

الجمهورية الديمقراطية
الشعبية
REpublique ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبو بكر بلكايد –
تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Architecture

Spécialité : Géomatique et Gestion de Foncier

Par : Abdelaziz Hicham Abdelhak et Bouazid Abdenour

Sujet

Application des SIG et de la télédétection pour la cartographie et la gestion du risque d'incendie des forêts en Algérie (cas d'étude wilaya de Sétif)

Soutenu publiquement, le 23 / 06 / 2026 , devant le jury composé de :

M/ KHALDOUN Abderrahim	INJ	Université de Tlemcen	Président
M/ MELOUKA Ismail	MAA	Université de Tlemcen	Examineur
Mme / BENZNINE Faila	MCB	Université de Tlemcen	Encadrant
Mme / SELKA Imene	DR	Université de Tlemcen	CO-Encadrant

Année universitaire : 2025/2026

Remerciements

Nous tenons à remercier nos encadreurs de mémoire, madame Benzenine Faila et madame Selka Imene, pour leur encadrement rigoureux, leurs conseils techniques avisés et sa disponibilité tout au long de ce projet de recherche. Sa guidance a été déterminante dans l'aboutissement de ce travail.

Nos remerciements vont également à l'ensemble du corps enseignant du département d'architecture université de Tlemcen, pour la qualité de la formation dispensée et les compétences acquises au cours de ce période.

Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance envers nos familles et nos proches respectifs, dont le soutien indéfectible a été une source de motivation constante tout au long de ce période.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Nous dédions ce travail :

À nos chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours académique.

À nos frères et sœurs, pour leur présence et leurs encouragements constants.

À nos enseignants, qui nous ont transmis le savoir et la passion

À tous nos amis et camarades de promotion, pour les moments partagés et les souvenirs inoubliables.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'application des SIG (Systèmes d'Information Géographique) et de la télédétection pour la cartographie et la gestion du risque d'incendie de forêt dans la wilaya de Sétif. Le travail s'appuie sur l'analyse de données satellitaires à travers des indices de végétation tels que le NDVI, le SAVI et le NBR, traités via Google Earth Engine, afin de détecter et de cartographier les zones brûlées entre 2000 et 2020. Des méthodes d'analyse spatiale avancées — dont la classification supervisée par Random Forest, la fonction K de Ripley et l'estimation par densité de noyau (Kernel Density Estimation) — ont été appliquées pour étudier la distribution spatiale des incendies, leur fréquence et les superficies touchées, en tenant compte des facteurs climatiques, topographiques et végétaux qui influencent la propagation des feux.

Mots clés : Incendie de forêt , Systèmes d'Information Géographique (SIG), télédétection

ملخص

تركز هذه الأطروحة على تطبيق نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد لرسم خرائط مخاطر حرائق الغابات وإدارتها في ولاية سطيف. يعتمد العمل على تحليل بيانات الأقمار الصناعية من خلال مؤشرات الغطاء النباتي، التي تمت معالجتها عبر محرك جوجل إيرث، للكشف عن المناطق المحترقة ورسم خرائطها بين عامي 2000 و2020. وقد طُبقت أساليب تحليل مكاني متقدمة - بما في ذلك التصنيف الخاضع للإشراف بواسطة الغابات العشوائية، ودالة ريبلي، وتقدير كثافة النواة - لدراسة التوزيع المكاني للحرائق، وتواترها، والمناطق المتضررة، مع مراعاة العوامل المناخية والطبوغرافية والنباتية التي تؤثر على انتشار الحرائق.

الكلمات المفتاحية: حرائق الغابات، نظم المعلومات الجغرافية، الاستشعار عن بعد

Abstract

This thesis focuses on the application of GIS (Geographic Information Systems) and remote sensing for mapping and managing forest fire risk in the wilaya of Sétif. The work relies on the analysis of satellite data using vegetation indices such as NDVI, SAVI, and NBR, processed via Google Earth Engine, to detect and map burned areas between 2000 and 2020. Advanced spatial analysis methods—including classification supervised by Random Forest, Ripley's K function, and kernel density estimation—were applied to study the spatial distribution of fires, their frequency, and the areas affected, taking into account the climatic, topographic, and vegetation factors that influence fire spread.

Keywords: Forest fires, Geographic Information Systems (GIS), Remote Sensing

Sommaire

CHAPITRE 1 : CADRE THEORIQUE ET BIBLIOGRAPHIQUE	1
1-Introduction	2
2-La Répartition Des Foret	3
3-Cumul des superficies incendiées de foyers.....	5
4-Les incendies de forêts — aspects généraux.....	6
5-Définition et facteurs influençant la propagation des incendies des forêts	6
5-1.Définition des incendies des forêts	6
5-2. Facteurs influençant la propagation des incendies des forêts	7
5-3.Combustibles végétaux	8
5-4.Facteurs topographie	9
5-4-1.L'inclinaison de la pente	9
5-4-2.Exposition des pentes	10
5-4-3.Elévation du terrain	11
5-5.Facteurs (conditions) climatiques	11
5-5-1. L'humidité relative.....	11
5-5-2.Vitesse et direction du vent	12
5-5-3.Précipitations	12
5-5-4.Température	12
6-Différents types de feux de forêts	13
6-1.Les feux de profondeur (souterrain).....	13
6-2.Feux de surface	14
6-3.Feux de cime (couronne)	14
6-4.Feux avec braises (couvants)	15
7-Apport Sig ET Télédétection	16
7-1.Système d'information géographique (SIG).....	16
7-1-1. Définition SIG.....	16
7-1-2. Principales fonctions d'un SIG	16
7-1-3.Formes de visualisation des données spatiales	17
7-1-4.Domaines d'application de SIG	18
7-2.La Télédétection.....	19
7-2-1.Définition.....	19
7-2-2.Les étapes fondamentales du processus de la télédétection	20
7-2-3.Domaines d'application de la télédétection	21
8-Conclusion.....	22
CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	23
1-Introduction.....	24

2-Situation géographique et administrative	25
3-Milieu physique	26
3-1. Relief	26
3-1-1.La Zone Montagneuse.....	26
3-1-2.Les Hautes Pleines	26
3-1-3.La Frange Semi-Aride	26
3-2.Climat.....	30
3-3. Pédologie.....	31
3-4.Hydrologie	31
4-Milieu forestier	32
4-1.Massifs forestiers.....	33
4-1-1.Massifs forestiers des BABORS.....	33
4-1-2.Massifs forestiers des BIBANS	34
4-1-3.Massifs forestiers du HODNA	34
4-2.Principales Essences Forestières	36
5-Conclusion.....	37
CHAPITRE 3 :MATERIELS ET METHODES	38
1-Introduction.....	39
2-La méthodologie	39
3-Détection et cartographie des zones brûlées	41
3-1.Définition des variables initiales.....	44
3-1-1.calcul NDVI et SAVI et NBR DE feux de forêts de SETIF (2014 ET 2020)	45
3-2.Création des images composites	46
3-3.Classification supervisée des zones brûlées (Random Forest Classifier)	48
3-4.Évaluation visuelle des périmètres de feux.....	49
3-5.Géotraitement des périmètres de feux.....	50
4-Analyse spatiale des feux de forêts	50
4-1.Analyse d'Agrégat Spatial Multi-Distances (fonction K de Ripley).....	51
4-2.Estimation de la densité de noyau (Kernel Density Estimation)	52
5-conclusion	53
CHAPITRE 4 : Résultats et Discussions.....	54
1-Introduction.....	55
2-Resultats.....	56
2-1.NDVI et SAVI (2000-2020)	56
2-2.Étude comparative NDVI–SAVI	59
2-2-1.Différences principales entre DNDVI et DSAVI	59
2-2-2 .Application aux zones brûlées	60
2-2-3.résultat de comparaison	60

2-3.Détection et cartographie des zones brûlées	60
2-3-1.Configuration spatiale des périmètres de feux	60
2-3-2.Distribution spatiale de la fréquence des feux	62
2-3-3.Distribution spatiale des superficies parcourues par le feu	63
2-4.Analyse spatiale des feux de forêts	66
2-4-1.Analyse d'Agrégat Spatial Multi-Distances (fonction K de Ripley)	66
2-4-2.Estimation de la densité de noyau (Kernel Density Estimation)	68
3-Discussion	71
3-1.configuration spatiale des périmètres de feux.....	71
3-2.Distribution spatiales de la fréquence des feux.....	71
3-3.Distribution spatiales des superficies parcourues par le feu	72
4-conclusion	73

Liste des figures

Figure 1-1 : Réparation des forêts en Algérie (Direction General des forets 2018).....	3
Figure 1-2 : Cumul des superficies incendiées de foyers durant la période entre 2000-2020 (Direction Générale des Forêts 2020).....	5
Figure 1-3 : Le triangle du feu et les composants nécessaires pour que les réactions d'allumage et combustion ont lieu	7
Figure 1-4 : Le triangle du comportement du feu et ses variables d'influence sur le degré d'intensité.....	8
Figure 1-5 : Effet mécanique de la pente sur le comportement du feu (Arfa, 2008).....	9
Figure 1-6 : Courbes de température en fonction de l'exposition des pentes (Arfa, 2008) ..	10
Figure 1-7 : Types de feux de forêts selon (Margerit, 1998).....	13
Figure 1-8 : Feux de profondeur (site 01).....	13
Figure 1-9 : Feux de surface (site 01).....	14
Figure 1-10 : Feux de cime (site 01).....	14
Figure 1-11 : Feux avec braises (site 02).....	15
Figure 1-12 : Feux avec braises (site 03).....	15
Figure 1-13 : Les formes (modes) de visualisation des données spatiales (Site 04)	17
Figure 1-14 : les sept étapes de la télédétection (Bul 2008).....	20
Figure 2-1 : Localisation géographique de la wilaya de Sétif	25
Figure 2-2 : Carte morphologique de la wilaya de Sétif	27
Figure 2-3 : Carte Relief de Setif (2020).....	29
Figure 2-4 : Carte des pluies moyennes annuelles de la wilaya de Sétif.....	30
Figure 2-5 : Domaine Forestier National (wilaya de Sétif).....	32

Figure 2-6 : Forêts domaniales de la wilaya de Sétif (Direction Générale des Forêts).....	35
Figure 2-7 : Répartition des principales essences forestières de la wilaya de Sétif	36
Figure 3-1 : Organigramme de la méthodologie	40
Figure 3-2 : MAX NDVI SETIF 2014 GOOGLE EARTH ENGINE (GEE) site05.....	42
Figure 3-3 : MAX NBR SETIF 2014, GOOGLE EARTH ENGINE (GEE) site05	43
Figure 3-4 : Détection des périmètres de feux de forêts.....	47
Figure 3-5 : Classification supervisée des zones brûlées (Random Forest Classifier).....	48
Figure 3-6 : Périmètre de feux Sétif (BOUTALEB 2014) Sur google earth engine (GEE) site05.....	49
Figure 3-7 : Fonction K de Ripley.....	51
Figure 3-8 : Fonctionnement de l'outil densité de noyau	52
Figure 4-1 : Les cartes (NDVI et SAVI) de la WILAYA DE SETIF (2000-2020)	57
Figure 4-2 : Analyse comparative des indices de végétation NDVI et SAVI à partir des images Landsat dans la wilaya de Sétif (2014)	59
Figure 4-3 : Périmètres de feux de forêts historiques de Sétif (2000-2020).....	60
Figure 4-4 : Périmètres de feux de forêts historiques au DFN de Sétif (2000-2020).....	61
Figure 4-5 : Fréquence des feux de forêts à Sétif (2000 – 2020)	62
Figure 4-6 : Nombre de feux et superficie brûlée par classes de feux.....	63
Figure 4-7 : Distribution spatiale des classes de feux de forêts à Sétif (2000 – 2020).....	65
Figure 4-8 : Résultat de la fonction K de Ripley.....	67
Figure 4-9 : Densité spatiale des feux de forêts à Sétif (2000 – 2020)	68
Figure 4-10 : Densité spatiale des feux de forêts pondérée à Sétif (2000 – 2020).....	69
Figure 4-11 : Grands feux de forêts (> 500 ha) de Boutaleb, Sétif	70

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Influence du taux d'humidité sur l'inflammabilité (Margerit, 1998).....	11
Tableau 2-1 : Principales espèces forestières et leurs superficies dans la wilaya de Sétif.....	36
Tableau 3-1 : Bandes spectrales sélectionnées pour la détection des zones brûlées	44
Tableau 3-2 : Indices bi-spectraux pour la détection des zones brûlées	44
Tableau 4-1 : Analyse comparative des indices DNDVI et DSAVI dans l'évaluation des zones brûlées.....	59
Tableau 4-2 : Nombre de feux, superficie brûlée et leurs pourcentages par classe de feux (source : auteurs).....	63
Tableau 4-3 : Résultats de l'analyse d'agrégat spatial multi-distances	66

LISTE DES ABREVIATIONS

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

BAMS: Burned Area Mapping Software

CCI: Climate Change Initiative

CFS : Conservation des Forêts de Sétif

DFN : domaine forestier national

Envisat : Environmental Satellite

ESA: European Space Agency

ESRI: Environmental Systems Research Institute

ETM: Enhanced Thematic Mapper Plus

GEE: Google Earth Engine

IFN: Inventaire Forestier National

MERIS: Medium Resolution Imaging Spectrometer

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NBR: Normalized Burn Ratio

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NIR: Near-InfraRed

OLI: Operational Land Imager

SWIR: Short-Wave InfraRed

TM: Thematic Mapper

UTM: Universal Transverse Mercator

WGS : World Geodetic System

Introduction générale

Les forêts sont déterminées comme un écosystème bien consolidé, caractérisé par une grande diversité biologique, et constituent une ressource diversifiée en fournissant des matières premières. Elles assurent le maintien de la biodiversité et la protection de la planète face aux changements climatiques. De plus, elles contribuent à la préservation des ressources terrestres et aquatiques et améliorent la qualité de l'air. **(Lilioriente M, 1996).**

L'Algérie est très touchée par les feux de forêt. Durant la période 1985-2010, elle a enregistré un cumul de 42 555 feux, qui ont parcouru une superficie forestière totale de 910 640 ha (soit 22,12 % de la surface forestière totale, avec un taux de 0,85 % par année). Ceci correspond à une moyenne annuelle de 1 637 feux et 35 025 ha de surface parcourue **(Meddour-Sahar et Derridj, 2012).**

Les statistiques révèlent une situation assez grave pour un pays menacé par la désertification, mais presque inconnu dans la littérature spécialisée, qui a tendance à limiter la problématique des feux en Méditerranée au « fire club » (les cinq États membres méridionaux de l'Union européenne). **(Vélez, 1999)**

Cependant, malgré les enjeux liés à la gestion du risque « feu de forêt », ses origines et ses causes sont peu connues et les politiques de gestion se limitent en Algérie à la phase d'extinction des incendies, plutôt que de s'orienter davantage vers un modèle équilibré d'efforts d'extinction et de prévention **(Meddour Sahar et Bouisset, 2013).**

En Algérie, les causes des incendies de forêt ont fait l'objet d'attention dans le passé par certains auteurs (Gravius, 1866 ; Thibault, 1866 ; Marc, 1916 ; IIA, 1933 ; Boudy, 1952) qui montrent que les origines du feu dépendent directement des usages agricoles et pastoraux des populations. **(Boudy, 1952)**

La wilaya de Sétif est également touchée par les incendies de forêt, notamment durant la période estivale marquée par des températures élevées et la sécheresse. Ces incendies provoquent la destruction du couvert végétal, menacent la biodiversité et favorisent la dégradation des sols. Leur apparition est liée à des facteurs climatiques et aux activités humaines, ce qui souligne l'importance de renforcer les mesures de prévention et de protection des espaces forestiers

Les mots clés : les forêts en Algérie, Incendies de forêt

CHAPITRE 1 : CADRE THEORIQUE ET BIBLIOGRAPHIQUE

1- Introduction

Dans ce cadre, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection se révèlent être des technologies qui se complètent, facilitant la collecte, le traitement et l'analyse précise des données spatiales. Leur emploi ouvre la voie à des opportunités significatives pour appréhender les dynamiques environnementales, cartographier les zones à risque et soutenir le processus décisionnel. Par conséquent, l'objectif de ce chapitre est d'exposer les notions essentielles relatives aux SIG et à la télédétection, tout en explorant leurs principaux champs d'application dans la gestion des incendies de forêt.

Dans ce cadre Les SIG et la télédétection sont aujourd'hui deux outils qui, utilisés ensemble, changent véritablement la façon dont on aborde la gestion des risques naturels. Leur force réside dans leur complémentarité : là où l'un collecte et organise l'information spatiale, l'autre la capte depuis le ciel avec une précision remarquable. Ensemble, ils permettent non seulement de mieux comprendre comment évolue notre environnement, mais aussi d'identifier les zones vulnérables et d'aider les décideurs à agir de manière plus éclairée et plus rapide. C'est dans cette perspective que ce chapitre se propose de présenter ces deux technologies, en explorant à la fois leurs fondements et leurs applications concrètes dans un domaine aussi sensible que la gestion des incendies de forêt

2- La Répartition Des Foret

Les forêts dans le monde sont réparties de manière inégale selon les conditions climatiques. On distingue principalement les forêts tropicales, situées dans les régions chaudes et humides comme l'Amazonie et le bassin du Congo, les forêts tempérées en Europe et en Amérique du Nord, et les forêts boréales au nord du globe. En Afrique, les forêts se concentrent surtout dans la zone équatoriale, avec une forte présence dans le bassin du Congo, tandis que d'autres régions présentent des formations plus clairsemées. En Algérie, les forêts sont principalement localisées dans le nord du pays, où le climat méditerranéen favorise leur développement, alors qu'elles deviennent rares vers le sud en raison de l'aridité du climat saharien.

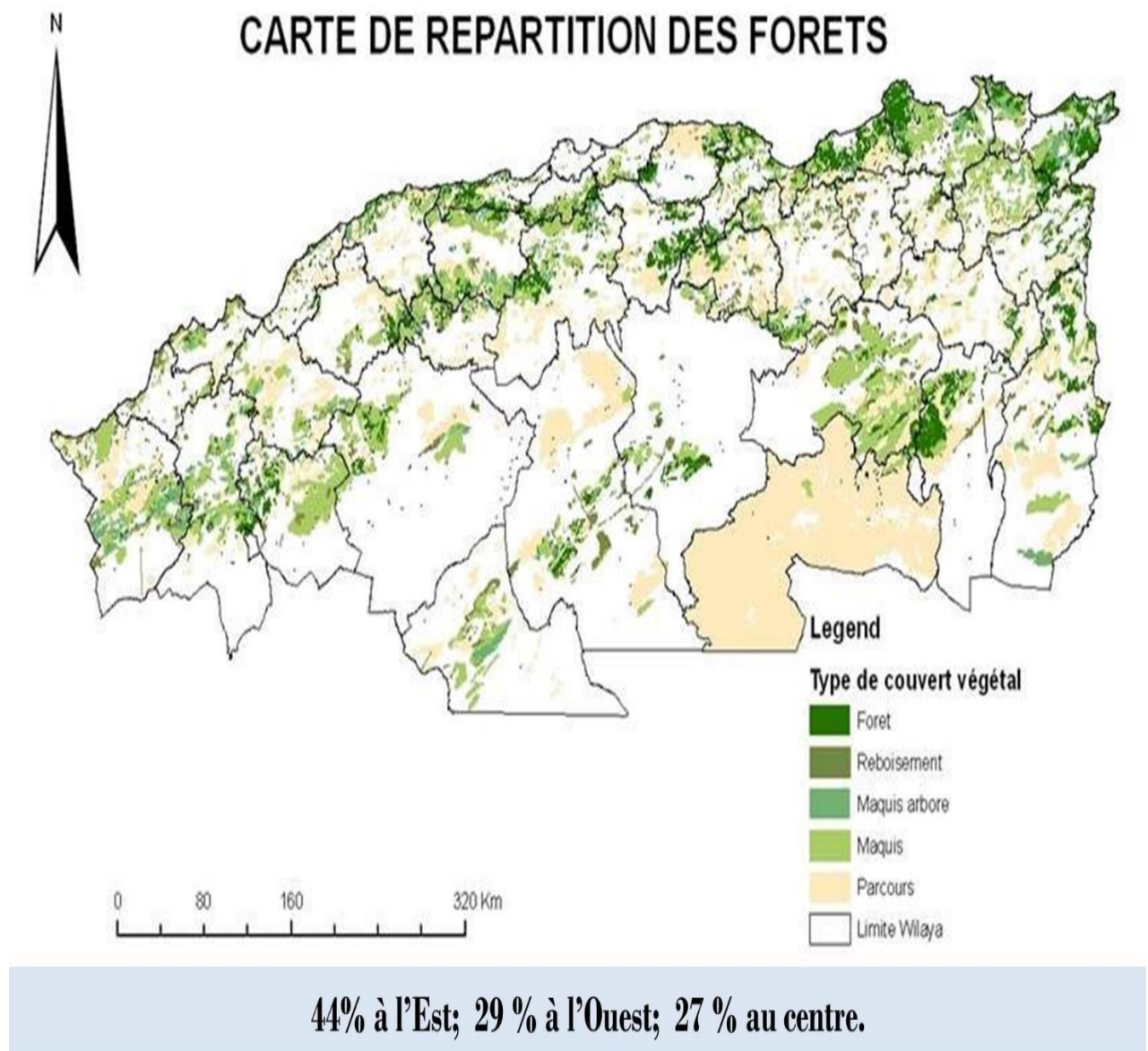


Figure 1-1 : Répartition des forêts en Algérie (Direction General des forets 2018).

Cette carte illustre la distribution des forêts en Algérie. Pour une compréhension facile, les zones colorées en vert représentent les divers types de couverture végétale, tels que les forêts, le maquis et les reboisements. On constate que la majorité des forêts se situe principalement dans la partie nord du pays, où les conditions climatiques sont plus humides. En revanche, le sud, qui correspond au Sahara, présente une très faible présence de végétation forestière en raison de son climat aride. En ce qui concerne la répartition régionale, 44 % des forêts se trouvent à l'Est, ce qui en fait la zone la plus boisée grâce à un climat plus humide. À l'Ouest, 29 % des forêts sont présentes, bien qu'elles soient moins denses, elles restent néanmoins forestières. Enfin, le centre du pays abrite 27 % des forêts, offrant une répartition intermédiaire.

3- Cumul des superficies incendiées de foyers

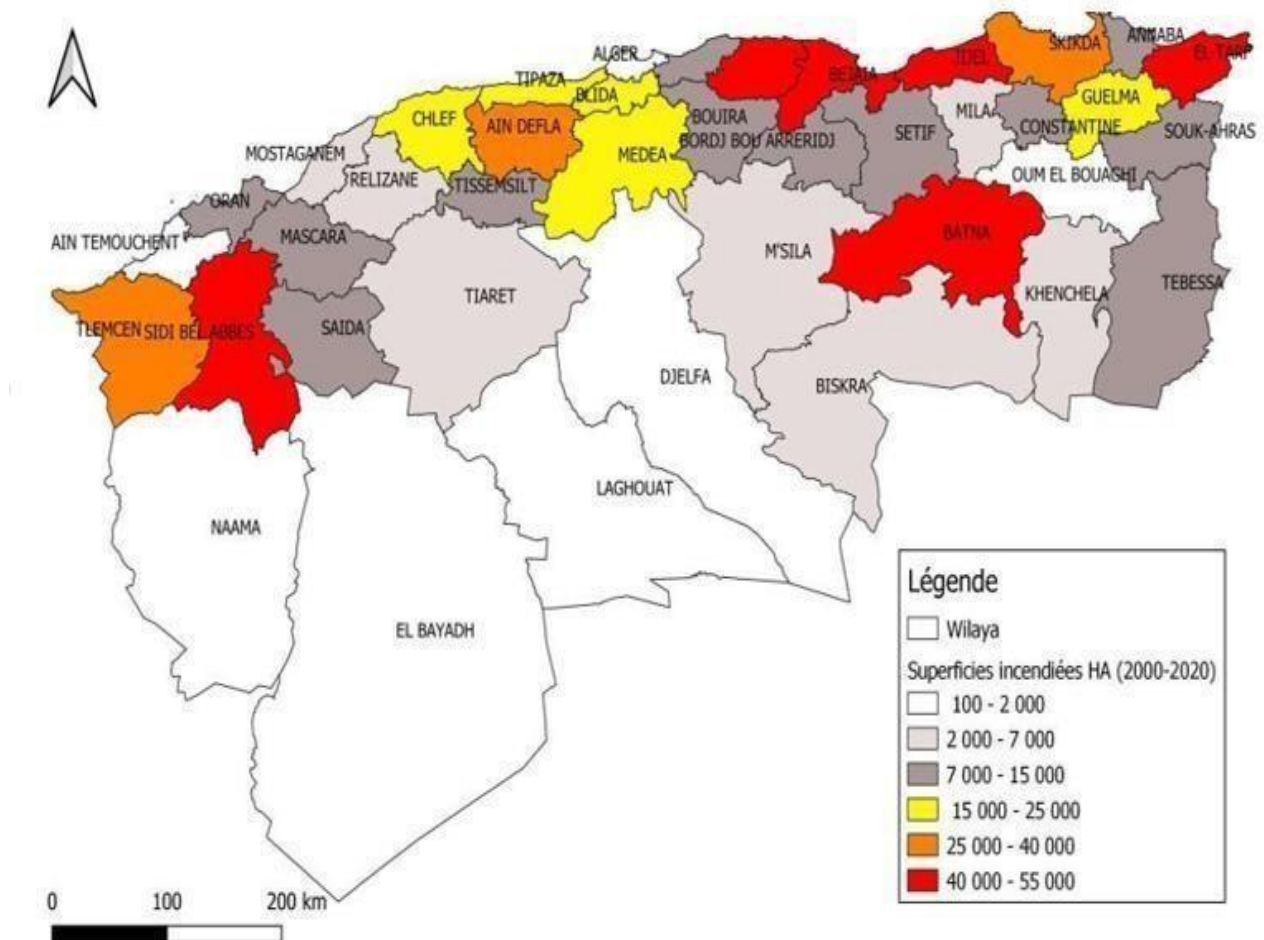


Figure 1-2 : Cumul des superficies incendiées de foyers durant la période entre 2000-2020
(Direction Générale des Forêts 2020)

Cette carte illustre la distribution des surfaces brûlées en Algérie de 2000 à 2020. On observe que les incendies se concentrent principalement dans les régions nord, tant à l'est qu'à l'ouest, où la densité de la couverture forestière est significative, tandis que le sud de la région est relativement épargné. Elle souligne les zones les plus vulnérables aux feux de forêt et constitue un outil précieux pour la gestion ainsi que la prévention des risques, en s'appuyant sur les systèmes d'information géographique et la télédétection.

4- Les incendies de forêts — aspects généraux

Les incendies provoquent la destruction d'environ 10 millions d'hectares de forêts proprement dites à travers le monde et lorsque les incendies se répètent dans les mêmes endroits avec une courte périodicité, ils entraînent une perte de la biodiversité et la destruction des biotopes (**SACQUET, 2006**).

Comme par exemple en Méditerranée, il s'agit même du risque naturel le plus important en forêt, forêts qui peuvent être affectées à long terme voire de façon irréversible. En dépit des efforts considérables déployés dans des actions de prévention et d'extinction, les grands incendies de forêt restent des événements récurrents qui ont souvent des interactions avec les infrastructures et les habitations, concernant ainsi de larges franges de la population. Quelles sont les raisons ? Les incendies de forêt sont-ils incontrôlables ?

5- Définition et facteurs influençant la propagation des incendies des forêts

5-1.Définition des incendies des forêts

Trabaud (1992) définit l'incendie comme « une combustion qui se développe sans contrôle dans l'espace et dans le temps ».

L'incendie de forêt, en particulier, se nourrit de tous les combustibles disponibles dans son environnement et se propage ainsi jusqu'à leur épuisement. Cette caractéristique explique la rapidité et l'ampleur des destructions causées par ce type de feu, rendant sa gestion particulièrement difficile.

Le feu résulte de la combustion de la végétation. Cette réaction chimique est provoquée par une source de chaleur d'origine naturelle ou humaine et nécessite un combustible et d'oxygène. Pour obtenir un feu, la présence de trois éléments est nécessaire : une source de chaleur, un combustible et l'oxygène. (**Plana, E. ; Font, M. ; Serra, M. ; Chauvin, S. ; Gladiné, J. 2016**)



Figure 1-3 : Le triangle du feu et les composants nécessaires pour que les réactions D'allumage et combustion ont lieu.

Par ailleurs, nous définissons l'incendie de forêt comme la propagation non contrôlée d'un feu sur l'ensemble de la végétation (arbres, broussailles, prairies et terres cultivables).

5-2. Facteurs influençant la propagation des incendies des forêts

Une fois le feu allumé, sa propagation est influencée par trois facteurs principaux : le type de combustible, la météorologie et la topographie (**Plana, E. ; Font, M. ; Serra, M. ; Chauvin, S. ; Gladiné, J. 2016**). Dans ce qui suit, nous mettons en lumière les éléments jouant un rôle essentiel dans le développement et la propagation des incendies, étroitement liés au type de combustibles végétaux, aux conditions climatiques et aux facteurs géologiques, en particulier la topographie. La compréhension de ces facteurs est fondamentale pour analyser le comportement du feu et élaborer des stratégies efficaces de prévention et de lutte contre les incendies de forêt.



Figure 1-4 : Le triangle du comportement du feu et ses variables d'influence sur le degré D'intensité.

5-3. Combustibles végétaux

Les combustibles influencent la propagation des incendies par leur nature, leur taille, leur disposition et leur quantité, mais surtout par leur composition chimique et leur teneur en humidité, qui déterminent leur inflammabilité. **(Ammari, 2011)**

- **Teneur en eau :** L'humidité influence fortement l'inflammation et la propagation des feux. L'eau contenue dans les végétaux se vaporise avant que ceux-ci n'atteignent leur température d'inflammation, augmentant la chaleur nécessaire et ralentissant la combustion. Les végétaux à faible teneur en eau s'enflamment à des températures de 260 à 450°C, tandis qu'une humidité trop élevée empêche le feu de se propager. L'inflammation n'a lieu que si la teneur en eau est inférieure à 7 %. **(Margerit, 1998)**
- **Composition chimique :** L'inflammabilité des espèces végétales dépend de leur teneur en essences volatiles et en résine. La présence de cire et de résine chez certaines espèces ralentit leur vitesse de dessèchement, ce qui retarde leur inflammation. De plus, plus un végétal est riche en minéraux, plus son pouvoir calorifique théorique est faible, et moins il est combustible. **(Colin et al., 2001)**

5-4.Facteurs topographiques

La topographie joue également un rôle majeur dans le comportement des feux de forêt, car elle influence à la fois la morphologie du feu et sa vitesse de propagation. En général, l'impact de la topographie dépend de l'inclinaison des pentes, de leur exposition ainsi que de l'élévation du terrain. Contrairement aux facteurs atmosphériques, la topographie est un élément constant, dont l'influence peut être déterminée et surtout prévue à l'avance.

5-4-1.L'inclinaison de la pente

La valeur de l'inclinaison d'un versant est proportionnellement liée à l'intensité des incendies de forêt, car elle amplifie les effets de la radiation et de la convection. (Arfa, 2008)

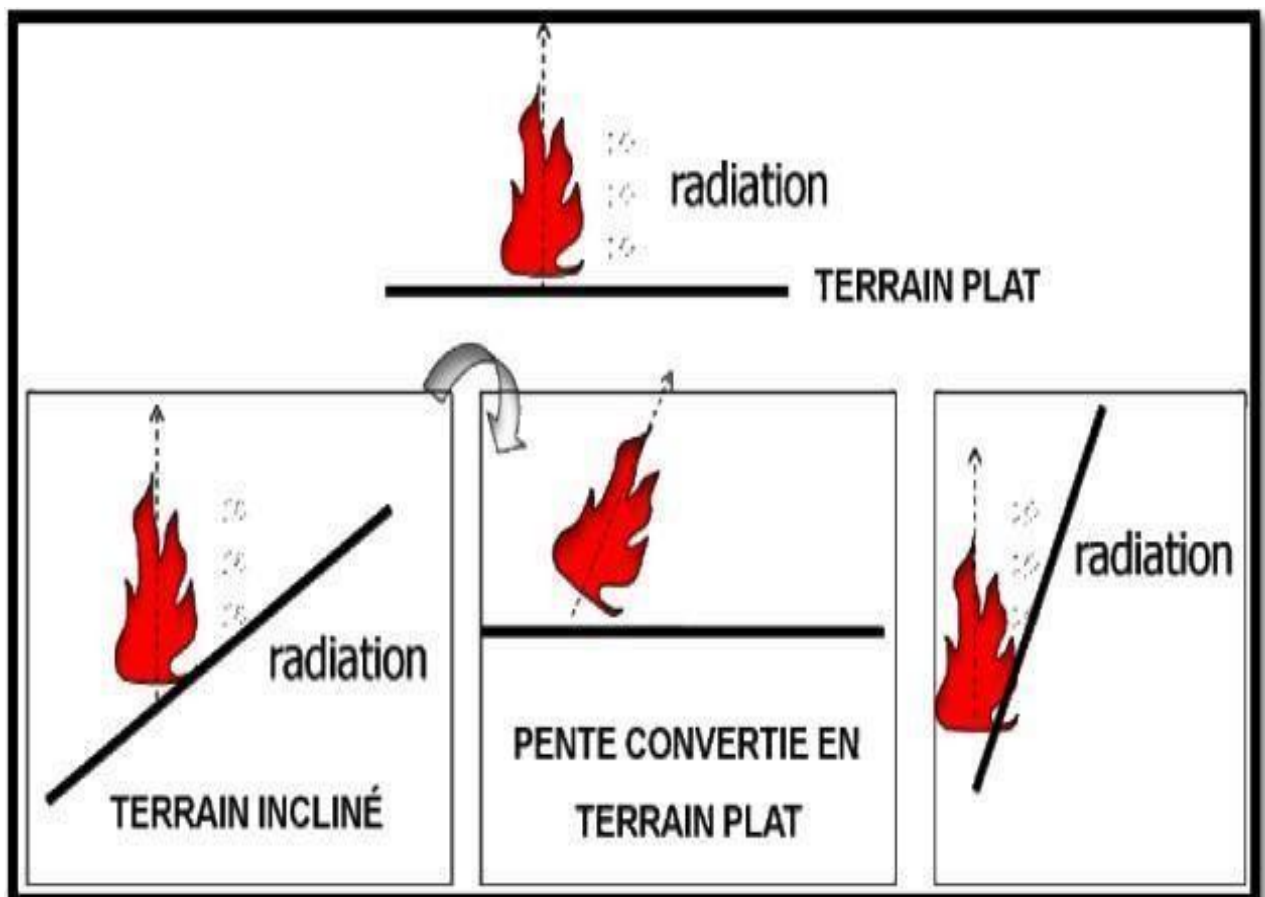


Figure 1-5 : Effet mécanique de la pente sur le comportement du feu (Arfa, 2008)

5-4-2.Exposition des pentes

L'exposition des matériaux combustibles au vent et au soleil accélère leur dessèchement. Le feu se propage plus vite sur les pentes Sud-Ouest que sur celles exposées au Nord ou à l'Est. L'intensité du rayonnement solaire, influencée par l'angle du soleil, la latitude, l'inclinaison des pentes, la nébulosité et la densité du couvert forestier, fait que la durée d'ensoleillement joue un rôle important dans la propagation des feux. (M.T.F, 1973)

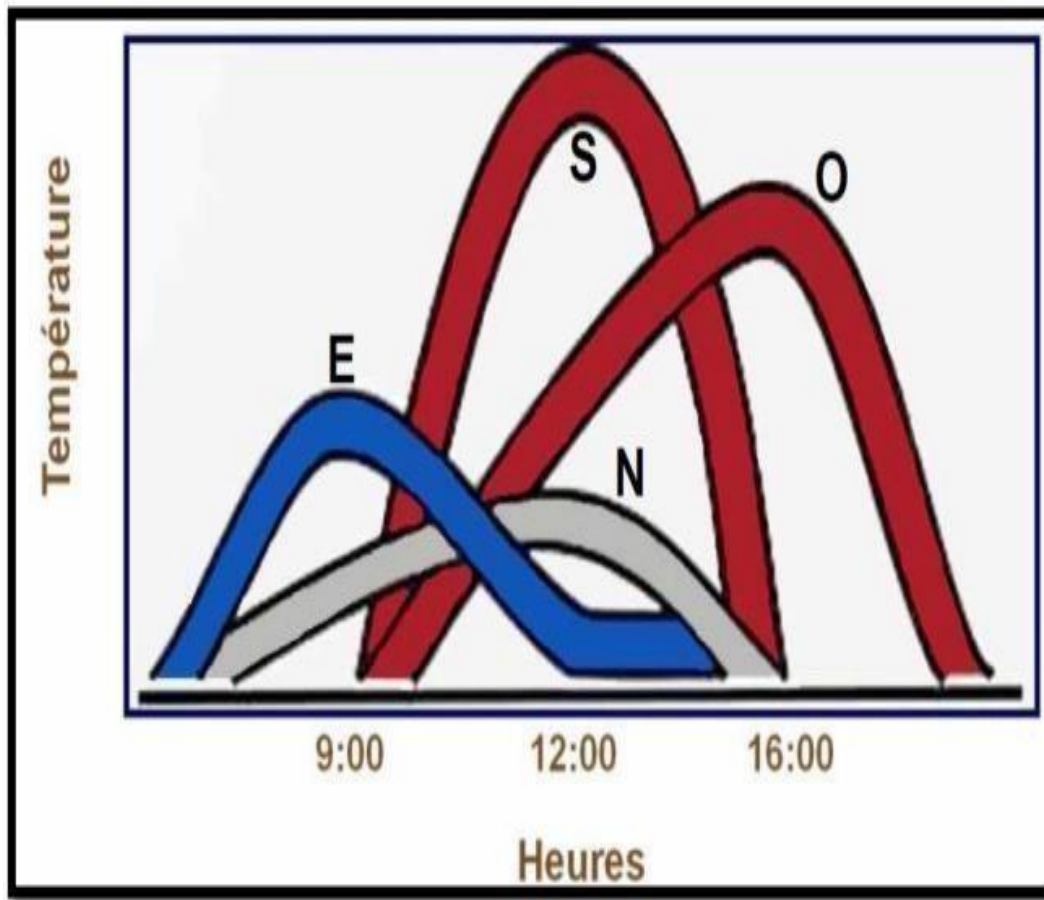


Figure 1-6 : Courbes de température en fonction de l'exposition des pentes (Arfa, 2008)

5-4-3.Elévation du terrain

L'élévation du terrain influe sur la composition de la végétation, sa teneur en humidité et son exposition aux vents. Plus le terrain est élevé, plus les combustibles sont exposés au soleil et aux vents intenses, donc plus ils sont secs et les feux brûlent alors plus rapidement. (**Arfa, 2008**).

5-5.Facteurs climatiques

5-5-1. L'humidité relative

Les modifications de la teneur en humidité relative ont un impact important sur les matériaux combustibles. Lorsque l'air est humide, les combustibles absorbent de l'eau et deviennent difficilement inflammables. À l'inverse, dans un air sec, l'évaporation de l'humidité est plus rapide, ce qui augmente l'inflammabilité des végétaux. L'état hydrique des formations végétales, en relation avec les réserves en eau du sol, constitue le principal facteur de risque pour les incendies de forêt du point de vue des facteurs climatiques (**Seguin, 1990**). Selon **Margerit (1998)**, la réciprocité entre humidité relative et inflammabilité des combustibles est déterminante dans le comportement du feu.

Tableau 1-1 : Influence du taux d'humidité sur l'inflammabilité (Margerit, 1998)

Humidité relative	Inflammabilité
>70	Peu de risque
46-70	Risque faible
26-45	Risque fort
<25	Risque très forte

5-5-2.Vitesse et direction du vent

Sans nul doute, le vent est bel et bien le facteur le plus aggravant dans un incendie de forêt. Il contribue à l'embrasement, à l'accélération, au transport et à la propagation du feu **(Frédéric, 1992)**. De plus, le vent favorise le dessèchement des combustibles et le fléchissement de la colonne de convection.

5-5-3.Précipitations

Et en particulier celles de type pluie, jouent un rôle important dans la dynamique des incendies de forêt, car elles sont plus fréquemment observées que les autres formes de précipitation. En effet, lorsque la pluviosité est régulière tout au long de l'année, le nombre d'incendies ainsi que les superficies brûlées restent relativement faibles. En revanche, si la pluviosité est irrégulière et ponctuée de périodes sèches prolongées, le nombre de feux augmente considérablement. **(Trabaud, 1970)** .

5-5-4.Température

La température de l'air varie tout au long de la journée en fonction de l'intensité de l'insolation. Elle exerce un effet soit indirect en dominant l'humidité relative de l'atmosphère et par conséquent en dominant celle des combustibles, soit direct par le réchauffement ou le refroidissement des matériaux. Autrement, plus la température ambiante est élevée, plus la température du combustible végétal mort ou vivant l'est, et moins la chaleur nécessaire à son inflammation est importante. **(Trabaud, 1989)** .

6- Différents types de feux de forêts

On peut distinguer quatre types principaux de feux de forêt, selon leur mode de propagation. Celui-ci est essentiellement déterminé par la nature et la structure de la végétation, ainsi que par les conditions climatiques qui influencent fortement l'intensité et la vitesse de propagation du feu (Margerit, 1998).



Figure 1-7:Types de feux de forêts selon (Margerit, 1998).

6-1.Les feux de profondeur (souterrain)

Ce type de feu est particulièrement dangereux, car il est plus difficile à détecter en raison de l'absence quasi totale de flammes. Il se propage lentement, principalement à travers la litière et l'humus (Megrouche, 2006). De plus, ce genre de feu représente un risque dévastateur pour les racines des arbres, pouvant compromettre la santé et la survie de la végétation à long terme.



Figure 1-8 : Feux de profondeur (site 01)

6-2. Feux de surface

Ce type de feu est très répandu et se caractérise par une propagation par rayonnement ou convection, avec une vitesse de propagation plus rapide que celle des feux de sol. Il dégage d'importantes flammes et une chaleur intense, affectant principalement la garrigue ou les landes. En général, il touche la végétation stratifiée de bas niveau, notamment la partie supérieure de la litière, la strate herbacée et les arbustes ligneux. De plus, les feux de surface peuvent entraîner l'inflammation de la cime des arbres grâce à un saut de flamme d'une branche à l'autre (Pierre-Yves & *al.*, 2001).



Figure 1-9 : Feux de surface (site 01)

6-3. Feux de cime (couronne)

Les feux de cime sont extrêmement dangereux et largement répandus. Ils se propagent à une telle vitesse qu'ils deviennent très difficiles à maîtriser. De plus, ce type de feu libère généralement une grande quantité d'énergie et affecte principalement la partie supérieure des arbres (les ligneux de grande taille), formant ainsi une véritable couronne de feu (Megrouche, 2006).



Figure 1-10: Feux de cime (site 01)

6-4. Feux avec braises (couvants)

Les feux avec braises sont généralement générés par des feux de cime, mais peuvent également résulter de certaines conditions climatiques, telles que le vent, ou de facteurs géographiques comme la topographie (Pierre-Yves et al., 2001). Le transport de ces braises peut s'effectuer sur de longues distances par rapport à la source du feu, atteignant, dans des cas exceptionnels, jusqu'à 10 à 20 km (Colin et al., 2001).



Figure 1-11 : Feux avec braises (site 02)



Figure 1-12 : Feux avec braises(site 03)

7- Apport Sig ET Télédétection

7-1.Système d'information géographique (SIG)

7-1-1. Définition SIG

Le Comité Fédéral de Coordination Inter-Agences pour la cartographie numérique (**FICCDC, 1988, cité dans Denegre et Salge, 1996**) définit le système d'information géographique comme suit :« Un système informatique composé de matériels, de logiciels et de processus, conçu pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale, afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion. »

Selon **Konecny (2003)**«Un SIG, dans une définition étroite, est un système informatique pour la saisie, la manipulation, le stockage et la visualisation des données spatiales numériques. Dans une définition plus large, il est un système numérique d'acquisition, de gestion, d'analyse, de modélisation et de visualisation de données spatiales aux fins de la planification ,l'administration et le contrôle de l'environnement naturel et aux applications socio-économiques».

7-1-2. Principales fonctions d'un SIG

Les systèmes d'informations géographiques (SIG) comprennent cinq familles, regroupées sous le terme des « 5A », qui signifient : **Abstraction, Acquisition, Archivage, Affichage et Analyse.** (**MARMONNIER, 2002**)

- **Abstraction** : Il s'agit de la modélisation de la réalité en fonction d'une perspective spécifique du monde. Cette étape permet de représenter les éléments du territoire de manière simplifiée et compréhensible pour l'analyse.
- **Acquisition** : Cette étape concerne la collecte, l'intégration et l'échange de données géographiques. Elle garantit que les informations spatiales nécessaires sont disponibles et à jour.
- **Archivage** : L'archivage consiste à organiser et conserver l'information géographique sous format numérique, afin de faciliter son accès, sa gestion et sa mise à jour.
- **Affichage** : Cette fonction correspond à la représentation et à la mise en forme des données, notamment à travers des cartes et d'autres supports visuels, pour rendre l'information compréhensible et exploitable.
- **Analyse** : L'analyse spatiale inclut des calculs géométriques sur les objets et le croisement de données thématiques, permettant de détecter des relations, des tendances et d'appuyer la prise de décision.

7-1-3. Formes de visualisation des données spatiales

Dans un SIG les données spatiales peuvent être représentées suivant deux modes : vecteur ou raster

- **Mode vecteur :**

Dans ce mode, les objets sont définis par des points, des arcs ou des polygones. L'information géographique est ainsi représentée de manière à refléter leur perception dans le monde réel (SITAYEB, 2006). Ce mode est particulièrement adapté pour représenter des entités discrètes telles que des routes, des bâtiments ou des limites administratives.

- **Mode raster :**

Dans le mode raster, les données sont stockées sous forme de cellules de taille et de forme identiques. Chaque cellule contient une valeur correspondant à une caractéristique de l'espace qu'elle représente. Ce mode permet de représenter l'espace de manière régulière et est particulièrement utile pour les phénomènes continus comme l'élévation du terrain, l'occupation du sol ou la température (SITAYEB, 2006).

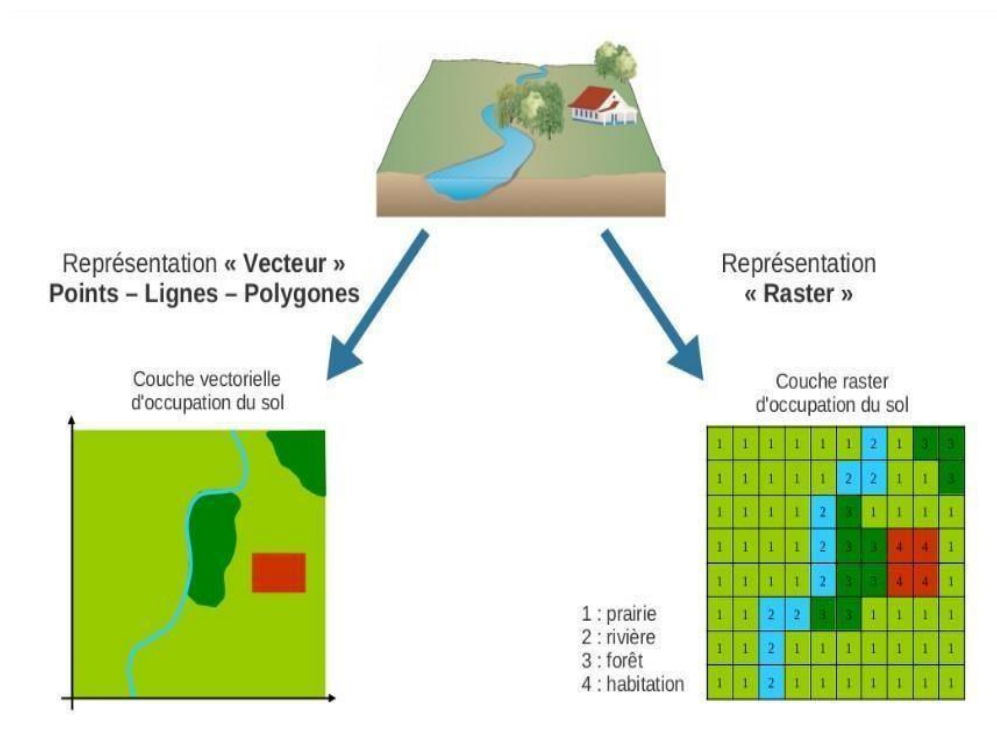


Figure 1-13 : Modes de visualisation des données spatiales (Site 04)

7-1-4.Domains d'application de SIG

Le développement des systèmes d'information géographique (SIG) a débuté vers 1980, en lien direct avec les avancées de l'informatique. Ces systèmes ont rapidement évolué grâce à l'amélioration des capacités de calcul et au stockage des données spatiales.

Actuellement, le développement des SIG s'accélère, porté par les nouvelles technologies, la disponibilité des données géospaciales et les besoins croissants d'analyse et de gestion de l'information géographique.

Une croissance très importante est attendue au cours de cette décennie, tant dans les applications professionnelles que dans les usages quotidiens, dans des domaines variés tels que l'aménagement du territoire, l'environnement, la gestion des ressources naturelles ou la prévention des risques. **(Barbant, 1993)**

Le SIG touche pratiquement la plupart des domaines et résolvent des problématiques de plus en plus complexes. Ainsi on entend parler de SIG en :

- **Urbanisme** : Gestion des plans d'occupation du sol, voirie, réseaux d'assainissement.
- **Réseaux de communication** : Électricité, eau, routes, fleuves, réseaux, souterrains.
- **Réseau de transport** : planification des transports urbains, optimisation d'itinéraires, la fourniture d'itinéraires sur internet, les assistants à la conduite automobile.
- **Protection civile** : Gestion et prévention de catastrophes.
- **Science de la terre** : Géologie, géodésie, pédologie, géotechnique.
- **les forêts** : Les **SIG** permettent de gérer durablement les forêts en fournissant des informations détaillées sur la végétation et le sol, et en intégrant des données multiples pour la planification, la récolte et la prise de décision.

7-2.La Télédétection

7-2-1.Définition

« L'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci ».

La télédétection 'Remote-sensing' est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. Elle englobe tout le processus qui consiste à:

- Capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis, réfléchi ou rétrodiffusé par la surface de la Terre.
- A traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information". Elle implique une interaction entre l'énergie incidente et les cibles.
(Michel Claude GIRARD, Colette M. GIRARD 1999)

7-2-2. Les étapes fondamentales du processus de la télédétection

Le processus de la télédétection suit généralement un enchaînement de sept (07) étapes illustrées par la figure :

- **Une source d'énergie ou d'illumination (A) :** En télédétection dite passive, le soleil constitue la principale source d'énergie. En télédétection dite active, la source est fabriquée par l'homme.
- Interactions entre le Rayonnement et l'**Atmosphère** tout au long du trajet source-cible et cible-capteur (**B**).
- Interactions avec **la cible (C)** : Ces interactions sont de trois types : la transmission, la réflexion et l'absorption. L'émission est à considérer comme un phénomène à part.
- Enregistrement du signal par **le capteur (D)** : Le capteur enregistre le signal reçu.
- **Transmission, Réception, et Traitement (E)** : Le satellite transmet les signaux vers des stations de réception au sol ou à des satellites relais. Au niveau de ces stations, les informations sont décodées et enregistrées sous forme d'images ou de photographies.
- **Interprétation et analyse (F)** : Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.
- **Application (G)** : La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

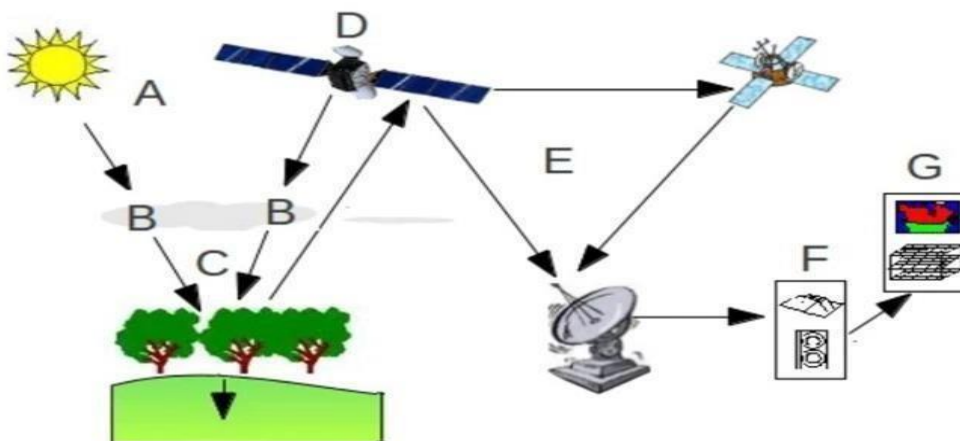


Figure 1-14 : les sept étapes de la télédétection (Bul 2008).

7-2-3.Domains d'application de la télédétection

Dans ce qui suit, nous mettrons en lumière plusieurs domaines qui utilisent la **télédétection** comme outil fondamental pour le développement de diverses études et recherches. Parmi ces domaines, on trouve :

- **Météorologie** : Elle permet de mesurer la vitesse des vents, les précipitations, les températures et de détecter les cyclones ou les orages.
- **Foresterie** : Elle sert à suivre la couverture forestière, la santé des forêts et les impacts après les ouragans.
- **Cadastre / Urbanisme** : Elle permet de cartographier la couverture du sol, l'urbanisation et de contrôler les autorisations (piscines, zones bâties...).
- **Agriculture** : Elle aide à identifier les plantations et à évaluer la production agricole.
- **Catastrophes environnementales** : Elle permet de surveiller les feux de forêts, éruptions volcaniques, sécheresses et marées noires.
- **Changements globaux** : Elle est utilisée pour étudier la désertification, les variations climatiques et la composition de l'atmosphère.
- **Hydrologie** : Elle étudie le comportement de l'eau à la surface du sol et dans le sol, ainsi que le cycle hydrologique.
- **Environnement** : Elle est utilisée pour les études d'impact et pour détecter les changements environnementaux.
- **Archéologie** : Cartographie des sites archéologiques.

Dans notre cas d'étude nous exploitons la télédétection comme outil essentiel pour l'identification des incendies dans l'Est de l'Algérie.

8-Conclusion

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) ainsi que la télédétection jouent un rôle crucial dans la gestion contemporaine des risques d'incendie forestier. Leur aptitude à rassembler et analyser des données spatiales diverses facilite une meilleure appréhension des éléments qui contribuent à l'initiation et à la propagation des feux. L'utilisation de ces technologies permet non seulement de dresser des cartes des zones à risque, mais également d'optimiser les méthodes de prévention, de suivi et d'intervention. Dans un pays comme l'Algérie, qui est particulièrement vulnérable à ce type de menace, l'intégration des SIG et de la télédétection constitue un atout fondamental pour une gestion durable et efficace des ressources forestières.

CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1- Introduction

Ce chapitre porte sur la wilaya de Sétif comme zone d'étude, en présentant ses caractéristiques géographiques, physiques et forestières pour mieux comprendre les facteurs favorisant les incendies de forêt.

La région est particulièrement vulnérable en raison de sa position en zone de transition climatique entre le bioclimat méditerranéen et le climat aride, avec des sécheresses et des chaleurs estivales intenses appelées à s'aggraver. À cela s'ajoutent les effets des changements climatiques et des activités humaines, qui ont allongé la saison des feux tout en amplifiant leur fréquence et leur pouvoir destructeur au cours des vingt dernières années.

2- Situation géographique et administrative

La wilaya de Sétif se situe dans la zone des hauts plateaux dans l'Est du pays entre les coordonnées géographiques $35,61^{\circ}$ à $36,59^{\circ}$ N et $4,73^{\circ}$ à $6,02^{\circ}$ E. Elle s'étend sur une superficie de 6.504 km^2 (650.400 ha), parmi lesquels seuls $1.023,13 \text{ km}^2$ (15,73%) sont boisés.

Elle est limitée au nord par les wilayas de **Béjaïa** et **Jijel**, à l'est par la wilaya de **Mila**, Au sud par les wilayas de **Batna** et **M'Sila** et à l'ouest par la wilaya de **Bordj Bou Arreridj** (Figure 11)

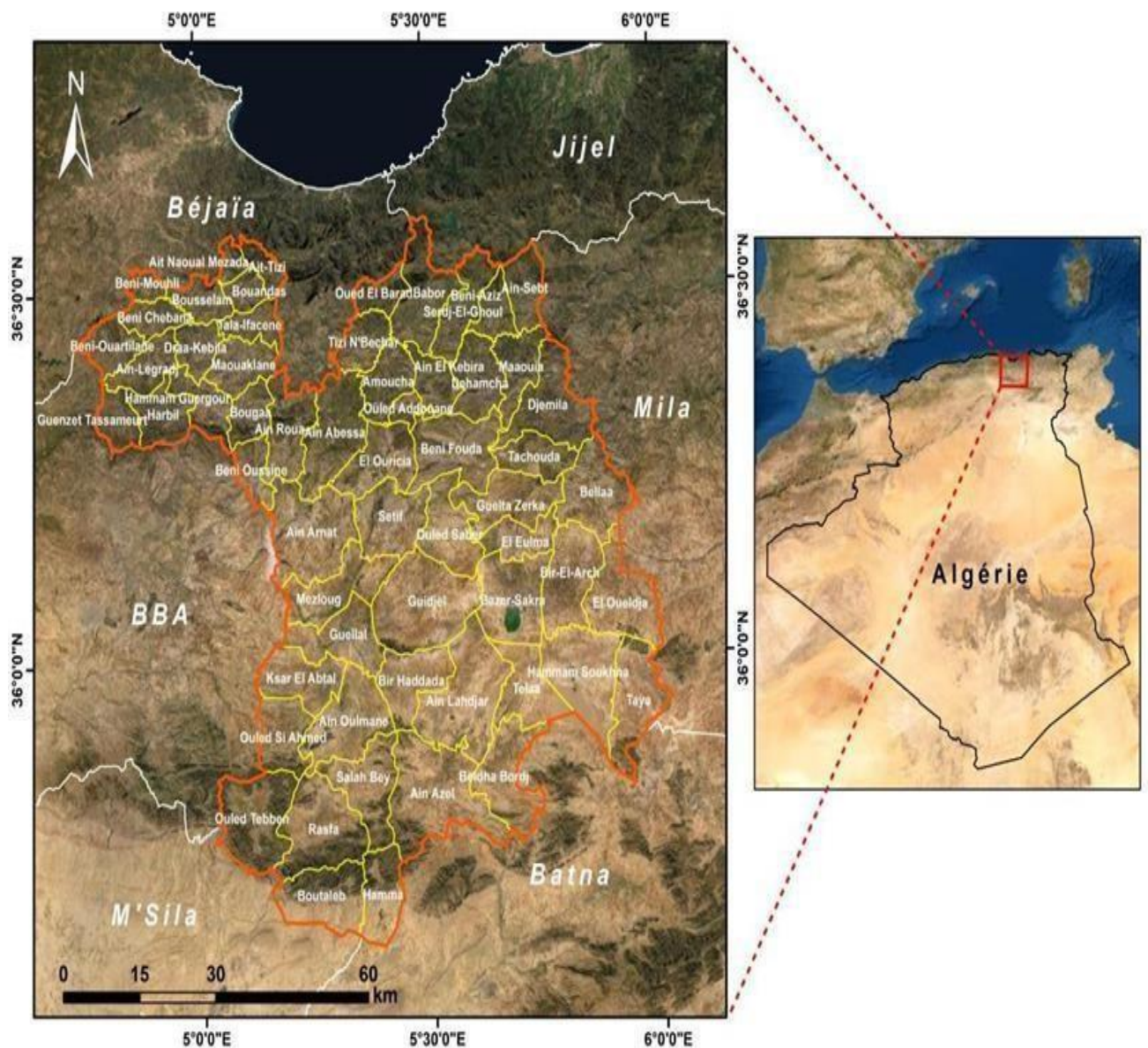


Figure2-1 : Localisation géographique de la wilaya de Sétif.

3-Milieu physique

3-1. Relief

D'une manière générale, la wilaya de Sétif est un pays de hautes terres où 03 principales zones se distinguent :

3-1-1.LA Zone Montagneuse

Elle se constitue de trois (03) masses montagneuses :

- **Les monts des BABORS** : situés au nord de la wilaya, ils s'étendent sur une centaine de Kilomètres culminant à 2.004 m au djebel BABOR.
- **Les monts des BIBANS** : qui couvrent le Nord-Ouest de la wilaya.
- **Les monts du HODNA** : s'étalent sur le sud et sud-ouest de la wilaya. L'altitude atteint jusqu'à 1.890 m à djebel Afghane. Cette zone occupe 2.871,61 km² soit 43,84% de la superficie de la wilaya avec 34 communes.

3-1-2.Les Hautes Pleines

Cette région s'enferme dans les limites naturelles qui sont les masses montagneuses. Elle occupe la partie centrale de la wilaya d'une superficie de 3.217,19 km² comprenant 22 communes avec une altitude variant entre 900 et 1 200m.

3-1-3.La Frange Semi-Aride

C'est une zone pratiquement plate ne dépassant guère les 900 m. On retrouve 04 communes d'une superficie totale de 460,84 km² soit 7,04% de la superficie de la wilaya. Elle coïncide avec le Sud, Sud-Est de la wilaya, elle abrite des chotts et Sebkhass : Chott El Beida (HAMMAM SOKHNA), Chott El-FERRAINE (Ain-LAHDJAR), SABKHET MELLOUL (GUELLEL), SABKHET BAZER (Sud BAZER SAKRA).

Ces trois zones caractérisant le relief de la wilaya de Sétif sont représentées dans la(FIGURE 2-2).

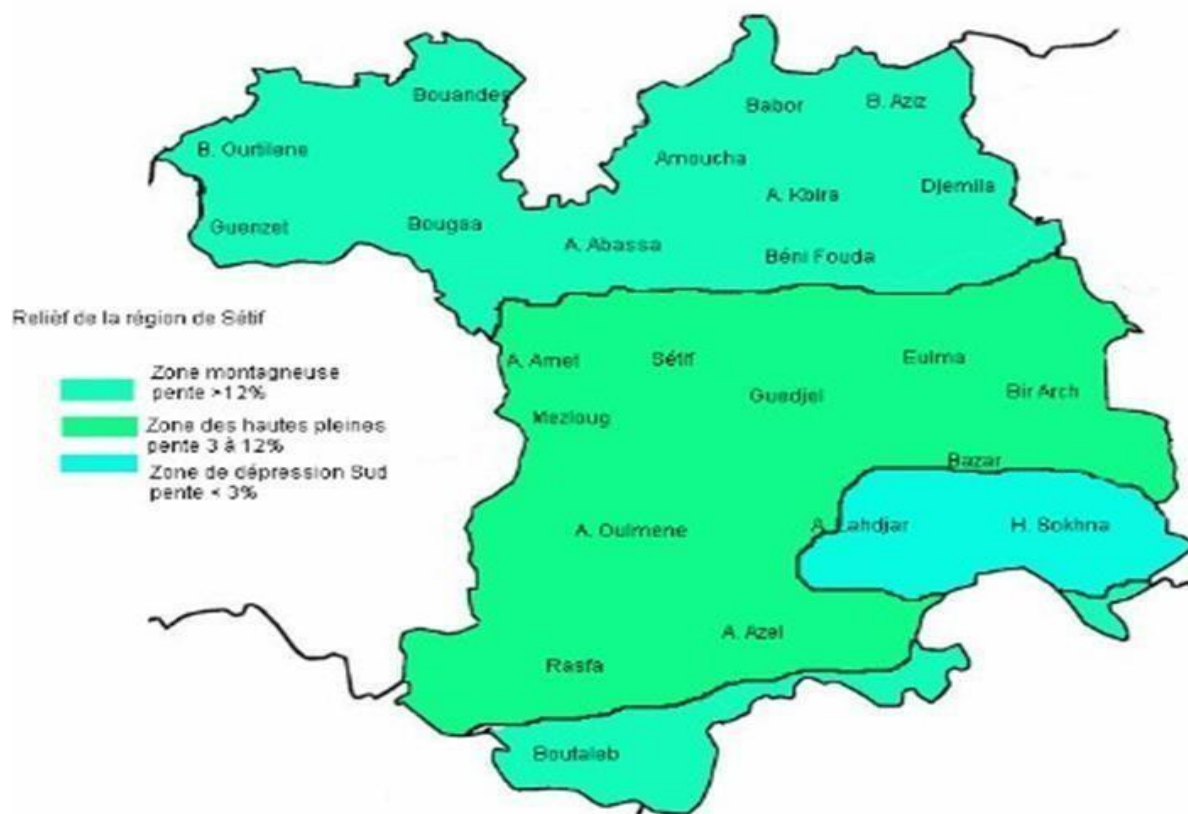


Figure2-2 : Carte morphologique de la wilaya de Sétif.

(Stratégie de Développement Rural Durable, 2004)

La carte représente le relief de la wilaya de Sétif à travers des classes d'altitude et des courbes de niveau. On observe une organisation spatiale assez nette du relief.

Globalement, les altitudes moyennes dominant largement (900–1300 m), ce qui indique que la wilaya est principalement constituée de hauts plateaux. Ces zones couvrent la plus grande superficie, notamment au centre, avec un relief relativement homogène et modérément ondulé.

Les altitudes plus faibles (300–900 m) apparaissent de manière localisée, surtout en périphérie, traduisant des zones plus basses ou des vallées. À l'inverse, les altitudes élevées (1300–2000 m) se concentrent principalement dans les zones montagneuses, notamment au nord et au sud-ouest, indiquant la présence de reliefs plus accidentés.

Les courbes de niveau (contour 150) montrent que certaines zones présentent des pentes plus marquées (courbes rapprochées), surtout dans les régions montagneuses, tandis que les zones centrales ont des pentes plus douces (courbes espacées).

En résumé, la wilaya de Sétif se caractérise par :

- une dominance de hauts plateaux (900–1300 m),
- des reliefs montagneux en périphérie,
- et des variations locales de pente influençant potentiellement la propagation des feux de forêts (accélération sur fortes pentes, ralentissement sur terrains plats (**FIGURE2-3**))

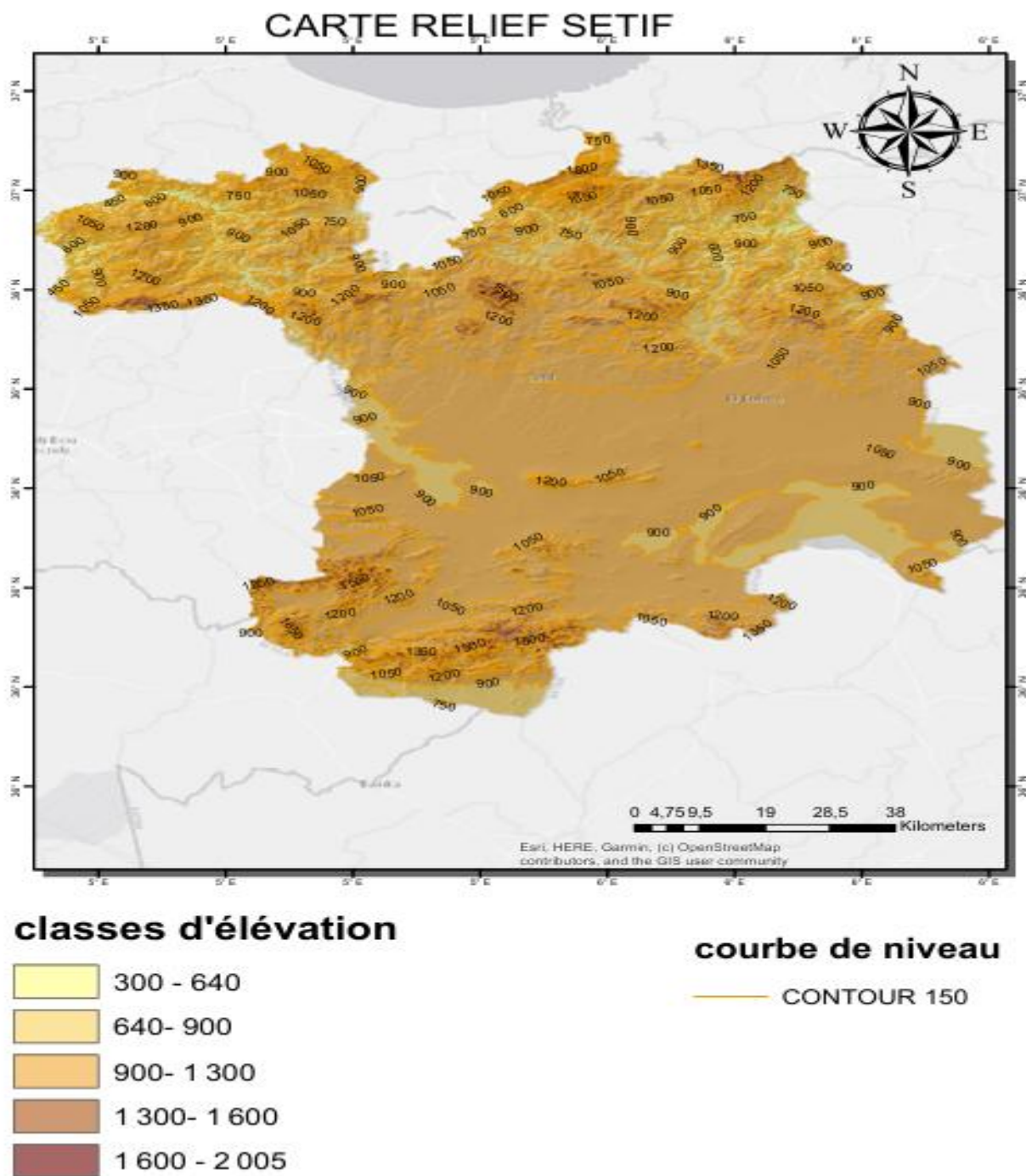


Figure 2-3 : Carte Relief de Setif (2020).

3-2.Climat

Le climat de la wilaya de Sétif est de type Méditerranéen continental semi-aride caractérisé par une saison hivernale pluvieuse et fraîche et une saison estivale, sèche et chaude.

Les précipitations moyennes annuelles varient considérablement selon la latitude et l'altitude, de 300 mm sur les versants sud de BOUTALEB à 1.100 mm au sommet de djebel BABOR (2.004 m).

La saison sèche s'étend du mois de mai au mois de septembre et la saison des pluies de novembre à la mi-mars.....(Figure 2-4).

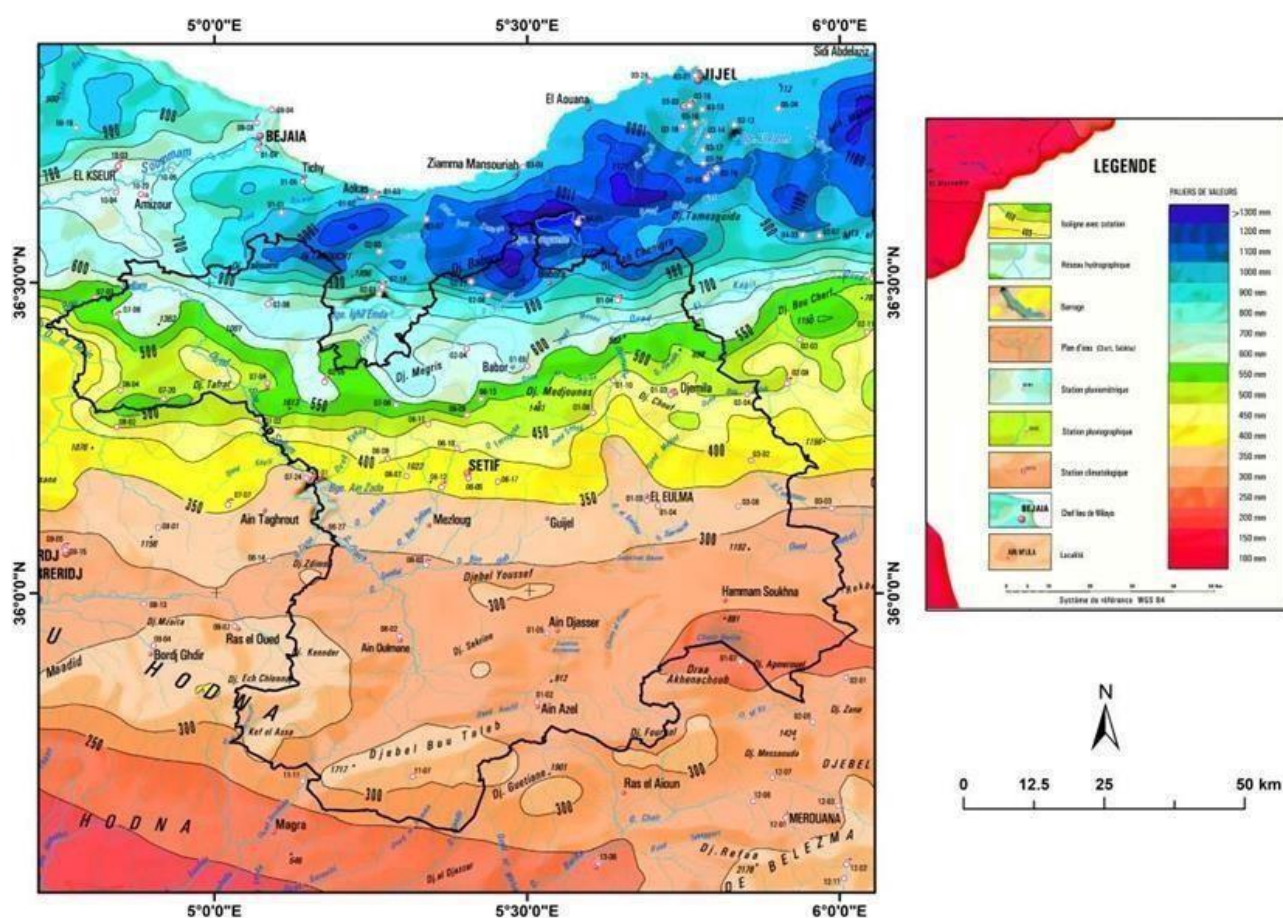


Figure 2-4: Carte des pluies moyennes annuelles de la wilaya de Sétif

(Issue de la carte des pluies moyennes annuelles du Nord de l'Algérie dressée par l'ANRH, 2005)

3-3. Pédologie

Chaque zone se caractérise par son sol :

- **La zone montagneuse** : dans sa grande partie est couverte par des sols calcaires ainsi que des alluvions.
- **La zone des hautes plaines** : dans cette région on rencontre surtout des sols calciques et calcaires dont la qualité est variable d'un lieu à un autre. Les uns s'amincissent et deviennent caillouteux.
- **La frange semi-aride** : les sols sont salins avoisinant les chotts et les sebkhas.

3-4. Hydrologie

Le réseau hydrographique est organisé autour du dispositif montagneux de la région. La moitié Nord envoie ses eaux de surface vers le bassin méditerranéen par les réseaux de l'oued BOUSSELLEM qui rejoint la SOUMMAM, de l'OUED AGRIOUN, de l'OUED EL-KEBIR, de l'oued BOUSELEH et de l'OUED RHUMEL. Ces réseaux d'oueds alimentent les barrages et autres retenues collinaires de la région. Le reste possède une hydrographie endoréique centrée sur les chotts.

4-Milieu forestier

Les peuplements forestiers occupent une superficie totale de 102.313 ha représentant un taux de boisement avoisinant 16% (le taux mondial de référence étant de 25%) dont 62.026 ha (60,62%) de forêts naturelles et 40.287 ha (39,38%) de reboisements (CFS).

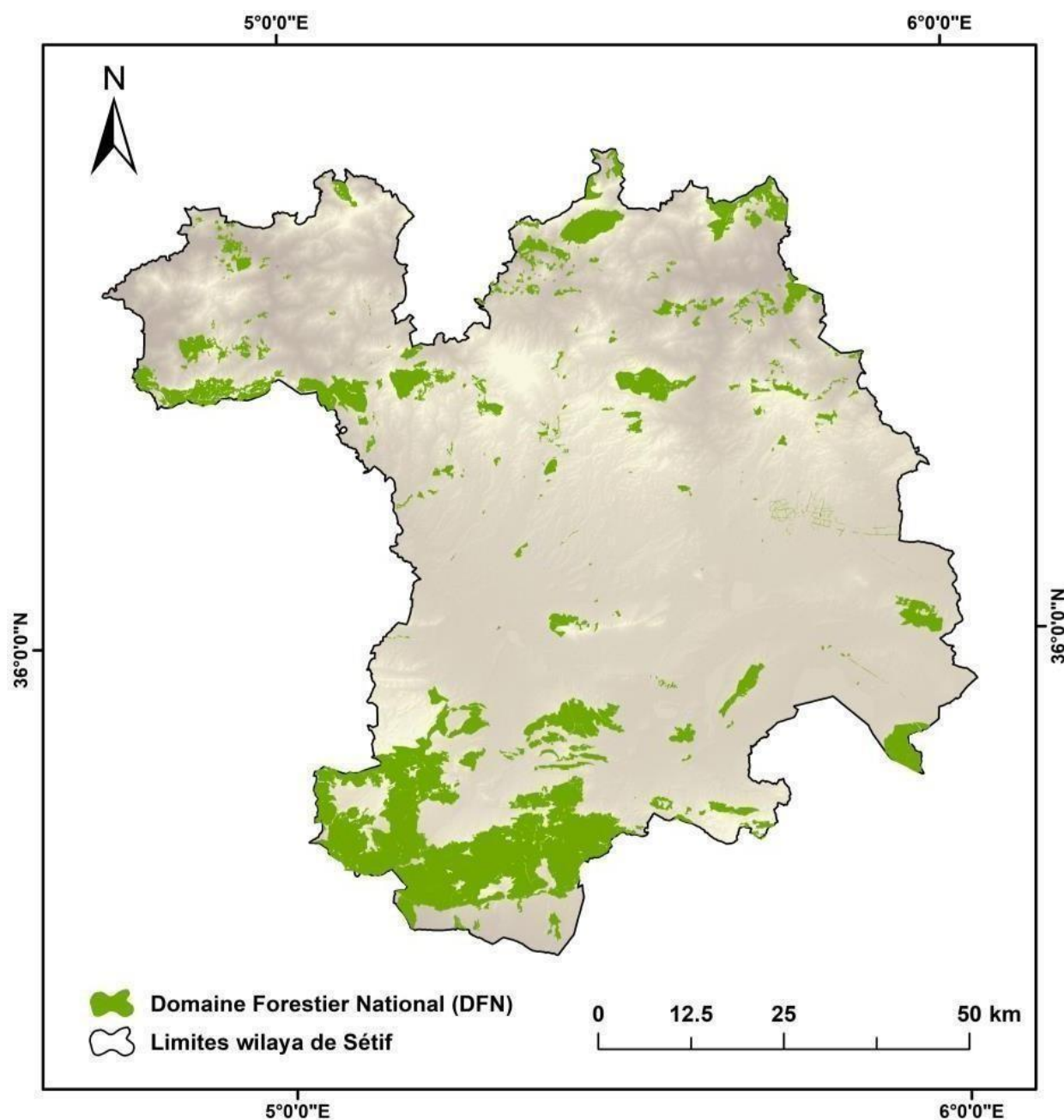


Figure 2-5: Domaine Forestier National (wilaya de Sétif)

4-1.Massifs forestiers

Le territoire de la wilaya de Sétif est traversé par 03 principales chaînes montagneuses (les BABORS, les Bibans et le HODNA) où se trouvent 03 massifs forestiers (**IFN**).

4-1-1.Massifs forestiers des BABORS

- **Forêt domaniale de BABOR (2.549 ha) :**

La forêt domaniale de BABOR est constituée de vieux peuplements (espèce endémique) de cèdre, sapin de Numidie, chêne Zéen et chêne vert.

- **Forêt domaniale des CHAABET LAKHERA (1.347 ha) :**

C'est une forêt dégradée, constituée exclusivement de maquis dense de chêne vert.

- **Forêt domaniale de LAALEM (357 ha) :**

Forêt constituée exclusivement de vieux peuplements purs de cèdre, chêne liège et de chêne Zéen.

- **Forêt domaniale de TAMENTOUT (3.198 ha) :**

Forêt dense de peuplements âgés. Elle est constituée essentiellement de chêne liège, chêne zéen, chêne afarès et chêne vert.

- **Forêt domaniale de Béni CHEBANA (1.128 ha) :**

Cette forêt domaniale est composée de peuplements purs de pin d'Alep et de maquis arboré clair de chêne vert.

- **Forêt domaniale de Béni Slimane (1.494 ha) :**

Forêt domaniale dégradée à dominance de chêne liège clair et chêne vert.

4-1-2. Massifs forestiers des BIBANS

- **Forêt domaniale de djebel TAFET (1.975 ha) :**

Forêt domaniale dégradée à dominance de maquis clairs de chêne vert et de pin d'Alep.

- **Forêt domaniale de TAZA (2.827 ha) :**

Elle comprend des maquis sur près des trois quarts de la forêt. On rencontre les peuplements de pin d'Alep et de chêne vert.

- **Forêt domaniale de LAANINI (1.950 ha) :**

La forêt domaniale de LAANINI est exclusivement constituée de maquis de chêne vert.

- **Forêt domaniale de LAARACHE (199 ha) :**

Cette forêt domaniale est constituée de pin d'Alep et de chêne vert.

- **Forêt domaniale d'OULED REZZOUG (3.961 ha) :**

Représente une forêt dégradée à l'état de maquis arborés et non arborés de chêne vert et de pin d'Alep.

4-1-3. Massifs forestiers du HODNA

- **Forêt domaniale de BOUTALEB (26.376 ha) :**

La forêt domaniale de BOUTALEB se caractérise par la prédominance des forêts de pin d'Alep Et de cèdre de l'Atlas.

- **Forêt domaniale de RIGHA DHAHRA (14.665 ha) :**

La strate arborescente est constituée par des forêts de pin d'Alep parfois mélangées à d'autres essences pour la plupart jeunes et claires.

Les forêts domaniales de la wilaya de Sétif sont représentées dans la (**Figure 2-6**).

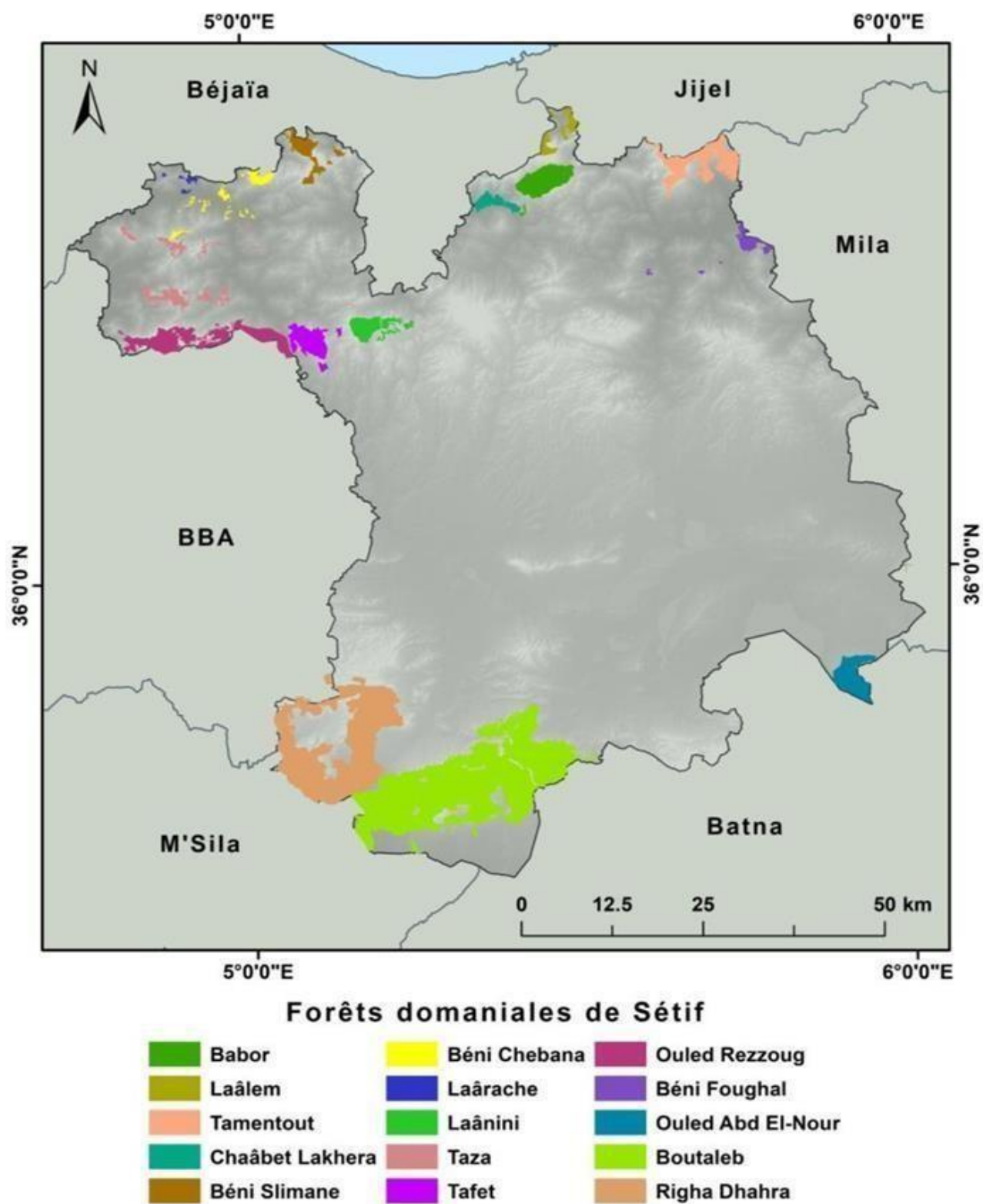


Figure 2-6 : Forêts domaniales de la wilaya de Sétif (Direction Générale des Forests).

4-2.Principales Essences Forestières

Selon les données de la Conservation des Forêts de Sétif (CFS), les principales espèces forestières sont présentées dans le **TABLEAU 2-1** et la **Figure2-7**.

Tableau 2-1 : Principales espèces forestières et leurs superficies dans la wilaya de Sétif.

Espèces	Superficies (ha)	Pourcentage
<i>Pinus halepensis</i> Mill.	50.744	49.60 %
<i>Quercus ilex</i> L.	33.939	33.17 %
<i>Juniperus oxycedrus</i> L. et <i>Juniperus phoenicea</i> L.	8.042	7.86 %
<i>Cedrus atlantica</i> (Endl.) Manetti ex Carrière.	4.262	4.17 %
<i>Quercus suber</i> L.	1.628	1.59 %
<i>Abies numidica</i> de Lannoy ex Carrière.	118	0.12 %
Autres	3.580	3.50 %
Total	102.313	

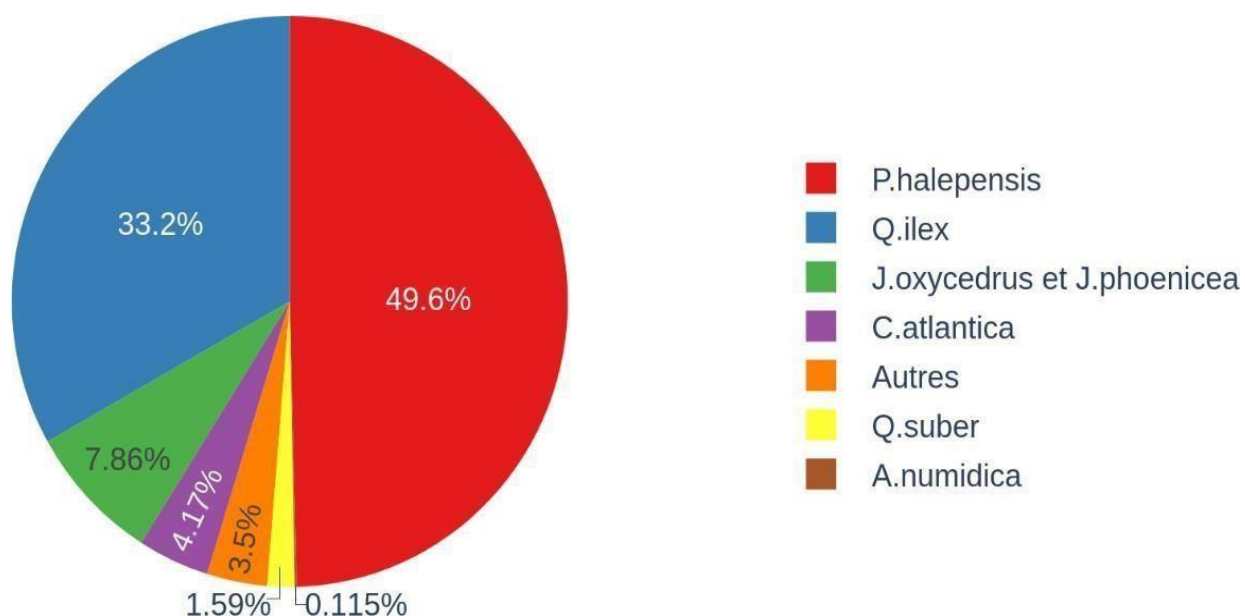


Figure 2-7 : Répartition des principales essences forestières de la wilaya de Sétif.

5-Conclusion

la wilaya de Sétif présente un environnement diversifié, comprenant un relief varié, des conditions climatiques spécifiques et des forêts, qui impactent considérablement sa susceptibilité aux incendies. Cela souligne l'importance d'une bonne compréhension de cette région pour optimiser la prévention et la gestion des feux de forêt.

Chapitre 3 :

MATERIELS ET METHODES

1-Introduction

Pour mesurer l'impact des feux de forêt et étudier leur évolution tant sur le plan spatial que temporel en Algérie, il est essentiel de commencer par la détection et la cartographie des zones touchées. Cette tâche s'appuie sur des images satellitaires, en particulier celles fournies par le programme Landsat, et fait appel à des algorithmes spécifiquement conçus pour identifier avec précision les surfaces incendiées dans les régions forestières de la wilaya de Sétif. Cette méthode permet de produire des cartes fiables des zones brûlées. La vérification des données en coordination avec la Direction Générale des Forêts (DGF) et les institutions algériennes compétentes, ainsi que pour la création d'outils de suivi opérationnel adaptés aux spécificités du territoire de la wilaya de Sétif.

2-La méthodologie

La démarche méthodologique adoptée dans ce travail s'articule autour de deux étapes complémentaires. La première étape consiste en la détection et la cartographie des zones brûlées sur la plateforme Google Earth Engine (GEE), en exploitant des images de surface Réflectance Niveau-2 issues des capteurs Landsat TM, ETM+ et OLI, couvrant la période 2000-2014-2020. À partir de ces données, deux composites temporels sont générés : un composite pré-feu basé sur l'indice NDVI maximal (MAX NDVI), et un composite post-feu basé sur l'indice NBR maximal (MAX NBR). La différence multi-temporelle entre ces deux composites ($\text{MaxNDVI} - \text{MaxNBR}$) est ensuite calculée afin de mettre en évidence les zones affectées par les incendies. Une classification supervisée est appliquée sur le résultat obtenu, suivie d'une évaluation visuelle. Si le résultat est jugé satisfaisant, les périmètres de feux sont extraits ; dans le cas contraire, la procédure de classification est réitérée jusqu'à l'obtention d'un résultat acceptable.

La deuxième étape porte sur l'analyse spatiale des feux de forêts sous ArcMap. Deux approches sont mobilisées en parallèle : l'analyse d'agrégat spatial multi-distances via la fonction K de Ripley, permettant d'évaluer la distribution spatiale des occurrences d'incendies à différentes échelles, et l'estimation par densité de noyau (Kernel Density Estimation – KDE), qui permet de visualiser la concentration spatiale des feux et d'identifier les zones de forte récurrence.

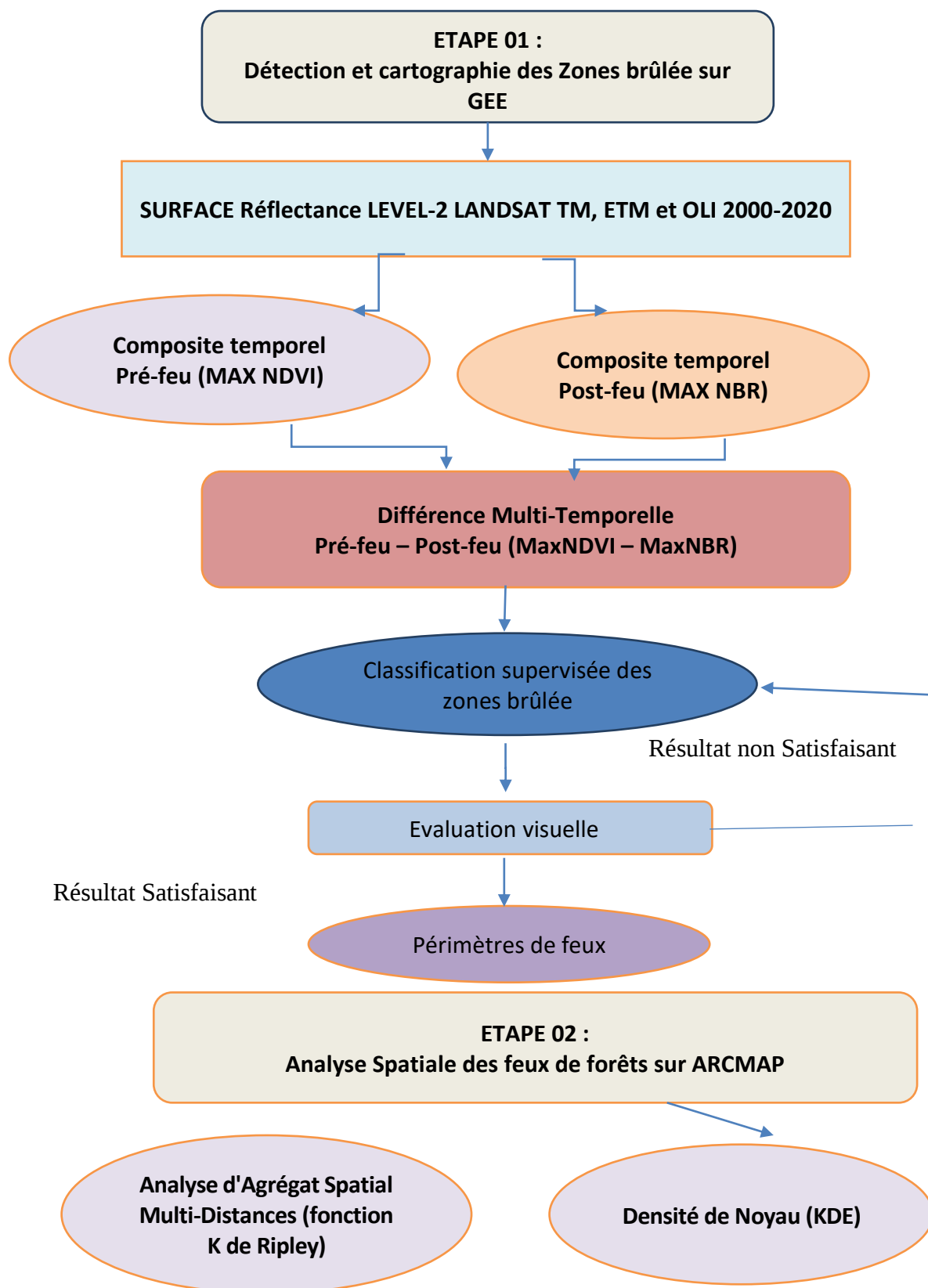


Figure 3-1 : Organigramme de la méthodologie.

3-Détection et cartographie des zones brûlées

La première étape de la méthodologie comprend la détection et la cartographie des zones brûlées à partir des images Landsat à l'aide d'un algorithme semi-automatique proposé par (**Bastarrika et al., 2014, 2011**) actuellement implémenté sur la plateforme Google Earth Engine (**GEE**) (**Gorelick et al., 2017**). Cet algorithme a été initialement développé par l'Université d'Alcalá de Henares (UAH), Espagne dans le cadre du programme Climate Change Initiative (**CCI**) de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), dans le cadre du projet Fire Disturbance (**Fire_CCI**) pour générer rapidement des périmètres de feux de forêts de référence à partir de capteurs de moyenne résolution afin de valider la base de données globale des feux de forêts Fire_CCI basée sur le capteur Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (**MODIS**).

Les versions antérieures de l'algorithme ont été implémentées sur une application de bureau intitulée Burned Area Mapping Software (**BAMS**) construite avec l'environnement de développement ArcObjects® dont l'interface interactive permet à l'utilisateur d'effectuer à la fois le traitement des scènes et la cartographie supervisée des zones brûlées.

L'algorithme à deux phases a été principalement développé pour la cartographie opérationnelle et précise des zones brûlées historiques à partir de capteurs à résolution moyenne tels que Landsat et Sentinel 2. L'approche a déjà été adoptée dans nombreuses études pour la reconstruction des profils historiques de feux de forêts à l'échelle régionale à partir des images multi-temporelles de Landsat TM et ETM+ dans la région de l'Attique, en Grèce (1984-2011) (**Pleniou et al., 2012**), dans le nord de la Tunisie (1984-2010) (**Belhadj-Khedher et al., 2018**), au centre de l'Argentine (1999-2011) (**Argañaraz et al., 2015**) et à l'échelle continentale (Amérique latine) en utilisant Landsat OLI (**Bastarrika et al., 2018**); pour générer des périmètres de référence basés sur Landsat pour valider les produits globaux des feux de forêts créés dans le cadre du programme Climate Change Initiative (CCI) de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), dans le cadre du projet Fire Disturbance (Fire_cci) d'ENVISAT-MERIS et MODIS (**Alonso-Canas et Chuvieco, 2015**), de MODIS (**Chuvieco et al., 2018**), de la variable climatique essentielle Burned Area Essential Climate Variable (**BAECV**) dérivée de l'USGS (**Vanderhoof et al., 2017**) et en termes de paramètres de zones brûlées (**Nogueira et al., 2017**) et de développer une base de données d'apprentissage d'algorithmes (**Ramo et Chuvieco, 2017**); pour évaluer les performances d'autres algorithmes de zone brûlée (**Tanase et al., 2020**) et comme base dans le développement de nouveaux algorithmes de zones brûlées basés sur Sentinel-2 et Landsat (**Roteta et al., 2019**) et (**Filipponi, 2019**) et (**Woźniak et Aleksandrowicz, 2019**).

Les périmètres de feux de forêts de 2000 à 2020 pour la wilaya de Sétif ont été générés sur la plate-forme de GEE en suivant les directives de (Roteta et al., 2021). Les étapes de la procédure sont décrites ci-dessous.

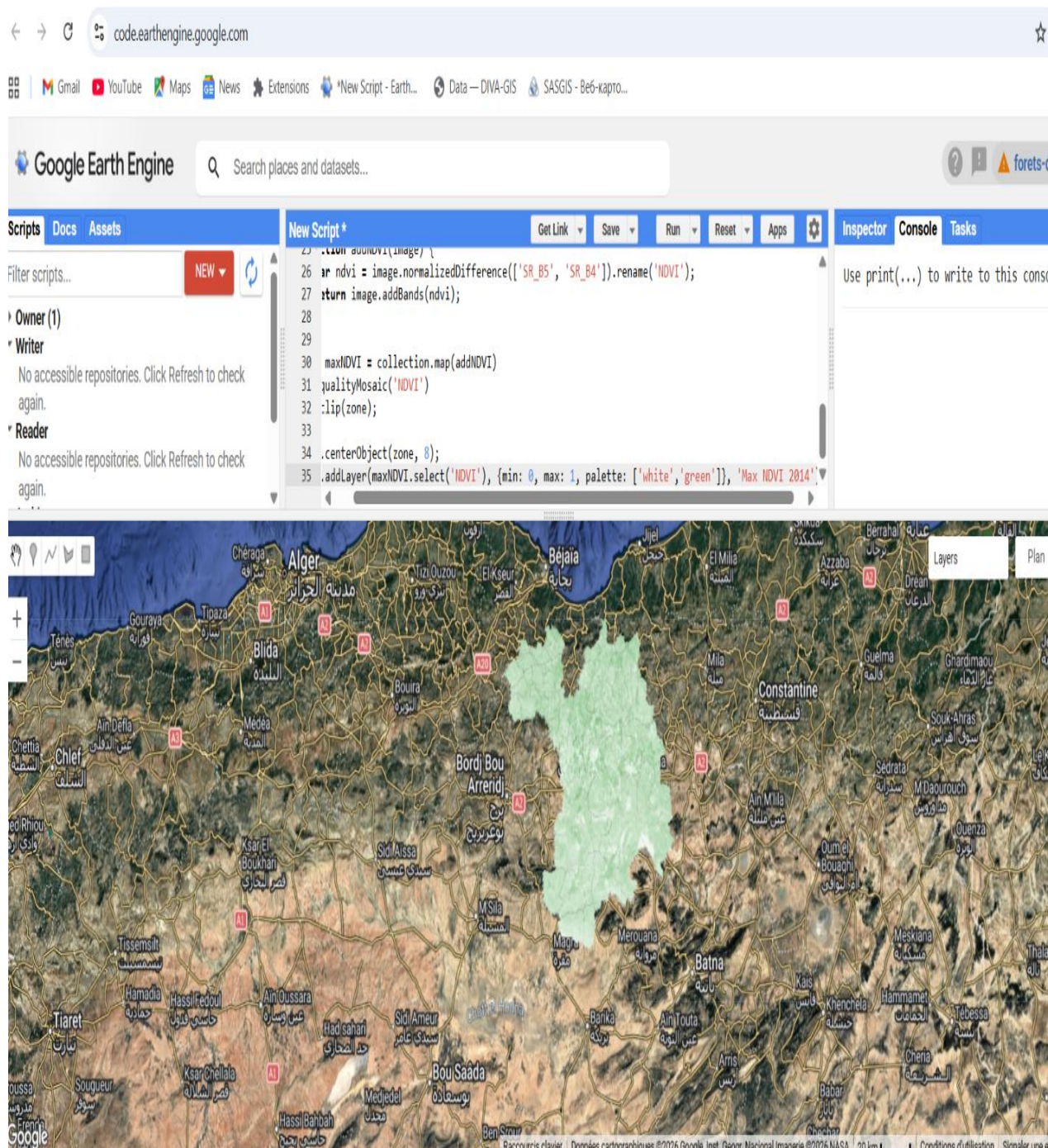


Figure3-2: MAX NDVI SETIF 2014 GOOGLE EARTH ENGINE (GEE)site05

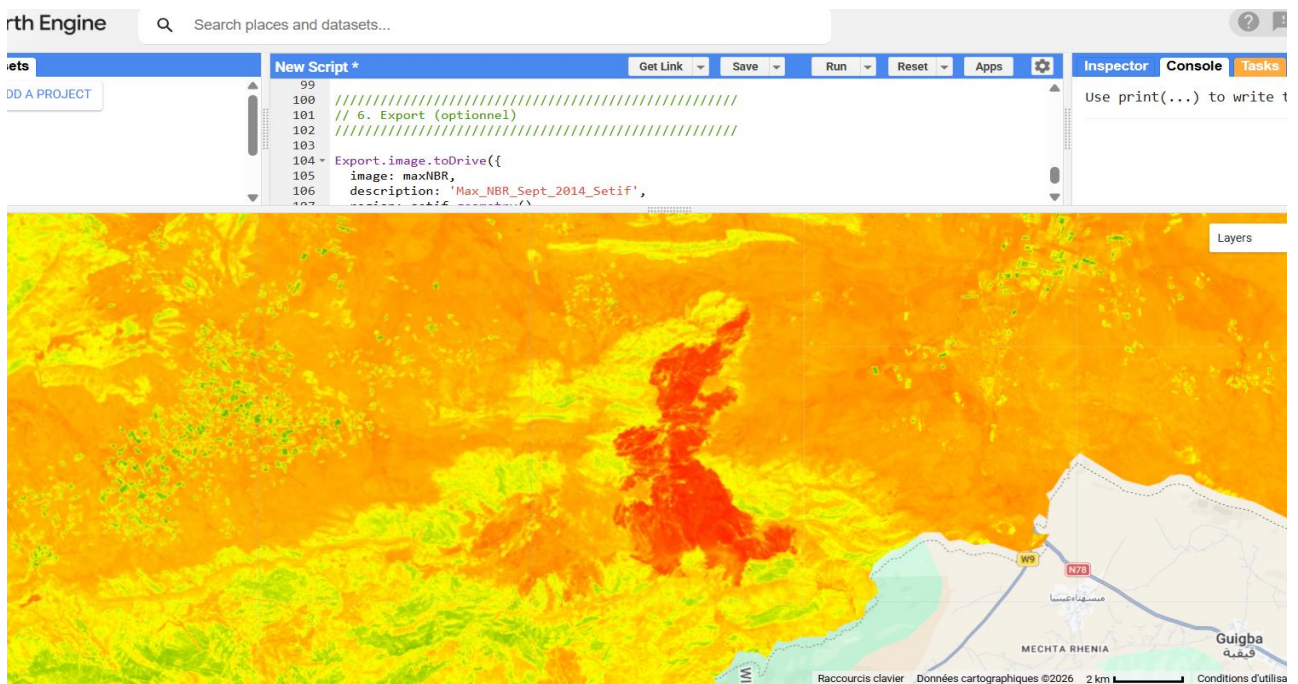
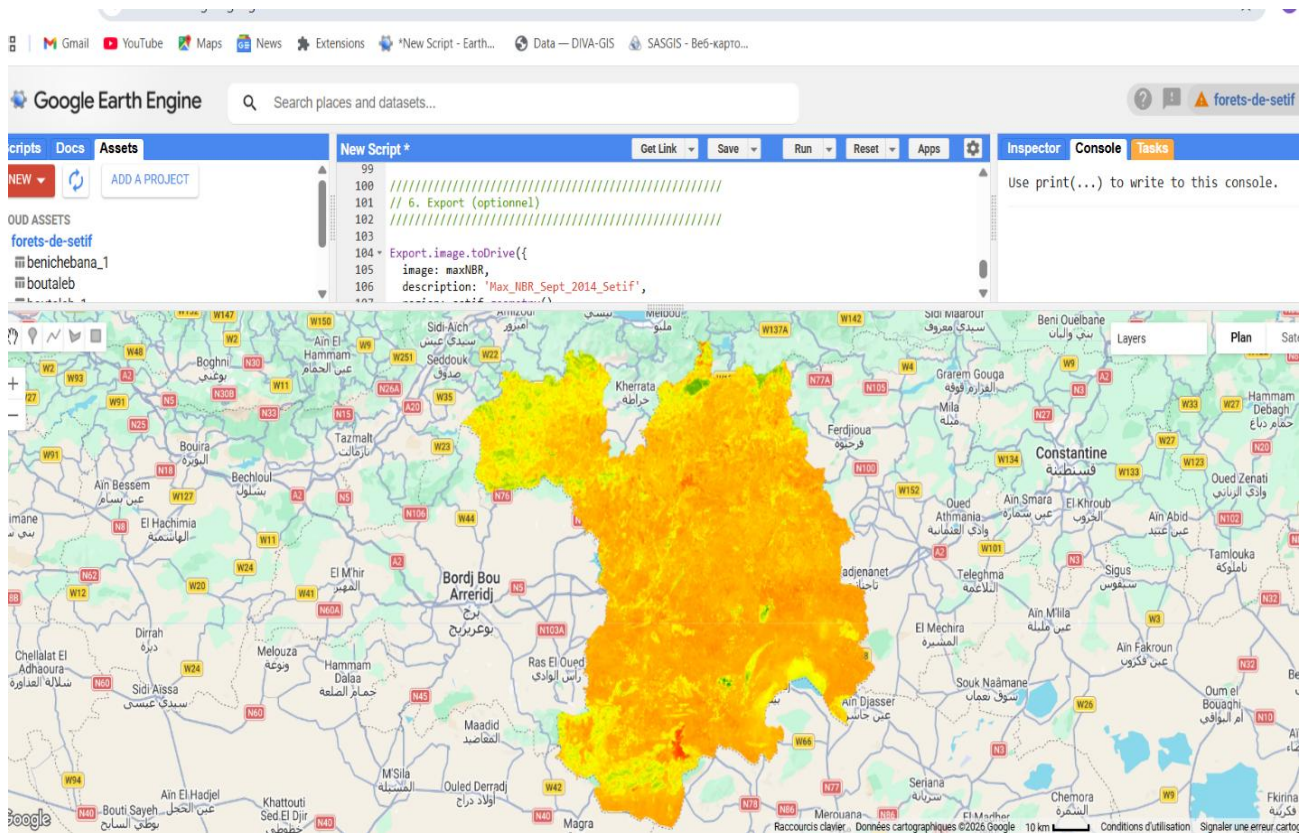


Figure 3-3: MAX NBR SETIF 2014, GOOGLE EARTH ENGINE (GEE) site05

3-1.Définition des variables initiales

La première étape est de définir un certain nombre de variables initiales dans le script GEE, à savoir :

- **Date de début et de fin de la saison de feux** : Généralement la saison de feux commence en juin jusqu'à la fin d'octobre.
- **Collection d'images Landsat** : Les images Landsat 5 TM ont été utilisées pour les saisons de 2000 à 2011. Landsat 7 ETM+ pour la saison de 2012 et Landsat 8 OLI à partir de 2013.
- **Bandes spectrales pertinentes** : 05 bandes spectrales ont été sélectionnées. Deux bandes dans le visible (rouge et bleu), infrarouge (IR) et infrarouge à ondes courtes (SWIR) (3-1).

Tableau 3-1 : Bandes spectrales sélectionnées pour la détection des zones brûlées.

Plateformes	Landsat 5	Landsat 7	Landsat 8
Capteurs	TM	ETM ⁺	OLI
Rouge	Bande 3	Bande 3	Bande 4
Blue	Bande 1	Bande 2	Bande 2
Infrarouge à ondes courtes (SWIR) 1	Bande 5	Bande 5	Bande 6
Infrarouge à ondes courtes (SWIR) 2	Bande 7	Bande 7	Bande 7
Proche Infrarouge (NIR)	Bande 4	Bande 4	Bande 5

Ces bandes spectrales ont ensuite été utilisées pour calculer 04 indices bi-spectraux (**Tableau 3-2**).

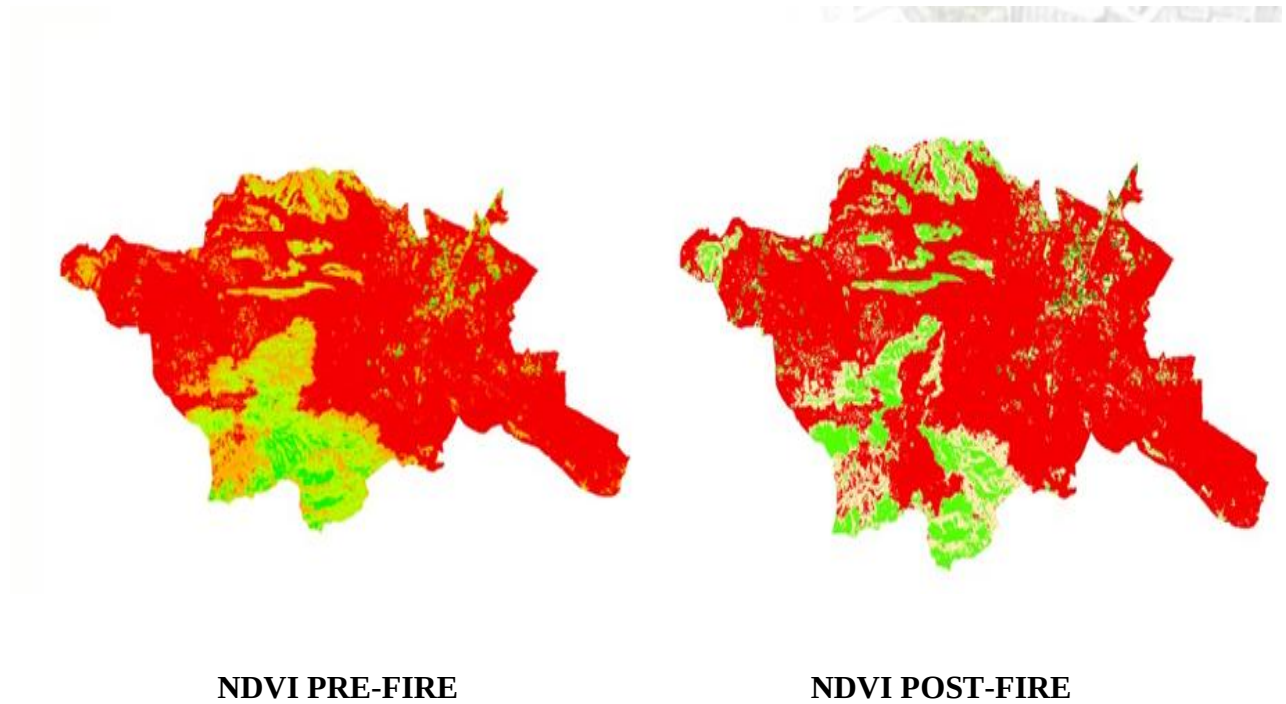
Tableau 3-2 : Indices bi-spectraux pour la détection des zones brûlées.

Indices	Formules
Normalized Burned Ratio (NBR)	$\text{SWIR 2} - \text{NIR} / \text{SWIR 2} + \text{NIR}$
Normalized Burned Ratio 2 (NBR 2)	$\text{SWIR 2} - \text{SWIR 1} / \text{SWIR 2} + \text{SWIR 1}$
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$\text{NIR} - \text{RED} / \text{NIR} + \text{RED}$
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$(\text{NIR} - \text{Red} / \text{NIR} + \text{Red} + \text{L}) * (1 + \text{L})$

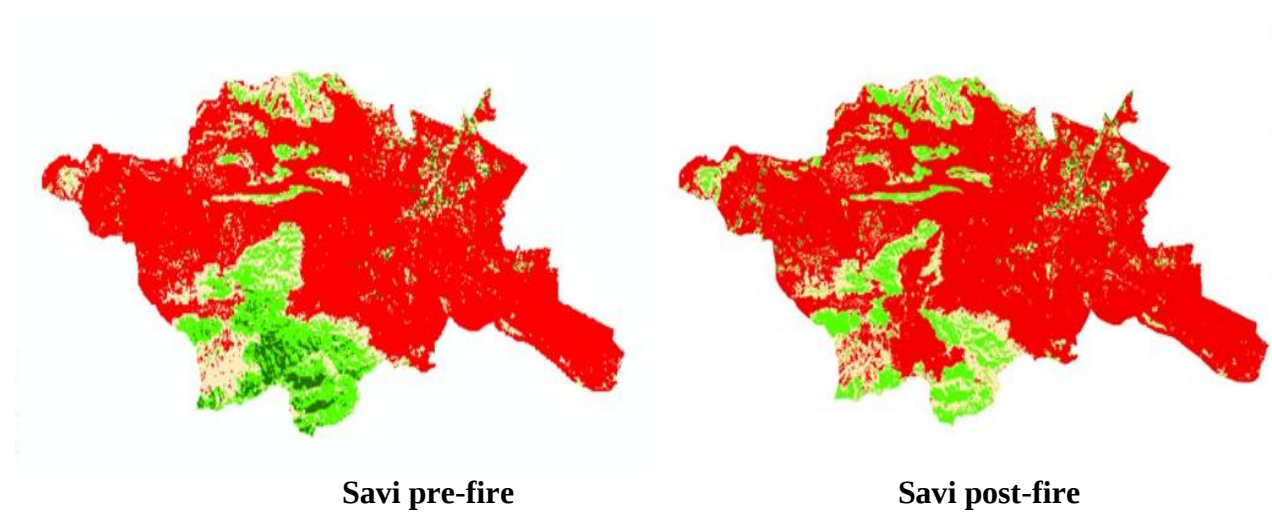
3-1-1.calcul NDVI et SAVI et NBR DE feux de forêts de SETIF (2014 ET 2020)

Calcul NDVI de Sétif (2014)

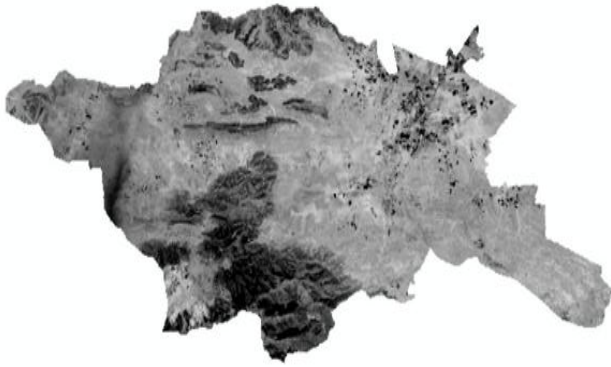
Ces cartes ont été obtenues en utilisant Arc Gis



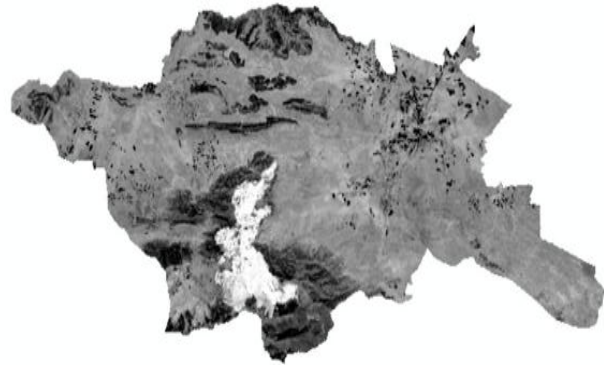
Calcul SAVI de Sétif (2014)



CALCUL NBR DE SETIF (2014)



NBR PRE-FIRE



NBR POST-FIRE

3-2.Création des images composites

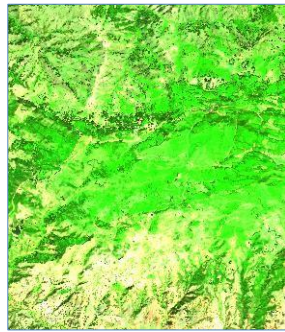
L'algorithme génère deux composites d'images temporelles à partir de la collection d'images Landsat sélectionnée. Chaque composite contient toutes les images Landsat disponibles entre les dates de début et de fin de la saison des feux de forêts.

Le composite d'images post-feu (brûlé) maximise l'indice spectral NBR dans chaque pixel de chaque scène représentant les zones brûlées les plus affectées observées dans la série chronologique. Le composite d'images pré-feu (non brûlé) maximise l'indice NDVI et présente les zones les moins touchées par le feu. Les périmètres brûlés sont détectés en soustrayant l'image post-feu de l'image pré-feu ($\text{MaxNBR} - \text{MaxNDVI}$).

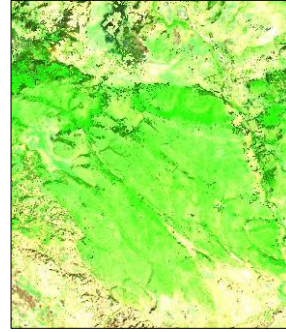
Les composites d'images temporelles sont affichés en combinaison de bandes SWIR 2, NIR et bande rouge dont les périmètres brûlés apparaissent sur le composite post-incendie dans la couleur rouge correspondant aux valeurs de réflectance dans le SWIR 2(**figure3-4**)



BOUTALEB 2014

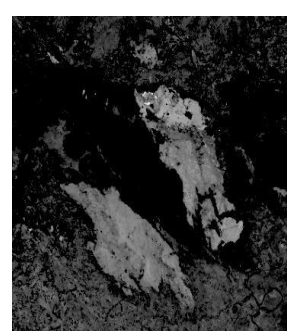
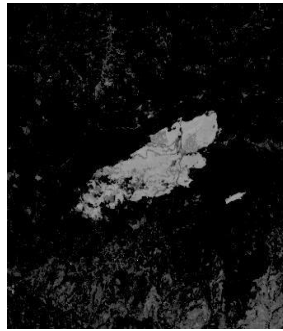
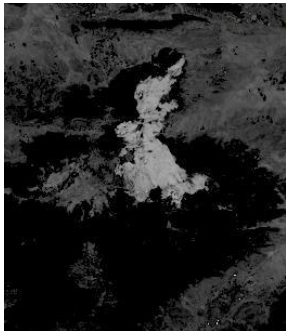


Guenzet 20

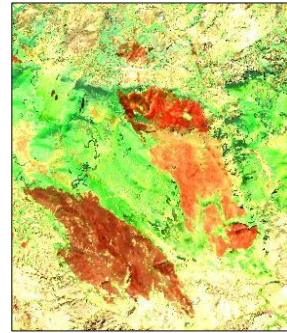
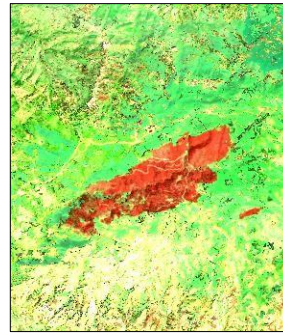
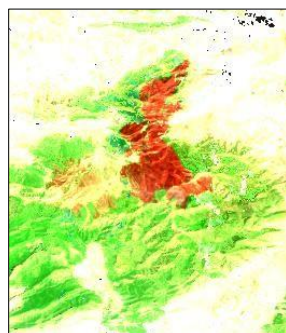


H. Guergour 2020

Composite d'images pré-feu (MaxNDVI)



Composite d'images post-feu (MAX NBR)



(Pré-feu)-(post-feu)

(MAX NDVI-MAX NBR)

Figure 3-4 : Détection des périmètres de feux de forêts.

3-3. Classification supervisée des zones brûlées (Random Forest Classifier)

L'algorithme utilise une stratégie supervisée en deux phases qui équilibre les erreurs de commission et d'omission. La première phase applique des critères stricts pour réduire l'erreur de commission et la deuxième phase vise à réduire l'erreur d'omission en utilisant un critère plus flexible.

Un certain nombre de pixels clairement brûlés avec un fort signal (pixels de départ) ont été extraits par des polygones prédéfinis de chaque zone brûlée distincte à travers le territoire de la wilaya, puis nous avons procédé à la deuxième phase, qui analyse automatiquement les pixels voisins spectralement similaires aux pixels de départ, puis applique un algorithme de croissance de région (*region growing algorithm*) pour capturer tout le périmètre brûlé. Ces derniers ont été traités à une résolution spatiale de 30 m (figure 3-5)

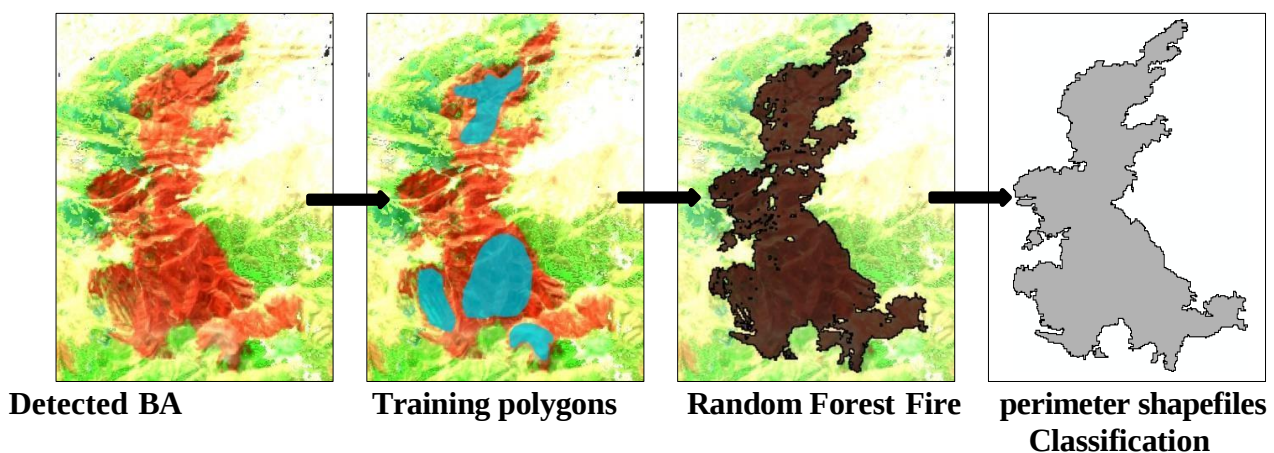
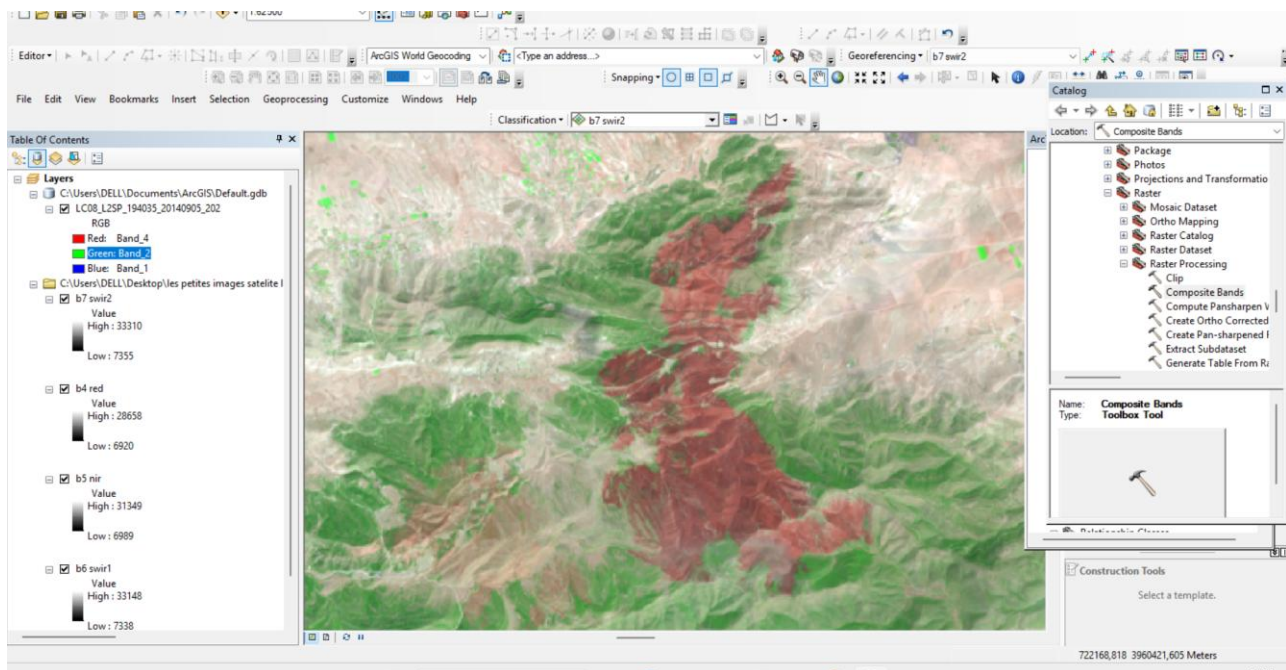


Figure 3-5: Classification supervisée des zones brûlées (Random Forest Classifier).

3-4.Évaluation visuelle des périmètres de feux

La dernière étape consistait à évaluer visuellement les périmètres brûlés produits. En cas de cartographie inexacte ou de confusion avec d'autres pixels, nous avons modifié nos polygones d'entraînement en créant de nouveaux de manière itérative pour obtenir les meilleurs résultats de cartographie.

Les périmètres brûlés finaux ont été exportées au format ESRI Shapefile pour un géotraitement sur ArcMap.

Les attributs du fichier de formes sont la date d'acquisition de l'image Landsat sur laquelle les feux de forêts ont été détectés et le nombre de pixels brûlés.

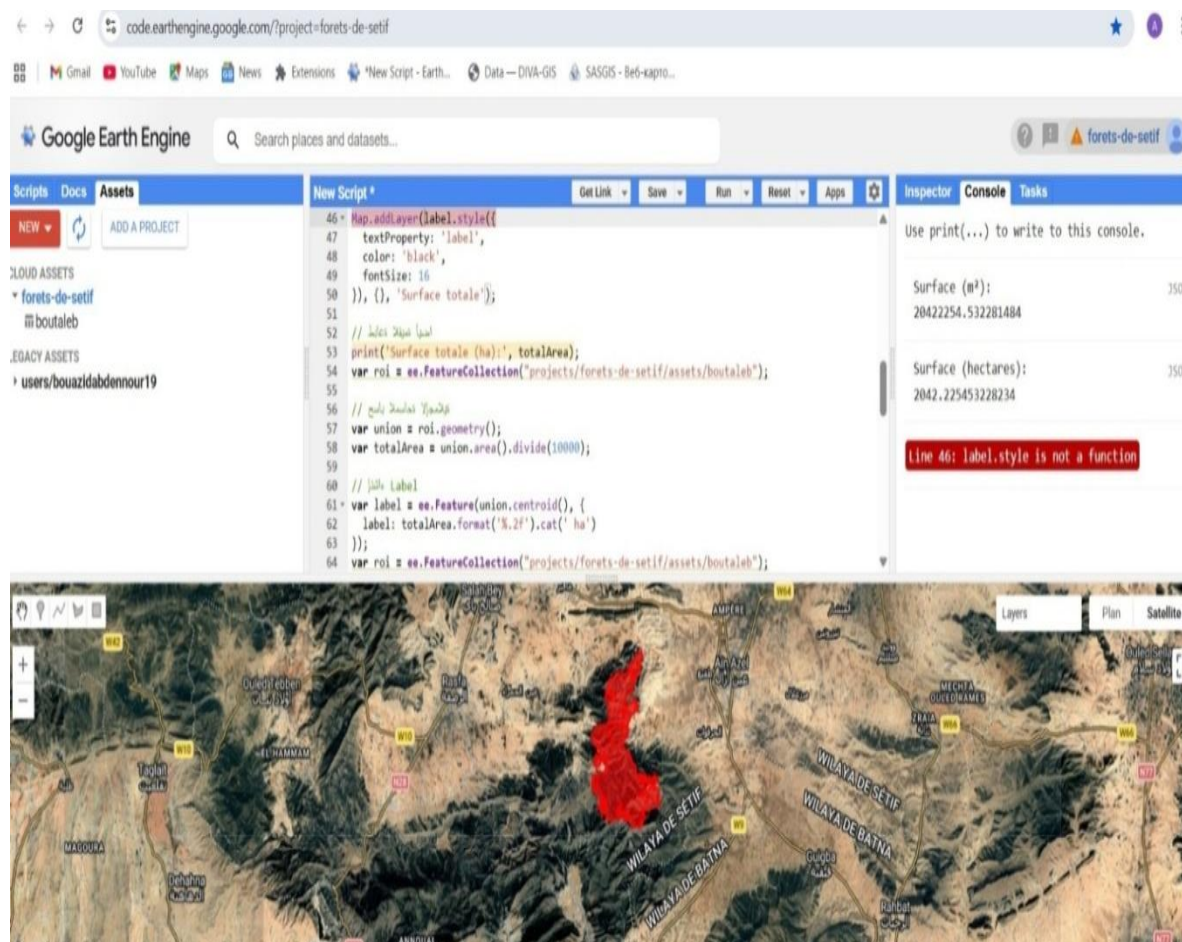


Figure 3-6: Périmètre de feux Sétif (BOUTALEB 2014) Sur Google Earth Engine (GEE) site05

3-5.Géotraitement des périmètres de feux

Les fichiers de formes obtenus ont ensuite été importés dans ArcMap pour une analyse plus approfondie. Les polygones présentant une confusion spectrale y compris ceux d'une superficie inférieure à **5 ha** ont été enlevés.

Étant donné que l'administration des forêts ne prend en compte que les feux de forêts qui touchent le domaine forestier national (**DFN**), nous n'avons retenu que les périmètres qui ont intersecté la couche **DFN** à l'aide de l'outil « sélectionner selon l'emplacement ».

Les périmètres de feux ont été projetés en **WGS 84 UTM Zone 31** ce qui a permis de calculer les superficies des feux puis une jointure spatiale a été utilisée pour identifier la commune de chaque périmètre de feu.

4-Analyse spatiale des feux de forêts

Le but de cette partie de la méthodologie est d'analyser la distribution spatiale des feux de forêts à l'aide de l'estimation de la densité de noyau (**Kernel Density Estimation**), une méthode largement utilisée dans l'analyse des motifs de points en études spatiales. Cette approche permet d'identifier les zones de concentration des incendies et de mettre en évidence les variations de l'intensité de leur répartition au sein de la zone d'étude, grâce à l'estimation de la densité des points sur une grille couvrant l'ensemble de l'espace étudié. À travers cette analyse, nous cherchons à répondre à plusieurs questions essentielles :

- Les feux de forêts présentent-ils une distribution spatiale groupée, dispersée ou aléatoire ?
- Si les feux de forêts sont regroupés, où se produit le regroupement ?
- Quels sont les facteurs à l'origine de l'occurrence de ces feux ?

4-1. Analyse d'Agrégat Spatial Multi-Distances (fonction K de Ripley)

L'Analyse d'Agrégat Spatial Multi-Distances est une méthode d'analyse du modèle spatial de données ponctuelles d'incident basée sur la fonction K de Ripley (Dixon, 2014). Elle récapitule la dépendance spatiale (agrégation ou dispersion des entités) sur une plage de distances. La fonction K de Ripley illustre comment l'agrégation ou la dispersion spatiale des centroïdes d'entité évolue lorsque la taille du voisinage change (figure 3-7).

Dans la présente étude, cet outil est utilisé pour pouvoir déterminer si les centroïdes des feux de forêt présentent une agrégation ou une dispersion statistiquement significative sur une plage de distances.

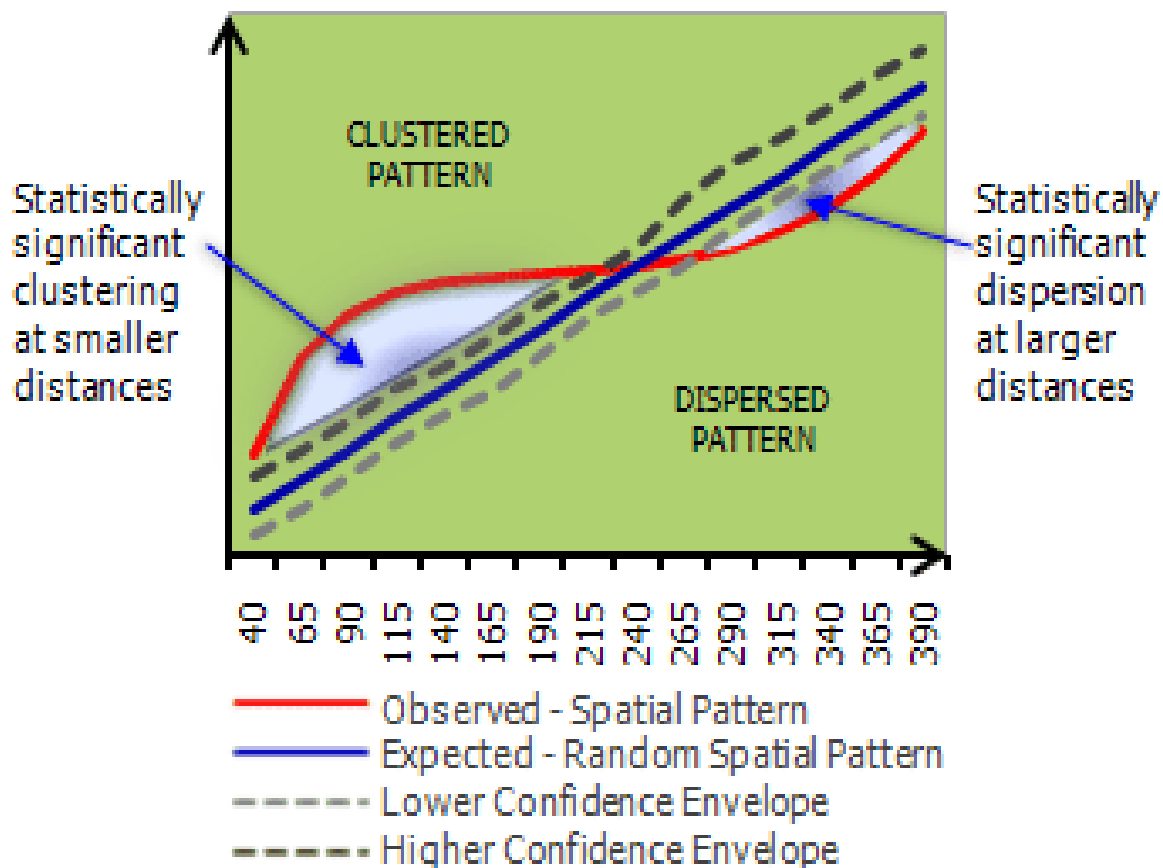


Figure 3-7 : Fonction K de Ripley.

4-2.Estimation de la densité de noyau (Kernel Density Estimation)

Les méthodes d'estimation de la densité de noyau (**Silverman, 1986**) sont souvent utilisées pour visualiser et analyser les données spatiales, dans le but de comprendre et de prédire potentiellement les modèles d'événements (**De Smith et al., 2007**). Les cartes de densité de noyau sont très demandées dans l'analyse des feux de forêts (**Koutsias et al., 2014, 2004; Kuter et al., 2011**).

Ce type d'analyse est particulièrement utile pour détecter les points chauds en raison de la série d'estimations effectuées sur une grille placée sur l'ensemble du nuage de points. Chacune de ces estimations montre l'intensité à un certain endroit et détecte donc les hauts et les bas des densités de motifs de points (**figure 3-8**).

Nous avons effectué l'analyse en utilisant un rayon de recherche (bande passante) par défaut calculé à 13.363,44 m. Le rayon de recherche par défaut (bande passante) est calculé spécifiquement sur le jeu de données en entrée à l'aide d'une variante spatiale de la règle générale de Silverman (**Silverman, 1986**) qui ne tient pas compte des points spatiaux aberrants (points qui sont éloignés des autres points).

La méthode de classification est appelée seuils naturels (*Jenks*), dont les classes sont déterminées par les regroupements naturels inhérents aux données avec cinq classes et dégradés de couleurs bleu à rouge pour indiquer les hauts (rouge) et les bas (bleu) des densités de motifs de points.

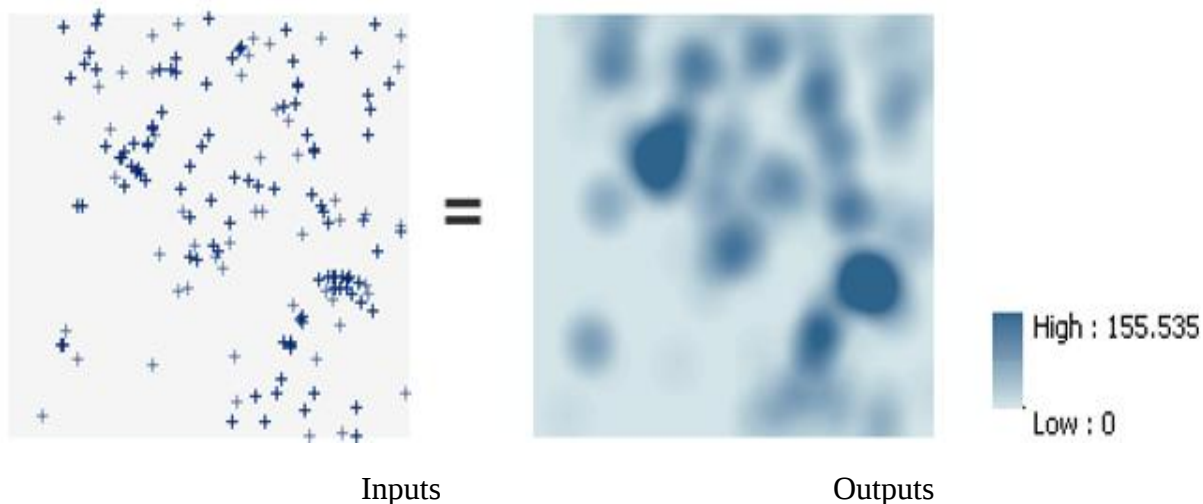


Figure 3-8 : Fonctionnement de l'outil densité de noyau.

5-Conclusion

Ce chapitre décrit la méthodologie utilisée pour analyser les feux de forêt dans la wilaya de Sétif (2000–2020), combinant deux outils complémentaires : Google Earth Engine pour la télédétection et ArcMap pour l'analyse spatiale.

Les images Landsat ont servi à calculer des indices spectraux (NDVI, SAVI, NBR) et à identifier les zones brûlées par comparaison temporelle avant/après incendie, puis exportées en Shapefile. L'analyse spatiale a ensuite mobilisé la fonction K de Ripley pour étudier l'agrégation des foyers, et la Kernel Density Estimation pour cartographier les zones à forte récurrence.

Cette approche a permis de constituer une base de données géoréférencée fiable, essentielle pour comprendre la dynamique des incendies et orienter les politiques de prévention.

Chapitre 4 : Résultats & Discussions

1-Introduction

L'étude de la dynamique spatiale et temporelle des feux de forêt constitue une étape essentielle pour comprendre l'ampleur des incendies et leurs impacts sur les écosystèmes forestiers de la wilaya de Sétif. Grâce aux techniques de télédétection et aux outils d'analyse géospatiale, il est possible de détecter les zones brûlées, d'évaluer les superficies affectées et d'analyser la répartition des incendies selon leur fréquence et leur intensité.

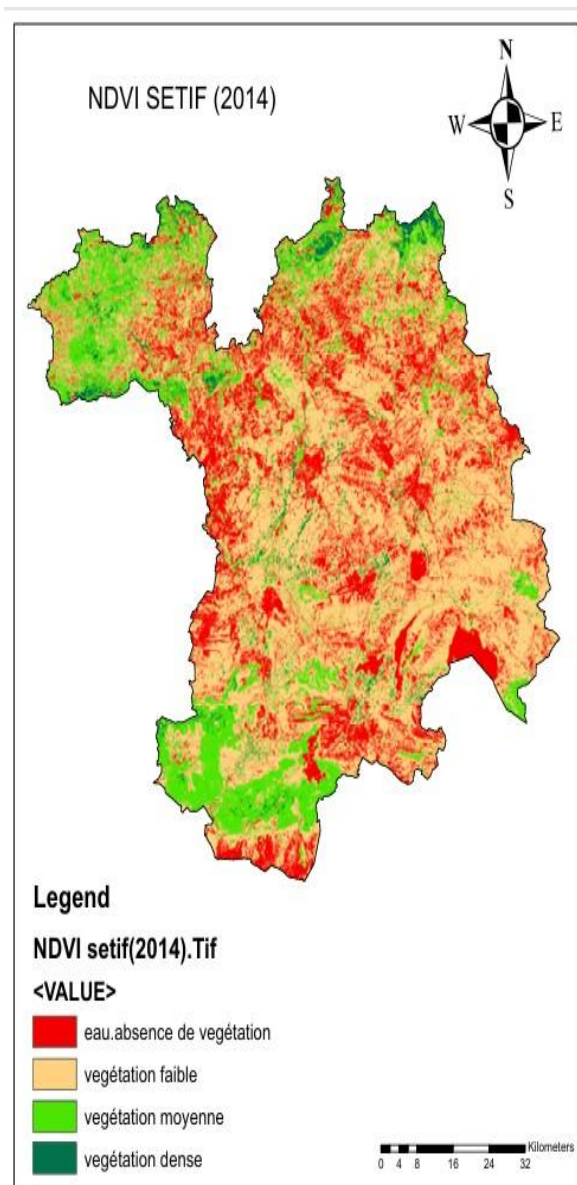
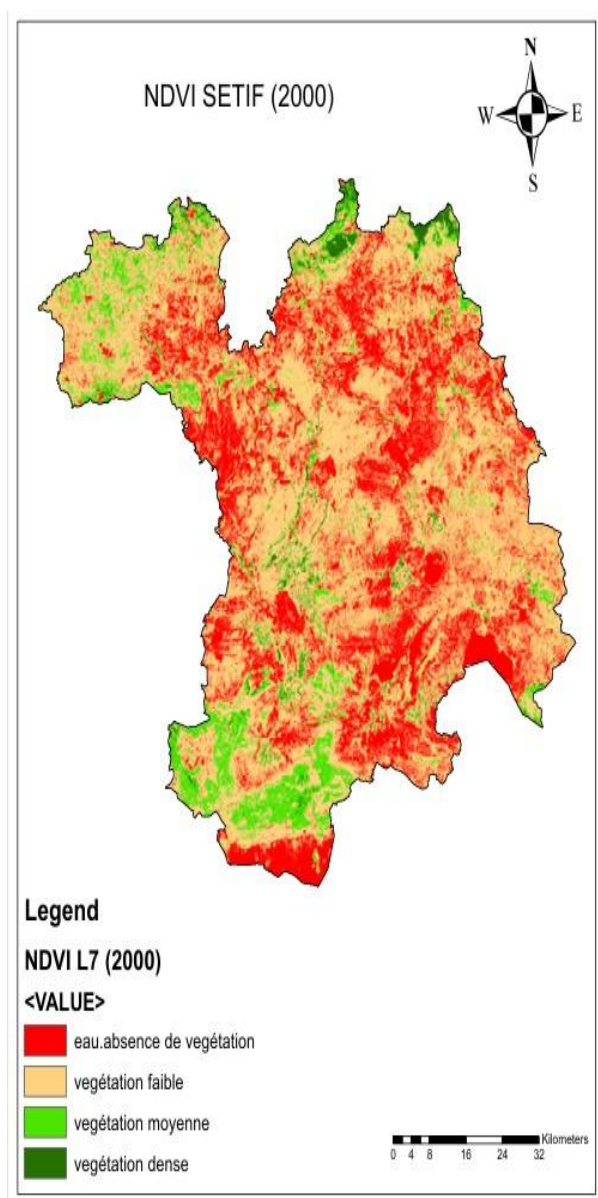
Dans ce chapitre, les images satellitaires Landsat traitées à l'aide de la plateforme Google Earth Engine ont permis de cartographier les périmètres historiques des feux de forêt entre 2000 et 2020. L'analyse porte également sur la distribution spatiale des incendies, les classes de superficies brûlées ainsi que les zones les plus touchées au niveau des massifs forestiers de la wilaya.

Ce chapitre nous permettra de présenter les résultats obtenus et de les discuter.

2-Résultats

2-1.NDVI et SAVI (2000-2020)

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'application des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et de la télédétection pour la cartographie et la gestion des risques forestiers. Il porte sur l'analyse diachronique de la végétation forestière de la wilaya de Sétif sur la période 2000–2020, à travers le calcul et la cartographie de deux indices spectraux : le NDVI et le SAVI. Les résultats obtenus constituent un outil d'aide à la décision pour la gestion des risques d'incendies et de désertification dans la région de Sétif.



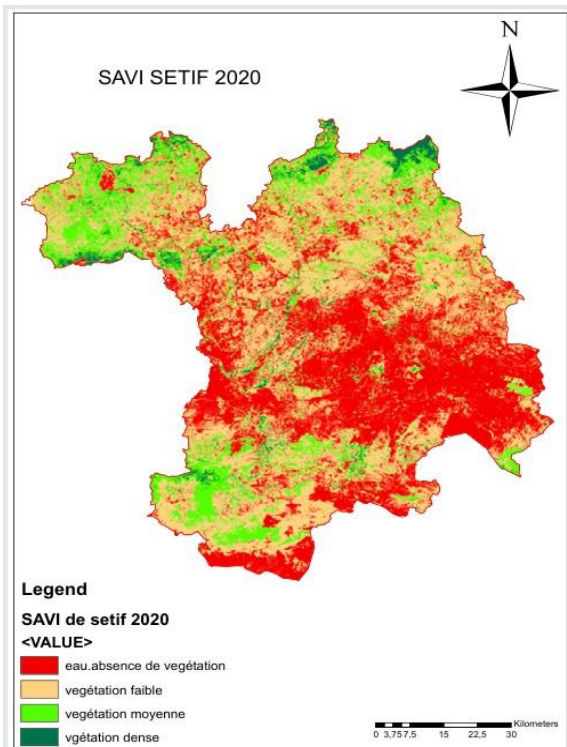
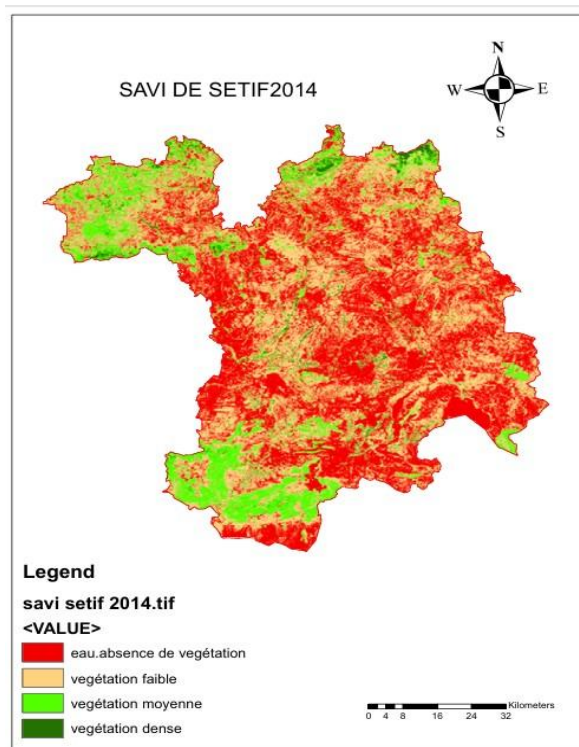
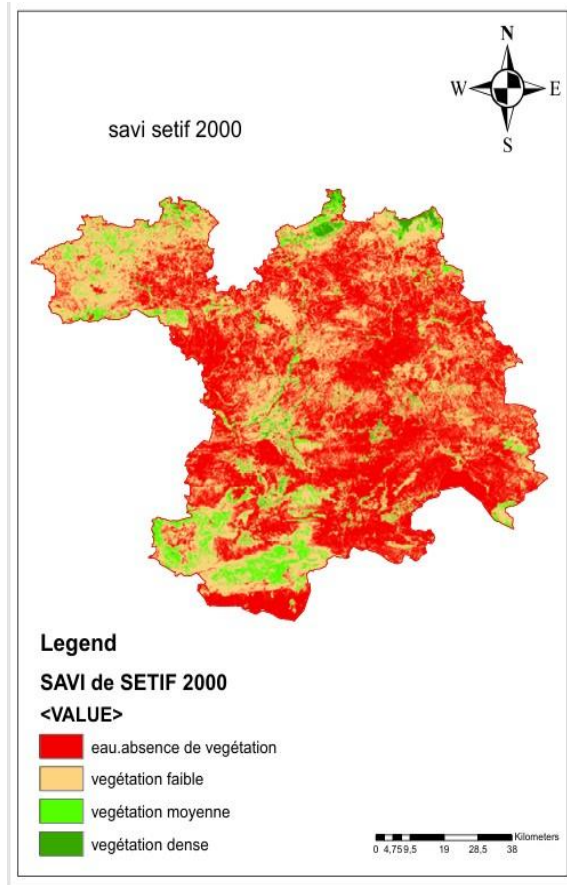
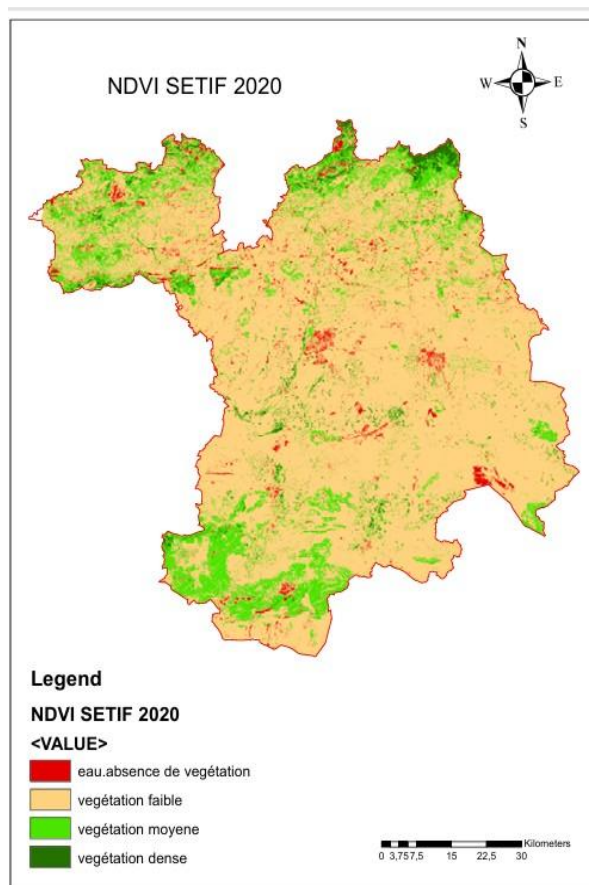


Figure 4-1 : Cartes NDVI et SAVI de la WILAYA DE SETIF (2000-2020).

L'analyse comparative des cartes NDVI et SAVI de 2000, 2014 et 2020 montre une évolution progressive de la couverture végétale dans la wilaya de Sétif.

En 2000, les surfaces dépourvues de végétation dominaient très largement le territoire, révélant un paysage majoritairement constitué de sols nus, de terrains agricoles non couverts et de zones steppiques peu productives.

En 2014, une légère amélioration est observée, marquée par une augmentation des zones de végétation faible à moyenne, notamment dans les régions septentrionales et certaines zones agricoles. Malgré cela, l'absence de végétation demeure encore largement prédominante.

En 2020, la situation évolue plus favorablement : les zones de végétation moyenne et dense deviennent plus étendues, surtout dans les zones forestières et montagnardes du Nord. Bien que les surfaces à faible couverture végétale restent importantes dans les Hautes Plaines et le Sud, la tendance générale indique un renforcement de la végétation sur le long terme.

Cette évolution, bien que progressive, reflète des transformations écologiques et socio-environnementales importantes à l'échelle de la wilaya. Le renforcement du couvert végétal observé entre 2000 et 2020 peut être attribué à plusieurs facteurs conjugués, notamment les programmes de reboisement mis en œuvre à l'échelle nationale, une réduction partielle de la pression pastorale dans certaines zones, ainsi que des variations pluviométriques favorables sur certaines périodes.

2-2.Étude comparative NDVI-SAVI

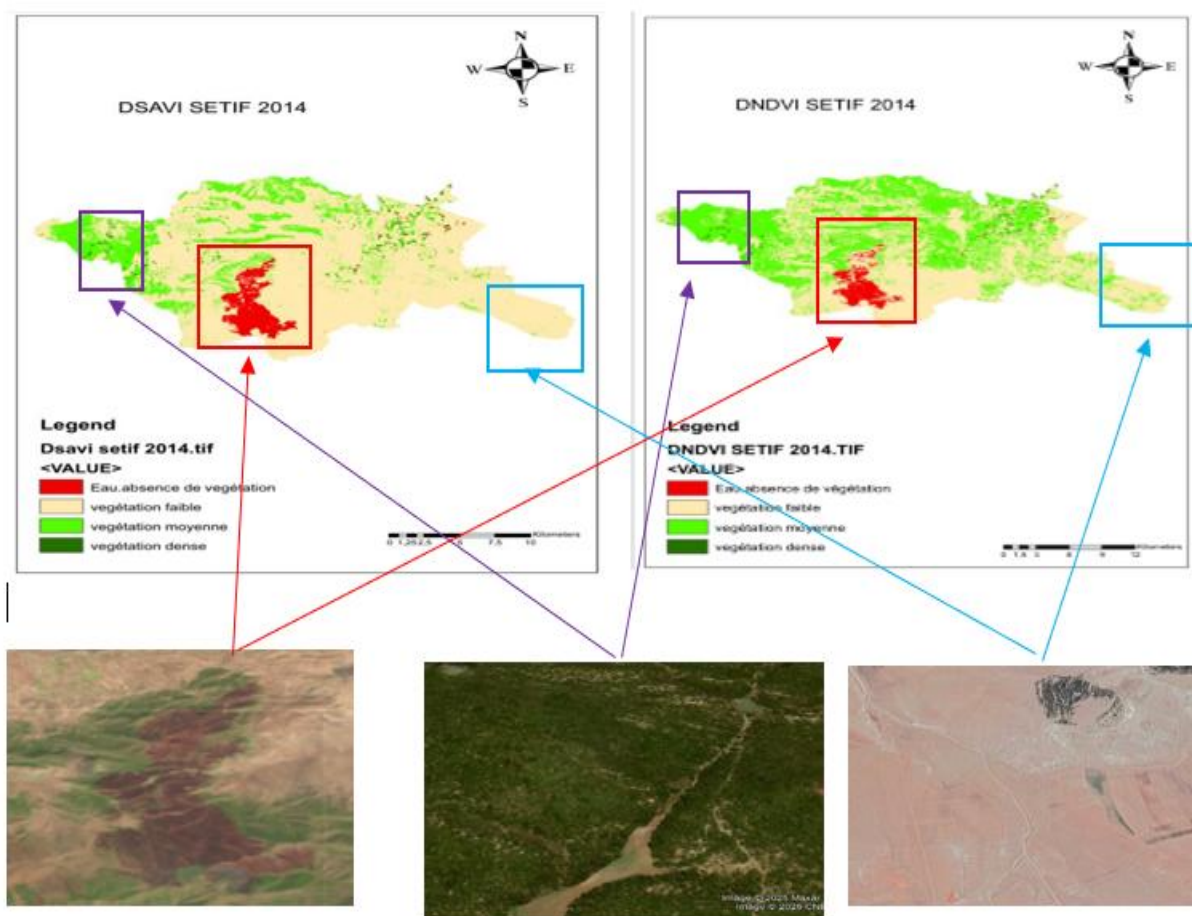


Figure 4-2 : Analyse comparative des indices de végétation NDVI et SAVI à partir des images Landsat dans la wilaya de Sétif (2014).

La différence entre DNDVI et DSAVI représente sur le tableau 4-1

2-2-1.Différences principales entre DNDVI et DSAVI

Tableau 4-1 : Analyse comparative des indices DNDVI et DSAVI dans l'évaluation des zones brûlées.

Critère	DNDVI	DSAVI
Sensibilité à la végétation	Très élevée	Moyenne
Sensibilité au sol	Forte (mauvaise)	Faible (meilleure)
Pertinent en zones semi-arides	✗ Peu fiable	✓ Idéal
Pertinent en zones densément végétalisées	✓ Très bon	✓ Bon
Bruit radiométrique	Plus élevé	Plus faible
Détection des zones brûlées	Très bonne	Bonne, mais plus stable

2-2-2 .Application aux zones brûlées

- **DNDVI** → détecte **fortement** les zones brûlées (grande baisse du NDVI).
- **DSAVI** → détecte aussi les brûlures mais avec **moins de bruit**, surtout lorsque le sol apparaît.

2-2-3.Résultat de comparaison

- Si la zone contient **beaucoup de sol nu**, **DSAVI** donnera des résultats **plus propres**.
- Si la zone est **forestière**, **DNDVI** est plus contrasté.

2-3.Détection et cartographie des zones brûlées

Les résultats de la détection et cartographie des périmètres de feux de forêts historiques à partir d'images multi-temporelles Landsat pour l'ensemble du territoire de Sétif en utilisant la puissance de traitement de GEE sont représentées ci-dessous.

2-3-1.Configuration spatiale des périmètres de feux

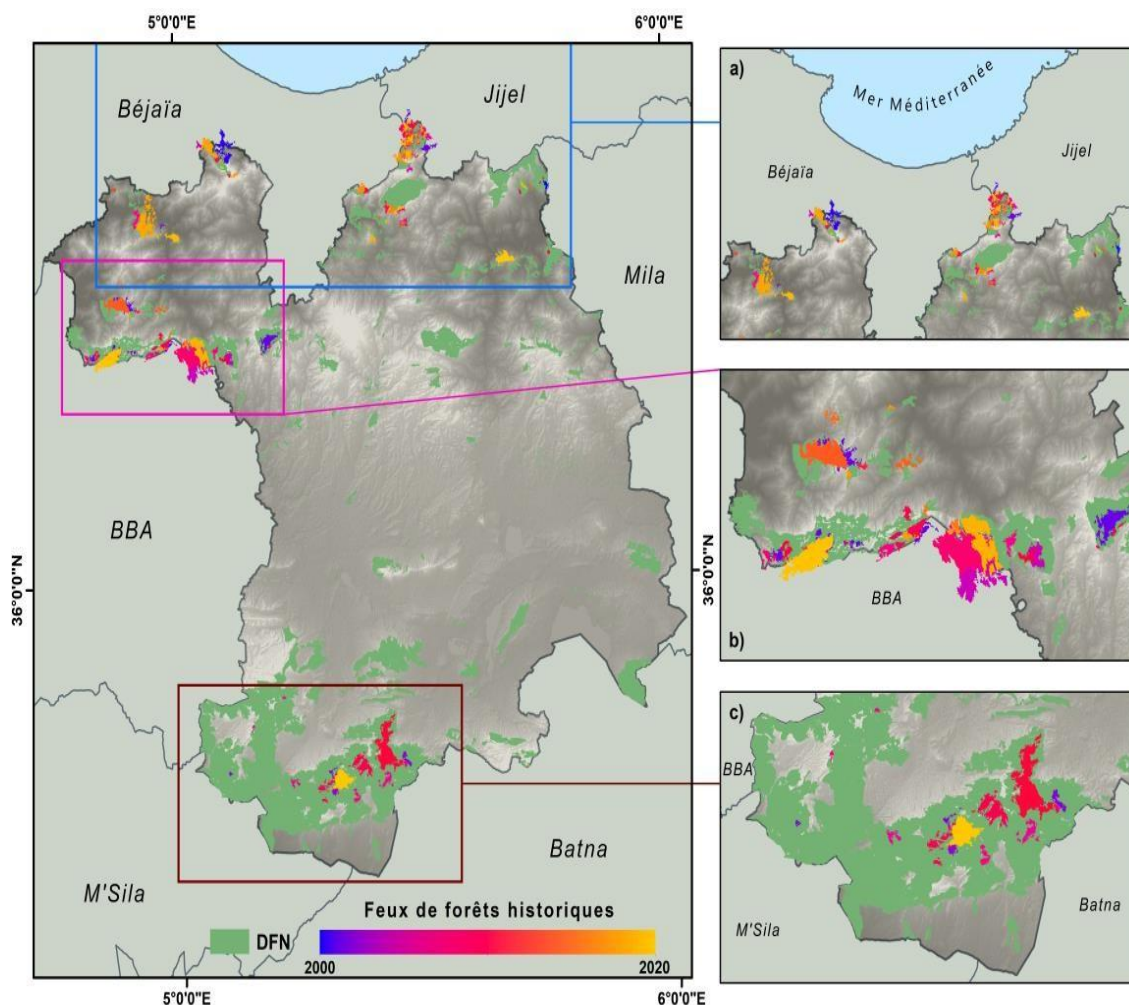


Figure 4-3 : Périmètres de feux de forêts historiques de Sétif (2000-2020).

La (Figure 4-3) illustre les périmètres historiques des feux de forêts survenus au cours des deux dernières décennies (2000–2020). On y observe clairement que l'occurrence des incendies est principalement concentrée dans certaines zones spécifiques, notamment au nord sur les massifs des BABORS (a), au nord-ouest sur les BIBANS (b), ainsi que dans la partie méridionale de la région du HODNA (c).

Par ailleurs, la (Figure 4-4) présente uniquement les périmètres des feux de forêts ayant touché le Domaine Forestier National (DFN) de la wilaya de Sétif. Au total, 114 incendies ont été recensés, ayant détruit une superficie forestière estimée à 10 005,09 hectares durant la même période. Ces périmètres de feux constituent ensuite la base de l'analyse spatiale réalisée dans cette étude.

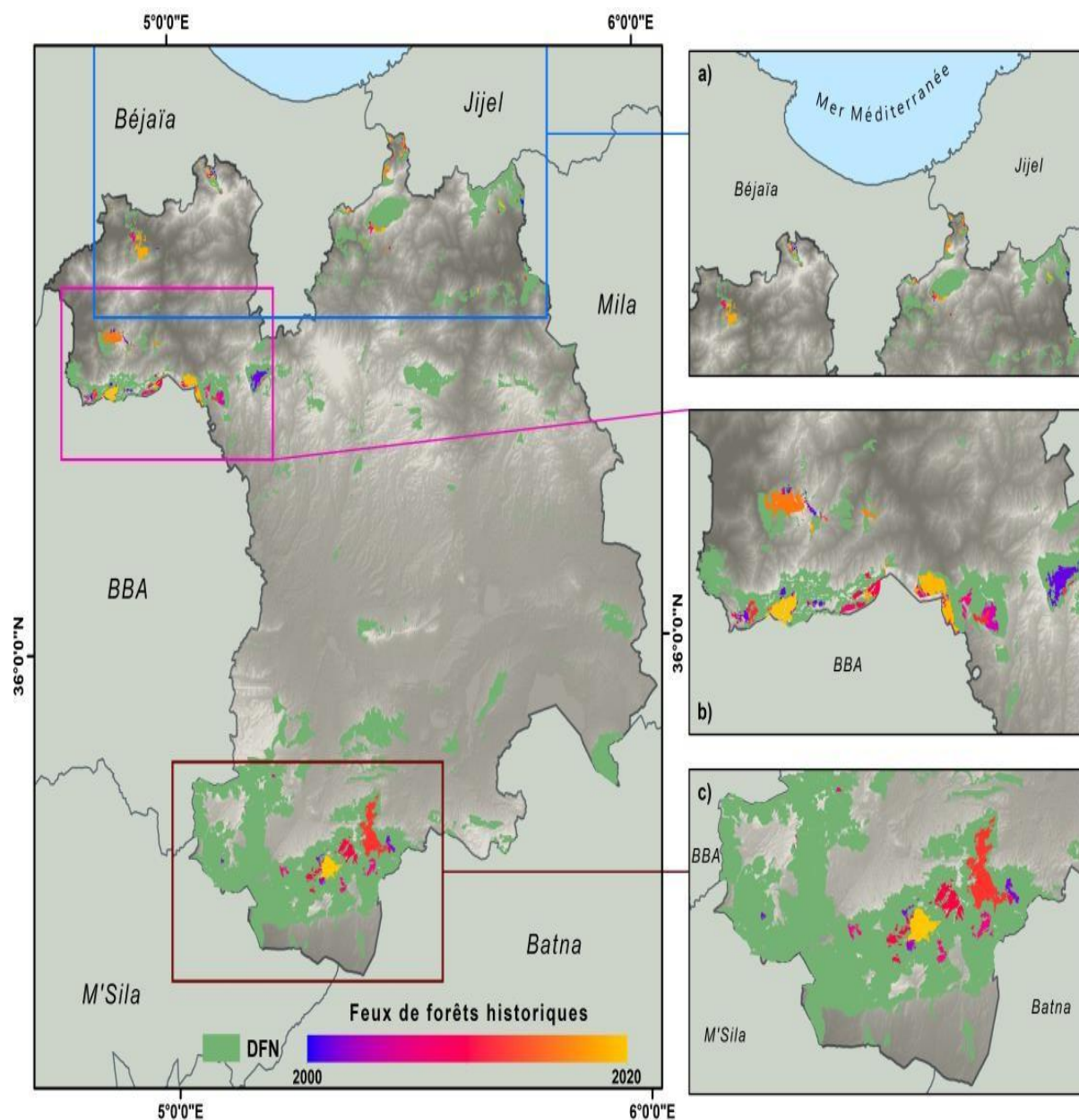


Figure 4-4 : Périmètres de feux de forêts historiques au DFN de Sétif (2000-2020).

2-3-2. Distribution spatiale de la fréquence des feux

L'observation de la (**Figure 4-5**), montre que la **zone (a)** se particularise par une activité des feux très intense avec 55 feux représentant **48,25%** du total des feux. La majorité de ces feux se sont produits dans la forêt domaniale de LAALEM avec **24** feux aux limites des wilayas de Béjaïa et Jijel et dans la forêt domaniale de Béni Slimane à l'ouest à la limite avec la wilaya de Béjaïa avec **09** feux.

La fréquence des feux dans la **zone (b)** est également importante avec **41** feux représentant **35,96%** du total des feux dont la majorité (**28 feux**) ont une tendance linéaire le long des limites avec la wilaya de Bordj Bou Arreridj à Ouled Rezzoug et Tafet et **07** feux à Taza. Les forêts domaniales de Lâanini et de Béni Foughal sont les moins affectés avec seulement **03** feux chacune.

L'activité des feux dans la **zone (c)** est la moins prononcée avec **18** feux représentant **15,78%** du total des feux principalement survenus sur le massif de Boutaleb (**15 feux**) et **03** feux à Righa Dhahra.

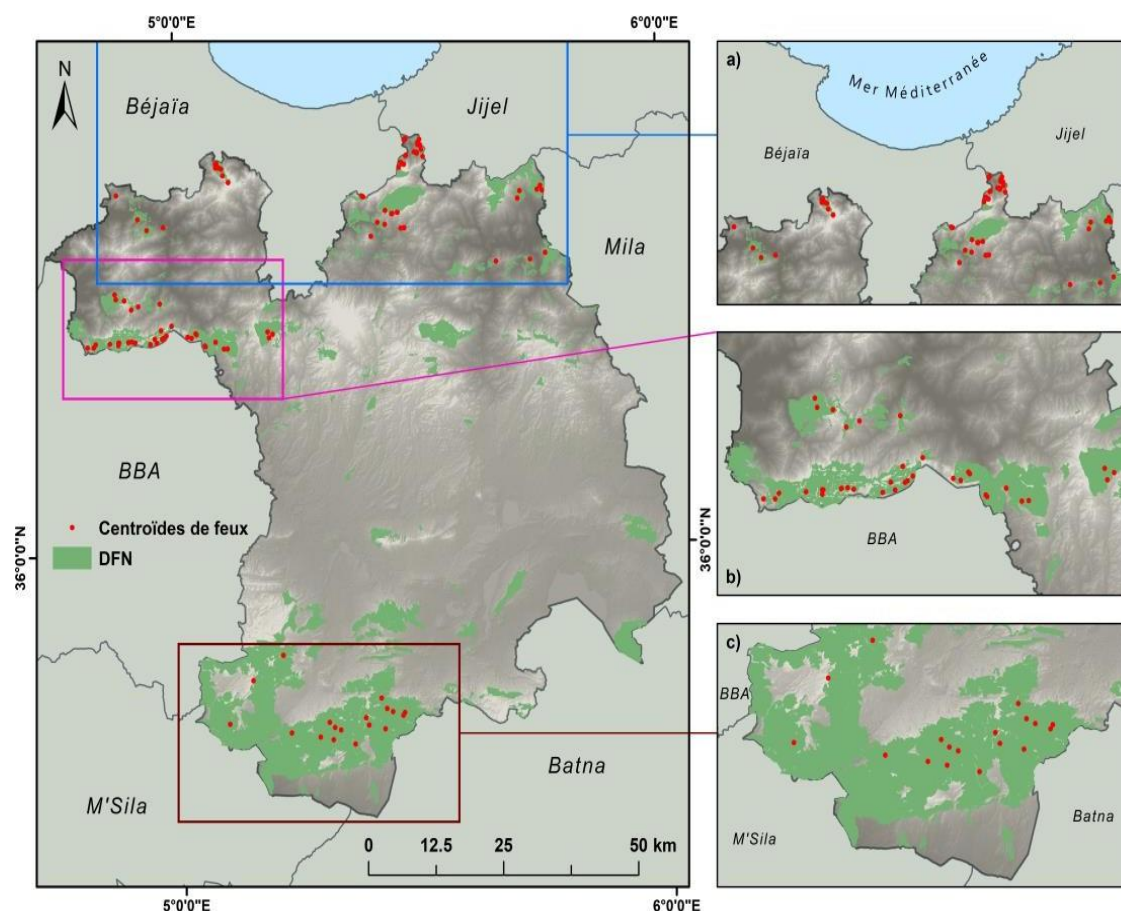


Figure 4-5 : Fréquence des feux de forêts à Sétif (2000 – 2020).

2-3-3. Distribution spatiale des superficies parcourues par le feu

La superficie parcourue par le feu est un indicateur important de leur pouvoir destructeur. Afin de mieux comprendre la distribution spatiale de la taille des feux de forêts sur le territoire de la wilaya, les périmètres de feux ont été regroupés en cinq classes (A – E) (San-Miguel-Ayanz et al., 2013).

Le nombre des feux de forêts et la superficie parcourue par le feu pour chaque classe de feux sont présentés dans le (TABLEAU 4-2)

Tableau 4-2 : Nombre de feux, superficie brûlée et leurs pourcentages par classe de feux.(source :auteurs)

	Classes de feux	Nbre de feux	%	Superficie (ha)	%
A	5 – 10 ha	19	16,67%	150,43	1,50%
B	10 – 50 ha	56	49,12%	1327,29	13,27%
C	50 – 100 ha	16	14,04%	1119,65	11,19%
D	100 – 500 ha	20	17,54%	4371,05	43,69%
E	> 500 ha	3	2,63%	3036,67	30,35%
	Total	114	100%	10005,09	100%

Une représentation plus claire du **tableau 4-2** est donnée dans la **Figure 4-6** .

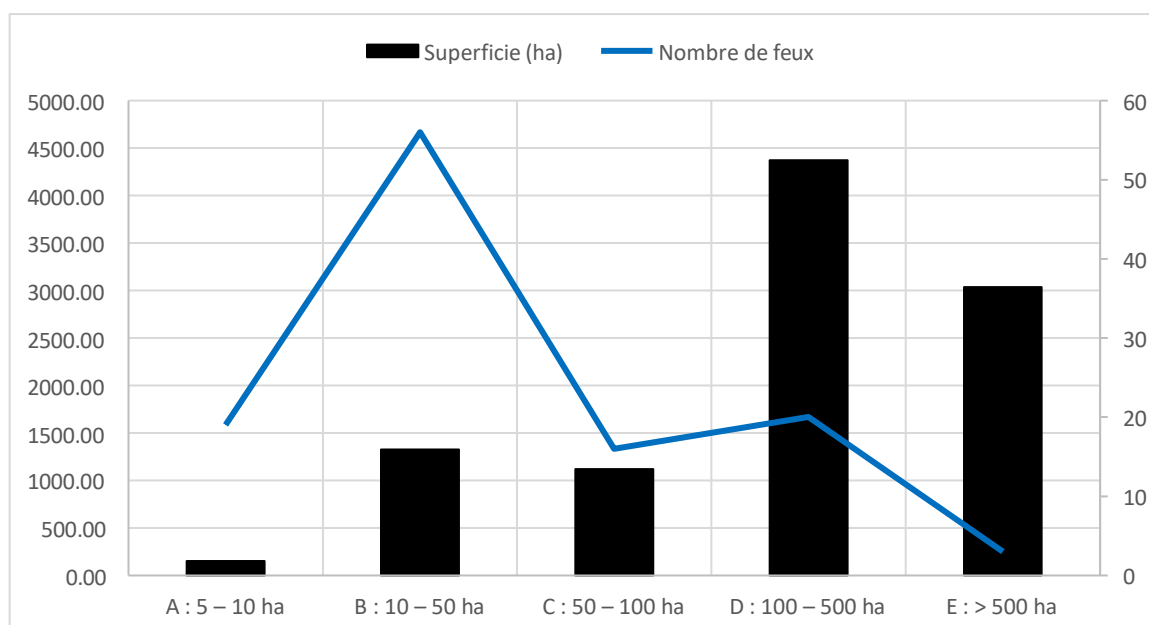


Figure 4-6 : Nombre de feux et superficie brûlée par classes de feux

Ce qui ressort du (**tableau 4-2**) et la (**figure 4-6**) est le fait qu'un nombre réduit de feux provoque la destruction de surfaces importantes et participe à une très large part du bilan des surfaces brûlées (Camia et al., 2011). Ceci est démontré dans la classe E où seulement **2,63%** des feux (**> 500 ha**) ont brûlé le tiers (**30,35%**) de la superficie totale et dans la (**classe D**) où **17,54%** des feux ont brûlé **43,69%** de la superficie totale. Les deux classes de feux (**D et E**) représentent **20,17%** du total des feux mais ont brûlé **74,04%** de la superficie totale. Encore une autre observation clé est que la **classe B (10 – 50 ha)** représente un pic de **49,12%** du total des feux mais avec seulement **13,27%** de la superficie totale brûlée. La **classe C (50 – 100 ha)** représente **14,04%** du total des feux avec **11,19%** de superficie brûlée. Les petits feux de forêts de la **classe A (5 – 10 ha)** représente **16,67%** du total des feux et ont brûlé que **1,50%** de la superficie totale parcourue par le feu.

La (**figure 4-7**) représente la distribution spatiale des cinq classes de feux de forêts dans la wilaya de Sétif.

- La **zone (a)** a le minimum de surface brûlée. À l'exception des feux de Béni CHEBANA survenus en 2009 et 2020, la taille des feux dans cette zone ne dépasse pas 100 ha dont 41,23% ne dépassant pas les 50 ha. Cette zone est dépourvue de feux de taille supérieure à 500 ha (classe E)
- La **zone (b)** est la plus affectée par ce fléau en termes de superficie brûlée (**4561,71 ha**). Elle se caractérise par moins de petits feux **< 10 ha (classe A)** représentant **2,63 %** du total des feux. Les **classes B (10 – 50 ha)** et **D (100 – 500 ha)** dominent les feux de forêts de la classe E (**> 500 ha**) n'existent pas.

Le massif de Boutaleb et Righa Dhahra (**zone c**) se caractérise par l'occurrence des feux de forêts extrêmes (**> 500 ha**) ou seulement 03 feux déclenchés dans les années 2013, 2014 et 2020 ont brûlé **3036,67 ha (30,35%)** de formations forestières. Le feu de forêt survenu dans la commune d'Aïn AZEL en 2020 demeure le plus destructeur des deux dernières décennies où **1809,58 ha (18,09%)** de pin d'Alep et de chêne vert ont été mis en fumée. Les feux de forêts de taille inférieure à 10 ha (classe A) sont pratiquement inexistantes dans cette zone. Il y avait un seul feu de **9,44 ha** dans la commune d'OULED TEBBEN en 2007.

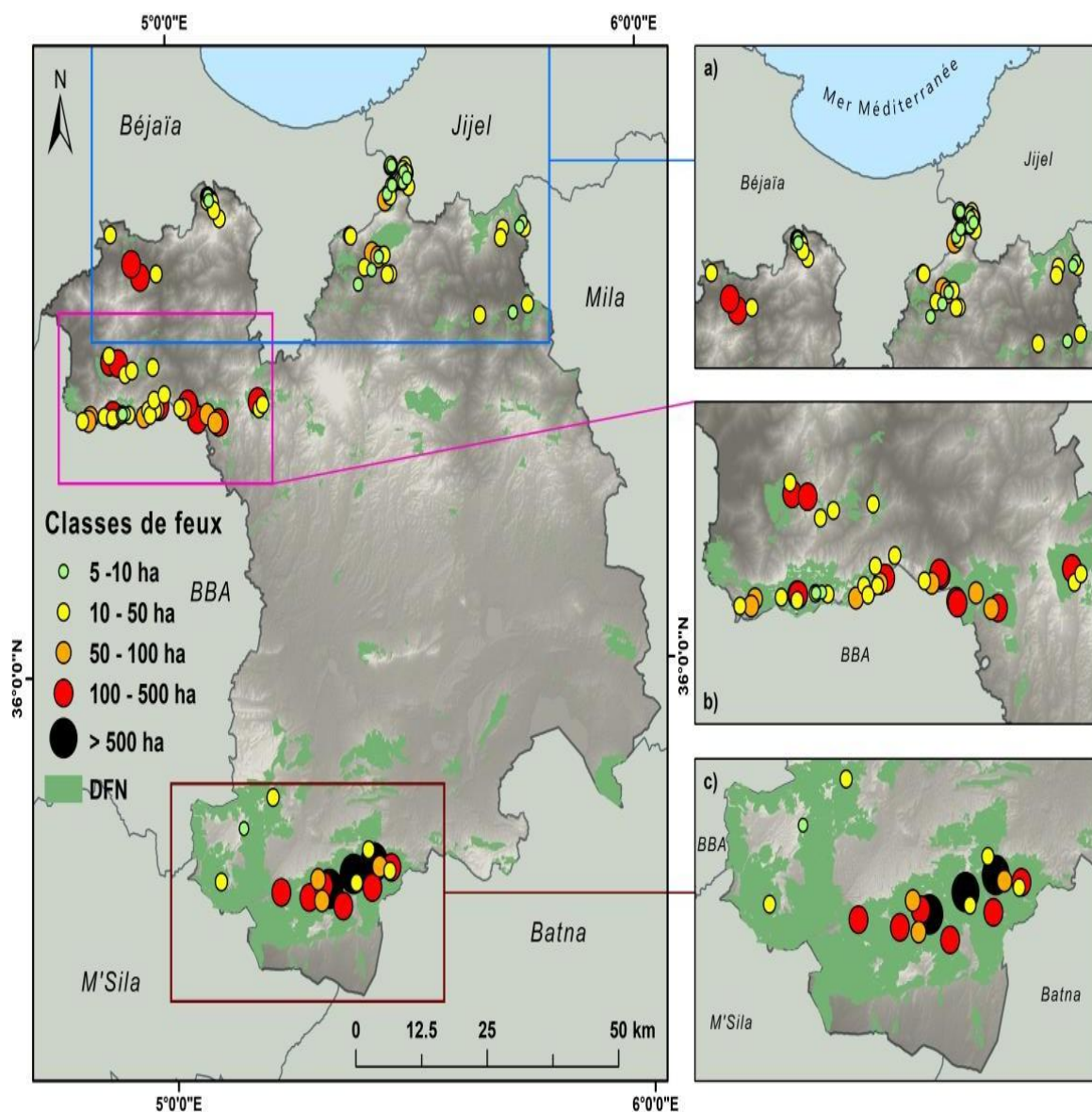


Figure 4-7 : Distribution spatiale des classes de feux de forêts à Sétif (2000 – 2020).

2-4. Analyse spatiale des feux de forêts

2-4-1. Analyse d'Agrégat Spatial Multi-Distances (fonction K de Ripley)

Le résultat de l'Analyse d'Agrégat Spatial Multi-Distances est donné dans le **tableau 4-3** et la **Figure 4-8**.

Pour les 10 enregistrements générés, le champ **ObservedK** est supérieur au champ **ExpectedK** dans 08 enregistrements. Cela indique une agrégation de points (**cluster**). Cependant, nous devons examiner cela en relation avec le champ **HiConfEnv** pour une signification statistique.

Le champ **ObservedK** est supérieur au champ **HiConfEnv**, cela indique un regroupement statistiquement significatif. Encore une fois dans les **10 cas**, notre champ **ObservedK** est plus élevé que le champ **HiConfEnv**, indiquant que nous avons un regroupement statistiquement significatif pour les feux de forêts à Sétif. Cela indique qu'il existe un processus spatial sous-jacent qui provoque l'éclosion de feux à toutes les distances observées.

Tableau 4-3 : Résultats de l'analyse d'agrégat spatial multi-distances

OBJECTID *	ExpectedK	Observed K	DiffK	LwConfEn v	HiConfEnv
1	2804.552 495	9858.182 309	7053.62981 3	2366.52064 8	3246.839 543
2	5609.104 991	13787.12 598	8178.02098 8	4937.43847 8	5768.282 534
3	8413.657 486	16355.50 1	7941.84351 6	7350.34563 5	8455.040 735
4	11218.20 998	18375.86 409	7157.65410 7	9706.63846 1	10707.18 877
5	14022.76 248	20710.53 556	6687.77307 8	11998.4889 5	13050.61 894
6	16827.31 497	21810.69 145	4983.37648	14000.5249 6	15196.54 451
7	19631.86 747	22771.31 974	3139.45227 1	16325.2596 8	17653.52 373
8	22436.41 996	23665.20 648	1228.78651 7	18447.4354	19708.00 846
9	25240.97 246	24667.16 763	-573.804832	20438.3326 9	21855.95 755
10	28045.52 495	26396.17 648	-1649.34847 9	22251.8092 1	24229.23 417

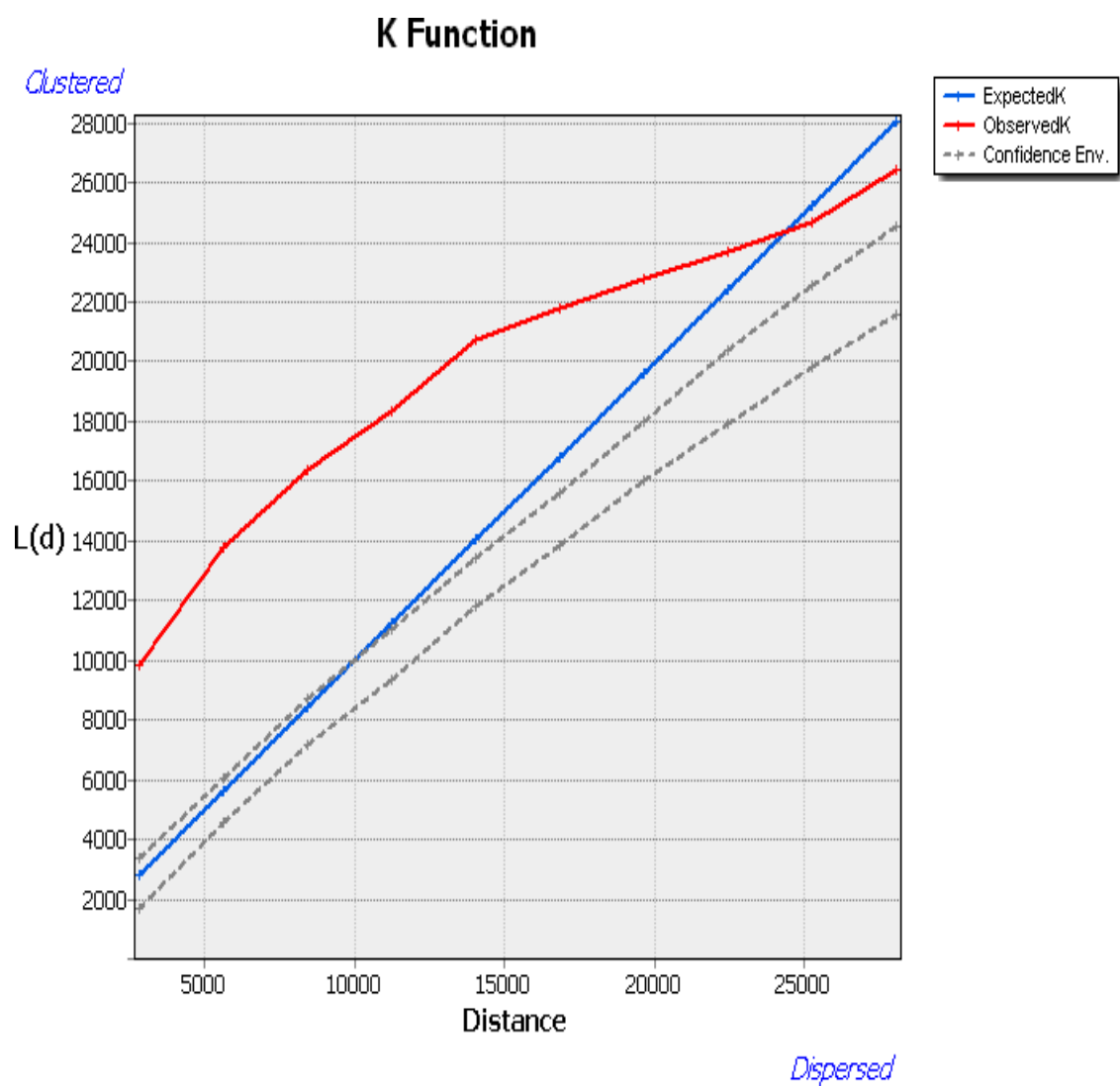
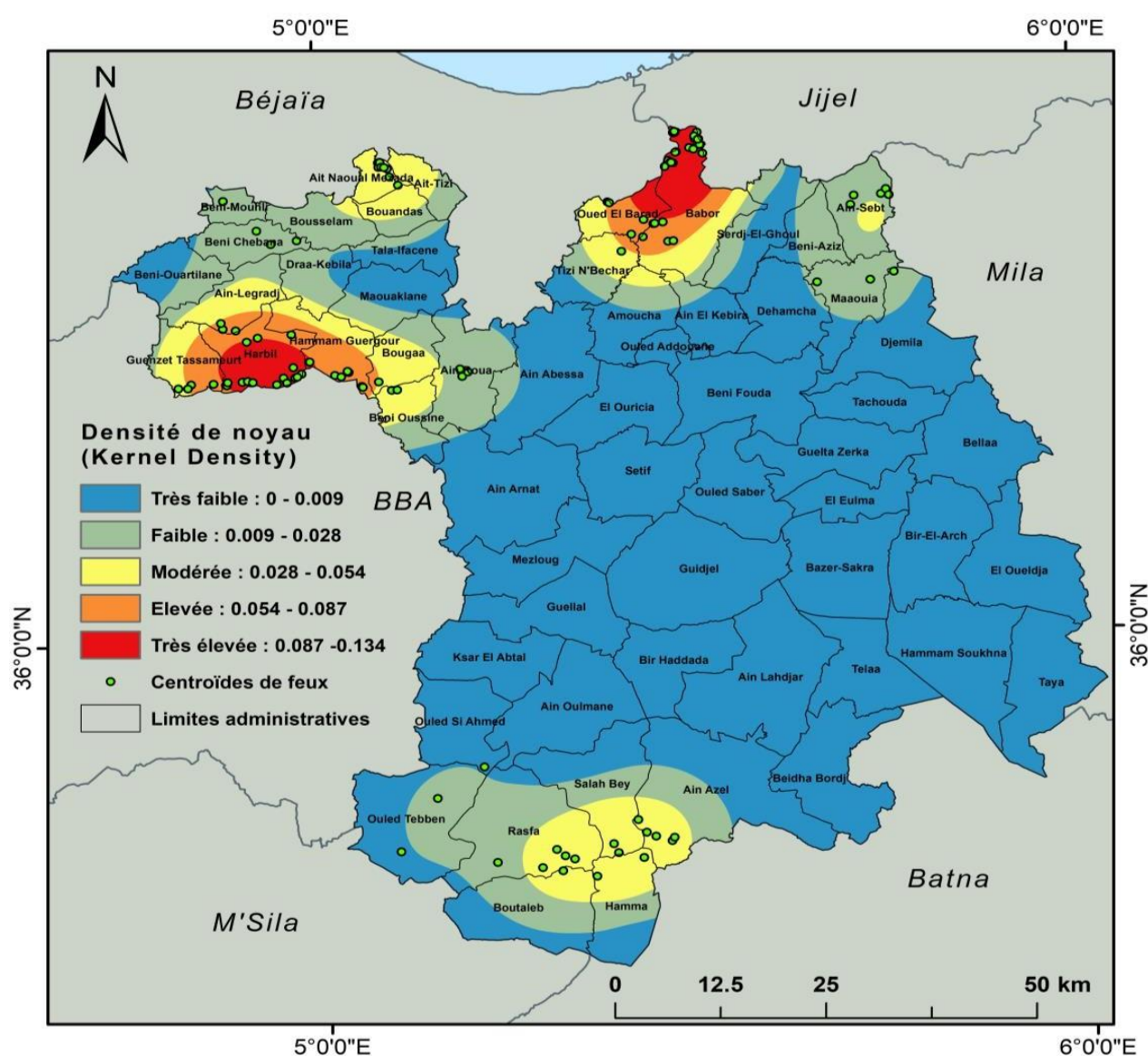


Figure 4-8 : Résultat de la fonction K de Ripley

2-4-2. Estimation de la densité de noyau (Kernel Density Estimation)

Les résultats de l'analyse de densité de noyau sont présentés dans la (figure 4-9) et la (figure 4-10). La (figure 4-9) montre la densité spatiale des feux de forêts ; tandis que la (figure 4-10) représente la densité spatiale des feux de forêts pondérée par leurs superficies. La résolution des analyses de densité de noyau est de 10 m.

Les points chauds de densité de feux très élevée (0,087 – 0,134) se trouvent à l'extrême nord de la wilaya dans les forêts domaniales de Lâalem et de Babor près des wilayas de Béjaïa et Jijel et au nord-ouest dans la forêt domaniale d'Ouled Rezzoug à la limite avec la wilaya de Bordj Bou Arreridj. La densité des feux est moyenne (0,028 – 0,054) dans le Boutaleb, Béni Slimane et Tamentout. Le reste du territoire de la wilaya est de faible à très faible densité de feu (0 – 0,028).



Après avoir induit la superficie parcourue par le feu dans le calcul de la densité de noyau, la distribution de la densité spatiale a considérablement changé (**figure 4-10**).

L'analyse de densité de noyau pondérée a conduit à l'émergence d'un point chaud unique à valeurs très élevées (33,505 – 54,075) dans la limite sud de Sétif sur le Boutaleb. Cette zone est exacerbée par les grands feux de forêts. Dans la zone du Nord-Ouest, on distingue deux autres points chauds à valeurs élevées (18,237 – 33,505).

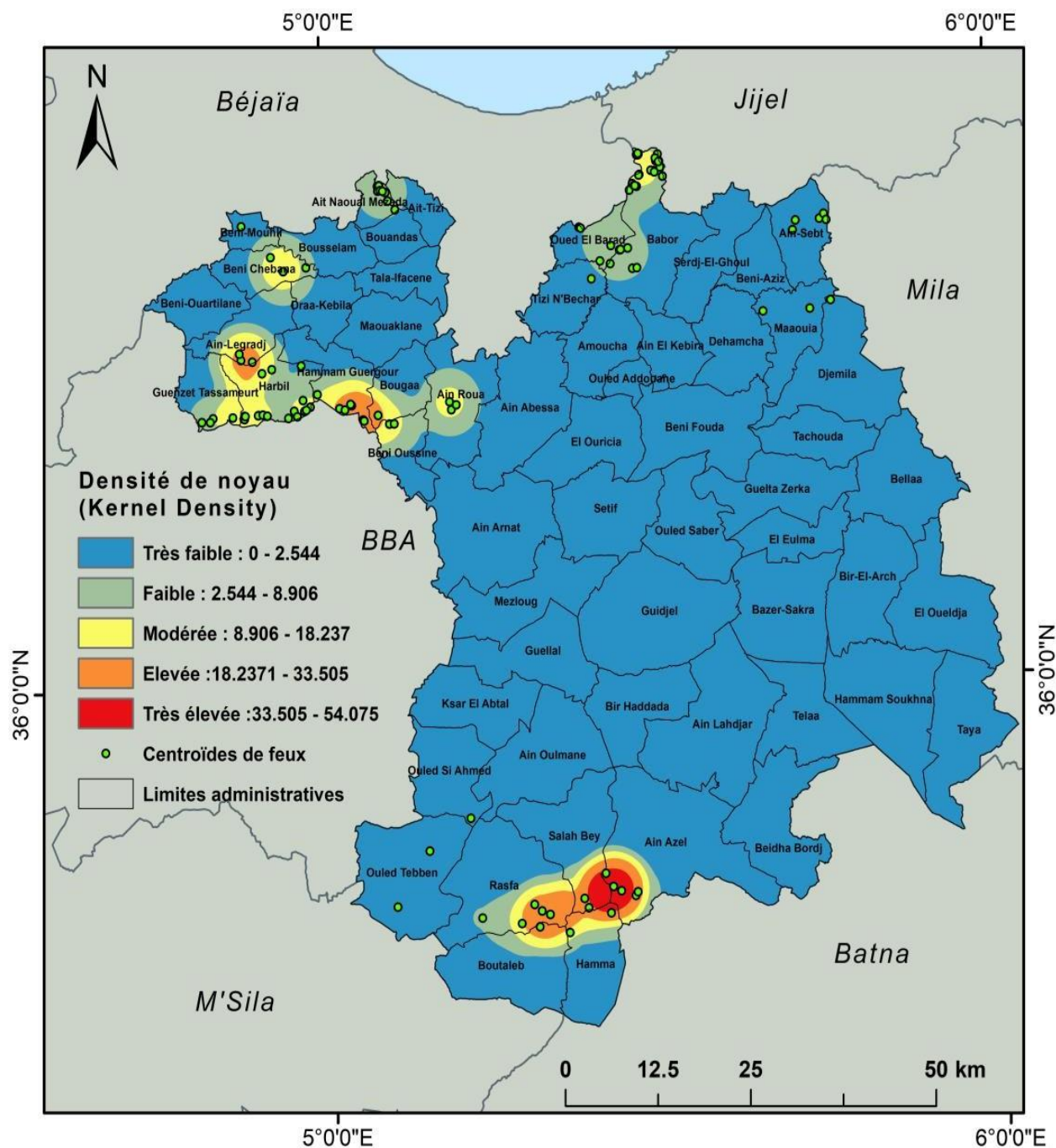


Figure 4-10 : Densité spatiale des feux de forêts pondérée à Sétif (2000 – 2020).

Les feux de forêts extrêmes (> 500 ha) qui ont survenu au Boutaleb pendant les six dernières années sont représentés dans la (figure 4-11.)

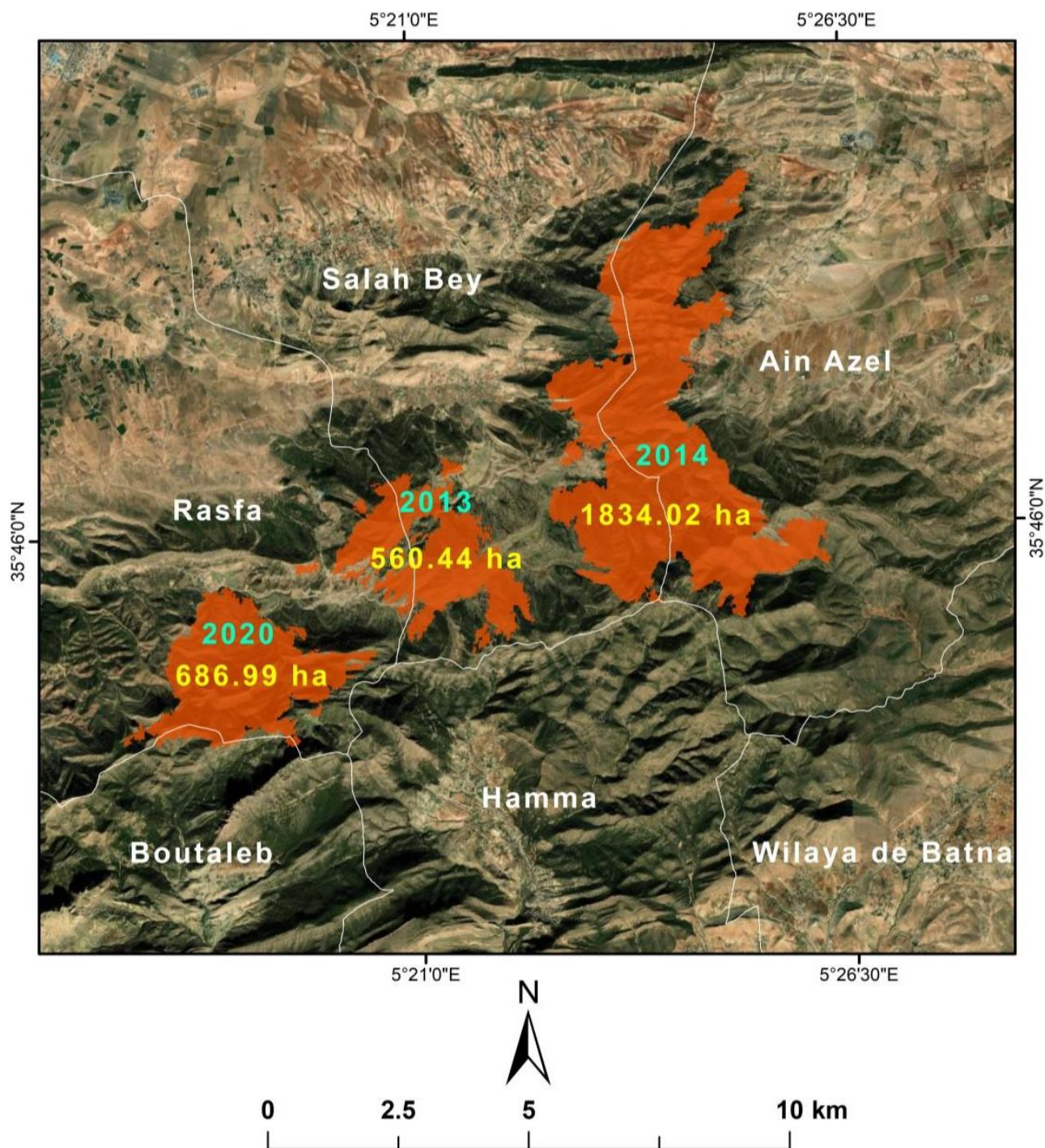


Figure 4-11 : Grands feux de forêts (> 500 ha) de Boutaleb, Sétif

3-Discussion

3-1. Configuration spatiale des périmètres de feux

La configuration spatiale des feux de forêts historiques n'a pas résulté de manière aléatoire. D'abord elle obéit à la répartition des principaux massifs forestiers de la wilaya et il existe des processus spatiaux sous-jacents qui contrôlent l'occurrence du feu.

3-2. Distribution spatiales de la fréquence des feux

Le nombre de feux élevé (55 feux) dans la **zone (a)** est principalement attribué aux feux qui ont été déclenchés dans les forêts domaniales de Lâalem (24 feux) et de Béni Slimane (09 feux). Ces forêts se situent dans la zone frontalière avec les wilayas de Béjaïa et Jijel où l'impact des activités anthropozoïques est considérable.

L'occurrence et la propagation des feux de forêts de la **zone (b)** sont positivement corrélées avec une forte densité de populations vivant à l'intérieur de l'espace forestier dominé par les maquis de chêne vert. La plupart des terres de cette partie de la wilaya ont été développées et associées à un niveau plus élevé d'activité anthropozoïques notamment le pacage ce qui a entraîné de nombreux feux qui ont eu un impact socio-économique plus important sur la vie humaine et la société.

Le faible nombre de feux de forêts dans la **zone (c)** est attribué aux caractéristiques socio-économiques de la zone. Il y a moins de populations riveraines qui vivent à proximité ou à l'intérieure des espaces forestiers et donc la probabilité d'éclosion de feux est moins importante par rapport aux zones septentrionales la wilaya.

3-3.Distribution spatiales des superficies parcourues par le feu

La dominance des feux de taille inférieure à 50 ha et l'absence de feux extrêmes dans la **zone (a)** s'explique par le fait qu'il existe une corrélation positive entre la quantité de précipitations et les superficies brûlées. Plus les précipitations sont abondantes, moins les superficies parcourues par le feu sont grandes.

Un autre facteur limitant les feux de grande ampleur de se produire dans cette zone est la connectivité relativement faible des combustibles forestiers et la végétation clairsemée, en particulier vers le sud.

L'abondance des feux de taille supérieure à 10 ha dans la **zone (b)** est associée à la nature des formations végétales (maquis) dominée par le chêne vert qui est très inflammable. L'absence de feux majeurs (> 500 ha) est principalement due à la discontinuité du couvert forestier (maquis dégradés) et aussi aux conditions climatiques locales qui sont moins sévères par rapport à la zone sud de Boutaleb.

L'occurrence des grands feux de forêts (> 500 ha) dans la **zone (c)** peut s'expliquer par l'assèchement des combustibles forestiers en raison du climat semi-aride se caractérisant par un déficit pluviométrique et les vents chauds et secs pendant les mois d'été ont considérablement augmenté le pouvoir destructeur des feux de forêts à Boutaleb.

Un autre facteur favorisant la propagation rapide et massive des feux de forêts à Boutaleb est le type et la concentration des combustibles forestiers. Les aiguilles de pin d'Alep et le feuillage de chêne vert, qui sont les espèces dominantes, qui sont très inflammables accentuent la vitesse de propagation du feu surtout en présence de vents forts.

Les formations forestières de Boutaleb sont denses et moins développées par l'homme. En effet, les feux de forêts sont parfois difficiles à détecter au début et il y a suffisamment de combustibles pour les maintenir rapidement en feu pour se propager.

4-conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en lumière, à travers une approche intégrée combinant la télédétection et les outils d'analyse géospatiale, les dynamiques spatio-temporelles de la végétation et des feux de forêts dans la wilaya de Sétif sur les deux dernières décennies.

L'analyse diachronique des indices spectraux NDVI et SAVI a révélé une évolution progressive du couvert végétal, avec une tendance au renforcement de la végétation dans les massifs forestiers et montagnards du Nord, contrastant avec la persistance de surfaces dénudées dans les Hautes Plaines et le Sud, le recours au SAVI s'avérant particulièrement pertinent dans ce contexte semi-aride en fournissant une estimation plus fiable de la biomasse végétale.

La cartographie des zones brûlées a mis en évidence une distribution spatiale concentrée et non aléatoire des incendies, confirmée par l'analyse d'agrégat spatial, témoignant de processus écologiques, climatiques et anthropiques sous-jacents qui conditionnent l'occurrence et la propagation des feux, tandis que l'analyse de densité de noyau a permis de localiser avec précision les points chauds d'intensité maximale.

En définitive, ces résultats démontrent la complémentarité et l'efficacité des outils SIG et de télédétection pour le suivi environnemental et la gestion des risques forestiers, constituant un socle d'information essentiel pour orienter les politiques d'aménagement durable et de protection des forêts de la wilaya de Sétif face aux défis climatiques actuels.

Conclusion Générale

Ce travail a abouti à la reconstruction du profil historique des feux de forêts de Sétif par télédétection en exploitant la puissance de traitement de Google Earth Engine (GEE) et ce, pour la période allant de 2000 à 2020. De plus, nous avons ensuite analysé la distribution spatiale de ces feux et discuté leur relation avec les variables anthropiques et environnementales locales.

Notre étude a révélé que les feux de forêts ne sont pas distribués au hasard à Sétif mais il existe un processus spatial qui les contrôlent. Les feux sont restreints à certaines zones de la wilaya. Ils se regroupent dans la partie la plus méridionale de la wilaya au massif de Boutaleb, dans le nord-ouest le long des limites administratives avec Bordj Bou Arreridj et dans les zones les plus septentrionales sur la Babors.

Dans l'analyse spatiale des feux, l'estimation de la densité de noyau (Kernel Density Estimation) sur les centroïdes des feux sur ArcMap nous ont permis d'identifier les zones à forte densité d'occurrence de feux et, par conséquent, celles à haut risque d'éclosion de feux dans le futur.

Les activités anthropozoïques à proximité des espaces forestiers au nord de la wilaya contribuent de manière significative à l'éclosion de feux alors que ce sont les facteurs naturels, en particulier les variables climatiques qui ont un impact plus important sur l'étendue et le pouvoir destructeur des feux au sud de la wilaya.

En matière de recommandations et à des fins de gestion des feux dans la wilaya, il serait proactif de fournir une éducation sur la prévention des feux de forêts aux populations locales des zones (a) et (b) ainsi que les accompagner et les sensibiliser pour prendre plus de vigilance et plus de dispositions de précaution dans leurs activités notamment dans la période estivale.

L'accent est mis également sur la coordination entre les conservations des forêts de Jijel, Béjaïa et Bordj Bou Arreridj qui est essentielle pour la prévention et la lutte contre la propagation des feux transfrontaliers.

En ce qui concerne la zone (c), la situation actuelle suggère qu'il serait plus efficace pour la CFS d'accorder plus d'attention à cette zone qui présente un risque potentiel de feux extrêmes et de prévenir les petits foyers de brûler continuellement et de devenir de grands feux.

Références Bibliographie

- **Alonso-Canas, I., Chuvieco, E., 2015.** Global burned area mapping from ENVISAT- MERIS and MODIS active fire data. *Remote Sens. Environ.* 163, 140-152.
- **Ammari M., 2011.** Etude de la dimension fractale du front dans un système désordonné binaire. Application aux feux de forêt. Thèse Magister. Univ Oran. Algérie, 90 p.
- **Arfa A., 2008.** « Les incendies de forêts en Algérie : stratégies de prévention et plans de gestion », Mémoire de Magister en écologie et environnement, université Mentouri Constantine, 52, 53, 55,123p
- **Argañaraz, J.P., Pizarro, G.G., Zak, M., Bellis, L.M., 2015.** Fire regime, climate, and vegetation in the Sierras de Córdoba, Argentina. *Fire Ecol.* 11, 55-73.
- **Barbant P. (1993).** Pédologie et système d'information géographique. Comment introduire les cartes et les autres données sur les sols dans les SIG. Les applications de SIG. Cah. Orstom, Sér. Pédol., n° 1, Vol XXXVIII. 109p.
- **Bastarrika, A., Chuvieco, E., Martín, M.P., 2011.** Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. *Remote Sens. Environ.* 115, 1003-1012.
- **Bastarrika, A., Alvarado, M., Artano, K., Martinez, M.P., Mesanza, A., Torre, L., Ramo, R., Chuvieco, E., 2014.** BAMS: A tool for supervised burned area mapping using Landsat data. *Remote Sens.* 6, 12360-12380.
- **Bastarrika, A., Barrett, B., Roteta, E., Akizu, O., Mesanza, A., Torre, L., Anaya, J.A., Rodriguez-Montellano, A., Chuvieco, E., 2018.** Mapping burned areas in Latin America from 2 Landsat-8 with Google Earth Engine 3
- **Belhadj-Khedher, C., Koutsias, N., Karamitsou, A., El-Melki, T., Ouelhazi, B., Hamdi, A., Nouri, H., Mouillot, F., 2018.** A revised historical fire regime analysis in Tunisia (1985–2010) from a critical analysis of the national fire database and remote sensing. *Forests* 9, 59.
- **Boudy, P., 1952,** Guide du forestier en Afrique du Nord, Paris, Ed. Maison rustique, 505 p.
- **[Bul 2008]** Bulletin de l'Information Géographique Appliquée aux Activités de Recherche Développement. BIG n 3- Initiation à la Télédétection, 2008.
- **Camia, A., San-Miguel-Ayanz, J., Vilar del Hoyo, L., Durrant Houston, T., 2011.** Spatial and temporal patterns of large forest fires in Europe. EGU Gen. Assem. Vienna.

- **Chuvieco, E., Lizundia-Loiola, J., Pettinari, M.L., Ramo, R., Padilla, M., Tansey, K., Mouillot, F., Laurent, P., Storm, T., Heil, A., 2018.** Generation and analysis of a new global burned area product based on MODIS 250 m reflectance bands and thermal anomalies. *Earth Syst. Sci. Data* 10, 2015-2031.
- **Colin P.Y., Jappiot M., Mariel A., Lampin C. & Veillon S., (2001).** Protection des forêts contre l'incendie. Edit. FAO/C.E.M.A.G.R.E.F. Cahier FAO Conservation n°36. 149 p.
- **Denègre J, Salgé F., (1996):** Les systèmes d'information géographiques. Paris, PUF. Que saisje ? N° 3122 ; 127 p. Denègre J., Salgé F., 1996 : Les systèmes d'information géographiques. Paris, PUF. Que saisje? N° 3122; 127 p.
- **De Smith, M.J., Goodchild, M.F., Longley, P., 2007.** Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools. Troubador publishing ltd.
- **Dixon, P.M., 2014.** Ripley's K function. Wiley StatsRef Stat. Ref. Online.
- **Filipponi, F., 2019.** Exploitation of Sentinel-2 Time Series to Map Burned Areas at the National Level: A Case Study on the 2017 Italy Wildfires. *Remote Sens.* 11, 622.
- **Frederic J., 1992.** Modélisation du comportement du feu, influence de la pente et de la charge d'une litière d'aiguilles de pin maritime, Document PIF9205. Avignon. 29p.
- **Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017.** Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* 202, 18-27.
- **Konecny, G. (2003)** Geoinformation: remote sensing, photogrammetry, and geographic information systems. Deuxième édition. Taylor & Francis.
- **Koutsias, N., Kalabokidis, K.D., Allgöwer, B., 2004.** Fire occurrence patterns at landscape level: beyond positional accuracy of ignition points with kernel density estimation methods. *Nat. Resour. Model.* 17, 359-375.
- **Koutsias, N., Balatsos, P., Kalabokidis, K., 2014.** Fire occurrence zones: kernel density estimation of historical wildfire ignitions at the national level, Greece. *J. Maps* 10, 630-639.
- **Kuter, S., Usul, N., Kuter, N., 2011.** Bandwidth determination for kernel density analysis of wildfire events at forest sub-district scale. *Ecol. Modell.* 222, 3033-3040.
- **Liliorente M., (1996).** Micoflora y patologiadelalcornoque (*Quercus suber*. L.). M.A.P. A; Madrid, 32.
- **Meddour-Sahar, O. et A. Derridj, 2012, Bilan des feux de forêt en Algérie:** Analyse spatiotemporelle et cartographie du risque (période 1985-2010): *Sécheresse*, 23, pp. 133-141.
- **Meddour-Sahar, O. et C. Bouisset, 2013,** Les grands incendies de forêt en Algérie: problème humain et politiques publiques de gestion des risques? *Méditerranée*, Num. spec. Les grands incendies en Méditerranée, Quelle réponse aux désastres environnementaux ? 121, pp. 33-40.

- **Meddour-Sahar, O., Meddour, R., Leone, V., Lovreglio, R., Derridj, A., 2013.** Analysis of forest fires causes and their motivations in northern Algeria: the Delphi method. *iForest-Biogeosciences For.* 6, 247.
- **Madoui, A., 2002.** Les incendies de forêt en Algérie. Historique, bilan et analyse. Forêt méditerranéenne.
- **Margerit J., (1998).** Modélisation et simulations numériques de la propagation de feux de forêts. Thèse Doct. Inst. National polytechnique de lorraine. Nancy. France. 260p.
- **MARMONNIER, P. (2002) :** L'information géographique. ENSG/CERSIG ,11p.
- Megrouche R., (2006).** Sensibilité de la végétation forestière aux incendies, cas de forêt domaniale de chattabah-ainsmara- Constantine. Mémoire de magistère en Ecologie et Environnement. Université Mentouri Constantine, Algérie 157p.
- Michel Claude GIRARD, Colette M. GIRARD** « Traitement des données de télédétection », DUNOD, paris,1999 .529p. + CD-ROM.
- **M.T.F., 1973.** Manuel de lutte contre les feux de forêts. Ministère des Terres et Forêts. Pierre Lefebvre. Québec. Canada. Inc. Sillery. 437p.
- **Nogueira, J.M.P., Ruffault, J., Chuvieco, E., Mouillot, F., 2017.** Can we go beyond burned area in the assessment of global remote sensing products with fire patch metrics? *Remote Sens.* 9, 7.
- Plana, E. ; Font, M. ; Serra, M. ; Chauvin, S. ; Gladiné, J. 2016.** Les incendies en forêt, guide pour les journalistes et les médias. Projet eFIRECOM. Edition CTFC. 36pp
- **Pierre-Yves Colin., Marielle Jappiot., Anne Mariel., (2001)** "Protection des forêts contre L'incendie: Fiches techniques pour les pays du bassin méditerranéen", cahier FAO Conservation 36.
- **Pleniou, M., Xystrakis, F., Dimopoulos, P., Koutsias, N., 2012.** Maps of fire occurrence—spatially explicit reconstruction of recent fire history using satellite remote sensing. *J. Maps* 8, 499-506.
- **Ramo, R., Chuvieco, E., 2017.** Developing a random forest algorithm for MODIS global burned area classification. *Remote Sens.* 9, 1193.
- **Roteta, E., Bastarrika, A., Padilla, M., Storm, T., Chuvieco, E., 2019.** Development of a Sentinel-2 burned area algorithm: Generation of a small fire database for sub-Saharan Africa. *Remote Sens. Environ.* 222, 1-17.
- **Roteta, E., Bastarrika, A., Franquesa, M., Chuvieco, E., 2021:** Landsat and Sentinel-2 Based Burned Area Mapping Tools in Google Earth Engine. *Remote Sens.* 13, 816.

- **San-Miguel-Ayanz, J., Moreno, J.M., Camia, A., 2013.** Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: lessons learned and perspectives. *For. Ecol. Manage.* 294, 11-22.
- **Seguin B., 1990.** La température de surface d'un couvert végétal et son état hydrique. Possibilité d'application à la surveillance des forêts par satellite. *Rev. for. Fr. t. XIII, (Sp.)* : 106-111.
- **Silverman, B.W., 1986.** Density estimation for statistics and data analysis. CRC press.
- **SITAYEB, T. (2006)** : Thèse, Application de la géomatique dans l'étude de la dynamique de la végétation dans la plaine de la Macta. Thèse de magistère, centre universitaire de Mascara.
- **SACQUET, 2006** : Atlas mondial du développement durable. Collection Atlas / Monde, Coédition, Autrement / Le comité 21.
- **Tanase, M.A., Belenguer-Plomer, M.A., Roteta, E., Bastarrika, A., Wheeler, J., Fernández-Carrillo, Á., Tansey, K., Wiedemann, W., Navratil, P., Lohberger, S., 2020.** Burned Area Detection and Mapping: Intercomparison of Sentinel-1 and Sentinel-2 Based Algorithms over Tropical Africa. *Remote Sens.* 12, 334.
- **Trabaud, L., (1970).** Le comportement du feu dans les incendies de forêts. Extrait de la revue technique du feu. PP 103, 15p.
- **Trabaud L., 1989.** Les feux de forêts : mécanismes, comportement et environnement. France sélection éditeurs. Aubervilliers., 278p.
- Trabaud L., 1992:** Les feux de forêts : mécanismes, comportement et environnement. Éditions France-Sélection, 278p.
- **Vanderhoof, M.K., Fairaux, N., Beal, Y.-J.G., Hawbaker, T.J., 2017.** Validation of the USGS Landsat burned area essential climate variable (BAECV) across the conterminous United States. *Remote Sens. Environ.* 198, 393-406.
- **Venäläinen, A., Korhonen, N., Hyvärinen, O., Koutsias, N., Xystrakis, F., Urbieto, I.R., Moreno, J.M., 2014.** Temporal variations and change in forest fire danger in Europe for 1960–2012. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14, 1477-1490.
- **Vélez, R., 1999,** The Red Books of Prevention and Coordination: A General Analysis of Forest Fire Management Policies in Spain., *Proceedings of the symposium on fire economics, planning, and policy.*
- **Woźniak, E., Aleksandrowicz, S., 2019.** Self-Adjusting Thresholding for Burnt Area Detection Based on Optical Images. *Remote Sens.* 11, 2669.

Références Webographique

- *Site (01) - <https://www.ontario.ca/fr/page/comportement-des-feux-de-foret>
- *Site (02) - <https://www.ouest-france.fr/monde/etats-unis/californie-un-violent-incendie-se-propage-au-milieu-des-vignobles-de-sonoma-6581187>
- *site (03) - <https://www.noovo.info/nouvelle/en-images-les-feux-de-foret-devastateurs-a-los-angeles.html>
- *site (04) - https://sist.pages.in2p3.fr/anf20-geomatique/01_sig/01_2_prise_en_main.html
- *site(05)- <https://code.earthengine.google.com>