était précisé qu'un vent de secteur Nord – Nord – Ouest soufflait ce jour-là. Le vent peut accélérer la propagation du feu et augmenter l'intensité du dommage. Les reliefs exposés Sud-Est seraient plus protégés en théorie.

Les points 54 et 66, tous deux de type G et à pente égale (de 30 %) ont respectivement une orientation Nord et Sud-Sud-Est. Ils possèdent la même combinaison de strates et sont tous deux situés en milieu de pente. Les données sont donc comparables. On observe une diminution de la note de dommage de 3.00 à 2.85 en passant d'une exposition Nord à une exposition Sud-Sud-Est. Cette hypothèse n'est pas confirmée par les points 12 et 61 de type B qui montrent une augmentation du dommage en secteur Sud-Est.

Les points 20 et 64 sont de type D et n'ont, des paramètres levés, que la pente qui diffère. Une pente à 40 % présente un dommage plus important qu'une pente de 20 % (3.51 contre 2.56). Là encore, des exemples contredisent cette généralité : les points 37 et 39 de type G en sont un bon exemple.

Ainsi, il est difficile de pouvoir généraliser l'influence des paramètres de pente et d'exposition car les configurations possibles sont grandes et les facteurs environnementaux très variables : comportement local du feu dû à une accumulation de combustible, à un micro-relief, etc.

4.2. L'analyse des classifications

4.2.1. La classification de l'image avant feu

La difficulté principale de cette classification a été de faire correspondre les 9 types de combustibles avec les 6 classes de végétation issues de la classification supervisée.

Afin de pouvoir créer une matrice de confusion correcte, les relevés de terrain ont été affectés aux classes de la classification d'image. Comme expliqué dans la partie « Résultats », le combustible G a posé problème car il se confondait avec toutes les classes sans exceptions.

L'analyse spectrale a eu pour objectif de regrouper les échantillons de type G en trois grandes classes et donc a permis de créer la matrice de confusion.

Des résultats satisfaisants sont obtenus suite à ce réagencement.

4.2.2. La classification de l'image après feu

Les tolérances appliquées sur les notes de dommage ainsi que sur la localisation du relevé permettent d'apporter une marge d'erreur acceptable pour le niveau de dommage d'une part, pour le positionnement des points levés d'autre part.

La tolérance sur la note de dommage correspond à un peu moins de 4 %, ce qui semble plus que raisonnable. D'autre part, le positionnement GPS et les projections des points sur l'image ont occasionné une tolérance spatiale de 1 pixel. Avec des images de haute résolution spatiale, cela semble être une correction honnête.

La validation de la première classification a permis de reclasser les dommages des points en deux grands types : les dommages associés aux garrigues et ceux qui se réfèrent aux peuplements arborés.

Cette reclassification et l'application des deux tolérances ont eu pour conséquence la validation de la matrice de confusion à hauteur de 83.33% de précision globale. Cela justifie donc les choix précédents.

Il est à noter que le dernier diagramme, présentant les niveaux de dommages en fonction des classes de combustibles, est cohérent avec les résultats précédents. Il montre les confusions, dans les garrigues hautes, entre les niveaux « Fort », « Très fort » et « Très fort Garrigue », résultats mis en exergue dans les matrices de confusions finales des deux classifications.

La répartition des dommages dans la classe « Feuillus » est aussi compréhensible. Une garrigue peut être composée principalement de feuillus et avoir, de ce fait, la même réponse spectrale que les feuillus arborés.

La classe « Minéral - bâti - sol nu » montre essentiellement peu de dommages. Mais les sols nus ayant une réflectance similaire à celle d'une garrigue basse, des confusions persistent. La matrice de confusion annonçait d'ailleurs 19,05% dans ce croisement de type d'occupation du sol. Ainsi, ces résultats sont pour le moins compréhensibles.

4.3. Les limites et les améliorations de la méthode

Sur la zone d'étude, la corrélation entre les dommages évalués sur le terrain et ceux mis en évidence par la classification a fourni des résultats assez satisfaisants au vu des données disponibles. Certes, des confusions sont présentes, mais elles restent cohérentes.

Dans l'Etat de l'Art, nous présentions les protocoles de terrain suivants : l'échelle d'intensité du Cemagref (Lampin *et al.*, 2002) et le Composite Burning Index ou CBI (Key et Benson, 2002, 2004, 2006). Le protocole réalisé dans cette étude offre un nombre plus réduit de strates (4 strates au lieu de 5) et propose un compromis entre les niveaux de dommages des deux autres protocoles (c'est-à-dire Faible, Modéré, Fort, Très fort). Le nombre de degrés de sévérité est moins vaste que l'échelle d'intensité mais la résolution de l'image ne permettait pas de distinguer les dommages faibles de très faibles. A la différence de l'échelle d'intensité et du CBI, la strate haute seule a été doublement pondérée par rapport aux autres, la réponse spectrale prenant essentiellement en compte la strate dominante (Baudel *et al.*, 2009).

Les échantillons sont bien répartis sur toute la zone. Cela dit, l'hétérogénéité est visible essentiellement dans le nombre d'échantillons par combustibles. Certains ne sont constitués que d'un seul levé quand d'autres en possèdent une trentaine. Une meilleure répartition des levés au sein même des combustibles aurait peut-être favorisé une plus grande finesse dans la classification des combustibles. Cette meilleure répartition n'était a priori pas réalisable car elle aurait nécessité une connaissance absolue du terrain.

Une limite dans ce protocole : la considération du taux de recouvrement dans notre calcul du dommage. La typologie du combustible avait pour intention la précision dans la description du combustible (Lampin *et al.*, 2004). Elle classait le couvert végétal selon deux grands critères : la hauteur et le taux de recouvrement. Hors nous n'avons pris en compte que la hauteur des strates dans notre calcul. Ainsi, un peuplement forestier dense pouvait avoir la même note de dommage qu'un peuplement forestier réparti en tâches. La prise en compte de ce couvert n'est pas négligeable car elle apporterait une meilleure compréhension des réponses spectrales des combustibles, affectés par la présence de sol nu. Il faudrait donc intégrer le pourcentage de couvert dans le calcul du dommage.

Concernant l'analyse en composantes principales, elle a permis de synthétiser sur 3 bandes les 6 bandes spectrales initiales. Elle a eu pour grand avantage de mettre en évidence la variabilité inter-classes au sein de l'image, ce qui nous a facilité l'apprentissage et la validation des classifications supervisées et non supervisées d'images. La classification avant feu présente un résultat assez satisfaisant mais la classification après feu est meilleure notamment du fait de la tolérance spatiale d'un pixel prise en considération. Dans la littérature, on trouve souvent un indice Kappa de l'ordre de 60 % (Patterson et Yool, 1998 ; DiGirolamo *et al.*, 2006). Ainsi, la classification avant feu n'entre pas dans cette précision tandis que la classification des dommages la dépasse.

5. Conclusion

Cette étude s'inscrit dans le projet TOSCA visant à préparer l'utilisation des missions Venùs et Sentinel-2 par le traitement et l'application de séries temporelles d'images LANDSAT 5. Elle vise à développer une méthodologie de qualité permettant de caractériser les dommages sur la végétation méditerranéenne après un incendie de forêt à l'aide de données terrains et d'images satellites avant et après feu.

Le protocole de terrain a été réalisé de manière à pouvoir répondre aux besoins de cette étude mais aussi afin de pouvoir étendre son utilisation à d'autres configurations comme par exemple un changement de résolution de l'image. L'échelle d'intensité du Cemagref, le Composite Burning Index CBI tout comme notre protocole de terrain font intervenir des variables facilement mesurables. Ces méthodes répondent au même objectif de caractérisation des dommages mais différent dans la pondération des strates de végétation. Le protocole a été testé sur deux images LANDSAT 5, la première caractérisant le type de combustible avant l'incendie, la deuxième identifiant les dommages après l'incendie.

D'autre part, l'Etat de l'Art rend compte des techniques utilisées pour répondre à cette problématique. Le calcul des indices de végétation ainsi que les différences d'indices, le choix de la résolution d'image (haute ou très haute résolution), l'analyse mono-temporelle ou multi-temporelle, la comparaison de produits différents, les classifications orientée-objet ou par pixel sont des analyses fréquemment effectuées. Ces études sont toutes distinctes les unes des autres de par le choix des données et méthodes utilisées et ont apporté des résultats concluants. La présente étude est fondée sur une série temporelle de deux images de résolution 30 m par classification d'image supervisée et non supervisée à partir d'une analyse par composantes principales.

L'évaluation des dommages sur la zone d'étude a révélé une répartition du dommage entre les types « Fort » et « Très fort » quelle que soit la nature du combustible. La corrélation des données terrain avec l'image a fourni des résultats mitigés : ils sont satisfaisants et cohérents mais la première classification (répartition des types de combustibles) est moins bien corrélée que la deuxième. Les principales confusions entre les classes « Très fort Garrigue », « Très fort » et « Fort » pour les garrigues hautes. Une autre grande confusion résidait dans la discrimination des garrigues basses et du sol nu, la réponse spectrale étant ressemblante. D'autre part, il aurait été judicieux d'intégrer les recouvrements dans le calcul de la note de dommage afin de rendre compte du pourcentage de sol nu dans les végétations éclaircies.

Cette étude permettrait d'appliquer un nouveau protocole pour l'évaluation des dommages après incendie. Il pourra donc être testé sur des images de résolutions différentes ou avec des méthodologies distinctes (indices de végétation, techniques de transformations linéaires).

Il pourra servir de support aux décideurs publics non seulement dans la phase *post* crise pour l'évaluation de l'ampleur des dommages dans des zones précises à partir d'une échelle d'intensité mais aussi dans le domaine de la prévention afin de montrer l'intérêt du

débroussaillage dans la propagation d'un feu de forêt. Il pourrait aussi intervenir dans la phase de diagnostic d'un plan de protection des risques d'incendie de forêt (PPRIf).

6. Bibliographie

- BASTARRIKA IZAGIRRE A., CHUVIECO SALINERO E., 2006 : Cartografía del área quemada mediante crecimiento de regiones : aplicaciones en entornos mediterráneos con imágenes TM y ETM+. *Geofocus*, n°6, pp 182-204.
- BAUDEL J., 2009 : Impact des incendies de forêt sur les peuplements. Approche par la télédétection. Mémoire en vue de l'obtention du Master en Sciences de l'Environnement Terrestre, pp 41.
- BLANCHI, R., JAPPIOT, M., ALEXANDRIAN, D. Forest fire risk assessment and cartography, a methodological approach. *IV international conference on Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, Coimbra, Portugal (D.X. Viegas, Ed.), 2002, Millpress, Rotterdam, Netherlands.
- COÏC B., 2004 : Mise en place d'une méthodologie pour cartographier les dommages causés par les incendies forestiers. Mémoire de stage de 4^{ème} année d'ingénieur ESA.
- HAGOLLE O., CESBIO, 2011 : Séries temporelles de produits LANDSAT de niveau 2A – Manuel d'utilisateur des données produites au CESBIO.
- CALOZ R., COLLET C., 2001 : Précis de télédétection : traitement numérique des images, volume 3 ; *Presses de l'Université de Québec et Agence universitaire de la Francophonie*, Sainte-Foy (Québec) pp 386.
- COLIN J., JAPPIOT M., MARIEL A., 2001 : Protection des forêts contre l'incendie. Fiche technique pour les pays du bassin méditerranéen. *Cahier FAO conservation*, Cemagref, 36, pp 149.
- CHAFER, C., NOONAN, M. AND MACNAUGHT, E. , 2004. The post-fire measurement of fire severity and intensity in the Christmas 2001 Sydney wildfires. *International Journal of Wildland Fire*. 13, 227–240.
- CHUVIECO E., MARTIN M.P., PALACIOS A., 2002: Assessment of different spectral indices in the red–near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, n°23, 5103-5110.
- CHUVIECO E., VENTURA G., MARTIN M.P. et GOMEZ I., 2005 : Assessment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping. *Remote Sensing of Environment*, 94, pp 450-462.
- CLOPEZ M. , 2011 :Prévention des incendies de forêt : signature du plan d'action Etat/ Communes suite aux grands incendies du 30 Août 2010.
- DE SANTIS A., CHUVIECO E., 2006 : Burn severity estimation from remotely sensed data : performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment*, 108, pp 433-435.

DIAZ DELGADO R., PONS X., 1999 : Empleo de imagenes de teledeteccion para el analisis de los niveles de severidad causados por el fuego. *Revista de teledeteccion*, 12.

DIGIROLAMO, P. A., 2006 : A Comparison of Change Detection Methods in an Urban Environment Using LANDSAT TM and ETM+ Satellite Imagery: A Multi-Temporal, Multi-Spectral Analysis of Gwinnett County, GA 1991-2000. *Anthropology Theses*, 18.

ESCAFADDEL, R., HUETE, A.R., 1991, Improvement in remote sensing of low vegetation cover in arid regions by correcting vegetation indices for soil "noise": C. R. Academie des Sciences Paris, v. 312, p. 1385-1391.

FERNANDEZ A., ILLERA P., CASANOVA J.L., 1997: Automatic mapping surfaces affected by forest fires in Spain using AVHRR NDVI composite image data. *Remote Sensing of Environment*, 60 (2), 153-162.

GARCIA M., CHUVIECO E., 2004 : Assessment of the potential of SAC-C/ MMRS imagery for mapping burned areas in Spain. *Remote Sensing of Environment* 92, 414-423.

GITAS I., POLYCHRONAKI A., KATAGIS T., MALLINIS G., MINAKOU C., 2007: Wildfires and Remote sensing. Fast mapping results provide deeper insights. *GEO Informatics*, pp 16-19.

GOLDAMMER J.G., 2000: Les incendies dans le monde : message du Global Fire Monitoring Center. *International Strategy for Disaster Reduction*, pp 8.

HAMMILL K.A., BRADSTOCK R.A., 2006: Remote sensing of fire severity in the Blue Mountains: Influence of vegetation type and inferring fire intensity. *International Journal of Wildland Fire*, 15(2), 213-226.

HEREDIA A., MARTINEZ S., QUINTERO E., PIÑEROS W., CHUVIECO E., 2003 : Comparacion de distintas técnicas de analisis digital para la cartografia de areas quemadas con imagenes LANDSAT ETM+. *Geofocus*, 3: 216-234.

KEY C.H., BENSON N.C., 2002: Remote sensing mesure of severity, the normalized burn ratio. *Fire monitoring and inventory protocol, Landscape Assessment*, Web site: <http://www.fire.org/firemon/lc.htm>.

KOUTSIAS N., KARTERIS M., 2000 : Burned area mapping using logistic regression modelling of a single post-fire LANDSAT 5 thematic mapper image. *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp 673 – 687.

LAMPIN C., CHANDIOUX O., PAULET V., JAPPIOT M., 2004 : Typologie de la végétation combustible dans les interfaces agriculture-forêt-urbain. Rapport pour le département Gestion des Territoires Unité Agriculture et Forêt Méditerranéenne, pp 116.

LAMPIN C., JAPPIOT M., ALIBERT N., MANLAY R., GUILLANDE R., 2002 : Prototype d'une échelle d'intensité pour le phénomène d'incendies de forêts. *Ingénieries*, 31, 49-56.

- LENTILE L.B., HOLDEN Z.A., SMITH A., FALKOWSKI M.J., HUDAK A.T., MORGAN P., LEWIS S.A., GESSLER P.E., BENSON N.C., 2006: Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 15 (3), 319-345.
- LONG M., RIPERT C., PIANA C., JAPPIOT M., LAMPIN C., GANTEAUME A., 2008 : Amélioration de la connaissance des causes de départ de feu de forêt ; Convention DGFAR Forest focus n° FF 2004-06.
- MEDAIL F., QUEZEL P., 1997: Hot-spot analysis for conservation of plant biodiversity in the Mediterranean basin. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 84, 112-127.
- MITRI G.H., GITAS I.Z., 2006: Fire mapping using object based classification of Ikonos imagery. *International Journal of Wildland fire*, 15, 457-462.
- MITRI G.H., GITAS I.Z., 2008: Mapping the severity of fire using object based classification for Ikonos imagery. *International Journal of Wildland fire*, 17, pp 431-442.
- NAVARRO-CERILLO R., HERNANDEZ CLEMENTE R., ESCUIN ROYO S., CRESPO CALVO R., FERNANDEZ REBOLLO P., LANJERI S., 2007: Forest FIRE effects assessment in Andalusia: a review of strategies and methodologies for severity zapping and vegetation recovery monitoring at the long-term. *Wildfire 2007, 4th international wildland fire conference*. Séville, Espagne.
- PATTERSON M.W., YOOL S.R., 1998 : Mapping Fire-Induced vegetation mortality using Landsat Thematic Mapper data : a comparison of linear transformation techniques. *Remote Sensing of Environment*, 65, 132-142.
- SALDIVIA S.O., CHUVIECO E., 2007: Utilizacion de productos MODIS para la cartografia de areas quemadas. *Revista de teledetección*, 27; pp 27-43.
- VERBYLA D.L., KASISCHKE E.S., HOY E.E., 2008: Seasonal and topographic effects on estimating fire severity from Landsat TM/ETM+ data. *International Journal of Wildland Fire*, 17, pp 527-534.
- VIEDMA C., CHUVIECO E., 1993: Cartografia y evaluacion de daños causados por incendios forestales mediante técnicas de teledetección. El ejemplo de la Hoya de Buñol. *Boletín de información técnica*, 167, 60-66.

7. Sites Internet

Laboratoire en Ecologie, Systématique et Evolution : <http://www.es.e.u-psud.fr>

Site du Ministère de l'Agriculture : <http://agriculture.gouv.fr>

Site d'IRSTEA : <http://www.irstea.fr>

Site du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie : <http://www.prim.net>

Lexique de la terminologie scientifique des feux de forêt : <http://www.firewords.net>

Site pédagogique sur la télédétection : <http://eduscol.education.fr/obter> (Direction de la Technologie, sous-direction des Technologies Educatives et des Technologies de l'Information et de la Communication, bureau des Technologies de l'Enseignement)

Site de l'European Space Agency : <http://www.esa.int>

Site de la maison de la télédétection : <http://www.teledetection.fr>

Site de l'université Paris 1 : <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued>

Site eCognition ERDAS : www.geosystems.fr

Bulletin d'information géographique n°3 édité par l'université d'Antananarivo et le Cirad : http://iarivo.cirad.fr/doc/dr/BIG_2.pdf

8. Annexes

Annexe 1 : Protocole terrain

Annexe 2 : Fiche terrain pour l'évaluation des dommages

Annexe 3 : Clé de détermination des types de combustibles

Annexe 4 : Table attributaire complète

Annexe 5 : Répartition des 90 points sur la zone d'étude

Annexe 6 : Occupation du sol classification sur la zone d'étude

Annexe 7 : Intensité des dommages sur la zone brûlée

Protocole pour la caractérisation des dommages post-incendie sur la végétation

Dans le cadre de la problématique du « Suivi spatio-temporel des surfaces incendiées pour l'évaluation des dommages après feu », un déplacement sur la zone d'étude, près de Fontanès dans le Languedoc-Roussillon a été prévu.

Plus exactement 11 journées de terrain programmées. Elles vont permettre de faire correspondre la classification, réalisée sous logiciel de traitement d'image ENVI, à la réalité. De plus, ce sera le moyen privilégié de valider ladite classification.

Pour rendre compte de l'état de la végétation après feu, nous avons décidé de créer une fiche technique. Les trois premières journées de terrain ont constitué la base des observations relatives aux mesures à réaliser. Elle remplira donc l'objectif de caractériser l'état d'endommagement pour chaque placette de manière rapide et efficace.

Pour que « rapide et efficace » soient respectés, une codification a été mise en place. Cette codification est fonction du degré d'endommagement non seulement par strate de végétation mais aussi par élément constituant le végétal.

Pour que ce protocole soit applicable au mieux dans les prochaines journées terrain et pour d'éventuels projets futurs, nous prendrons connaissance dans une première partie des notions fondamentales concernant la végétation et la méthode de stratification utilisée. Puis, après avoir rappelé brièvement le matériel à utiliser, nous nous attarderons sur les fiches à proprement parler.

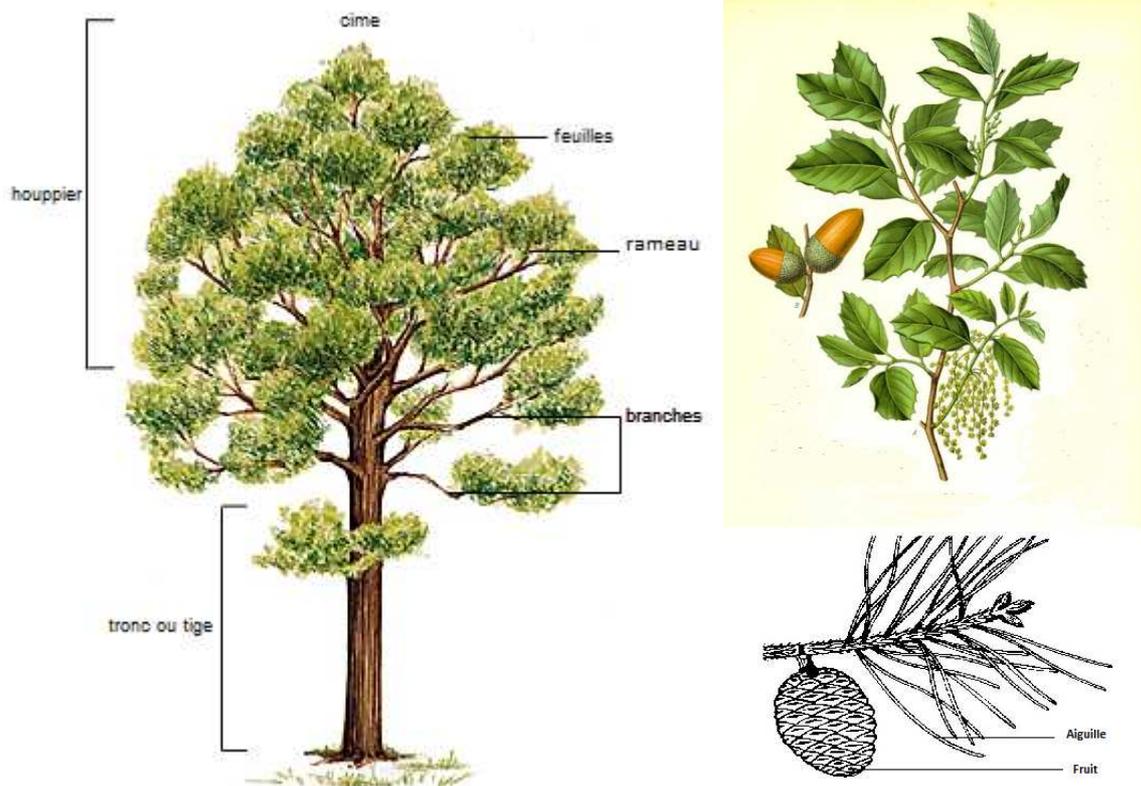
Notions fondamentales : les éléments structuraux d'une espèce et la convention de stratification des placettes.

Les journées sur le terrain nous ont permis de constater que deux ans après le feu, on observe non seulement une végétation morte et sévèrement endommagée mais aussi une reprise de la végétation.

Cet état de fait va, dans un souci de clarté, entraîner une séparation de ces deux états : un premier volet sera destiné à faire état de la repousse de la végétation, puis une description de la végétation ayant été atteinte par le feu sera réalisée.

Forts de ces considérations initiales, voyons plus en détail les différentes conventions établies pour ce protocole.

1) Structure de l'espèce



Au niveau des éléments structurant l'arbre ou l'arbuste, nous considérerons les fruits (pomme de pin, gland), les feuilles ou aiguilles, les rameaux, les branches et le tronc.

Le niveau de ramification du rameau est d'un degré supérieur à celui de la branche.

2) Stratification du couvert végétal

La stratification du couvert végétal est une convention que l'on a établie. La hauteur de l'arbre fera entrer l'arbre dans telle ou telle strate.

Ainsi, au vu des espèces présentes sur le terrain et de leur hauteur, nous distinguons 4 strates :

- La strate de 0 à 1 m
- La strate de 1 à 4 m
- La strate de 4 à 10 m
- La strate de plus de 10 m.

Sera traitée à part la litière, couche constituée de végétaux en décomposition (feuilles, aiguilles, fruits morts). Elle permettra d'apprécier, selon son recouvrement, l'intensité du feu sur la placette.

Notons que l'établissement de ces strates n'est utilisé que pour l'évaluation des dommages, et non pour caractériser la repousse de la végétation.

3) Essences rencontrées sur le terrain

L'expérience des premières journées de terrain nous a permis de recenser différentes espèces d'arbre, d'arbustes et d'herbacés.

Dans la catégorie des herbacés, on trouvera : les brachypodes, le thym, le ciste de Montpellier et la salsepareille essentiellement.

Dans la catégorie des arbustes : Arbousier, Pistachier lentisque, Buis, Viorne tin, ciste, Genévrier, Genêt épineux, Romarin, Philaire.

Dans la catégorie des arbres : Chêne kermès, Chêne vert, Chêne blanc, Pin d'Alep, Pin pignon, Cyprès.

Des essences qui laissent entrevoir un paysage de garrigue développé sur ce sol calcaire.

Une annexe photographique récapitulative de ces espèces est jointe au protocole.

Matériel :

Il est prévu d'apporter lors des déplacements sur le terrain :

- Le GPS Thalès : il nous permettra de situer le centroïde de la placette.
- Une mire télescopique de 4 m : elle servira de référence pour les strates.
- Un clinimètre pour mesurer la pente, l'exposition et la hauteur des arbres.
- Une paire de jumelles pour observer l'état d'endommagement des rameaux et des fruits.
- Les fiches de terrain et les diverses cartes de repérage.
- Un appareil photo

Protocole et fiches de terrain

Le protocole

L'objectif de cette étude est de déterminer la note d'endommagement de la placette considérée.

La placette, justement, doit être homogène dans le dommage. De plus, elle doit être assez grande. Dans notre cas, étant donné que l'image LANDSAT a une résolution de 30m x 30m, les placettes doivent avoir une taille d'environ 90x90 m².

En premier lieu, il faudra déterminer le type de combustible à l'aide de la typologie réalisée par l'unité. Elle permettra de prendre en considération le volume de combustible brûlé. La clé de détermination proposée ci-dessous identifie un type de combustible en fonction de la nature du combustible (peuplement forestier, garrigue), de sa hauteur (plus de 10m, moins de 10m) et de son recouvrement (en %). Il y a 9 lettres (de A à I). Chaque lettre correspond à un type de formation végétale.

Puis, nous déterminerons les différents pourcentages du couvert végétal existant après le feu : la litière, le sol nu et la reprise de végétation. Les espèces dominantes seront notifiées.

Après avoir traité la partie « repousse de la végétation », l'étape suivante correspond à l'étude de l'endommagement de la placette. Celle-ci sera faite à partir de l'analyse de chaque strate.

Pour la strate de 0 à 1m, on trouvera les éléments de structure des végétaux suivants : feuille, rameau, branche, tronc. Dans cette strate, on peut trouver les petits arbustes ayant résisté au feu. Certains conservent leurs rameaux fins, tandis que d'autres apparaissent sous forme de chicots accusant d'un sévère dommage.

Pour les autres strates, la présence de fruits viendra compléter la liste des éléments structuraux. Arbres, arbrisseaux et arbustes pourront trouver leur place dans ces strates.

Nous en venons donc aux dommages à proprement parler sur la structure du végétal.

La convention est la suivante :

- 4 niveaux de dommages pour les feuilles (étude du houppier) :
 - 0** : Saines : le houppier est intact et vert
 - 1** : Roussies : la forte chaleur a provoqué un dessèchement des feuilles, ce dont témoigne la coloration roussie du houppier. Les feuilles sont roussies mais sont toutes présentes.
 - 2** : Partiellement absente : le couvert du houppier est incomplet
 - 3** : Absentes : Il n'y a plus de feuilles.

- 4 pour les rameaux :
 - 0** : Sains : les dernières ramifications sont intactes.

- 1 : Noircis : toutes les ramifications sont présentes mais noircies
- 2 : Disparition des derniers niveaux de ramification
- 3 : Disparition totale des rameaux, il ne reste que les branches

- 4 pour les branches :

- 0 : Saines : dans le sens d'intactes
- 1 : Partiellement noircies
- 2 : Complètement noircies
- 3 : Dommages profonds (chicots) : sévèrement attaqué

- 4 pour le tronc :

- 0 : Sain : toujours dans le sens d'intact
- 1 : Partiellement noirci
- 2 : Complètement noirci
- 3 : Dommages profonds (chicots)

- 3 pour les fruits :

- 0 : Sain : pas de changement de couleur
- 1 : Noircis partiellement ou complètement
- 2 : Absents

Une codification est appliquée pour chaque degré de dommage. Le nombre augmente avec la sévérité du dommage. Ainsi on constate par exemple un houppier sain de code 0 et un houppier sans feuilles de niveau 3.

Sur chaque strate, nous allons effectuer la somme des codes. Cette somme partielle à l'échelle de la strate sera sommée à celles des autres strates.

Ce résultat permettra de positionner la placette sur l'échelle de dommage.

Les fiches terrain

En annexe 2 et 3, vous pourrez trouver respectivement la typologie du combustible et la fiche de caractérisation des dommages.

ANNEXE 2 : Fiche terrain pour l'évaluation des dommages

Evaluation des dommages après feu - Feu de Fontanès du 30 août 2010

N° relevé :	Lieu-dit :				
Date relevé :	Auteurs :				
Situation topographique :	Fonds de vallon	Haut de pente	Milieu de pente	Bas de pente	Plat
Type de combustible incendié :	Exposition :			Pente :	

Etat de la litière après le feu

Espèces dominantes :	Epaisseur :				
Recouvrement :	0 - 10 %	10 - 30 %	30 - 60%	60 - 90%	> 90%
Recouvrement sol nu :	0 - 10 %	10 - 30 %	30 - 60%	60 - 90%	> 90%
Remarques :					

Reprise de la végétation après le feu

Espèces dominantes :	Hauteur moyenne :				
Recouvrement :	0 - 10 %	10 - 30 %	30 - 60%	60 - 90%	> 90%
Remarques :					

Description des dommages après le feu

Strate 0 - 1 m Somme :

Espèces dominantes :					
Feuilles :	0 : saines	1 : roussies	2 : partiellement absentes (présentes au sol)		3 : absentes
Rameaux (niveaux de ramification ≥ 2) :					
	0 : sains	1 : noircis	2 : disparition des derniers niveaux de ramification		3 : disparition totale
Branches (niveau de ramification = 1) :					
	0 : saines	1 : partiellement noircies	2 : complètement noircies		3 : dommages profonds, chicots
Troncs (niveau de ramification = 0) :					
	0 : sains	1 : partiellement noircies	2 : complètement noircies		3 : dommages profonds, chicots
Remarques :					

Strate 1 - 4 m Somme :

Espèces dominantes :					
Feuilles :	0 : saines	1 : roussies	2 : partiellement absentes (présentes au sol)		3 : absentes
Rameaux (niveaux de ramification ≥ 2) :					
	0 : sains	1 : noircis	2 : disparition des derniers niveaux de ramification		3 : disparition totale
Branches (niveau de ramification = 1) :					
	0 : saines	1 : partiellement noircies	2 : complètement noircies		3 : dommages profonds, chicots
Troncs (niveau de ramification = 0) :					
	0 : sains	1 : partiellement noircies	2 : complètement noircies		3 : dommages profonds, chicots
Fruits :	0 : sains	1 : noircis	2 : absents		
Remarques :					

Strate 4 - 10 m Somme :

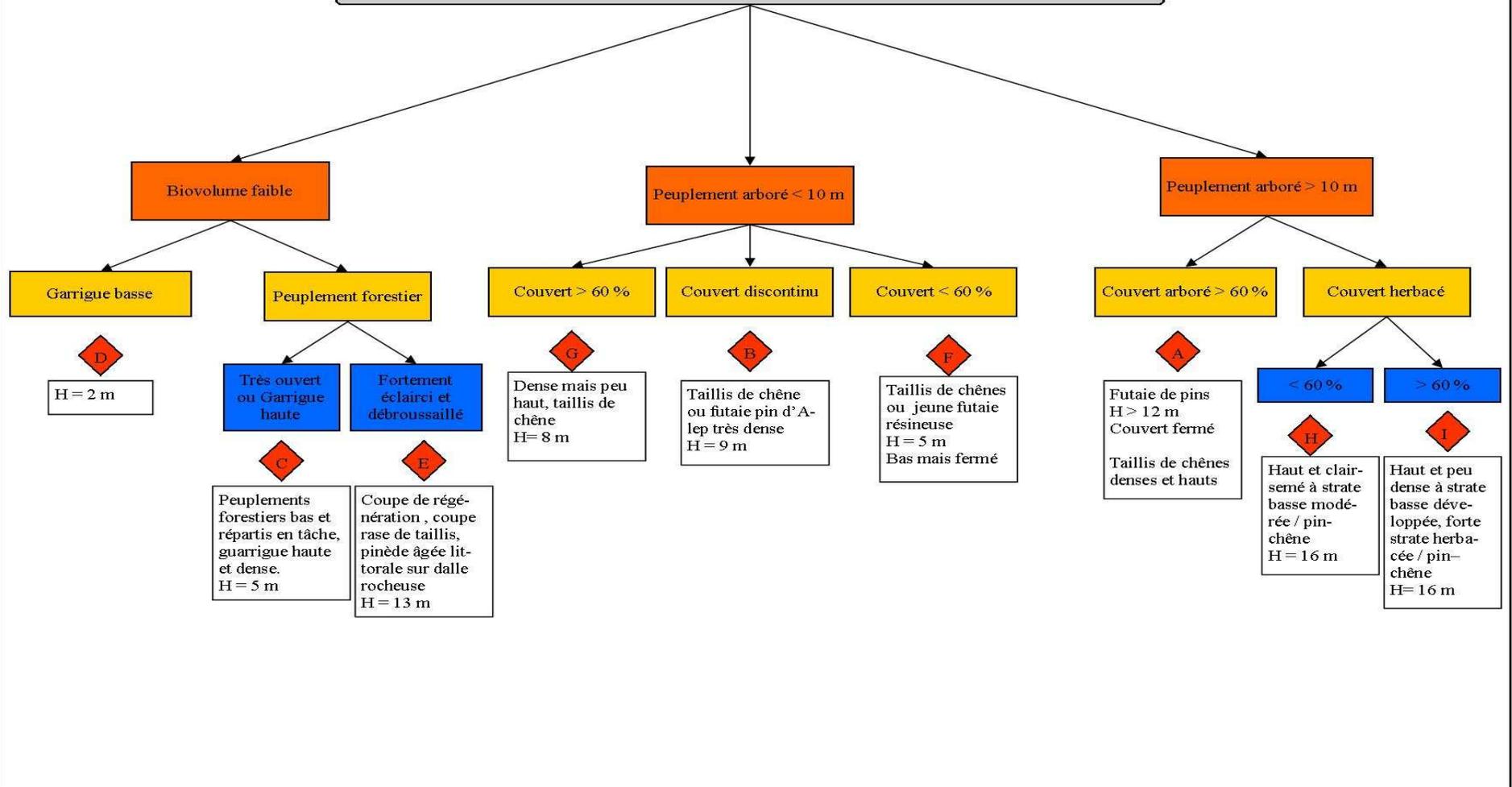
Espèces dominantes :					
Feuilles :	0 : saines	1 : roussies	2 : partiellement absentes (présentes au sol)		3 : absentes
Rameaux (niveaux de ramification ≥ 2) :					
	0 : sains	1 : noircis	2 : disparition des derniers niveaux de ramification		3 : disparition totale
Branches (niveau de ramification = 1) :					
	0 : saines	1 : partiellement noircies	2 : complètement noircies		3 : dommages profonds, chicots
Troncs (niveau de ramification = 0) :					
	0 : sains	1 : partiellement noircies	2 : complètement noircies		3 : dommages profonds, chicots
Fruits :	0 : sains	1 : noircis	2 : absents		
Remarques :					

Strate > 10 m Somme :

Espèces dominantes :					
Feuilles :	0 : saines	1 : roussies	2 : partiellement absentes (présentes au sol)		3 : absentes
Rameaux (niveaux de ramification ≥ 2) :					
	0 : sains	1 : noircis	2 : disparition des derniers niveaux de ramification		3 : disparition totale
Branches (niveau de ramification = 1) :					
	0 : saines	1 : partiellement noircies	2 : complètement noircies		3 : dommages profonds, chicots
Troncs (niveau de ramification = 0) :					
	0 : sains	1 : partiellement noircies	2 : complètement noircies		3 : dommages profonds, chicots
Fruits :	0 : sains	1 : noircis	2 : absents		
Remarques :					

ANNEXE 3 : Clé de détermination des types de combustibles

CLE DE DETERMINATION DU RECOUVREMENT EN FONCTION DU TYPE DE COMBUSTIBLE



ANNEXE 4 : Table attributaire complète

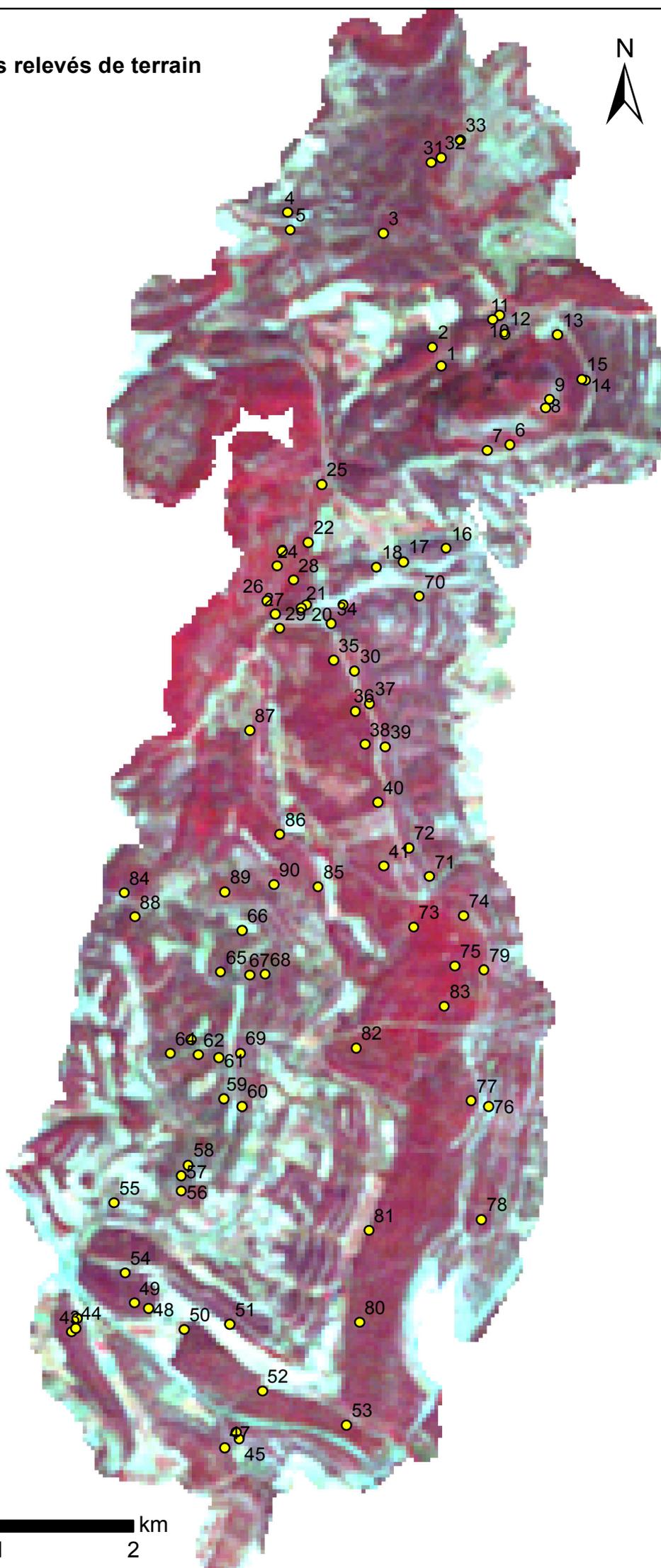
ID	DATE	TOPO	ASPECT	SLOPE	FUEL	SOL_NU	VEG_APF	SUM0A1	SUM1A4	SUM4A10	SUM10	SUM_TOT	Moysur4	Intensité
1	07/03/2012	4	NNO	17	B	3	1	10	9	8	0	27	2,62	Fort
2	07/03/2012	2	SE	30	B	2	2	10	8	9	0	27	2,69	Fort
3	07/03/2012	5	-	0	G	1	2	9	10	10	0	29	2,89	Fort
4	07/03/2012	5	-	0	A	1	3	0	5	5	4	14	1,29	Moyen
5	07/03/2012	5	-	0	G	1	3	0	10	10	0	20	2,86	Fort
6	14/03/2012	4	SO	18	G	1	3	11	10	7	0	28	2,63	Fort
7	14/03/2012	4	S	22	G	3	1	11	12	9	0	32	3,06	Très fort
8	14/03/2012	3	SSE	28	D	0	4	10	0	0	0	10	3,33	Très fort
9	14/03/2012	3	SSE	20	D	1	3	10	0	0	0	10	3,33	Très fort
10	21/03/2012	4	E	10	F	1	3	9	8	3	0	20	1,75	Moyen
11	21/03/2012	3	E	25	A	1	3	9	10	9	4	32	2,14	Fort
12	21/03/2012	3	N	27	B	2	2	11	11	6	0	28	2,56	Fort
13	21/03/2012	4	NNE	9	G	1	3	10	5	0	0	15	2,06	Fort
14	21/03/2012	4	ENE	19	E	1	2	0	0	0	2	2	0,57	Faible
15	21/03/2012	4	ENE	23	A	0	2	11	10	0	4	25	2,20	Fort
16	21/03/2012	2	NNE	15	F	2	2	9	9	4	0	22	1,96	Moyen
17	21/03/2012	2	O	15	F	2	2	9	9	4	0	22	1,96	Moyen
18	21/03/2012	3	NNE	20	G	2	1	12	7	7	0	26	2,50	Fort
19	21/03/2012	4	S	30	G	3	1	12	7	7	0	26	2,50	Fort
20	22/03/2012	3	NNO	25	D	2	2	11	7	0	0	18	2,56	Fort
21	22/03/2012	3	N	50	G	2	2	11	11	0	0	22	3,32	Très fort
22	22/03/2012	4	E	20	G	2	2	12	13	10	0	35	3,36	Très fort
23	22/03/2012	3	ESE	48	F	3	1	10	11	0	0	21	3,21	Très fort
24	22/03/2012	3	ESE	50	F	4	0	0	10	0	0	10	2,86	Fort
25	22/03/2012	4	E	30	G	2	3	11	11	9	0	31	2,99	Fort
26	22/03/2012	3	SE	48	D	1	3	10	10	0	0	20	3,02	Très fort
27	22/03/2012	3	N	38	D	3	1	10	11	0	0	21	3,21	Très fort
28	22/03/2012	1	NNE	10	C	2	2	12	12	0	0	24	3,62	Très fort
29	22/03/2012	5	-	-	G	2	2	11	11	0	0	22	3,32	Très fort
30	22/03/2012	5	-	-	D	2	2	10	9	0	0	19	2,83	Fort
31	28/03/2012	4	-	0	H	2	2	12	11	9	9	41	2,97	Fort
32	28/03/2012	5	-	0	H	2	2	12	11	9	9	41	2,97	Fort

33	28/03/2012	3	S	11	C	3	1	9	10	6	0	25	2,32	Fort
34	28/03/2012	3	NE	35	G	3	1	11	11	9	0	31	2,99	Fort
35	28/03/2012	3	O	11	C	2	2	11	12	9	0	32	3,06	Très fort
36	28/03/2012	2	SO	8	C	1	3	11	11	9	0	31	2,99	Fort
37	28/03/2012	3	ENE	45	G	2	2	11	7	0	0	18	2,56	Fort
38	28/03/2012	5	-	0	C	2	2	11	10	0	0	21	3,13	Très fort
39	28/03/2012	3	ENE	35	G	2	2	12	9	0	0	21	3,05	Très fort
40	28/03/2012	2	O	15	G	2	2	11	10	9	0	30	2,92	Fort
41	28/03/2012	3	OSO	15	D	1	3	9	11	0	0	20	3,10	Très fort
42	29/03/2012	3	ENE	45	G	2	2	11	7	7	0	25	2,42	Fort
43	29/03/2012	3	OSO	30	G	1	3	11	7	0	0	18	2,56	Fort
44	29/03/2012	4	N	10	G	3	2	12	10	9	0	31	3,00	Très fort
45	29/03/2012	4	S	0	D	3	1	12	9	0	0	21	3,05	Très fort
46	29/03/2012	2	S	0	G	1	3	11	7	7	0	25	2,42	Fort
47	29/03/2012	4	NNE	5	G	1	3	11	9	9	0	29	2,85	Fort
48	29/03/2012	4	SE	20	G	2	2	12	11	9	0	32	3,07	Très fort
49	29/03/2012	3	SE	30	A	2	2	12	13	10	9	44	3,14	Très fort
50	29/03/2012	3	O	35	H	2	2	12	12	0	8	32	2,40	Fort
51	29/03/2012	3	SSO	30	A	3	2	12	12	11	9	44	3,14	Très fort
52	29/03/2012	3	N	35	C	2	3	10	8	0	0	18	2,63	Fort
53	29/03/2012	3	NNE	35	C	1	3	12	10	0	0	22	3,24	Très fort
54	05/04/2012	3	N	30	G	3	1	12	10	9	0	31	3,00	Très fort
55	05/04/2012	5	-	-	I	0	3	11	10	0	7	28	2,63	Fort
56	05/04/2012	3	S	-	C	2	2	11	11	9	0	31	2,99	Fort
57	05/04/2012	3	NO	30	Plan-	2	2	11	8	0	0	19	2,75	Fort
58	05/04/2012	2	NO	-	C	3	1	12	9	0	0	21	3,05	Très fort
59	05/04/2012	3	ONO	20	G	1	3	11	9	8	0	28	2,70	Fort
60	05/04/2012	3	E	10	Plan-	2	2	12	10	0	0	22	3,24	Très fort
61	05/04/2012	3	SE	30	B	2	2	11	11	9	0	31	2,99	Fort
62	05/04/2012	3	S	30	C	3	2	10	10	10	0	30	2,98	Fort
63	05/04/2012	3	NO	30	C	2	2	11	11	0	0	22	3,32	Très fort
64	05/04/2012	3	NNO	40	D	3	2	11	12	0	0	23	3,51	Très fort
65	05/04/2012	3	NO	45	G	2	3	11	11	9	0	31	2,99	Fort

66	05/04/2012	3	SSE	30	G	1	3	11	9	9	0	29	2,85	Fort
67	05/04/2012	1	S	10	C	0	4	11	9	0	0	20	2,94	Fort
68	05/04/2012	3	SO	30	D	2	2	11	12	0	0	23	3,51	Très fort
69	05/04/2012	3	E	20	G	2	2	11	10	0	0	21	3,13	Très fort
70	18/04/2012	2	SE	25	G	2	2	11	7	0	0	18	2,56	Fort
71	18/04/2012	3	E	30	B	2	2	12	9	0	0	21	3,05	Très fort
72	18/04/2012	3	ENE	50	G	2	2	12	13	9	0	34	3,21	Très fort
73	18/04/2012	3	SSO	15	C	2	2	9	10	0	0	19	2,90	Fort
74	18/04/2012	2	SO	25	C	2	2	9	10	0	0	19	2,90	Fort
75	18/04/2012	3	ONO	25	C	2	2	11	11	0	0	22	3,32	Très fort
76	18/04/2012	2	E	10	D	2	2	11	7	0	0	18	2,56	Fort
77	18/04/2012	5	-	-	D	2	2	11	7	0	0	18	2,56	Fort
78	18/04/2012	3	E	10	G	1	3	11	8	0	0	19	2,75	Fort
79	18/04/2012	3	E	35	G	2	2	11	9	0	0	20	2,94	Fort
80	18/04/2012	3	O	15	D	1	3	10	11	0	0	21	3,21	Très fort
81	18/04/2012	3	O	20	C	1	3	10	7	0	0	17	2,44	Fort
82	18/04/2012	5	-	-	C	1	3	10	10	0	0	20	3,02	Très fort
83	18/04/2012	5	-	-	C	1	3	10	10	0	0	20	3,02	Très fort
84	19/04/2012	3	SSO	15	C	2	2	9	9	0	0	18	2,71	Fort
85	19/04/2012	3	OSO	35	G	2	2	12	11	9	0	32	3,07	Très fort
86	19/04/2012	5	-	-	G	2	2	12	11	9	0	32	3,07	Très fort
87	19/04/2012	2	O	15	B	1	3	12	11	0	0	23	3,43	Très fort
88	19/04/2012	3	NO	10	C	1	3	12	12	0	0	24	3,62	Très fort
89	19/04/2012	3	SO	15	G	2	2	12	10	0	0	22	3,24	Très fort
90	19/04/2012	3	NE	25	G	0	4	10	10	0	0	20	3,02	Très fort

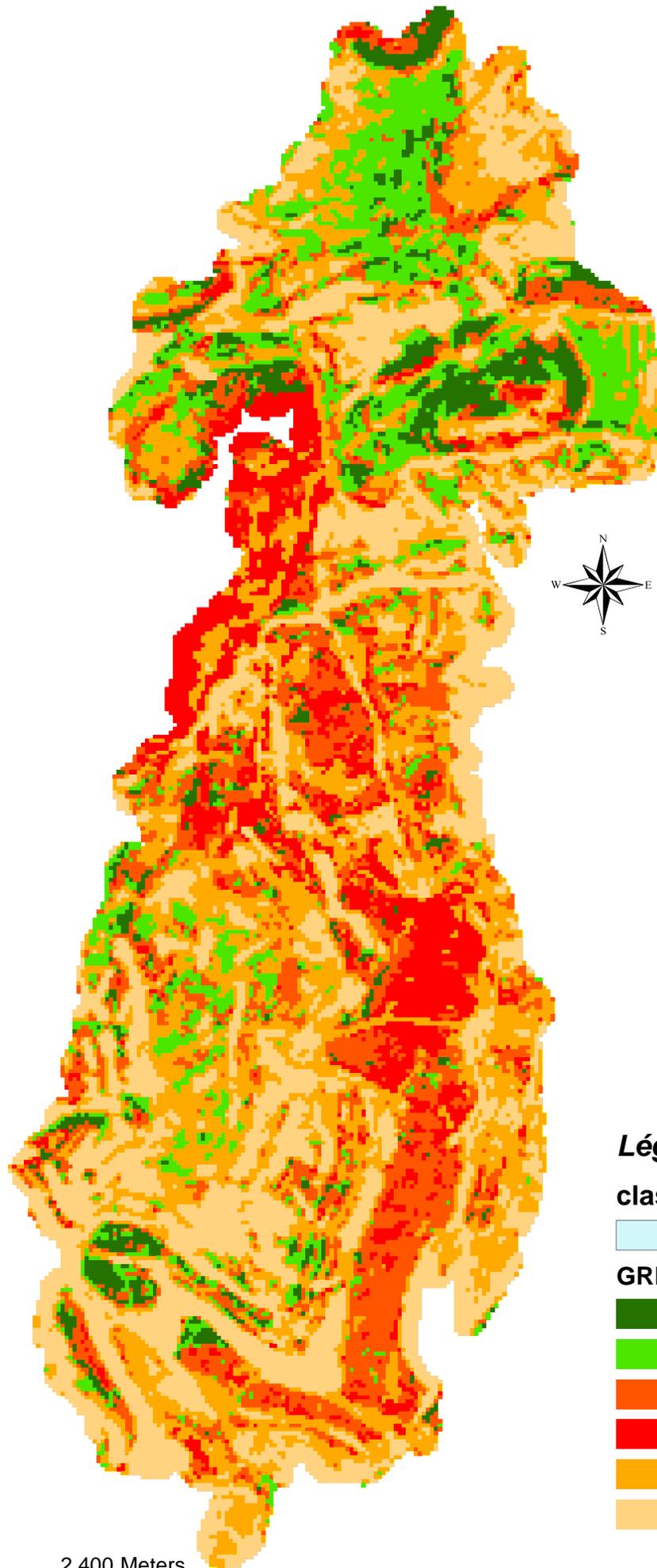
ANNEXE 5 : Répartition des 90 points sur la zone d'étude

Localisation des relevés de terrain



ANNEXE 6 : Occupation du sol classification sur la zone d'étude

Occupation du sol sur la zone d'étude



Légende

classif_6cl_poly

 <all other values>

GRIDCODE

 Résineux matures

 Résineux jeunes

 Garrigue haute

 Feuillus dominants

 Garrigue basse

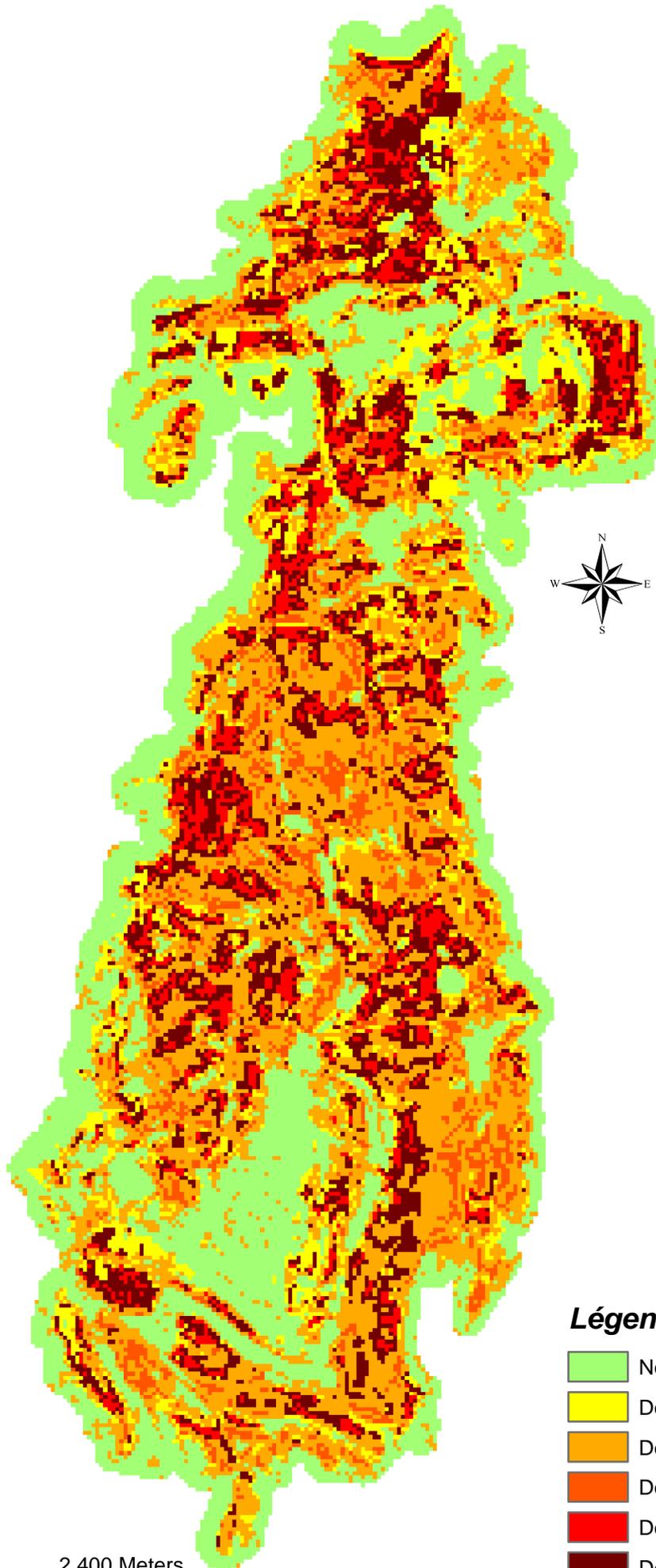
 Bâti - sol nu - minéral

0 600 1 200 2 400 Meters



ANNEXE 7 : Intensité des dommages sur la zone brûlée

Intensité des dommages sur la zone brûlée



Légende

-  Non brûlé ou dommage faible
-  Dommage modéré
-  Dommage fort (garrigues)
-  Dommage très fort (garrigues)
-  Dommage fort
-  Dommage très fort

0 600 1 200 2 400 Meters

Résumé :

La télédétection est un outil précieux pour cartographier les dommages causés par les incendies de forêt. Dans le cadre du projet TOSCA visant à la préparation des missions Vénus et Sentinel-2, cette étude montre l'intérêt de l'utilisation des séries multi-temporelles d'images LANDSAT à Haute Résolution pour la thématique des feux de forêt. L'objectif est de pouvoir distinguer plusieurs degrés d'endommagement sur la végétation à partir de données satellitaires. Un protocole terrain basé sur des protocoles existants – Composite Burning Index (CBI) et l'échelle d'intensité du CEMAGREF (Lampin et al., 2002) – a été mis en place pour décrire les dommages, les quantifier et les mettre en relation avec les images satellitaires. Deux classifications d'images avant et après feu ont permis de mettre en évidence les types de combustibles présents avant l'incendie d'une part, les niveaux de dommages sur la végétation après l'incendie d'autre part. La classification avant feu présente une précision globale de 62.14 % tandis que celle après feu présente une précision globale de 83.33 % du fait de la prise en compte d'une tolérance spatiale pour les points de validation. Concernant les dommages, des confusions résident essentiellement entre les niveaux fort et très fort. Cette méthodologie pourra être adaptée à l'évaluation des dommages après feu en considérant des images satellites de meilleure résolution spatiale.

Abstract :

Remote sensing represents a precious help to map damages caused by wildfires. In the framework of the TOSCA project aimed to prepare the Venus and Sentinel-2 missions, this study reflects the interest of using multi-temporal series of LANDSAT images with high spatial resolution concerning wildfire issues. The aim of this study is to discriminate several damages on the image which reveals the impact of fire on vegetation. It introduces a new field observation method based on existing protocols – Composite Burning Index (CBI) and the prototype of intensity scale developed by the Cemagref (Lampin et al., 2002) – to describe and characterize the post-wildfire damages and to compare them with high resolution images. Two classifications were obtained before and after wildfire, allowing to characterize fuel before the wildfire and levels of post wildfire damages. The pre-fire classification brings a global precision of 62.14 % whereas in the post-fire classification this accuracy represents 83.33 % thanks to a spatial tolerance. The confusion focuses on the discrimination of high and very high damage level classes. This methodology could be applied to assess post-fire damages considering satellite image with better spatial resolution.