

Etude du feu de Villeneuve : partie 1



Sujet : Caractérisation et étude des dégâts d'un feu de forêt en climat méditerranéen

Joachim Comet, Baptiste Delaunay, Marta Ducamp, Alexandre Esteouille et
Léonie Leroux

Professeur chargé du suivi : Marc Poupée

Nous remercions notre professeur Marc Poupée ainsi que Maxime Soma, Valentine Aubard et leurs équipes de l'INRAE pour nous avoir guidé et répondu à nos questions.

Table des matières

Introduction :	1
I. Analyse de l'objet d'étude et démarche générale	3
A. Contexte de l'incendie.....	3
B. Définition du périmètre d'étude.....	3
C. Définition de la notion de dégât.....	3
D. Les méthodes de quantification de dégâts automatiques existantes.....	4
E. Protocole de caractérisation sur le terrain.....	6
F. Facteurs d'adaptation de notre Δ NBR.....	6
II. Mise en place des méthodes et résultats	6
A. Les données d'origine.....	7
1. Etablir une carte de la végétation et du feu grâce aux données récoltées sur le terrain.....	7
2. Les données aériennes et spatiales.....	7
B. Traitements des données.....	8
1. Classification de la zone.....	8
2. Étude la sévérité de la brûlure: détermination des paramètres.....	8
a. Classification grâce au Δ NBR.....	8
b. Classification obtenue avec les images RADAR.....	12
3. Etude de la sévérité de l'incendie.....	13
III. Regard critique sur notre étude	13
A. Qualité des vérités terrains.....	14
B. Qualité des résultats.....	14
C. Questionnement et incertitudes.....	15
Conclusion :	16
Sources :	17

Résumé :

Un feu a eu lieu entre les communes de Villeneuve et Niozelles dans le département des Alpes de Hautes Provence au début du mois d'août 2022.

Nous avons combiné nos observations sur le terrain et les images satellites et aériennes afin d'étudier la sévérité et la brûlure sur le zone incendiée. Nous avons pour cela utilisé des images RADAR et optiques, ainsi que des données LIDAR, que nous avons combinées avec des vérités terrains dans le but de créer des indices ou des colorations qui représentent de la meilleure manière possible la sévérité et la brûlure du feu. L'utilisation, relativement peu courante dans l'étude des feux, des données RADAR nous permet d'établir une nouvelle manière de qualifier la gravité d'un feu lorsque le couvert nuageux est trop important pour utiliser des données optiques ou LIDAR.

Introduction :

La forêt est aujourd'hui considérée comme un endroit précieux, que ce soit sur le plan écologique, car elle représente dans l'imaginaire collectif un havre de paix pour la biodiversité; sur le plan économique, car le bois y est cultivé pour les activités humaines ; et sur le plan social, car elle représente un lieu de calme et de promenade pour la population locale, qui y est souvent très attachée.

L'année 2022 a été une année fortement frappée par les incendies forestiers avec plus de 72000 hectares d'espaces naturels qui ont brûlé au cours de près de 19 000 feux partout en France [1]. Des régions qui n'avaient jusque là été que peu exposées à ce phénomène, comme la Bretagne ou les Pays de la Loire, ont été touchées par les feux. Cette évolution dans la répartition et le nombre des feux soulèvent donc de nouveaux enjeux qui viennent s'ajouter aux traditionnels.

Parmi ceux-ci, on peut noter le plus évident : Comment éviter ces événements ? Mais aussi, une fois qu'ils sont survenus, comment faire en sorte qu'ils fassent le moins de dégâts possibles ; et finalement les manières possibles de traiter la forêt durant sa repousse pour faire en sorte que la faune et la flore locales se rétablissent au mieux.

Ce projet a suscité notre attention en raison de son lien avec l'actualité scientifique et climatique. En effet, les feux de forêts sont des événements dévastateurs qui frappent de plus en plus des zones qui n'étaient pas confrontés à ce problème. Dans un souci écologique, il est donc important d'apporter de l'aide aux localités grâce à des études précises. Le feu de Villeneuve se prête parfaitement à cela, car il a touché une région peu habituée au feu de cette ampleur, tout en étant de taille raisonnable pour son étude.

Notre étude porte sur un feu de forêt qui a eu lieu sur les communes de Villeneuve et Niozelles dans le département des Alpes de Hautes Provence à partir du 2 août 2022 dans l'après midi et qui s'est poursuivi avec des reprises locales durant plusieurs jours. Environ 246 hectares ont été pris dans les flammes, dont 207 hectares de forêt. C'est le feu de forêt le plus conséquent qui a eu lieu sur cette forêt dans la décennie [3]. La proximité avec la zone nous a permis de coupler l'usage d'imagerie aérienne et spatiale, et les observations et mesures sur le terrain pour avoir des résultats plus pertinents.

Nous avons fait le choix de nous intéresser aux dégâts des feux dans une approche de comparaison des conditions pré et post feu, plutôt que de nous intéresser à d'autres aspects

des feux de forêt, comme la reprise de la végétation ou la dynamique du feu. Notre étude s'insère dans un projet à long terme, et elle est la première d'une série à s'intéresser à ce feu. Nous sommes donc dans la bonne fenêtre temporelle pour nous intéresser aux dégâts car nous pouvons voir, mieux maintenant que plus tard, les dégâts sur le terrain, avant que la végétation ne reprenne.

Les dégâts sur la forêt ont été notre centre d'intérêt durant la réalisation de ce projet. Nous avons donc qualifié et quantifié l'impact du feu sur la forêt selon certains critères.

Nous nous sommes ainsi demandé durant notre étude comment nous pouvions construire un protocole pour obtenir des données pertinentes pour qualifier les dégâts sur un feu de forêt en zone méditerranéenne, tout en alliant les observations sur le terrain et la télédétection. Nous avons aussi la volonté de qualifier les méthodes automatiques déjà établies par la littérature scientifique. Au cours de ce rapport, nous présentons dans un premier temps les données que nous avons récoltées et les méthodes que nous avons employées pour les exploiter, puis nous exposons nos résultats et en fournissons une interprétation. Dans un dernier temps, nous nous intéresserons aux autres pistes de résultats que nous aurions aimé obtenir.

I. Analyse de l'objet d'étude et démarche générale

A. Contexte de l'incendie

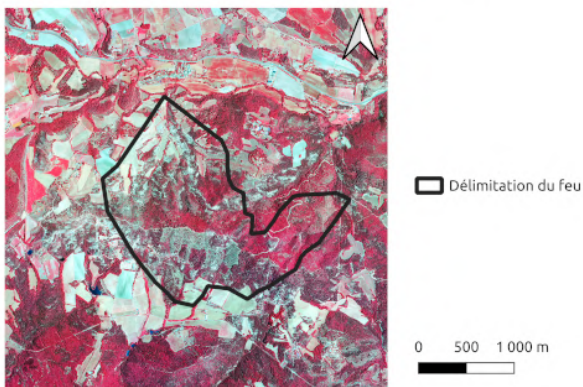
Le feu étudié a eu lieu dans un massif forestier de la commune de Villeneuve, au Sud de Niozelles. Il a démarré, au lieu-dit La Bastide du Bois le 02/08 vers 17h, à la suite d'un incident agricole. Il s'est très rapidement propagé vers le Nord, jusqu'à approcher Niozelles. Cet incendie a été favorisé par les conditions météo, comme l'indiquent les données récoltées par la station Météo-France à Dauphin, située à environ 5km de la zone du feu. Depuis plusieurs jours, le climat était chaud et sec (plus de 35°C à l'ombre et moins de 25% d'humidité l'après-midi) et le vent assez soutenu (des rafales à plus de 40 km/h). Il a été contenu en fin de journée par les pompiers à l'exception du flanc droit qui est resté plus actif. Dans les semaines qui ont suivi, il y a eu de nombreuses reprises sur le flanc droit et notamment une le 04/08 au lieu-dit La Colle. Finalement, le feu a détruit près de 246 ha, dont 207 ha de forêts.

B. Définition du périmètre d'étude

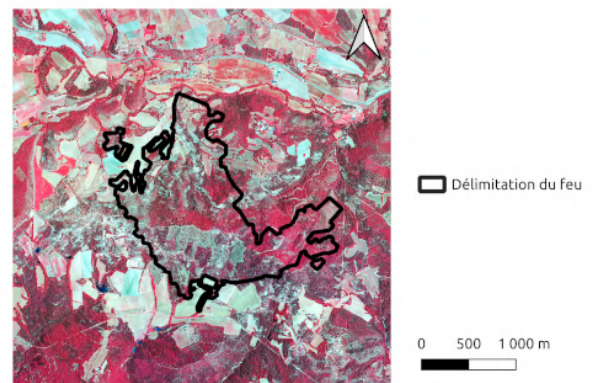
Afin d'étudier au mieux le feu, il nous fallait définir l'emprise de ce dernier. En effet, nous connaissons la surface brûlée grâce à des rapports fournis par les mairies ou les casernes de pompiers, mais pas les limites de la zone brûlée. Nous avons donc dû définir les frontières de la zone nous même. Pour cela, nous avons utilisé 2 méthodes. La première consistait juste à les tracer nous même par photo-interprétation à partir d'une photo aérienne de la zone brûlée. Elles n'étaient donc que très peu précises, mais nous donnaient déjà un ordre d'idée des limites de la zone.

La deuxième méthode a été faite de manière automatique. En prenant la couche DNBR que nous avons calculée, on extrait tous les pixels dont la valeur est comprise entre 0,2 et 2, ce qui correspond à la valeur de pixels de végétation brûlée. Cette méthode nous renvoie une zone délimitée de manière beaucoup plus précise que la première.

Délimitation du feu - méthode 1



Délimitation du feu - méthode 2



Illustrations 1 et 2

C. Définition de la notion de dégât

La notion de dégât se rapporte à toutes les conséquences négatives d'un phénomène sur des biens matériels. Les dégâts sur la forêt peuvent se rapporter à plusieurs paramètres mesurables plus ou moins facilement : la surface de forêt brûlée, le manque à gagner pour les exploitants, le manque à gagner pour les habitants des alentours ou encore la quantité de faune qui a été tuée ou déplacée. Au cours de notre travail nous avons décidé de définir les dégâts selon trois paramètres, en suivant la typologie définie par Jon Keeley en 2009 [2]. Les dégâts d'un feu de forêt peuvent s'appréhender sous trois angles : l'intensité du feu, la sévérité du feu et la sévérité des brûlures.

Le premier paramètre relève de la quantité d'énergie dégagée par le feu : elle est quantifiable grâce à la mesure de la chaleur émise durant toute la durée de l'incendie. Puisque nous commençons cette étude presque un an après l'événement et que nous n'avons pas à notre disposition de prise de vue par caméra thermique au moment du feu, ce facteur était impossible à évaluer pour nous. Le deuxième paramètre relève quant à lui de la quantité de biomasse partie en fumée (la sévérité de l'incendie). Le troisième et dernier paramètre relève pour sa part du degré auquel une zone a été affectée par le feu ("burn severity", sévérité de la brûlure). Il rend compte à la fois de l'effet immédiat du feu sur la zone, et de la reprise de la végétation à moyen terme.

D. Les méthodes de quantification de dégâts automatiques existantes

Avant de nous lancer dans une étude plus précise de notre zone, nous avons fait des recherches en amont afin de comprendre comment nous pouvions qualifier les dégâts que l'on cherchait à étudier sur notre zone.

L'un des indices les plus couramment utilisé par les acteurs environnementaux (ONF, CES incendie...) afin d'étudier les feux de forêt est le Δ NBR, delta "normalized burn ratio". Cet indice nous a notamment permis de qualifier la sévérité de la brûlure. Il met en avant la différence entre le proche infra-rouge et le moyen infra-rouge du spectre électromagnétique réfléchi par les massifs forestiers sur une période donnée. Le Δ NBR est la différence des indices NBR sur deux périodes différentes.

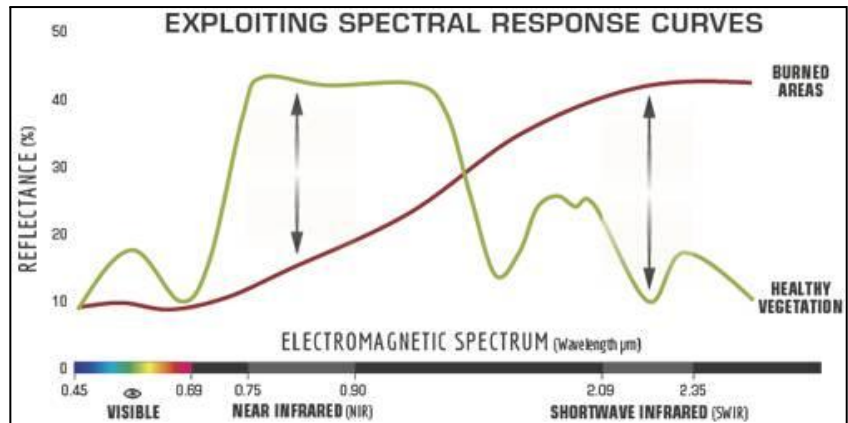


Illustration 3

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Illustration 4

$$dNBR \text{ or } \Delta NBR = \text{PrefireNBR} - \text{PostfireNBR}$$

Illustration 5

Pour calculer le NBR, puis le ΔNBR, il est possible d'utiliser les images des bandes B8 de longueur d'onde 833 nm (proche infra-rouge, ou NIR) et B12 de longueur d'onde 2185,7 nm (moyen infra-rouge, ou SWIR) du satellite Sentinel-2.

Une des principales problématiques concernant le calcul du ΔNBR est de savoir à quelles dates de références nous devons calculer les NBR pré et post-feu. Deux paramètres sont alors à étudier pour pouvoir calculer cet indice afin de qualifier la sévérité de la brûlure de l'incendie.

En ce qui concerne l'analyse du ΔNBR, il existe un dernier paramètre qui est le seuillage afin de pouvoir classifier les différents types de feu qui se sont présents sur une zone. Afin d'avoir une première approche de ce paramètre, nous nous sommes d'abord appuyés sur une étude chinoise [5] d'un feu de forêt dans le Chongqing du 17 au 26 Août 2022 ainsi que sur un article des Nations Unies [4]. Ces deux publications possèdent une approche assez différente du seuillage: l'article des Nations Unies donne une approche plus théorique du seuillage avec des classes assez précises, alors que l'étude du Chongqing, qui s'appuie sur des données terrain, simplifie les classes afin faciliter les prises de vérités terrain.

Severity Level	dNBR Range (scaled by 10 ³)	dNBR Range (not scaled)
Enhanced Regrowth, high (post-fire)	-500 to -251	-0.500 to -0.251
Enhanced Regrowth, low (post-fire)	-250 to -101	-0.250 to -0.101
Unburned	-100 to +99	-0.100 to +0.99
Low Severity	+100 to +269	+0.100 to +0.269
Moderate-low Severity	+270 to +439	+0.270 to +0.439
Miderate-high Severity	+440 to +659	+0.440 to +0.659
High Severity	+660 to +1300	+0.660 to +1.300

Seuillage établi par les Nations Unies, Illustration 5

dNBR	Description
<0.15	Low severity
0.15–0.4	Moderate severity
>0.4	High severity

Seuillage établi dans l'étude du Chongqing, Illustration 6

Afin de qualifier la sévérité de la brûlure sur la zone de Villeneuve, nous devons donc étudier trois paramètres en lien avec le Δ NBR: les dates de référence pour calculer les NBR pré-feu et post-feu, ainsi que le seuillage pour pouvoir analyser les différents types de feu.

De plus, nous avons essayé d'expérimenter la classification des feux grâce aux données RADAR. En effet, nous n'avons pas trouvé beaucoup de publications sur le sujet : les données RADAR peuvent être utilisées afin d'étudier l'évolution d'un feu de forêt, mais il n'existe pas d'indice équivalent au Δ NBR obtenu avec ce type de données. Or, ce pourrait être un outil pratique afin de qualifier les feux dans les zones avec une forte couverture nuageuse, là où les images avec des données de réflectance du spectre électromagnétique peuvent devenir inutilisables.

Nous devons donc étudier les mêmes paramètres que le Δ NBR afin d'essayer d'expérimenter cet indice équivalent (dates d'acquisition pré et post feu, seuillage), tout en déterminant le type d'images à utiliser (VV, VH, VV/VH...).

E. Facteurs d'adaptation du Δ NBR

Nous supposons que deux facteurs peuvent remettre en cause l'efficacité du Δ NBR: les zones avec seulement quelques arbres sur un sol à nu et la sécheresse.

En effet, la réflectance d'un pixel avec de la végétation peut être différente s'il y a du sol à nu en dessous. Sur ce type de pixel, la valeur du PIR peut être assez forte grâce à la végétation qui s'y trouve, mais la valeur du SWIR l'est aussi à cause du sol à nu: les valeurs du NBR pré-feu et donc du Δ NBR sur ce pixel seront plus faible, entraînant ainsi une sous-estimation des dégâts du feu sur le pixel.

Nous supposons de plus que le Δ NBR peut être sensible à la sécheresse. La sécheresse des végétaux et du sol peut augmenter la valeur du SWIR: cela peut biaiser la valeur du NBR post-feu, car des zones qui n'ont pas brûlé peuvent être classé comme tel à cause de la valeur du SWIR qui aura augmenté, ce qui augmentera ainsi la valeur du Δ NBR, entraînant ainsi une surestimation des dégâts dans les zones qui n'ont pas brûlé.

F. Protocole de caractérisation sur le terrain.

Lors de nos sorties sur le terrain, nous avons utilisé deux protocoles différents afin de caractériser les dégâts. Dans un premier temps, nous avons utilisé un protocole que nous avons créé nous même. En se plaçant sur des zones d'intérêt, nous délimitons ses bordures de sorte que celle-ci soit complètement homogène. Puis, à l'aide d'un code que nous avons

créé, nous décrivons grossièrement l'état des différentes strates en donnant plus de précision sur la strate arborée. A partir de ce protocole, on peut classer une très grande surface car le code est vrai sur de grande zone. Cependant, la caractérisation n'est pas très précise. [voir annexe 1]

Dans un deuxième temps, afin d'affiner la caractérisation des dégâts, nous avons utilisé le protocole que l'INRAE utilise. L'observation se fait sur des placettes de 10m de rayon, prises au hasard dans la zone qui a brûlé. On utilise ensuite un tableau de classification qui divise la forêt en 4 strates (0-1 m, 1-4 m, 4-10 m et +10 m), et chaque niveau de strate en 5 éléments (tronc, branches, rameaux, feuilles et fruits). Chaque élément est ensuite décrit par un code indiquant le degré de brûlure [voir annexe 4]. On obtient donc une classification extrêmement précise qui décrit chaque strate au plus proche de la réalité. Ce protocole est beaucoup plus précis que le premier, mais ne permet pas de couvrir une grande zone car la classification ne décrit que de petites zones.

II. Mise en place des méthodes et résultats

A. Les données d'origine

1. Etablir une carte de la végétation et du feu grâce aux données récoltées sur le terrain

Comme nous venons de la voir (cf I. E.), un des paramètres importants à étudier est la relation entre les espèces et les dégâts observés. Pour réaliser notre Vérité Terrain des essences présentes sur la zone, nous avons déjà identifié les essences majoritaires lors d'un premier repérage sur la zone et établi lors d'une semaine de stage de télédétection une nomenclature qui associe à chaque espèce un code [voir en annexe 2], ce qui permet de raccourcir le temps passé sur le terrain, l'analyse et le traitement ensuite. Nous avons aussi au préalable fait une segmentation de la zone avec QGIS : QGIS rassemble les pixels qui ont des valeurs proches pour essayer d'avoir des groupes de pixels qui représentent dans la réalité des arbres uniques ou des arbres de même espèce. Nous sommes ensuite allés sur le terrain pour repérer les essences et les associer aux groupes de pixels.

2. Les données aériennes et spatiales

Pour pouvoir faire une analyse à plus grande échelle et avec des données quantifiables, nous avons également utilisé des données issues de l'imagerie spatiale et aérienne.

Type de donnée	Source des données	Date d'acquisition	Résolution terrain	Utilité
Ortho-photographies en IRC (infrarouge, rouge, vert)	IGN BD ortho	2015	50 cm	La végétation émet dans le proche infrarouge (PIR), et plus les feuillus que les résineux.

Images satellites RADAR, bandes VV et VH, decibel gamma0 - radiometric terrain corrected et linear gamma0 - radiometric terrain corrected	Copernicus, mission Sentinel-1, récupérées sur EO-browser	Toutes les dates disponibles entre le 11 juin 2022 et le 28 septembre 2022	10 mètres	Le RADAR est sensible à la texture, la structure des éléments (alignés ou pas), et l'humidité. C'est donc un outil utile pour observer les feux.
Images optiques, - bande 4 (665 nm), - bande 8 (842 nm), - bande 12 (2190 nm)	Copernicus, mission Sentinel-2, récupérées sur sci-hub.coper nicus	Dates trimestrielles entre le 7 septembre 2019 et début 2022, puis mensuelles jusqu'au 3 juillet 2023.	10 et 20 m	Permet de calculer les indices NDVI et NBR.
LIDAR HD	IGN, LIDAR HD	Printemps/été 2021	Entre 10 et 20 points par m ² .	Permet de calculer la densité de la forêt.

B. Traitements des données

Toutes les données que nous avons utilisées ont été traitées sur la zone [926000, 6316000; 930000, 6320000] en projection Lambert-93, qui recouvre l'ensemble de notre feu.

1. Classification de la zone

L'exploitation par Random Forest de l'orthophoto, de données d'humidité (NDVI) prises de manière saisonnière, de moyenne et écart-type de ces NDVI et de différentes longueurs d'onde de Sentinel-2, nous permet d'obtenir la carte suivante possédant une précision générale de 82,3%. (Voir matrice de confusion en annexe)

Classification de la végétation pré-feu

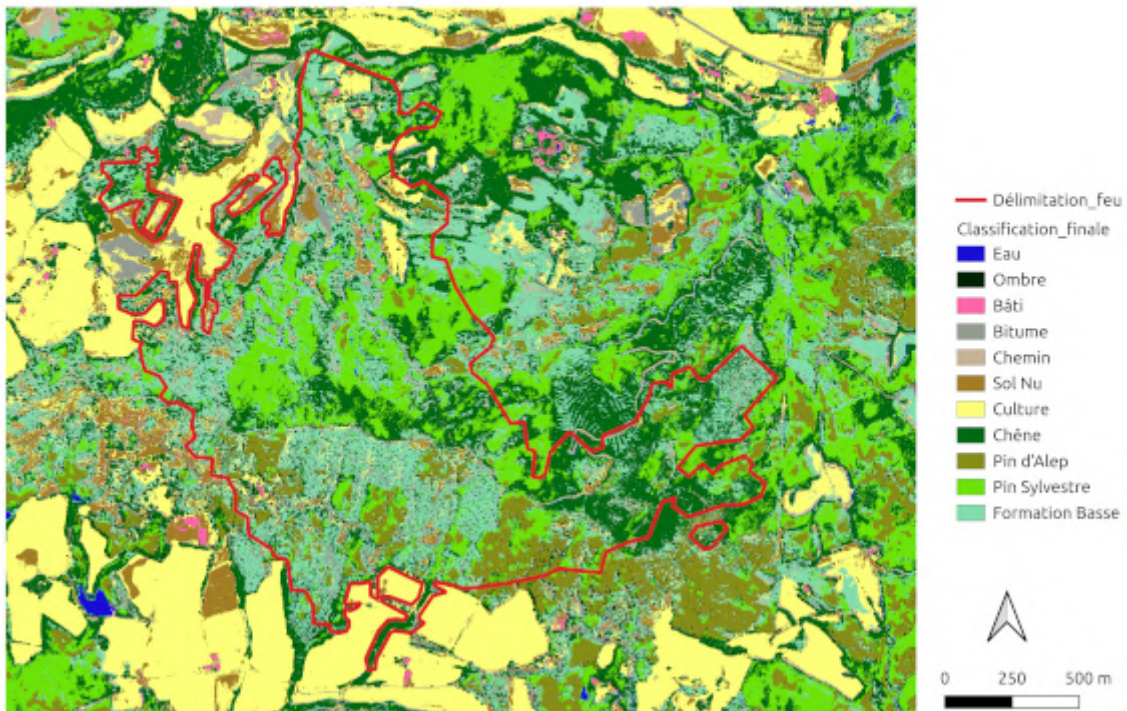


Illustration 7

2. Étude la sévérité de la brûlure: détermination des paramètres

a. Classification grâce au Δ NBR

Dans notre première méthode, nous avons choisi de calculer le NBR pré-feu avec les images acquises le 02/08/2022 à 10 h, soit 7 h avant le départ de l'incendie, et nous avons calculé le NBR post-feu avec les images du 07/08/2022 après que les pompiers aient éteint une première fois l'incendie. Nous pensions que pour obtenir les valeurs de Δ NBR les plus représentatives possibles, nous devons faire concorder au maximum les dates des acquisitions avec celles de l'incendie. En ce qui concerne le seuillage, nous avons d'abord utilisé celui mis en place par les Nations Unies car il nous semblait plus détaillé par rapport à nos premières observations de la zone.

ΔNBR du 2 août par la première méthode

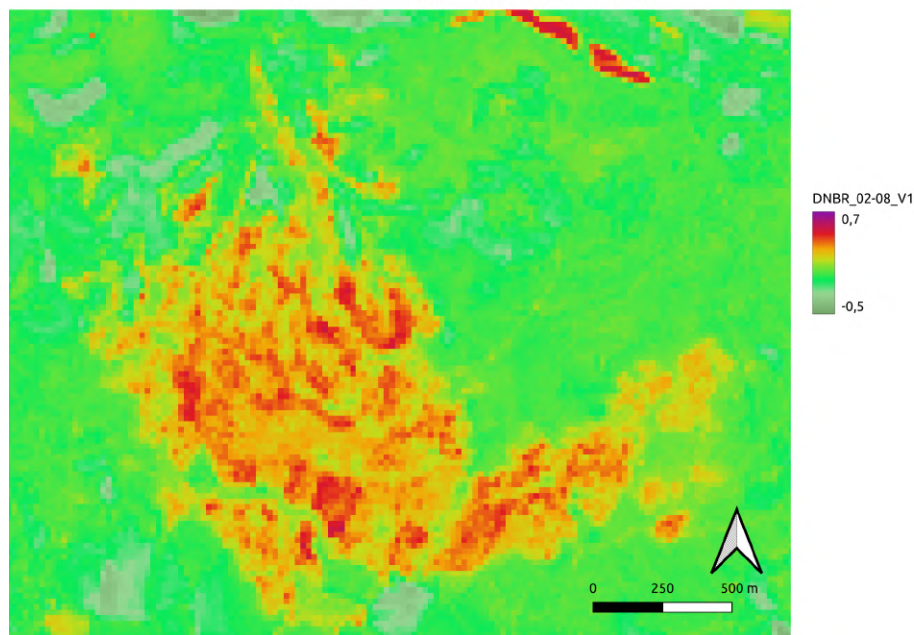


Illustration 8

Les premiers résultats obtenus nous semblaient sous-évaluer les dégâts par rapport à ce que nous avons observé, et nous avons par la suite appris que le feu avait repris à plusieurs endroits après le 7 Août et s'était prolongé pendant trois semaines, expliquant ainsi le fait que nos résultats sous-estiment les dégâts (les valeurs du ΔNBR ne dépassaient pas 0,6).

Nous avons donc mis en place une seconde méthode : pour le NBR pré-feu, nous avons gardé les données acquises le 02/08/2022 juste avant l'incendie car ces acquisitions représentent le plus l'état de la forêt avant l'incendie, nous permettant ainsi de qualifier les dégâts de l'incendie sans prendre en compte la sécheresse estivale.

Il a été plus difficile de calculer le NBR post-feu à cause de la temporalité de l'incendie qui représente un autre facteur dans la détermination de ce paramètre. Nous avons donc décidé de calculer le NBR à partir des valeurs de NBR de plusieurs images satellites pendant deux mois après le feu (toutes les images disponibles du 12 Août 2022 au 22 septembre 2022). Le nouveau post-feu NBR est basé sur les NBR des deux mois après le feu : nous avons sélectionné les pixels des images sur deux mois avec les plus faibles valeurs (valeur négatives puisque le SWIR est plus fort dans les zones brûlées où il n'y a plus de végétation).

$$\Delta NBR_{final} = NBR_{02/08/2022} - NBR_{plus\ faible\ valeur\ sur\ 2\ mois}$$

Enfin, nous avons modifié le paramètre "seuillage" en ajustant la classification des Nations Unies : les seuils tels qu'ils étaient fixés avait tendance à surestimer la brûlure dans certaines zones. Nous avons donc échelonné les seuils en fonction des dégâts que nous avons observés sur la zone.

Couleur	Sévérité de la brûlure	Valeur du ΔNBR
■	Sols	$\Delta\text{NBR} < -0,25$
■	Sols	$-0,25 < \Delta\text{NBR} < -0,1$
■	Unburned	$-0,1 < \Delta\text{NBR} < 0,15$
■	Low Severity	$0,15 < \Delta\text{NBR} < 0,27$
■	Moderate-low Severity	$0,27 < \Delta\text{NBR} < 0,44$
■	Moderate-high Severity	$0,44 < \Delta\text{NBR} < 0,7$
■	High Severity	$0,7 < \Delta\text{NBR}$

Nous obtenons une nouvelle carte des dégâts de la zone :

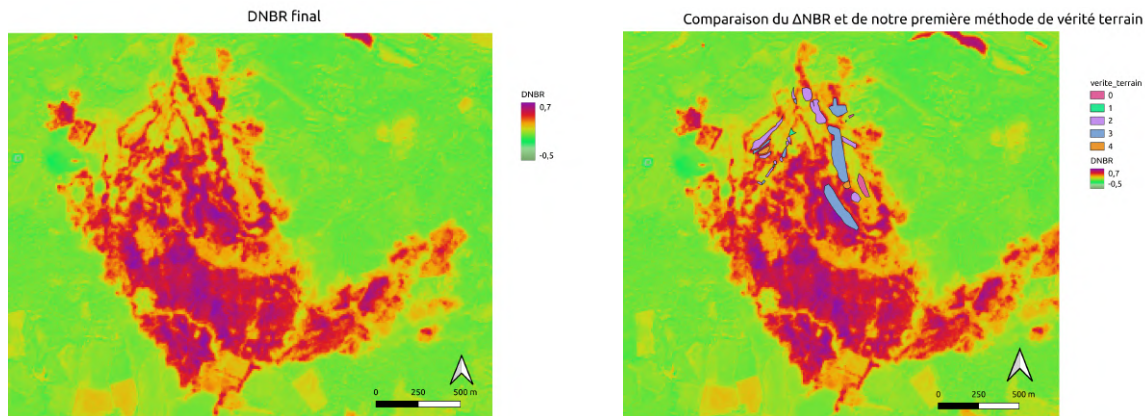


Illustration 9 et 10

Les valeurs du ΔNBR et notre classification correspondent bien à ce que nous avons observé sur le terrain, surtout au niveau de la limite Nord de la zone des feux. En effet, nous avons fait des relevés terrain assez précis sur cette zone car les arbres étaient entouré de plusieurs champs, ce qui nous permettait de bien nous repérer pour faire le relevé, et l'on pouvait observer des séparations assez nettes au niveau des différents types de feu que l'on retrouve assez bien au niveau des valeurs ΔNBR et de la classification.

Il reste néanmoins quelques erreurs : en effet, les champs agricoles apparaissent comme étant des zones partiellement brûlées car ces parcelles ont pu être récoltées entre les deux dates ou asséchées par les fortes températures. De plus, certaines zones qui n'ont pas brûlé apparaissent comme étant des zones légèrement brûlées (ΔNBR compris entre 0,20 et 0,30) : cela est probablement dû à la sécheresse et à la chaleur dégagée par l'incendie qui a continué d'assécher certaines zones de forêt sans les brûler.

Enfin, afin de vérifier si le ΔNBR était sensible à la sécheresse sur notre zone, nous avons recalculé un raster en prenant comme date de référence pré-feu le 13 juin, date à laquelle la zone a moins été touchée par la sécheresse :

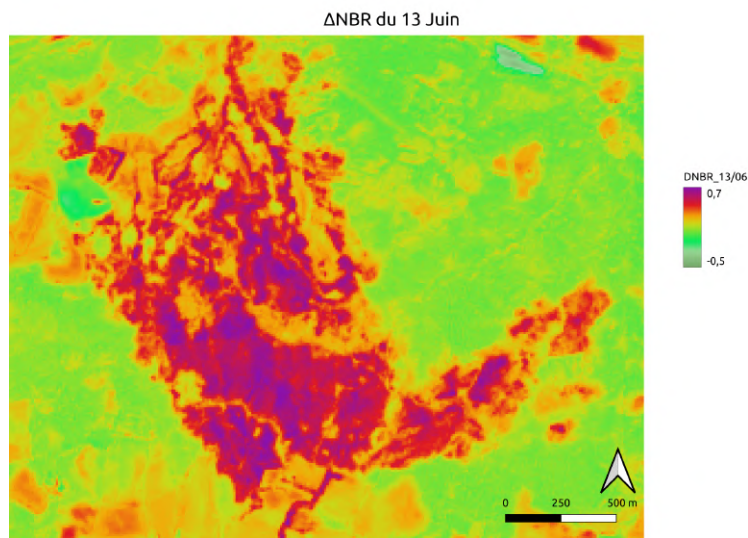


Illustration 11

Des zones partiellement brûlées apparaissent aux extrémités des zones de feu : pourtant, lors des observations sur le terrain, on n'observe pas de trace de feu sur ces zones. Si le ΔNBR lui attribue des valeurs entre 0,2 et 0,3, c'est que la zone a été confrontée à la sécheresse entre mi-juin et la fin de l'incendie.

b. Classification obtenue avec les images RADAR

Afin de pouvoir exploiter les images RADAR, nous devons déterminer plusieurs paramètres: le type d'image à utiliser, les dates des acquisitions et le seuillage.

Afin d'éviter le Speckle dans le traitement des images RADAR, nous avons utilisé des données dont l'acquisition date de deux mois avant et après le feu, et en avons fait la moyenne avant et après le feu. Nous avons calculé la différence entre l'une et l'autre pour avoir une carte des différences de signal avant et après le feu. Cette correction nous permet de diminuer le Speckle tout en résolvant le paramètre temporel de l'acquisition des images.

Nous avons choisi de traiter les images que nous avons appelé ΔVV et ΔVH (différence des valeurs de VV et VH avant et après le feu) : en effet, ces images permettent de mettre en avant la différence de texture de la forêt avant et après le feu en associant des valeurs à ces différences de texture. Ces valeurs sont plus élevées dans les zones brûlées.

Enfin, les derniers paramètres à déterminer sont les seuils de classification pour le ΔVV et le ΔVH. Plutôt que de fixer des seuils RADAR par rapport à nos vérités terrain, nous avons essayé d'adapter les seuils du ΔNBR sur les images RADAR. Nous avons exprimé les valeurs de chaque image en fonction des valeurs du ΔNBR final sur un graphique. Les fonctions obtenues grâce à ces corrélations nous ont permis d'adapter les seuils de classification aux ΔVH et ΔVV. Nous avons par la suite réitéré ce processus en essayant de combiner ΔVH et ΔVV : nous avons fait une représentation 3D en représentant les ΔVH, ΔVV et ΔNBR afin de trouver l'équation de plan qui puisse adapter les seuils de classification.

Ce sont des droites de régressions linéaires qui décrivent le mieux les relations entre le Δ NBR et les différentes variables. Les graphiques ainsi que les seuils RADAR issus de ces droites sont disponibles dans l'annexe [annexe 5 et 6]. Nous obtenons donc les cartes des dégâts suivantes.

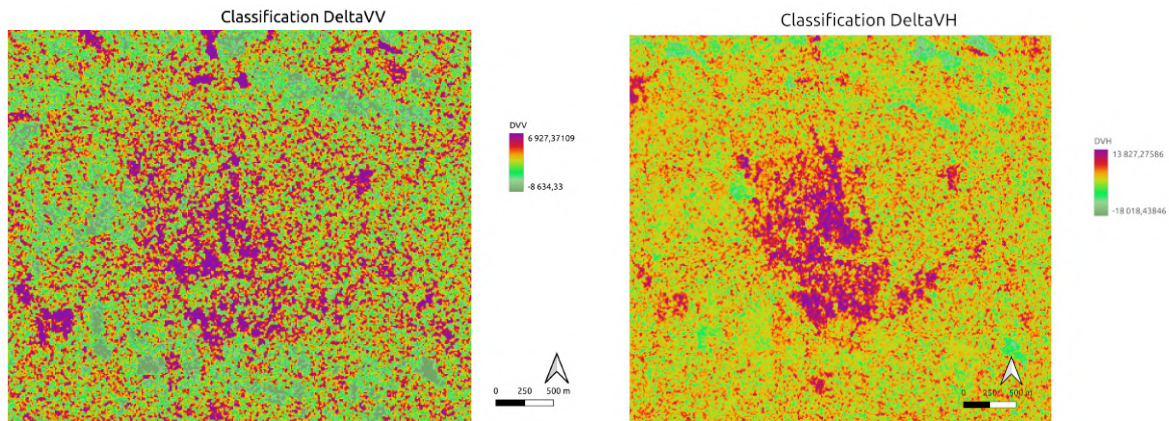


Illustration 12 et 13

De manière générale, en comparaison avec nos données terrains, les cartes des dégâts RADAR ont tendance à surestimer la sévérité de la brûlure, notamment les zones qui ne sont pas concernées par l'incendie. Nous supposons donc que les données RADAR sont très sensibles à la moindre variation de texture, entraînant ainsi une aggravation des dégâts. La carte des dégâts obtenue avec le Δ VH est celle qui concorde le plus avec nos vérités terrain et le résultat est plutôt satisfaisant si on le compare au Δ NBR, malgré la sur-évaluation des dégâts: sans forcément donner une délimitation précise de la zone des feux, le Δ VH décrit plutôt bien les dégâts les plus importants.

3. Etude de la sévérité de l'incendie

Nous avons évalué la densité de la forêt avant le feu grâce aux données de LIDAR HD prises avant le feu (dans notre département, elles ont été acquises au printemps/été 2021 par l'IGN). Ces données utilisent le multi-écho, pour un seul signal émis, plusieurs reviennent. Plus il y a d'échos qui reviennent, plus la densité est localement grande.

En traitant, puis en rastérisant les données des nuages de points récupérés nous avons pu établir une carte de la densité de la forêt qui nous permet de repérer les zones avec des grandes quantités d'arbres.

N'ayant pas de données Lidar HD après l'incendie, nous nous sommes penchés sur l'utilisation du LBK2GO de Leica, un appareil permettant de faire une acquisition LIDAR au sol. L'appareil étant nouveau, nous avons dû faire des tests de mesure, puis aller sur le terrain. Nous avons pour objectif d'acquérir des nuages de points dans des zones de 10m réparties sur l'ensemble de l'incendie. Ce qui nous aurait permis de récupérer la densité végétative de ces zones, puis de les cartographier afin de comparer nos valeurs à celles obtenues précédemment avec le Lidar HD et ainsi estimer la proportion de la forêt qui aurait disparu après le feu.

Malheureusement par manque de temps et d'expérience de cet appareil, nous n'avons pas pu récupérer nos acquisitions et réussir à récupérer la densité depuis le nuage de point.

III. Regard critique sur notre étude

A. Qualité des vérités terrains

La plus grande difficulté que nous avons rencontrée lors de l'établissement de nos Vérités Terrain est celle de connaître notre emplacement précis. Lors de la première VT, (en utilisant notre protocole), nous nous repérons grâce à l'application mobile QField et reportons à peu près les zones observées sur une orthophoto imprimée. Nous avons appliqué la même méthode de positionnement lors de nos second relevés avec le protocole INRAE : nous avons repéré et placé des points sur QGIS puis téléchargé via QField la carte avec les points. Cela nous a permis d'être plus précis, sans atteindre non plus la même précision qu'avec un appareil GPS. Nous couvrons une moins grande surface, mais sommes plus précis dans la localisation.

Aussi, nous aurions pu plus nous intéresser au protocole de relevé de l'étude chinoise sur le feu de Chongqing qui était une synthèse de ceux que nous avons effectués : au lieu d'attribuer des types de feu à des zones en traçant leur contour, les scientifiques de l'étude ont décidé de faire des relevés sur des points de coordonnées connues un peu partout sur la zone avec un rayon de 10m (équivalent des placettes), puis d'attribuer à chaque point un type de feu.

B. Qualité des résultats

1. Critique de la qualité des méthodes de traitement employées

Les résultats obtenus lors de la classification étaient suffisants pour notre travail. En effet, la classification des différentes espèces composant la forêt était bonne, et cela composait l'essentiel de la base sur laquelle notre travail reposait. Cependant, si notre travail avait porté sur l'ensemble des éléments composant la zone, la classification n'aurait probablement pas convenu. Certains éléments de la zone se ressemblent énormément, comme le sol nu et le bitume par exemple, et l'algorithme de classification n'arrive pas à bien les distinguer. Certains paramètres convenant mieux à la classification d'éléments spécifiques que d'autres, il est important d'en tester plusieurs et de jouer sur leur poids dans l'algorithme afin d'obtenir la meilleure classification possible.

2. Qualité générale du Δ NBR

Afin de vérifier la "sensibilité" du Δ NBR aux zones de végétation peu dense en général, nous avons comparé les valeurs du Δ NBR à un raster de densité de points (qui représente la densité de la végétation). Ce raster a été obtenu à partir des données LIDAR.

Sur les graphiques en annexes [voir annexe 7], on observe que pour une couverture végétale peu dense (nombre de point par faisceaux inférieur à 1,5 ou nombre de point sans recouvrement inférieur à 600), le Δ NBR reste tout de même sensible à la brûlure des arbres, puisque la majorité des points avec une faible valeur de densité possède une valeur de Δ NBR supérieure à 0,2. Le Δ NBR permet donc de détecter les brûlures sur un sol végétalisé peu dense, même si cela peut atténuer la gravité des dégâts.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons comparé les valeurs du ΔNBR sur notre zone avec celle du NDMI (Normalized Difference Moisture Index) qui est un indice qui détecte l'humidité dans les végétaux grâce aux bandes B8A et B11 de Sentinel-2. Il peut donc être un indice de sécheresse. Si le ΔNBR est sensible à la sécheresse, il devrait être fortement corrélé avec le NDMI à des dates équivalentes avant l'incendie.

D'après le graphique en annexe [voir annexe 8], on observe pas de corrélation entre le ΔNBR et le NDMI: peu importe la variation NDMI, les valeurs du ΔNBR varient entre 0,2 et 0,3, ce qui ne permet pas de décrire précisément l'état de sécheresse de la végétation.

C. Questionnement et incertitudes

Lors des différentes sorties terrains que nous avons réalisées, plusieurs éléments nous ont intrigués mais nous n'avons pas eu le temps de réellement les étudier.

Tout d'abord, nous avons été intrigués par la quasi-absence de repousse de pins d'Alep alors que c'est une espèce pyrophile. Elle se sert habituellement des incendies pour se reproduire. La chaleur d'un feu de forêt ouvre ses cônes, ce qui permet à ses graines de se propager. Cependant, nous n'avons que peu de repousses de pin d'Alep dans toute la forêt. La raison qui nous semble être la plus plausible est que la zone était déjà tellement sèche avant l'incendie que la capacité de reproduction de la végétation a pu être endommagée avant l'incident. Cela peut aussi venir du fait que si le feu était trop violent, les graines aient été endommagées et n'aient donc pas pu pousser.

Un autre élément intrigant que nous avons pu observer est que la repousse de la végétation ne se fait pas sur certaines zones. Régulièrement, autour d'arbres brûlés, on peut observer un cercle dans lequel rien ne repousse. Cela arrive plus fréquemment autour d'arbres ayant grandement, voire complètement brûlé. L'hypothèse que nous avons émise pour expliquer ce phénomène est que la terre autour de cet arbre a brûlé, que ce soit par un violent feu de surface ou un feu de sol, au point d'en perdre sa fertilité.

Une curiosité que nous avons notée est que lorsque l'on observe les images LIDAR HD fournies par l'IGN et après un traitement visant à supprimer le recouvrement entre les bandes de deux passages différents, on voit apparaître des cercles. L'apparition de ces cercles est due à une plus grande densité de points à ces endroits. L'acquisition du LIDAR HD se base sur une prise de vue aérienne depuis un avion se déplaçant en cercle et en suivant des bandes. Nous avons donc supposé que ces cercles de densité supérieure au reste de l'image étaient dus au fait que l'avion qui réalise cette prise de vue a ralenti, ce qui a permis au capteur LIDAR de collecter plus de points à ces endroits-là.

La question centrale de notre étude est de savoir à quel point les paramètres que l'on a rentrés pour la sévérité sont généralisables pour qualifier la sévérité de tous les feux de méditerranée, ou au moins de climat très proches à celui de notre zone. Nous émettons des réserves quant à cela, les mêmes échelles de segmentation de peuvent pas être appliquées automatiquement, car la sévérité peut grandement varier selon de multiples facteurs, et pas uniquement le climat ou la sécheresse qui précède l'incendie. Cependant, on peut généraliser à d'autres feux la méthode que nous avons utilisée pour les images RADAR.

Conclusion :

Cette étude nous aura permis d'étudier plusieurs paramètres des feux de forêt grâce aux outils de la télédétection tout en nous appuyant sur la possibilité de vérifier nos résultats sur la vérité terrain. Nous avons pu faire plusieurs observations sur l'étude automatique des feux.

Tout d'abord, il n'est pas toujours le plus pertinent d'utiliser une classification des feux de manière automatique, comme elles ont déjà été établies par les autres articles scientifiques. Il faut adapter les seuils à chaque feu pour pouvoir étudier au mieux les différences en leur sein.

Aussi, nous avons vu qu'il était possible de créer de nouvelles manières de qualifier la sévérité des feux, notamment grâce aux images RADAR. Ces résultats peuvent être utiles pour l'étude des feux dans les zones humides et tropicales, qui ont souvent un très fort couvert nuageux. Des zones de plus en plus humides sont touchées par d'importants feux de forêt avec le réchauffement climatique, il s'agit donc d'un enjeu important.

Cette étude est la première d'une série sur ce feu, dans laquelle nous avons établi une carte des dégâts du feu sur la forêt avec différentes techniques, le but est de continuer en étudiant la repousse de la forêt, et en mettant en corrélation les prochains résultats avec ceux-ci.

Sources :

[1] Lutte contre les feux de forêt : protéger les populations, les biens et l'environnement Dossier de presse 2023, Ministère de l'Intérieur et des Outre-mer, Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire.

[2] Keeley, Jon. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*. 18. 116-126. 10.1071/WF07049

[3] Données issue de la Base de Données sur les Incendies et les Feux de Forêts en France (BDIFF) <https://bdiff.agriculture.gouv.fr/>

[4]<https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>

[5] Zhao, Y. Huang, Y. Sun, X. Dong, G. Li, Y. Ma, "Forest Fire Mapping Using Multi-Source Remote Sensing Data: A Case Study in Chongqing"; *Remote Sens.* 2023, 15,2323.