

Université des Frères Mentouri Constantine 1
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة الاخوة منتوري قسنطينة 1
كلية علوم الطبيعة والحياة

Département : Biologie et Ecologie Végétale **قسم :** بيولوجيا و علم البيئة النباتية

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Protection des Ecosystèmes

Intitulé :

Estimation et cartographie de l'indice de combustibilité de la végétation forestière : cas de la wilaya de Jijel

Présenté et soutenu par : *BENAMIRAMIRA Abdelghani Mohamed El Amine et
BOUDIAF Aymen*

Le : 6 Juillet 2021

Jury d'évaluation :

Président du jury : BENDERRADJI Mohamed El Habib **Prof – UFM Constantine 1**
Rapporteur : ARFA Azzedine Mohamed Touffik **MCB – UFM Constantine 1**
Examineurs : GANA Mohamed **MCB – UFM Constantine 1**

*Année universitaire
2020 – 2021*

Remerciements

Remerciements

*O*n remercie tout d'abord ALLAH qui nous a donné la santé durant les années d'études et la force pour accomplir ce travail.

Toute notre reconnaissance et nos remerciements à notre encadreur Mr. ARFA Azzedine Mohamed Toufik : pour avoir accepté de nous diriger tout au long de ce travail et pour sa disponibilité, ses conseils, son soutien et ses encouragements qui ont été d'une grande utilité dans l'orientation et l'avancement de nos travaux.

Sans oublier de remercier les membres de jury : Prof BENDERADJI Mohamed El Habib et Dr GANA Mohamed qui ont bien voulu accepter d'examiner ce travail.

Enfin, merci à toute personne qui nous a encouragé de près ou de loin afin de terminer ce mémoire.

Dédicaces

Dédicace

Pour commencer je prends le temps de remercier mon Dieu pour nous avoir aidés à accomplir ce présent travail.

C'est avec toute mon affection que je dédie ce modeste travail :

A celui qui m'a donné vie et qui m'as apporté sans cesse son amour, mon père.

A Ma très chère mère qui m'a apporté sans cesse amour, soutien et encouragement ; et qu'elle trouve ici l'expression de mes vives reconnaissances.

Mes très chers frères et ma sœur.

A toute ma famille et mes proches petits et grands.

A tous mes amis et tous mes collègues.

A vous cher lecteur.

Amen.

Dédicace

Je tiens à remercier mon Dieu le tout Puissant de m'avoir donné la force et le courage pour terminer mes études.

Je dédie principalement ce modeste travail à :

Mes parents qui sont toujours les premières causes de tous mes succès, avec leurs diverses aides tout au long de mes études.

A mes frères et sœurs.

A tout le reste de ma famille pour leurs précieux conseils.

A tous mes amis

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce Projet soit possible, je vous dis merci.

Abdelghani Mouhamed El Amine.

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Sommaire

Table des illustrations

Introduction 1

Chapitre I : Présentation des massifs forestiers de la wilaya de Jijel

1. Situation géographique de la wilaya de Jijel.....	2
2. Patrimoine forestier de la wilaya de Jijel.....	2
2.1. Répartition du patrimoine forestier selon les formations végétales.....	2
2.2. Les principaux massifs forestiers de la wilaya de Jijel.....	3
2.2.1. Les forêts de Taher.....	3
2.2.2. Les forêts de Texenna	4
2.2.3. La forêt d'El Ancer	5
2.2.4. La forêt de Bouaafroune	5
2.2.5. La forêt de Settara	6
2.2.6. La forêt d'El Aouana	7
2.3. Distribution des essences forestières dominantes dans la wilaya de Jijel	7

Chapitre II : Méthodologie et matériels

1. Approche méthodologique.....	9
1.1. Choix du satellite.....	9
1.2. Sélection et acquisition de l'image satellitaire.....	10
1.3. Calcul de l'indice de végétation NDVI	11
1.4. Estimation du biovolume végétal à partir des valeurs de l'NDVI	12
1.5. Calcul de l'indice de combustibilité (IC) à partir du biovolume végétal estimé.....	13
2. Logiciels utilisés	14
2.1. SNAP.....	14
2.2. ArcGIS.....	14

Chapitre III : Résultats et discussions

1. Choix de l'image satellite	15
2. Calcul et cartographie de l'indice de végétation NDVI des forêts de la wilaya de Jijel...	15
3. Estimation et cartographie du biovolume végétal à partir des valeurs de l'NDVI.....	15
4. Calcul et cartographie de l'indice de combustibilité IC.....	17
5. Cartographie des classes de risque de l'indice de combustibilité (IC).....	17
6. Classification des forêts de la wilaya de Jijel en fonction du risque de combustibilité...	19
6.1. Forêts avec un niveau de risque de combustibilité très élevé.....	19
6.2. Forêts avec un niveau de risque de combustibilité élevé.....	19
6.3. Forêts avec un niveau de risque de combustibilité moyen.....	20
6.4. Forêts avec un niveau de risque de combustibilité modéré.....	20

6.5. Forêts avec un niveau de risque de combustibilité faible.....	20
7. Analyse des niveaux de risque de combustibilité en fonction des formations végétales de la wilaya de Jijel	20
7.1. Analyse des niveaux de risque de combustibilité des maquis et maquis arborés.....	21
7.2. Analyse des niveaux de risque de combustibilité des forêts.....	22
8. Vérification et validation de la carte de risque de combustibilité des formations forestières de la wilaya de Jijel.....	23
Conclusion	25
Références bibliographique	26

Résumés

*Table des
illustrations*

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique de la wilaya de Jijel.....	02
Figure 2 : Répartition des formations forestières au niveau de la wilaya de Jijel.....	03
Figure 3 : Formations végétales dominantes des massifs forestiers de la wilaya de Jijel.....	08
Figure 4 : Système d'imagerie spatiale à très haute résolution Sentinel-2.....	10
Figure 5 : Interface du site web Copernicus Open Access Hub.....	10
Figure 6 : Exemples représentatifs du biovolume combustible et de sa répartition éventuelle en fonction des différentes strates (les nombres placés sous les parallélépipèdes correspondent au biovolume tel qu'il peut être lu dans les siglages des formations)	12
Figure 7 : Échelle d'équivalence entre les valeurs de l'NDVI et du biovolume.....	13
Figure 8 : Images Sentinel-2A couvrant la wilaya de Jijel du 16/05/2021.....	15
Figure 9 : NDVI des massifs forestiers de la wilaya de Jijel (2021).....	16
Figure 10 : BV des massifs forestiers de la wilaya de Jijel estimé à partir de l'NDVI (2021).....	16
Figure 11 : Indice de combustibilité (IC) des massifs forestiers de la wilaya de Jijel (2021).....	17
Figure 12 : Classes de risque IC des massifs forestiers de la wilaya de Jijel (2021).....	18
Figure 13 : Risque de combustibilité des maquis et maquis arborés de la wilaya de Jijel.....	21
Figure 14 : Risque de combustibilité des formations forestières de la wilaya de Jijel.....	22
Figure 15 : Répartition des surfaces moyennes/feu en fonction des classes de risques (2020)....	23

Liste des photos

Photo 1 : La forêt de Taher.....	4
Photo 2 : La forêt de Texenna.....	4
Photo 3 : La forêt d'El Ancer.....	5
Photo 4 : La forêt de Bouaafroune.....	6
Photo 5 : La forêt de Settara.....	6
Photo 6 : La forêt d'El Aouana.....	7

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classes de risque de combustibilité des massifs forestiers de la wilaya de Jijel.....	18
--	----

Introduction

Introduction

Le feu est un aléa naturel le plus important pour les forêts et les zones boisées du bassin méditerranéen. Chaque année, environ 50.000 feux ravagent entre 700.000 et 1 million d'hectares de terres causant d'énormes dommages sur le plan social, économique et écologique ainsi que la perte de vies humaines (Kazakis et Ghosn, 2008).

Les forêts algériennes ont subi au cours du temps de nombreuses agressions par les incendies, ces derniers représentent sans aucun doute le facteur de dégradation le plus ravageur de la forêt en Algérie, pertes écologiques (disparition d'espèces rares), économiques et parfois humaines (Madoui, 2002).

La wilaya de Jijel caractérisée par ses forêts denses et diverses, qui occupent une surface importante, est constamment exposée au risque des feux de forêts. Afin de mieux contrecarrer cette menace, il est essentiel de bien identifier et cartographier les zones à risque élevé de combustibilité.

Dans les systèmes actuels d'estimation du risque de combustibilité des feux de forêt, le type de végétation ainsi que son biovolume représentent des facteurs importants de prédisposition au feu. La végétation est l'élément essentiel des incendies car elle constitue le matériel combustible (Hamdi et Boulhendi, 2020).

Dans le cadre de cette étude et à partir du cas pratique de la wilaya de Jijel, nous nous sommes intéressés à l'estimation du biovolume végétal, nécessaire au calcul de l'indice de combustibilité, à partir de l'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Notre mémoire est organisée en trois chapitres :

- Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur la situation géographique, la présentation et la répartition des principaux massifs forestiers de la wilaya de Jijel.
- Le deuxième chapitre présente la méthodologie de travail et le matériel utilisé, où nous avons présenté les méthodes d'obtention de l'image satellitaire, le calcul de l'indice de végétation, l'estimation du biovolume végétal et le calcul de l'indice de combustibilité.
- Le troisième chapitre a été consacré à la présentation et la discussion des principaux résultats obtenus.

Chapitre I
Présentation des
massifs forestiers
de la wilaya de
Jijel

Chapitre I : Présentation des massifs forestiers de la wilaya de Jijel

1. Situation géographique de la wilaya de Jijel

La région de Jijel fait partie du littoral de l'Algérie, le territoire de la wilaya s'étale sur une superficie de 2.396,63 km², avec une façade maritime de 120 km. Elle est comprise entre les parallèles 36°10' et 36°50' de l'hémisphère Nord et entre les méridiens 5°25' et 6°30' à l'Est de Greenwich. Cette wilaya appartient au domaine Nord atlasique connu localement sous le nom de la chaîne des Babors. La wilaya de Jijel compte 28 communes organisées en 11 Daira, elle est limitée au nord par la mer méditerranée, à l'est par la wilaya de Skikda, à l'ouest par la wilaya de Bejaia et au sud par les wilayas de Setif et Mila (fig. 1).

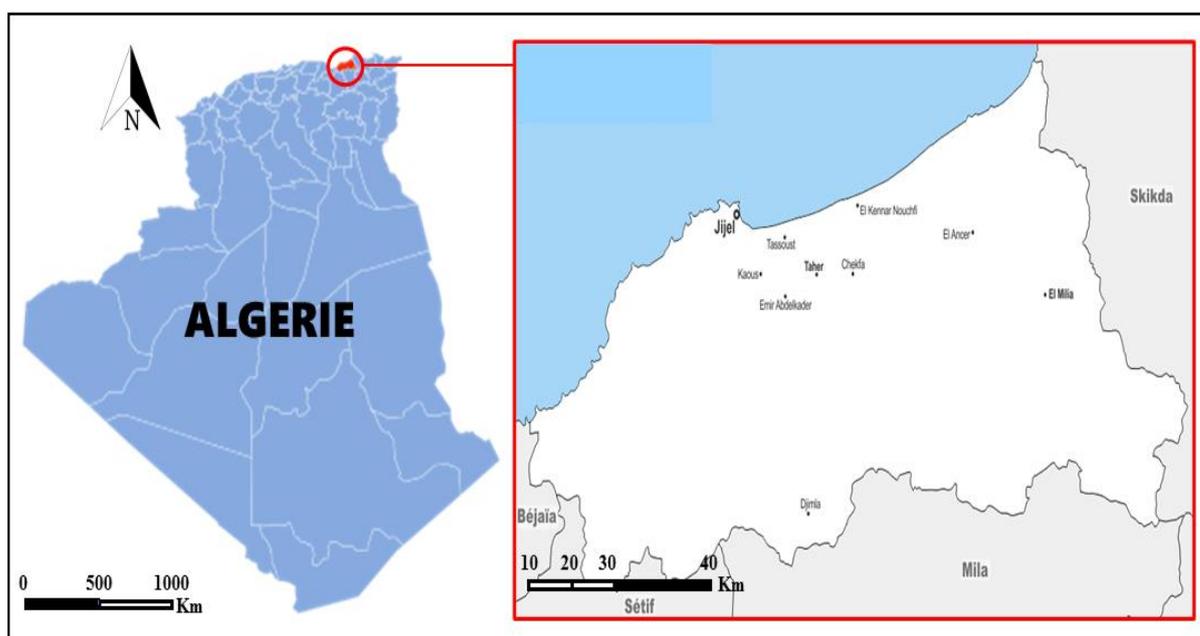


Figure 1 : Situation géographique de la wilaya de Jijel.

2. Patrimoine forestier de la wilaya de Jijel

Les forêts occupent 137.457 ha, soit 57% de la superficie totale de la wilaya de Jijel. Elles sont constituées majoritairement de chênaies : chênes lièges, chêne zéen, chêne afarès et de pin d'Alep et pin maritime (conservation des forêts de la wilaya de Jijel).

2-1. Répartition du patrimoine forestier selon les formations végétales

A. Les forêts : les forêts naturelles et les reboisements occupent une superficie de 99.123ha, soit 72% qui se caractérisent par une diversité des essences et une dynamique de croissance.

B. Les maquis : constitués d'arbustes et d'arbrisseaux, le plus souvent dense, couvrent une superficie de 21.102ha et correspondant à 15% des formations boisées.

C. Les maquis arborés : quant à eux couvrent une superficie de 17.232ha (13%) dont la moitié est considérée comme étant dense (fig. 2).

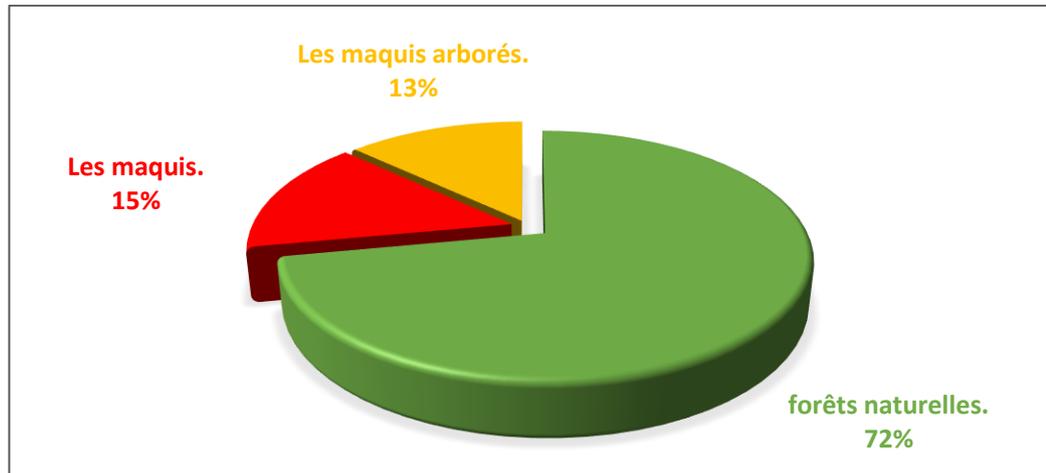


Figure2 : Répartition des formations forestières au niveau de la wilaya de Jijel.

2-2. Les principaux massifs forestiers de la wilaya de Jijel

La forêt de Jijel abrite, non seulement, une végétation exceptionnellement riche en espèces rares et endémiques, mais elle abrite aussi le parc national de Taza, inclus dans le réseau mondial des réserves de la biosphère. Elle joue également un rôle simultané de préservation, de protection et de production.

2-2-1. Les forêts de Taher

La circonscription de Taher détient un patrimoine forestier important, sa superficie forestière est estimée à 23.730 ha, dont les forêts représentent 49,96%, les maquis 26,92% et les autres formations végétales comme les broussailles 23,10% (photo 1).

Le chêne liège représente l'essence dominante des forêts de Taher, il occupe environ 40% et se trouve généralement dans les forêts de Béni Siar, Béni Affer, Béni Ider, Ouled Askeur, El Kannar et Sidi Abdelaziz.

Les autres essences forestières comme le chêne zéen, le chêne afarès et le pin maritime occupent de petites superficies, environ 6,63%. Ces essences sont réparties sur les forêts de Béni Affer, Ouled Askeur, et Béni Habibi. Le sous-bois est constitué essentiellement de

bruyère, calycotome, diss, cytise, fougère, arbousier, lentisque, et myrte (Zehani et Boulbekliz, 2014).



Photo 1 : La forêt de Taher (Google image).

2-2-2. Les forêts de Texenna

Représente un patrimoine forestier important, la superficie occupée par les essences forestières principales est estimée à 10.713 ha (photo 2). Le chêne liège représente l'essence dominante des forêts de la circonscription de Texenna, il occupe un pourcentage d'environ 56,25%. Le sous-bois est constitué essentiellement de *Erica arborea*, *Calycotome spinosa*, *Ampelodesmos mauritanicum*, *Cytisus triflorus*, *Pteris aquilina*, *Arbutus unedo*, *Pistacia lentiscus*, et *Myrtus communis*.



Photo 2 : La forêt de Texenna (Google image).

La forêt de Rekkada Metlatine de 2440,65 ha, constituée de peuplements assez denses (futaies de 130 à 160 arbres à l'hectare) est considérée comme l'un des pôles les plus importants de production du liège de la wilaya de Jijel (Kahila et Boumelit, 2012).

2-2-3. La forêt d'El Ancer

La forêt d'El Ancer est formée d'une subéraie caractérisée par un sous-bois très diversifié, parmi les espèces rencontrées : le myrte, le lentisque, la lavande, le diss et le calycotome (photo 3). On y rencontre aussi quelques espèces ripisylves : le peuplier blanc, le peuplier noir et le laurier noble. Notant aussi que la forêt est traversée par l'Oued El Kabîr (Boussalem et Saad, 2019).



Photo3 : La forêt d'El Ancer (Google image).

2-2-4. La forêt de Bouaafroune

La forêt de Bouaafroune est située à environ 5 km du massif de Tamentout, c'est une forêt de montagne localisée entre 800-1352 m d'altitude, elle couvre une superficie d'environ 1080 ha, soit 15% de la commune de Djimla (photo 4). Composée essentiellement par des associations chêne liège, chêne zéen, chêne afarès et des reboisements accessoires de cèdre de l'atlas. Le couvert du chêne afarès (essence dominante dans la forêt), moins épais que celui du chêne zéen, laisse passer plus de lumière ce qui favorise le développement d'une strate arbustive, composées de bruyère arborescente, de myrtes, de genêt, de diss et une strate herbacée assez développée (Mayache, 2018).



Photo 4 : La forêt de Bouaafroune (Google image).

2-2-5. La forêt de Settara

Située à l'extrémité Est de la wilaya de Jijel (à 16 km au sud d'El Milia), la forêt de Settara s'étend sur 5763 ha, à la frontière de la wilaya de Skikda. Les peuplements de la forêt sont essentiellement composés par le chêne liège pur (photo 5). Le chêne afarès occupe une très faible superficie de 27,5 ha et le chêne zéen une superficie de 43,4 ha.

Le maquis dense sous un couvert forestier moyen, concurrence le chêne liège et empêche le bon développement des semis. La forêt présente tous les types de dégradation depuis le maquis à la futaie pleine (Nacer et Bendjamaa, 2013).



Photo 5 : La forêt de Settara (Google image).

2-2-6. La forêt d'El Aouana

Située au Nord-Ouest de la commune de Jijel à 18 km du chef-lieu de wilaya, la circonscription d'El Aouana à elle seule couvre une superficie de 23.825 ha dont 3807ha sont, depuis 1988, rattachés au parc national de Taza, avec un taux de boisement de 47% (photo 6). Les formations forestières à El Aouana sont composées de chêne-liège (11.060 ha), de chêne zéen et chêne afarès (3670 ha), de pin maritime (272 ha), de maquis (8293 ha) et autres (530 ha) (Rouibah *et al.*, 2018).



Photo 6 : La forêt d'El Aouana (Google image)

2-3. Distribution des essences forestières dominantes dans la wilaya de Jijel

Les forêts de la wilaya de Jijel sont composées essentiellement de chênes liège, la forêt juxtapose en fait, deux formations principales : les vieilles futaies pures et plus ou moins denses, et les boisements beaucoup plus clairs souvent mixtes et plus jeunes. Les premières représentent 65% de l'espace sylvicole, leur taux de recouvrement est généralement supérieur à 75%, et la hauteur moyenne des arbres avoisine 9 mètres. Les seconds disséminés à travers tout l'espace forestier, forment un peuplement où les arbres ne dépassent pas 7 mètres.

Les boisements de chêne liège couvrent quasiment toutes les échines montagneuses, les hauts et les bas versants ; leur composition floristique qui a connu un cycle récessif sous l'effet des incendies répétés et le surpâturage connaît actuellement une nette évolution. Grâce en effet à un abandon de l'espace sylvicole durant plus de dix ans, une certaine remontée biologique a été enregistrée.

Le chêne liège est omniprésent, en altitude il se mélange toutefois, au chêne zéen et au chêne afarès, puis petit à petit leur cède la place. Il disparaît également sur les versants calcaires en exposition sud, remplacé par le chêne vert et le pin d'Alep (Tatar, 2008).

La répartition des superficies forestières par essence fait ressortir une certaine diversité dans la composition des peuplements forestiers qui ont été cartographiés sur le terrain (fig. 3). Le chêne liège constitue toutefois l'essence dominante et occupe près de 79 % des superficies forestières totales. Les peuplements de chêne zéen occupent un peu plus de 14% de la superficie forestière totale et constituent de ce fait la seconde essence de par son importance. Le reste des forêts est composé d'essences pures ou mélangées de chêne vert, de chêne afarès et de pin maritime (BNEDER, 2008).

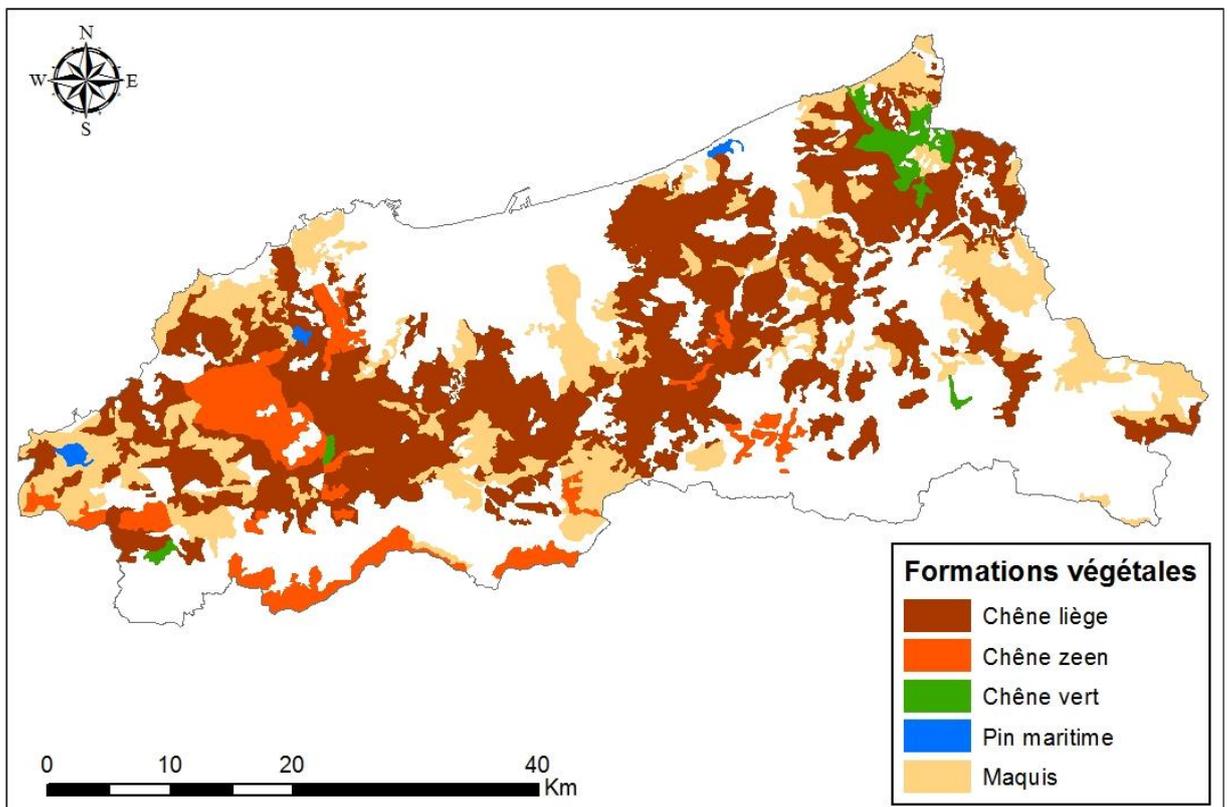


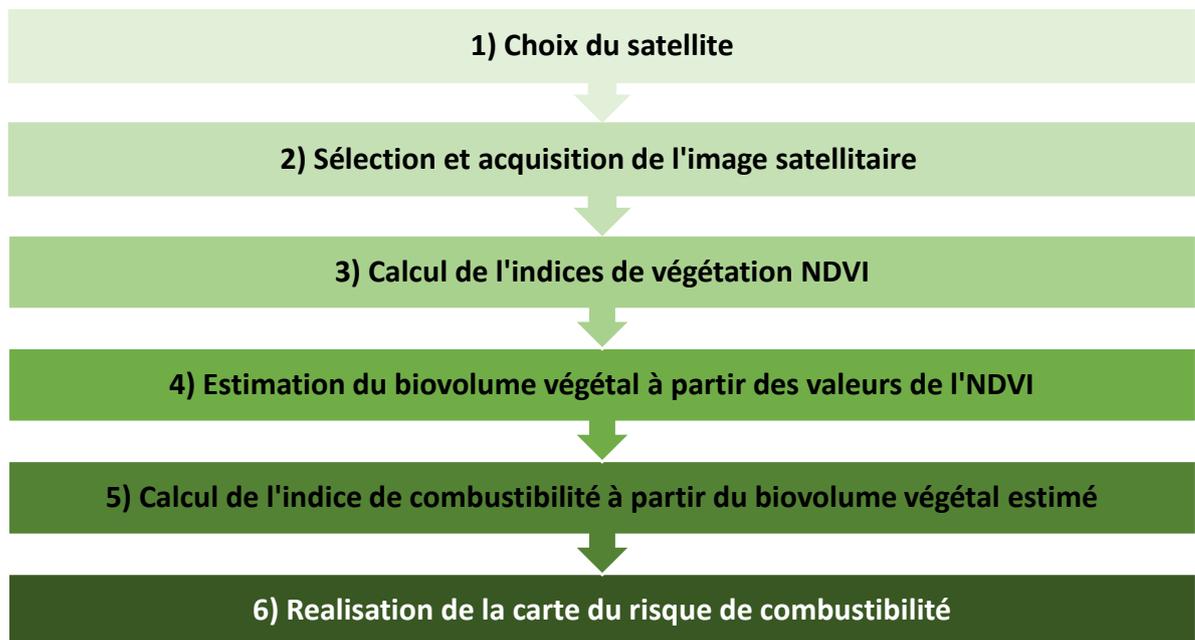
Figure 3 : Formations végétales dominantes des massifs forestiers de la wilaya de Jijel
(source BNEDER, 2008).

Chapitre II
Méthodologie et
matériels

Chapitre II : Méthodologie et matériels

1. Approche méthodologique

La démarche adoptée pour la conception d'un outil cartographique d'aide à l'estimation et la cartographie de l'indice de combustibilité de la végétation dans la wilaya de Jijel en utilisant les techniques de télédétection, s'appuie sur 6 étapes :



1-1. Choix du satellite

Notre choix s'est porté sur le satellite Sentinel-2, dont les images sont disponibles gratuitement sur le site web Copernicus Open Access Hub connu auparavant sous le nom de «Sentinels Scientific Data Hub ».

Sentinel est une série de satellites d'observation de la Terre de l'Agence Spatiale Européenne dont les deux premiers exemplaires (fig. 4), qui sont identiques, ont été mis en orbite en 2015 (Sentinel-2A) et 2017 (Sentinel-2B). Les satellites Sentinel-2 se caractérisent par :

- ✓ Une haute résolution spatiale : 10m-20m en fonction des bandes spectrales ;
- ✓ Une fauchée de 290 km ;
- ✓ Une fréquence de revisite : 5 jours avec 2 satellites ;

- ✓ Une richesse spectrale : 13 bandes spectrales ;
- ✓ Des angles de prise de vue constants : pas d'effets directionnels ;
- ✓ Des données ouvertes et gratuites ;
- ✓ Des produits prêts à l'emploi : produit 2A ortho-rectifié avec correction atmosphérique ;



Figure 4 : Système d'imagerie spatiale à très haute résolution Sentinel-2.

1-2. Sélection et acquisition de l'image satellitaire

L'acquisition de l'image satellite Sentinel-2 s'est fait à travers le site web Copernicus Open Access Hub (fig. 5).



Figure 5 : Interface du site web Copernicus Open Access Hub.

Les critères de sélection de l'image satellite qui ont conditionnés notre choix sont :

- La couverture de l'ensemble des massifs forestiers de la wilaya de Jijel ;
- L'absence de couverture nuageuse ;
- Durant la saison printanière (de mars à mai) où l'activité photosynthétique est à son maximum pour mieux quantifier le biovolume végétal ;
- La date la plus récente possible pour des données à jours.

1-3. Calcul de l'indice de végétation NDVI

L'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est l'indice de végétation le plus communément utilisé en télédétection, il génère une image affichant la couverture végétale.

Cet indice est obtenu par un calcul sur les bandes "proche infrarouge" (PIR) et "rouge" (R) du capteur, qui permet de détecter le niveau de chlorophylle. Le résultat de cette opération donne une matrice de valeurs comprises entre -1 et 1 caractérisant l'NDVI de chaque pixel de l'image. Les valeurs comprises entre -1 et 0 représentent les éléments composés d'eau, les valeurs comprises entre 0 et 0,2 représentent les éléments composés de sols nus. Nous nous intéressons ici uniquement aux valeurs concernant la végétation, c'est à dire aux valeurs comprises entre 0,2 et 1, plus l'indice est élevé plus la végétation est dense (Sellers, 1985).

La formule de l'NDVI appliqué aux canaux de Sentinel-2 est la suivante :

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{PIR}} - \rho_{\text{R}}) / (\rho_{\text{PIR}} + \rho_{\text{R}}) = (\text{B8} - \text{B4}) / (\text{B8} + \text{B4})$$

ρ_{PIR} : réflectance dans la bande proche-infrarouge (B8) ;

ρ_{R} : réflectance dans la bande rouge (B4).

Le calcul de l'NDVI de l'image Sentinel-2 a été réalisé à l'aide des boîtes à outils «Toolboxes», proposé par l'Agence Spatiale Européenne, qui partagent une architecture commune appelée SNAP (Sentinel Application Platform). Ce sont des boîtes à outils open source gratuites et performantes développées spécialement pour les données des satellites Sentinel et disponibles sur le site web STEP (Science Toolbox Exploitation Platform) (Arfa, 2019).

Une fois l'indice NDVI calculé, les données sont transférées vers le SIG pour le découpage de l'image pour ne garder que les limites des massifs forestiers de la wilaya de Jijel. L'image raster "NDVI" doit être convertie en vecteur pour pouvoir manipuler les valeurs des champs de la table attributaire.

1-4. Estimation du biovolume végétal à partir des valeurs de l'NDVI

Le biovolume végétal représente le volume total de matériel végétal d'un peuplement donné susceptible de brûler lors d'un feu éventuel. Ce biovolume correspond à un parallélépipède dans lequel la végétation serait enfermée en tenant compte du recouvrement de tous les types de combustibles dans toutes les strates. Si la végétation remplit entièrement le parallélépipède, le biovolume est égal à 50 (nombre maximum obtenu en faisant la somme des différents recouvrements par types de peuplement) ; dès que le recouvrement de la végétation diminue, le biovolume décroît. La figure 6 donne quelques exemples du biovolume et de sa répartition spatiale en fonction de différentes dispositions des strates (Trabaud, 1971).

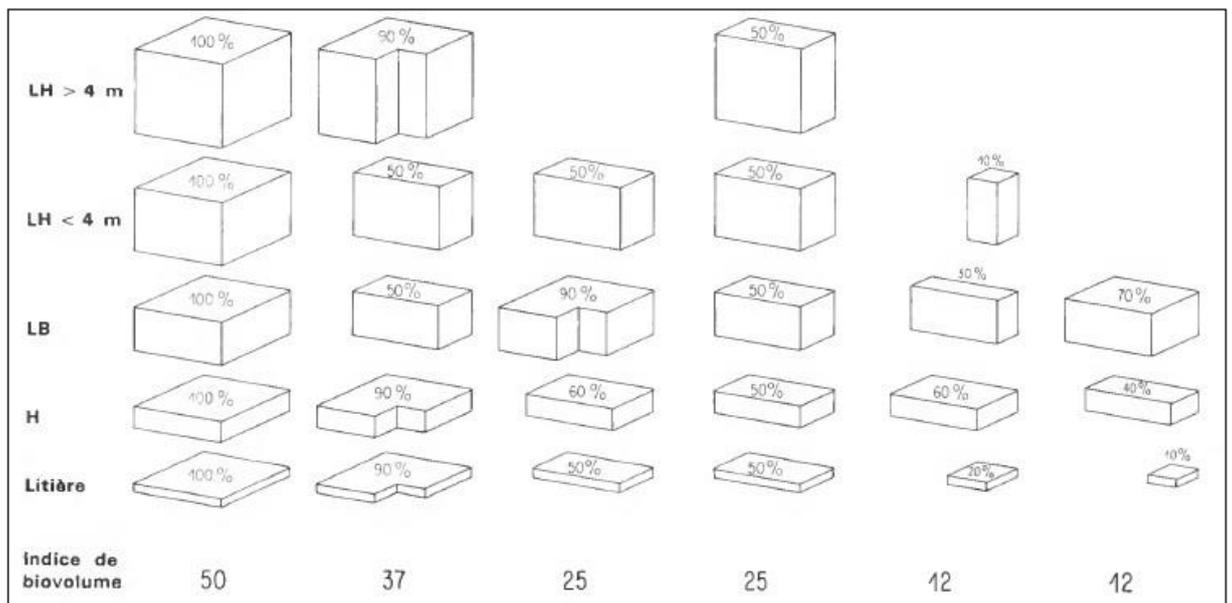


Figure 6 : Exemples représentatifs du biovolume combustible et de sa répartition éventuelle en fonction des différentes strates (les nombres placés sous les parallélépipèdes correspondent au biovolume tel qu'il peut être lu dans les siglages des formations) (Trabaud, 1971).

L'estimation du biovolume global de la végétation à partir de l'NDVI, nécessite de mettre en place une échelle d'équivalence entre les valeurs du biovolume et les valeurs de l'NDVI. Sachant que les valeurs théoriques du biovolume varient entre 0 et 50 et les valeurs de l'NDVI

concernant la végétation, sont comprise entre 0,2 et 1, il suffit donc de faire correspondre ces deux intervalles. Dans ce cas, la valeur 0,2 de l'NDVI correspondra à la valeur 0 du biovolume et celle de 1 sera équivalente à 50 (fig. 7) (Arfa, 2019).

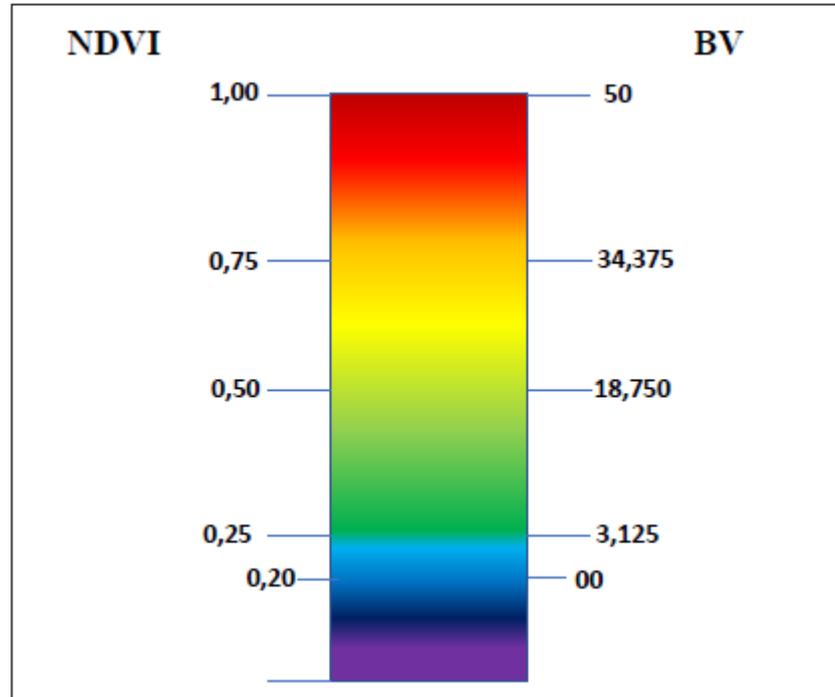


Figure 7 : Échelle d'équivalence entre les valeurs de l'NDVI et du biovolume.

1-5. Calcul de l'indice de combustibilité (IC) à partir du biovolume végétal estimé

Les principaux critères qui interviennent dans l'apparition d'un feu dans un espace végétal, sont la structure spatiale du combustible (recouvrement horizontal et stratification verticale) et la nature des espèces dominantes. Les espèces dominantes qui caractérisent les formations en raison de leur importance constitutive influent sur l'inflammabilité et la combustibilité des peuplements intrinsèques (Trabaud, 1980).

Pour évaluer l'indice IC nous utilisons une méthode proposée par Alexandrian (1982) pour estimer la gravité potentielle d'un feu démarrant dans un peuplement forestier déterminé. Cette méthode a consisté en la mise au point d'un modèle, empirique, basé sur l'expérience des sapeurs-pompiers pour pondérer les termes d'une expression mathématique dont les paramètres proviennent d'une description normalisée de la végétation. C'est ainsi qu'un indice d'intensité potentielle du feu (ou indice de combustibilité) a été exprimé par la relation suivante :

$$IC = 39 + 0,23 * BV * (E - 7,18)$$

BV est le biovolume végétal estimé à partir de l'indice de végétation NDVI.

E représente la combustibilité moyenne de chaque type de peuplement. Elle est égale à la somme de la note de combustibilité de l'essence prédominant du relevé (E_1) et la moyenne des notes de combustibilité des espèces abondantes du relevé (E_2). Ces données sont obtenues à partir de la carte des formations végétale de la wilaya de Jijel réalisée par le BENDER en 2008.

L'indice de combustibilité peut atteindre théoriquement 140, il est codé en 5 classes :

- 1 : Faible : $IC < 40$.
- 2 : Modéré : $40 \leq IC < 50$.
- 3 : Moyen : $50 \leq IC < 60$.
- 4 : Elevé : $60 \leq IC < 70$.
- 5 : Très élevé : $IC > 70$.

2. Logiciels utilisés

2-1. SNAP

SNAP est un logiciel gratuit et libre regroupant plusieurs boîtes à outils permettant de visualiser, de traiter et d'analyser les données satellites, notamment les produits Sentinel. Ce logiciel a été utilisé lors de cette étude pour le calcul de l'indice de végétation NDVI à partir de l'image Sentinel-2.

2-2. ArcGIS

ArcGIS est un système d'information géographique qui permet de visualiser, d'interroger, d'analyser et de mettre en page les données géographiques. Il fournit des outils interactifs pour explorer, sélectionner, afficher, éditer, analyser, symboliser et classifier les données ou pour créer automatiquement, mettre à jour ou gérer les cartes et métadonnées (Ouamara, 2013). La version d'ArcGIS qui a été utilisée lors de cette étude est la 10.1.

Les tâches réalisées avec ArcGIS sont :

- ✓ Découpage de l'image raster de l'NDVI avec la végétation de la wilaya de Jijel.
- ✓ Conversion du raster NDVI en vecteur.
- ✓ Calcul du BV à partir des valeurs de l'NDVI.
- ✓ Calcul et classification de l'indice de combustibilité (IC)
- ✓ Réalisation et mise en page des différentes cartes.

Chapitre III
Résultats et
discussion

Chapitre III : Résultats et discussions

1. Choix de l'image satellite

L'image satellitaire choisie est de type Sentinel-2A, niveau 2A ortho-rectifié avec correction atmosphérique, datant du 16 mai 2021 (fig. 8). Elle porte la référence « S2A_MSIL2A_20210516T102021_N0300_R065_T31SGA_20210516T133153 ».



Figure 8 : Images Sentinel-2A couvrant la wilaya de Jijel du 16/05/2021.

2. Calcul et cartographie de l'indice de végétation NDVI des forêts de la wilaya de Jijel

Le résultat du calcul de l'indice de végétation NDVI à partir de l'image Sentinel-2A et le découpage de ce dernier avec les limites des massifs forestiers de la wilaya de Jijel est présenté dans la figure 9. Les résultats montrent que les valeurs de l'indice de végétation NDVI, pour l'ensemble des massifs forestiers de la wilaya de Jijel sont comprises entre 0,98 et -0,97.

3. Estimation et cartographie du biovolume végétal à partir des valeurs de l'NDVI

Les valeurs de l'NDVI ont été utilisées comme référence de base pour l'estimation du biovolume global des massifs forestiers de la wilaya de Jijel (fig. 10). Les valeurs du biovolume au niveau des massifs forestiers de la wilaya de Jijel varient entre 0 et 50 avec une moyenne de 35.

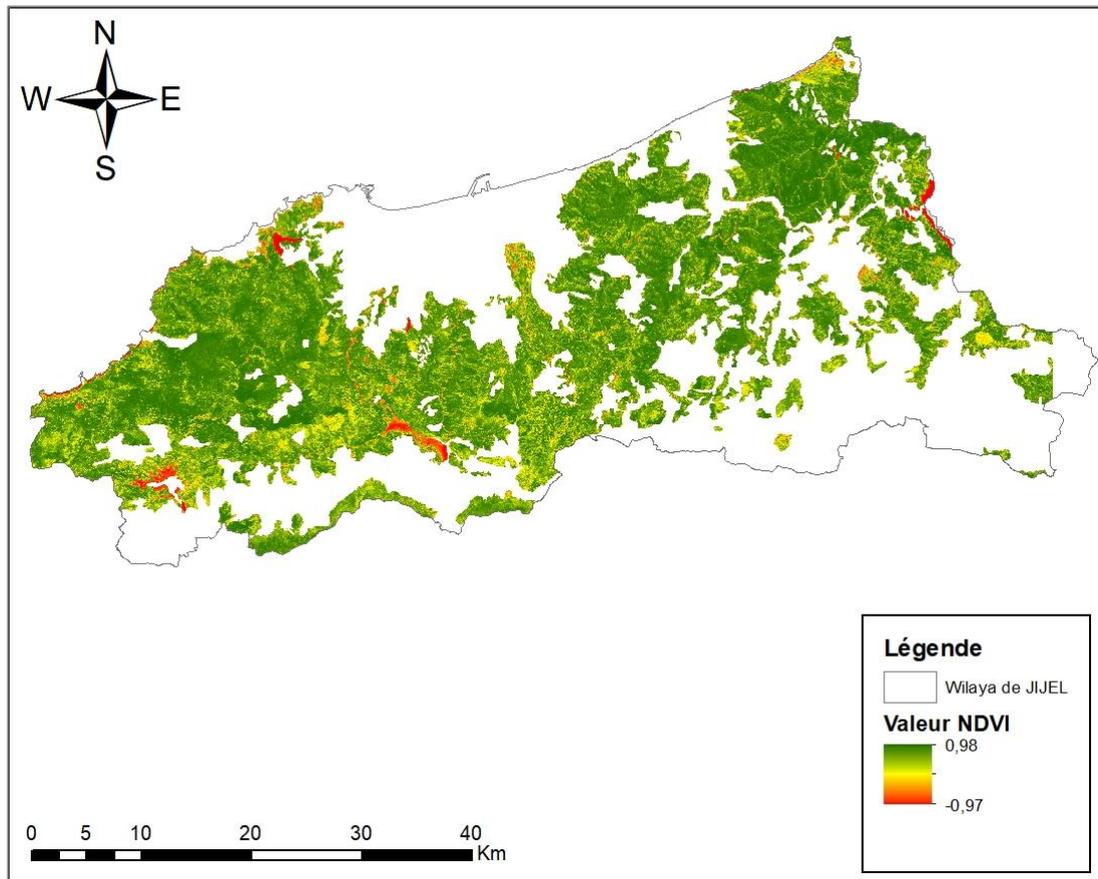


Figure 9 : NDVI des massifs forestiers de la wilaya de Jijel (2021).

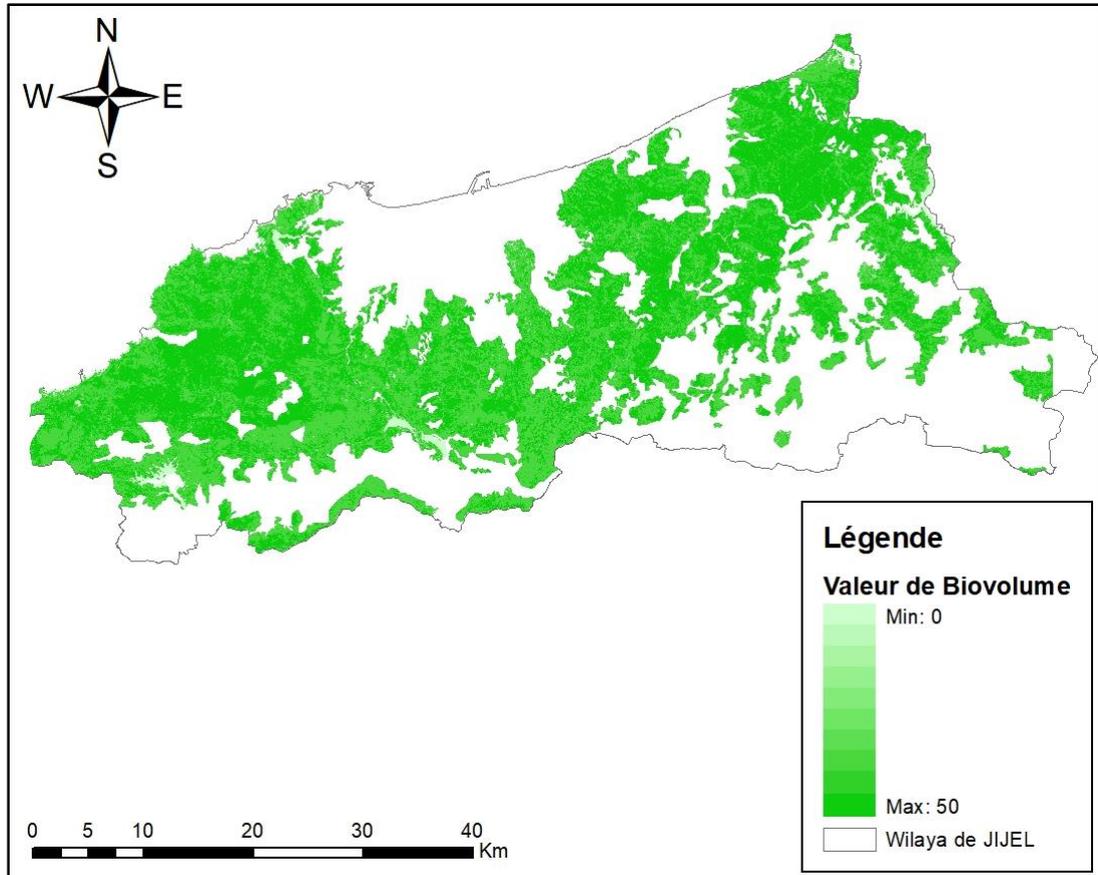


Figure 10 : BV des massifs forestiers de la wilaya de Jijel estimé à partir de l'NDVI (2021).

4. Calcul et cartographie de l'indice de combustibilité IC

Les valeurs du biovolume végétal, estimées à partir de l'NDVI, combinées aux valeurs des notes d'intensité calorifique E_1 et E_2 , extraites à partir de la carte des formations végétale de la wilaya de Jijel, ont servie à calculer l'indice de combustibilité IC (fig. 11). Sur l'ensemble des massifs forestiers de la wilaya de Jijel, les valeurs de l'indice de combustibilité IC varient entre 30 et 114,29, avec une moyenne de 60,3.

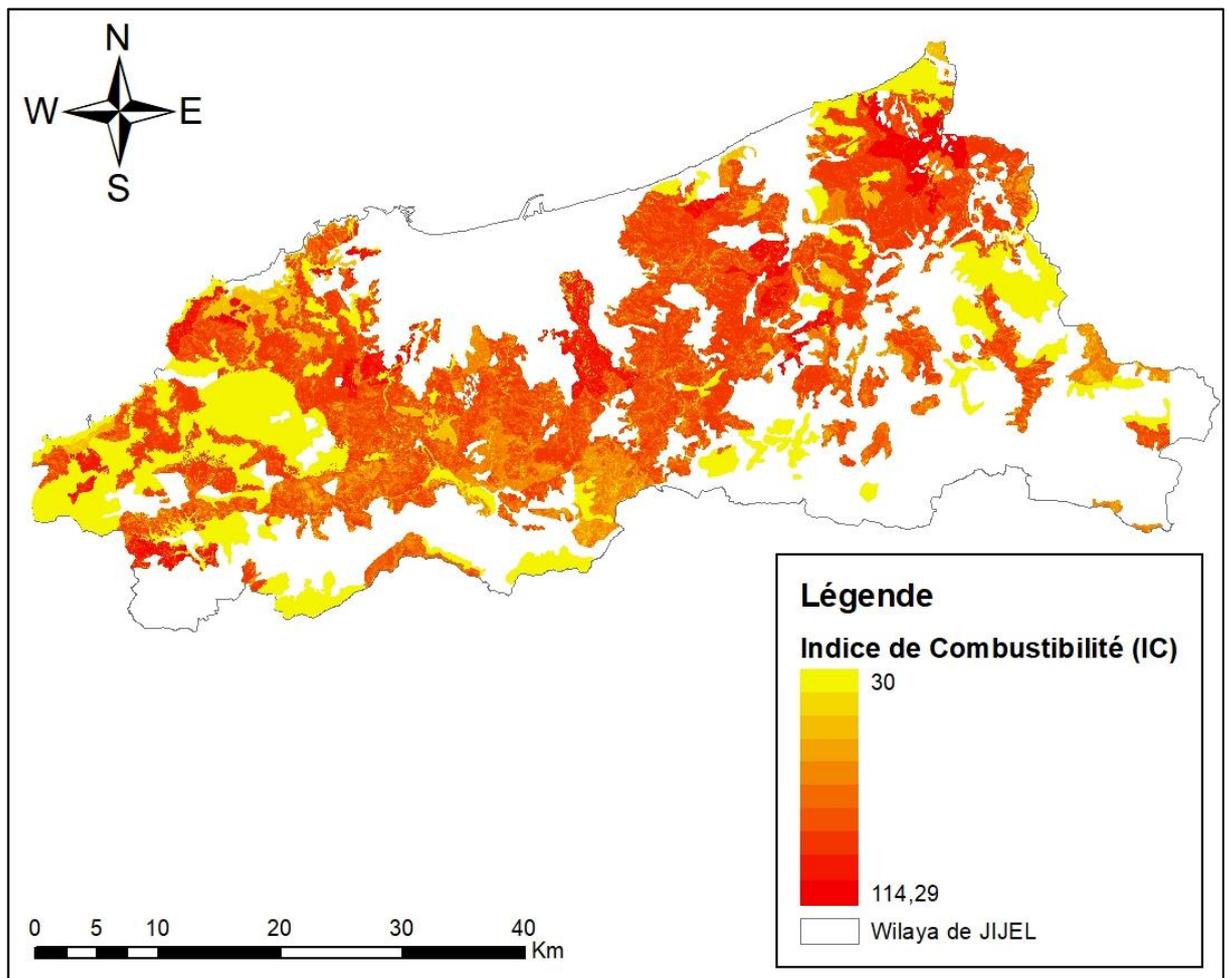


Figure 11 : Indice de combustibilité (IC) des massifs forestiers de la wilaya de Jijel (2021).

5. Cartographie déclassés de risque de l'indice de combustibilité (IC)

Les valeurs de l'indice de combustibilité IC ont été classées en 5 niveaux de risque : faible, modéré, moyen, élevé et très élevé.

Le résultat de la classification de l'indice de combustibilité IC sont illustrés dans la figure 12.

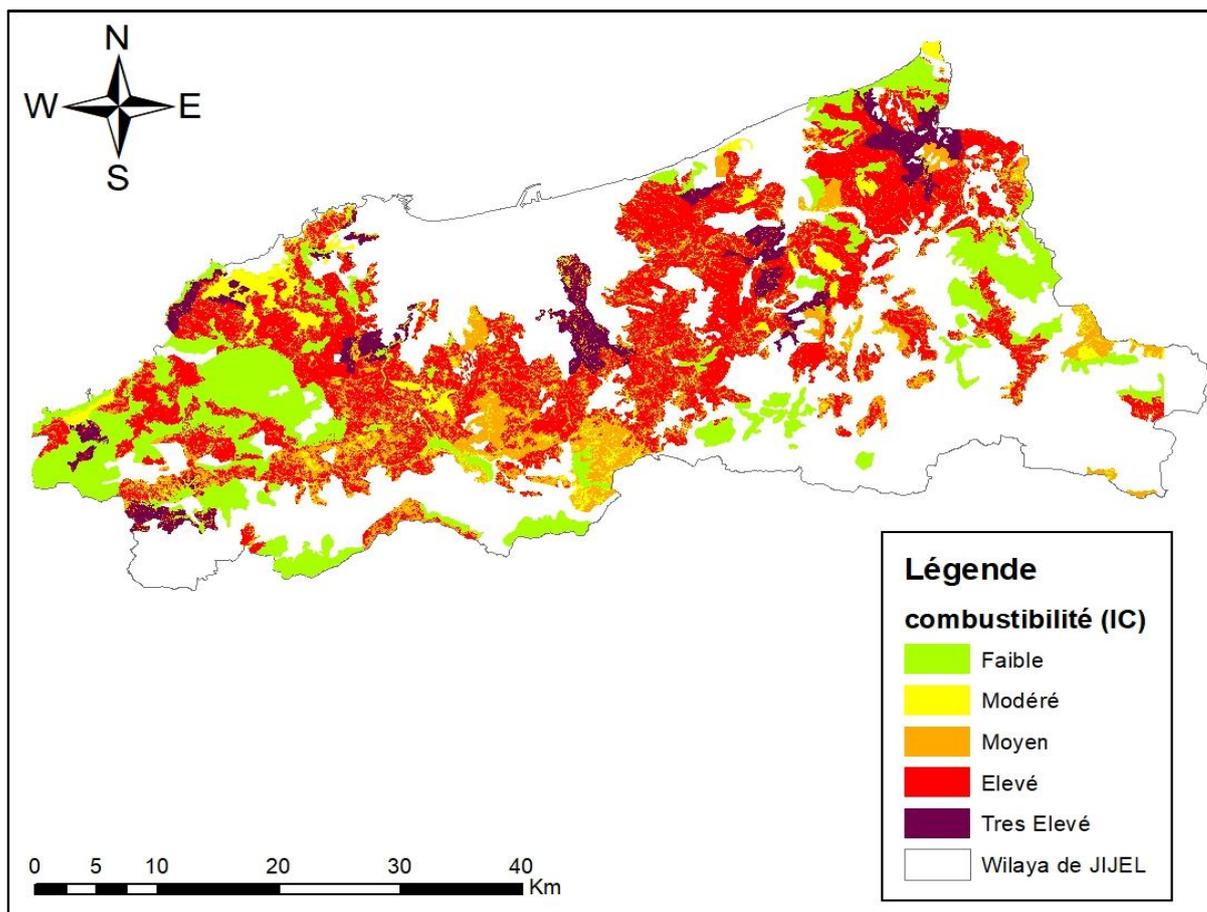


Figure 12 : Classes de risque IC des massifs forestiers de la wilaya de Jijel (2021).

Les surfaces des formations végétales pour chaque niveau de risque IC sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Classes de risque de combustibilité des massifs forestiers de la wilaya de Jijel (2021).

IC classes	Surface forestière (ha)	Surface forestière (%)
Faible	32.419,94	23,8%
Modéré	10.261,81	7,5%
Moyen	25.948,49	19,1%
Elevé	57.555,17	42,3%
Très élevé	97.52,85	7,2%
Total	135.938,26	100,0%

Les résultats obtenus à partir de la carte de risque montrent que la moitié de la superficie forestière de la wilaya de Jijel présente un niveau de risque de combustibilité élevé à très élevé. Les zones à risque faible et moyen représentent respectivement 23,8% et 19,1, alors que les zones à risque de combustibilité modéré ne représentent que 7,5% de la surface forestière totale.

Cette répartition s'explique par la dominance des forêts de chêne liège riche en sous-bois très combustible comme la bruyère, par exemple. La présence aussi d'importante surface de maquis dense et très combustible contribue également à augmenter le niveau de risque de combustibilité de la wilaya de Jijel.

6. Classification des forêts de la wilaya de Jijel en fonction du risque de combustibilité

6-1. Forêts avec un niveau de risque de combustibilité très élevé

La forêt de Taher est l'unique forêt qui présente, en majorité, un risque très élevé de combustibilité.

6-2. Forêts avec un niveau de risque de combustibilité élevé

Parmi les forêts domaniales qui ont en majorité un niveau de risque de combustibilité élevé, on peut citer :

- Forêt domaniale Adendoune ;
- Forêt domaniale Beni Affer ;
- Forêt domaniale Beni Ahmed.
- Forêt domaniale Beni Aicha ;
- Forêt domaniale Beni Fatah ;
- Forêt domaniale Beni Hbibi ;
- Forêt domaniale Beni Idder ;
- Forêt domaniale Beni Khettab ;
- Forêt domaniale Dar El Oued ;
- Forêt domaniale Djidjeli ;
- Forêt domaniale El Karn ;
- Forêt domaniale Ouled Askeur ;
- Forêt domaniale Rekkada ;
- Forêt domaniale Texenna ;

Pour les forêts il y a celle d'El Ancer, de Sidi Abdelaziz, d'Oudjana, de Chahna, de Bouraoui Belhadeb et de Boudria Beni Yadjis.

6-3. Forêts avec un niveau de risque de combustibilité moyen

En ce qui concerne les forêts domaniales, qui ont en majorité un niveau de risque de combustibilité moyen il y a celle de Beni Meslem. Pour les forêts nous avons la forêt de Djmila et d'Ouled Yahia.

6-4. Forêts avec un niveau de risque de combustibilité modéré

Une seule forêt domaniale présente en majorité un niveau de risque de combustibilité modéré, c'est celle de Tissemlat.

6-5. Forêts avec un niveau de risque de combustibilité faible

Les forêts domaniales présentant en majorité un risque faible de combustibilité sont :

- Forêt domaniale Beni Siar ;
- Forêt domaniale Guerrouche ;
- Forêt domaniale Lalem ;
- Forêt domaniale Ouled Debab ;
- Forêt domaniale Ouled Kassem ;
- Forêt domaniale Tamentout.

En ce qui concerne les forêts on peut citer celle de Settara, de Kimir Oued Adjoul, de Ziama Mansouria et d'El Milia.

7. Analyse des niveaux de risque de combustibilité en fonction des formations végétales de la wilaya de Jijel

Chaque type de formation végétale, au niveau de la wilaya de Jijel, a été analysé en fonction du niveau de risque de combustibilité.

7-1. Analyse des niveaux de risque de combustibilité des maquis et maquis arborés

La répartition des niveaux de risque de combustibilité pour les maquis et maquis arborés de la wilaya de Jijel est illustrée dans la figure 13.

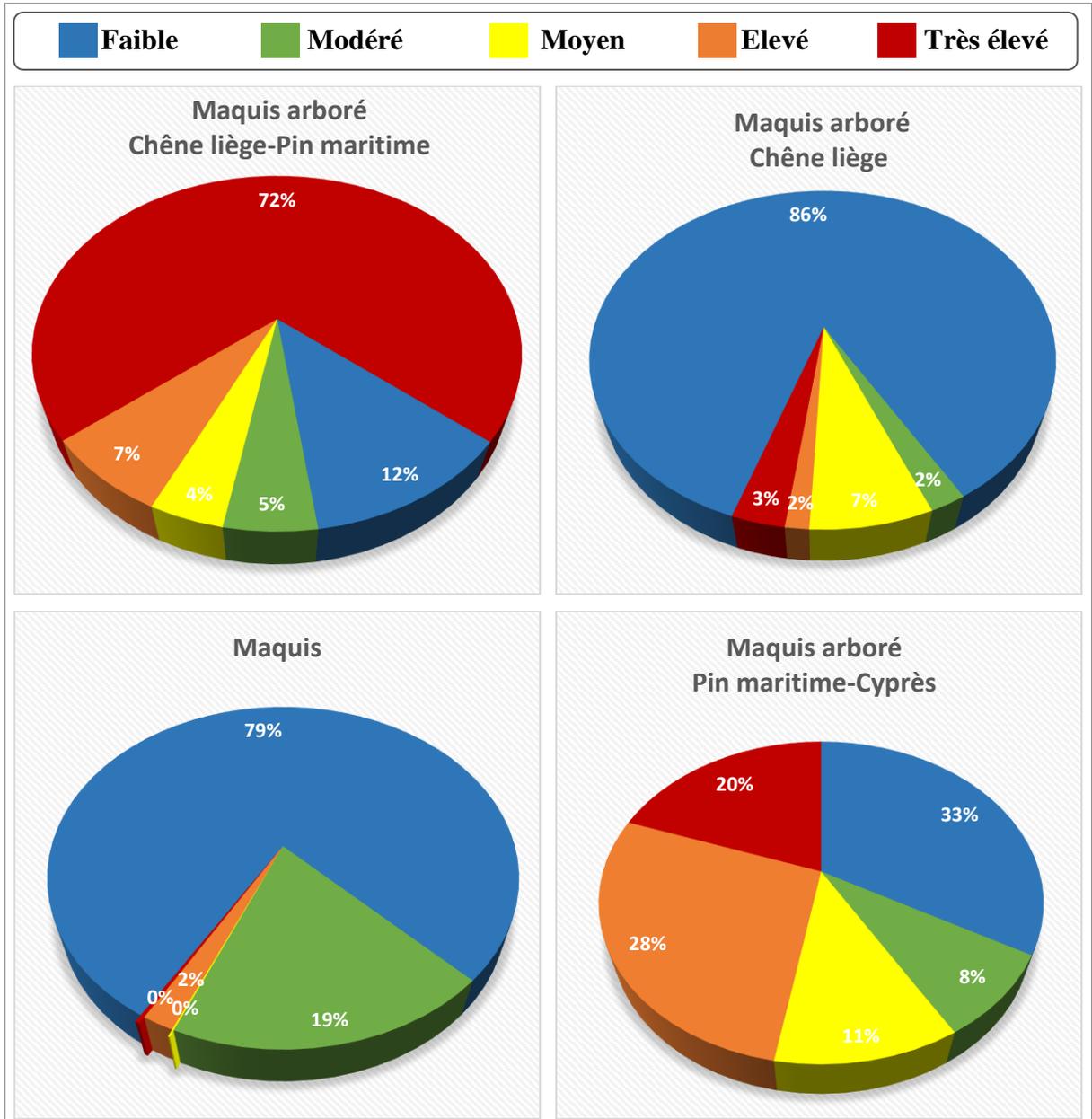


Figure 13 : Risque de combustibilité des maquis et maquis arborés de la wilaya de Jijel.

Les résultats d'analyse montrent que 79% des maquis arborés à base de chêne liège et de pin maritime présente un niveau de risque de combustibilité élevé (7%) à très élevé (72%). Cela s'explique par le fait de l'association d'une végétation très dense du maquis de chêne liège avec les arbres de pin maritime qui est une essence très combustible.

En seconde position, il y a les maquis arborés à base de pin maritime et de cyprès, avec 48% de risque dont 28% élevé et 20% très élevé.

Enfin, en ce qui concerne les maquis et les maquis arborés de chêne liège, c'est le niveau de risque de combustibilité faible qui domine avec respectivement 79% et 86%.

7-2. Analyse des niveaux de risque de combustibilité des forêts

La répartition des niveaux de risque de combustibilité pour les différentes formations forestières de la wilaya de Jijel est présentée dans la figure 14.

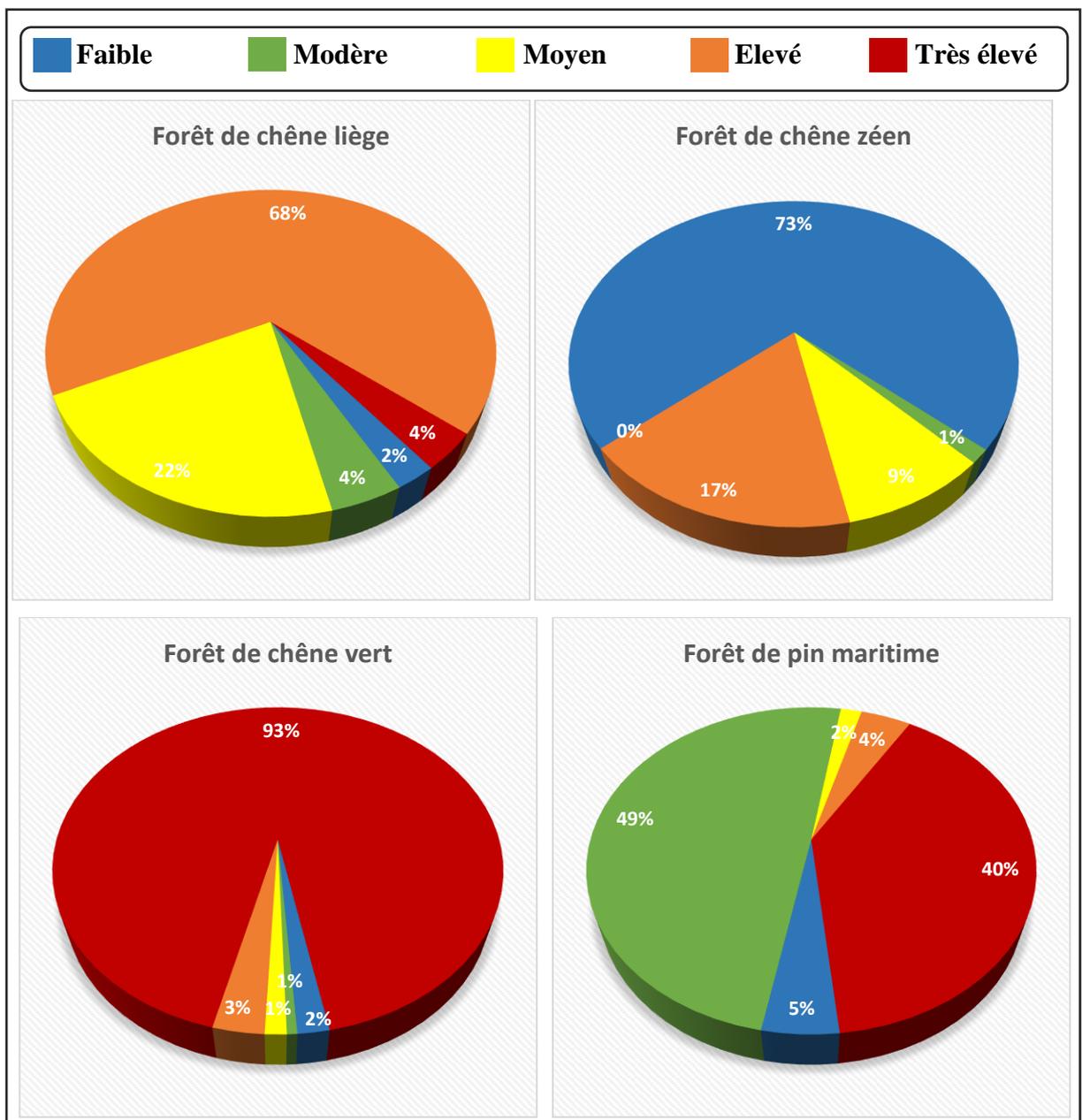


Figure 14 : Risque de combustibilité des formations forestières de la wilaya de Jijel.

D'après les résultats d'analyse, on observe que le niveau de risque de combustibilité très élevé concerne les formations à base de chêne vert et de pin maritime avec respectivement 93% et 40%. Ces deux essences possèdent un potentiel calorifique très élevé lors de la combustion.

Les formations à base de chêne liège présentent un niveau de risque de combustibilité élevé avec 68%. Il est vrai que le chêne liège possède un potentiel calorifique inférieur à celui du chêne vert et du pin maritime, mais son sous-bois, parfois dense, fait grimper ce potentiel, notamment, avec la présence de la bruyère.

La formation à base de chêne zéen affiche le plus faible niveau de risque de combustibilité avec 73%. Le chêne zéen présente un potentiel calorifique moyen, de plus son sous-bois n'est pas très dense et ne contient pas d'espèce très combustible, comme c'est le cas pour le chêne liège.

8. Vérification et validation de la carte de risque de combustibilité des formations forestières de la wilaya de Jijel

Afin de vérifier et de valider la carte de risque de combustibilité des massifs forestiers de la wilaya de Jijel, nous avons réalisé une comparaison entre les surfaces moyennes brûlées par feu en 2020 et les 5 classes de risque. Pour ce faire nous avons calculé la surface moyenne brûlée par feu, c'est-à-dire la surface brûlée totale que divise le nombre de feu, à l'intérieur de chacune des 5 classes de risque (faible, modéré, moyen, élevé et très élevé). Les résultats sont illustrés dans la figure 15.

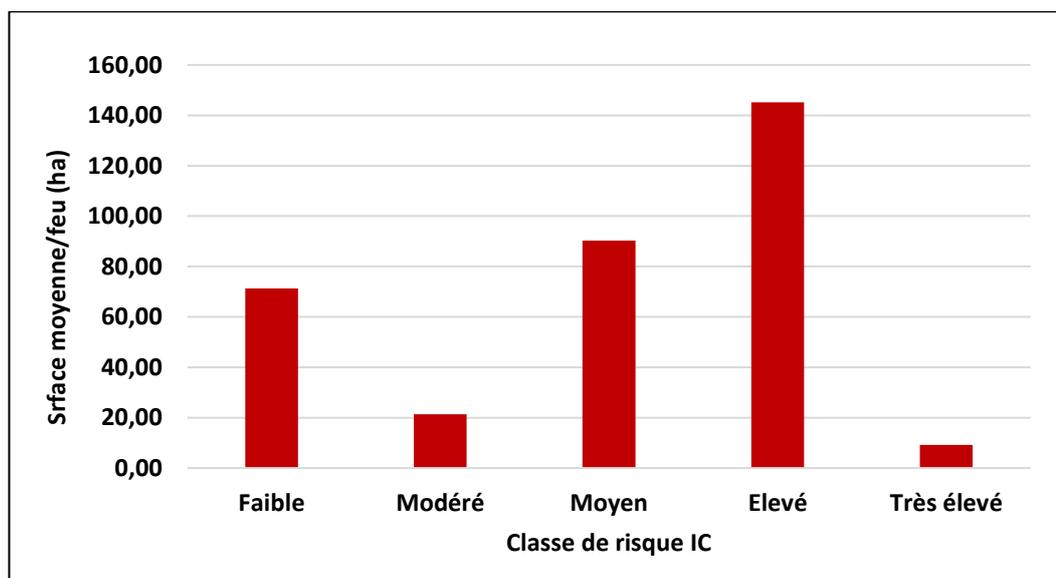


Figure 15 : Répartition des surfaces moyennes/feu en fonction des classes de risques (2020).

Les résultats de comparaison, révèlent que, durant l'été 2020, les feux les plus graves, qui ont brûlés en moyenne 145,18 ha, sont localisés dans les formations présentant un niveau de risque élevé.

Les zones à risque moyen enregistrent une surface moyenne/feu de 90,26 ha, suivi par les zones à risque faible avec 71,31 ha.

Les zones à risque modéré et très élevé, présentent les surfaces les plus petite avec respectivement 21,41 ha et 9,14 ha. Cette faible surface s'explique par le fait que ces deux zones à risque ne représentent, respectivement que 7,5% et 7,2% des massifs forestiers de la wilaya de Jijel.

Il existe d'autres facteurs qui contrôlent la répartition des incendies tels que le climat (température, humidité, le vent), les pentes, le relief, l'exposition, l'action anthropique.

Pour une bonne validation des résultats de la carte de risque de combustibilité il est nécessité de disposer des bilans des surfaces brûlées s'étalant sur au moins une dizaine d'années, voire plus. Cependant, la validation de nos résultats avec une seule année, celle de 2020, reste satisfaisante.

Conclusion

Conclusion

La télédétection et les SIG peuvent être des outils très complémentaires avec les méthodes conventionnelles utilisées dans la prévention et la gestion des feux de forêt. Ces technologies sont d'autant plus utiles lorsqu'on dispose d'une connaissance détaillée du risque, la fréquence attendue, le caractère, et l'intensité des événements dans une région. Les images satellitaires donnent une vue globale et fournissent des informations très utiles sur l'environnement.

Le calcul et la cartographie de l'indice de combustibilité au niveau des forêts de la wilaya de Jijel à l'aide de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques, ont permis d'établir une carte de risque de combustibilité des forêts. La carte du risque de combustibilité elle-même, n'est pas un moyen de lutte proprement dit, mais elle permettra aux gestionnaires de mettre en place un dispositif de lutte adéquat d'une part, et d'acquérir des équipements appropriés permettant une lutte plus efficace d'autre part.

L'utilisation de l'indice de végétation NDVI a été déterminante dans l'estimation du biovolume végétal indispensable pour le calcul de l'indice de combustibilité. Cette technique permet non seulement, d'économiser du temps et de l'argent, mais aussi de créer une carte de risque de combustibilité chaque année avant la saison des feux de forêt, car le biovolume végétal peut varier d'une année à une autre. Cela permet d'avoir des cartes récentes et à jours pour une meilleure gestion des feux de forêt.

La carte résultante des différents croisements issus du modèle appliqué a été visualisée et validée à l'aide des bilans des feux de forêt déclarés durant l'été 2020.

L'application de la géomatique pour évaluer le risque de combustibilité des forêts constitue un outil efficace pour définir les priorités d'implantation ou d'entretien des infrastructures de lutte et d'aménagement des terrains exposés au risque de propagation du feu.

Parmi les résultats d'analyse de cette étude nous avons relevé qu'au niveau de la wilaya de Jijel, les forêts de chêne liège, chêne vert et les maquis arboré (chêne liège et pin maritime) sont ceux qui présentent le plus grand risque de combustibilité en cas d'incendie.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

Alexandrian D.,1982 - Estimation de l'inflammabilité et de la combustibilité de la végétation. CEMAGREF, BI n° 228, pp. 31-39.

Arfa A.M.T., 2019 - Application du SIG et de la télédétection pour un outil cartographique d'aide à la gestion des feux de forêts dans la wilaya d'El Tarf. Université des frères Mentouri Constantine 1. Algérie. 190p.

BNEDER, 2008 - (Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural) Rapport sur la caractérisation des formations forestières de la wilaya de Jijel. Conservation de Jijel. 30p.

Boussalem F. et Saad H.,2019 - Cartographie des habitats de la forêt d'El Ancer (W. Jijel) par analyse multi spectrale. 16p.

Ferkhi I., 2012 - Diagnostic écologique du reboisement dans la région de Jijel. Mémoire Master Ecologie et environnement. Université Mentouri Constantine. Algérie. 36p.

Hamdi R. et Boulhendi A., 2020 - Estimation par télédétection du biovolume végétal pour le calcul de l'indice de combustibilité : comparaison entre les différents indices de végétation, cas de la forêt de Chettabah (Constantine). Mémoire Master Protection des écosystèmes. Université des frères Mentouri Constantine 1. Algérie. 36p.

Kahila M. et Boumelit S., 2012 - Contribution à l'étude des incendies de forêts au niveau de la Circonscription de Texenna (wilaya de Jijel). 45p.

Kazakis G. et Ghosn D., 2008 - Le problème des incendies de forêts en Méditerranée. La Lettre de veille du CIHEAM- N°6.

Madoui A., 2002 - Les incendies de forêts en Algérie. Historique, bilan et analyse. Forêt méditerranéenne. T. XXII, (1).

Mayache M., 2018 - Ecologie et Biologie de la Sittelle Kabyle, *Sitta ledanti* dans quelques forêts humides de la région Jijel (Algérie). pp 14-25.

Nacer A. et Bendjamaa M., 2013 – Evaluation des risques d’incendie de forêts à partir des données de télédétection (cas de la forêt de Settara, Wilaya de Jijel). Université de Jijel. 48p.

Ouamara A., 2013 - Etude et mise en œuvre des systèmes d’information géographique. Mémoire de master. Université Abderrahmane Mira. Bejaia. 58 p.

Rouibah A., Fennineche H. et Herikeche M., 2018 - Contribution à l’étude de quelques facteurs causent le dépérissement du chêne liège (*Quercus Suber L.*) dans le littoral ouest de Jijel (Algérie). agriculture and forestry journal. Université de Jijel. 9p.

Sellers P. J., 1985 – Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration. International Journal of Remote Sensing 6: 8. pp. 1335-1372.

Tatar H., 2008 - La foret : Une chance pour le milieu rural jjiellien. Sciences& Technologie D–N°28, Université Mentouri Constantine. Algérie. pp 39-44.

Trabaud L., 1971 - Les combustibles végétaux dans le département de l’Hérault. Montpellier. Centre national de la recherche scientifique. Centre d’études phytosociologiques et écologiques.78 p.

Trabaud L., 1980 - Impact biologique et écologique des feux de végétation sur l’organisation, la structure et l’évolution de la végétation des zones de garrigues du bas-Languedoc. Thèse Doc. Etat Univ. Sc. Techn. Languedoc, Montpellier, 288 p.

Zehani N. et Boulbekliz S., 2014 - Contribution au diagnostic écologique des projets de reboisement de Chêne-liège au niveau de la circonscription des forêts de Taher (Wilaya de Jijel). Université de Jijel. 81p.

Résumés

Résumé

Dans cette étude, on vise à explorer l'apport de l'imagerie spatiale pour estimer et cartographier le risque de combustibilité des formations forestières au niveau de la wilaya de Jijel située au nord-est de l'Algérie. La réalisation de cet objectif permet d'améliorer l'aménagement des zones les plus à risque et de cibler les ouvrages de protection pour être en mesure de lutter convenablement contre les incendies de forêt. Les résultats obtenus à partir de l'analyse et du traitement de l'image fournie par le satellite Sentinel-2, prise le 16/05/2021, a permis d'obtenir une carte de risque de combustibilité. Cette approche repose sur l'analyse des valeurs de l'indice de végétation NDVI afin de les convertir en biovolume végétal. Les valeurs de l'indice de combustibilité IC sont calculées en fonction du biovolume végétal estimé. Enfin les résultats du calcul de l'indice de combustibilité sont classés selon le degré de risque en cinq classes : faible, modéré, moyen, élevé et très élevé.

Mots clés : Télédétection, SIG, biovolume, combustibilité, NDVI.

Abstract

This study, aims as to explore the contribution of spatial imagery to estimate and map the risk of combustibility of forest formations in the province of Jijel located in northeastern Algeria. Achieving this objective makes it possible to improve the development of the most areas at risk and to target protective structures in order to be able to adequately fight forest fires. The results obtained from the analysis and processing of the image provided by the Sentinel-2 satellite, taken on 05/16/2021, made it possible to obtain a combustibility risk map. This approach is based on the NDVI values of the vegetation index in order to convert them into plant bio-volume. The IC combustibility index values are calculated based on the estimated plant bio-volume. Finally, the results of calculating the combustibility index are classified according to the degree of risk into five classes: low, moderate, medium, high and very high.

Keywords: Remote sensing, GIS, bio-volume, combustibility, NDVI.

الملخص

تهدف هذه الدراسة الى الكشف عن مساهمة صور الأقمار الصناعية في تقدير و رسم خريطة مخاطر احتراق الغابات في ولاية جيجل الواقعة في شمال شرق الجزائر. إن تحقيق هذا الهدف يجعل من الممكن تحسين تطوير المناطق الأكثر عرضة للخطر من أجل التمكن من مكافحة حرائق الغابات بشكل صحيح. النتائج التي تم الحصول عليها من تحليل و معالجة صورة القمر الصناعي Sentinel-2، والتي تم التقاطها في 2021/05/16، جعلت من الممكن الحصول على خريطة مخاطر الاحتراق. يعتمد هذا النهج على تحليل قيم مؤشر الغطاء النباتي NDVI من أجل تحويلها إلى حجم حيوي للنبات. يتم حساب قيم مؤشر الاحتراق IC بناءً على الحجم الحيوي للنبات المقدّر. أخيرًا، تم تصنيف نتائج حساب مؤشر الاحتراق وفقًا لدرجة الخطر إلى خمس فئات: منخفض، معتدل، متوسط، عالي و عالي جدًا.

الكلمات المفتاحية: الاستشعار عن بعد، نظم المعلومات الجغرافية، الحجم الحيوي، القابلية للاحتراق. NDVI

**Présenté par : BENAMIRAMIRA Abdelghani Mohamed El Amine
BOUDIAF Aymen**

Année universitaire : 2020/2021

**INTITULE : Estimation et cartographie de l'indice de combustibilité de la
végétation forestière : cas de la wilaya de Jijel**

**Mémoire de fin de cycle pour l'obtention du diplôme de
Master en Protection des Ecosystèmes.**

Résumé

Dans cette étude, on vise à explorer l'apport de l'imagerie spatiale pour estimer et cartographier le risque de combustibilité des formations forestières au niveau de la wilaya de Jijel située au nord-est de l'Algérie. La réalisation de cet objectif permet d'améliorer l'aménagement des zones les plus à risque et de cibler les ouvrages de protection pour être en mesure de lutter convenablement contre les incendies de forêt. Les résultats obtenus à partir de l'analyse et du traitement de l'image fournie par le satellite Sentinel-2, prise le 16/05/2021, a permis d'obtenir une carte de risque de combustibilité. Cette approche repose sur l'analyse des valeurs de l'indice de végétation NDVI afin de les convertir en biovolume végétal. Les valeurs de l'indice de combustibilité IC sont calculées en fonction du biovolume végétal estimé. Enfin les résultats du calcul de l'indice de combustibilité sont classés selon le degré de risque en cinq classes : faible, modéré, moyen, élevé et très élevé.

Mots clés : Télédétection, SIG, biovolume, combustibilité, NDVI.

Laboratoire de Recherche :

Développement et Valorisation des Ressources Phytogénétiques

Jury d'évaluation

Président du jury : BENDERRADJI Mohamed El Habib Prof - UFM Constantine 1

Rapporteur : ARFA Azzedine Mohamed Touffik MCB - UFM Constantine 1

Examineurs : GANA Mohamed MCB - UFM-Constantine 1

Date de soutenance : 6 Juillet 2021