

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة مولاي الطاهر، سعيدة

Université MOULAY Tahar, Saida



كلية العلوم

Faculté des Sciences

قسم البيولوجيا

Département de Biologie

N° d'Ordre

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master

En Sciences biologiques

Spécialité : Protection et Gestion des écosystèmes

Thème

Utilisation de Google Earth Engine pour une analyse critique de la base de données incendies de forêt de la wilaya de Tlemcen

Présenté par :

- Mr : Kerroumi Aboubakr El Seddik
- Mr : Mecheri Moustafa

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

Président

Mr. Kefifa Abdelkrim

Pr Université UMTS

Examineur

Mr. Anteur Djamel

Pr Université UMTS

Rapporteur

Mr. MEDERBAL Mohammed
Touati

MAA Université UMTS

Année universitaire 2022/2023

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة مولاي الطاهر، سعيدة
Université MOULAY Tahar, Saïda



N° d'Ordre

كلية العلوم
Faculté des Sciences
قسم البيولوجيا
Département de Biologie

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master
En Sciences biologiques
Spécialité : Protection et Gestion des écosystèmes
Thème

Utilisation de Google Earth Engine pour une analyse critique de la base de données incendies de forêt de la wilaya de Tlemcen

Présenté par :

- Mr : Kerroumi Aboubakr El Seddik
- Mr : Mecheri Moustafa

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

Président

Mr. Kefifa Abdelkrim

Pr Université UMTS

Examineur

Mr. Anteur Djamel

Pr Université UMTS

Rapporteur

Mr. MEDERBAL Mohammed
Touati

MAA Université UMTS

Année universitaire 2022/2023

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes parents

Toute ma famille

Groupe one family

A mes amis

Remerciements

Avant tous, je remercie Dieu le tout puissant qui m'a guidé tout au long de ma vie, qui m'a donné courage et patience pour traverser tous les moments difficiles, et qui m'a permis d'achever ce travail.

Je souhaite également remercier mon encadreur, Mr. Mederbal Mohammed Touati, auquel je dois respect et gratitude pour m'avoir guidé afin de mener à bien cette étude. Ses remarques pertinentes et ses suggestions ont sans cesse permis l'amélioration de la qualité de ce document.

Je remercie également les membres du jury qui ont accepté de s'intéresser à mes travaux et m'ont apporté leur jugement d'experts : Mr Kefifa Abdelkrim, autant que président de jury ; Mr Anteur Djamel qui est acceptés d'examiner ce travail.

Je suis profondément reconnaissant envers tous ceux qui ont joué un rôle dans mon parcours académique, et je leur suis extrêmement reconnaissant pour leur soutien et leurs contributions.

Liste des abréviations

BA: Burned Area

SIG : système d'information géographique

ONS : Office National des Statistiques

DGF : la Direction Générale des Forêts

DSA : la Direction des Services Agricoles

SAU : La surface agricole utile

CFT : la Conservation des Forêts

GEE: Google Earth Engine

BAMT: Burned Area Mapping Tools

NBR: Normalized Burn Ratio

NRI: Normalized Burn Ratio Index

BAMS: Burned Area Mapping

Esri: Environmental Systems Research Institute.

Ha: Hectare

VA: Zones de validation

PIR: Proche infra-rouge

NDVI: Indice de Végétation Normalisé

RP: Raster Processing

ONS : Office for National Statistics

D.S.A: Déclaration Simplifiée d'Agriculture

% : pourcentage

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales essences des forêts algériennes(DGF, 2004)	8
Tableau 2 : Répartition générale des terres (D.S.A, 2010).	17
Tableau 3 : Les forêt domaniale de la willaya de Tlemcen (CFT 2018).....	19
Tableau 4 : superficie de principales essences forestières dans la région de Tlemcen (D.S.A, 2010).....	20
Tableau 5: Description des images Landsat 5	22
Tableau 6: Description des images Landsat 7.....	23
Tableau 7: Description des images Landsat 8.....	23
Tableau 8 : Bandes sélectionnées pour les outils BAMT, en fonction du satellite et du capteur	31
Tableau 9 : Comparaison des statistiques DGF au résultats BAMT de wilaya de Tlemcen durant la période (1992-2020).....	44

Liste des figures

Figure 1 Répartition des incendies par région en Algérie (période 1985-2006) (Arfa, 2008).....	12
Figure 2 : Carte de situation géographique de la wilaya de Tlemcen.....	13
Figure 3 : Découpage territorial par communes et par ensemble physique	14
Figure 4 : Carte de Forêt de la wilaya de Tlemcen.....	17
Figure 5 : imagerie satellitaire sous GEE.....	25
Figure 6 : Editeur de Code JavaScript de GEE.....	26
Figure 7 : Organigramme du travail.....	27
Figure 8 : formatage des données statistique des incendies.	27
Figure 9 : Organigramme des cinq outils BAMT du Maine(ref).....	30
Figure 10 : Utilisation de la couche "Région manuelle" pour définir la région sous la forme d'un polygone	33
Figure 11 : Les couches à utiliser pour définir les polygones d'entraînement.	36
Figure 12 : Zone d'échantillonnage à Tlemcen, avec des données Landsat.....	37
Figure 13 : les cartes des incendies de forêt pour chaque année durant la période 1992-2020 au niveau de la wilaya de Tlemcen	42
Figure 14 : La carte de synthèse des incendies de forêt entre 1992-2020 au niveau de la Wilaya de Tlemcen	43
Figure 15 : Les données corrigées (BAMT - DGF) la superficie brûlée à la période 1992-2020.....	45
Figure 16 : Evolution des superficies des incendies de forêt selon les mois dans la Wilaya de Tlemcen durant la période 1992-2020.....	48

Résumé

Le projet de fin d'étude vise à examiner de manière critique les enregistrements des incendies de forêt sur une période de vingt-huit ans (1992-2020) dans la wilaya de Tlemcen. L'objectif principal est d'évaluer la fiabilité des données fournies par la Direction Générale des Forêts (DGF) en utilisant des méthodes telles que les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection.

Pour mener à bien cette étude, nous avons créé un programme en Java qui utilise la plateforme Google Earth Engine pour cartographier les zones touchées par les incendies à partir d'images multi-spectrales Landsat. Les résultats obtenus ont mis en évidence des variations importantes dans l'estimation des surfaces brûlées, atteignant même jusqu'à 400%.

En conclusion, il est primordial d'effectuer une évaluation approfondie de la qualité des données utilisées pour reconstituer l'historique des incendies à partir des statistiques nationales. Cela est essentiel pour éviter des conclusions erronées et renforcer la crédibilité des données, permettant ainsi leur utilisation plus répandue dans l'analyse comparative des modèles d'incendie et l'étude de la météorologie des incendies.

Ce projet de fin d'étude contribue également à l'analyse du régime de feu sous-représenté sur la limite sud du bassin méditerranéen, en fournissant des informations précieuses sur les incendies de forêt dans la région de Tlemcen.

Mots clés : GEE, post-incendie, forêt de Tlemcen, cartographie, NBR, NRI.

Abstract

The main goal of the final project is to conduct a critical analysis of the forest fire records in the Tlemcen province over a span of twenty-eight years (1992-2020). The primary aim is to assess the dependability of the data supplied by the General Directorate of Forests (DGF) by employing techniques such as Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing.

To successfully conduct this study, we used a Java program that utilizes the Google Earth Engine platform to map fire-affected areas using multi-spectral Landsat images. The obtained results have revealed significant variations in the estimation of burned surfaces, even reaching up to 400%.

In conclusion, it is of utmost importance to undertake a comprehensive assessment of the data quality employed in reconstructing the fire history based on national statistics. This step is paramount in order to avert erroneous inferences and bolster the reliability of the data, thereby facilitating their broader utilization in comparative fire model analysis and the investigation of fire meteorology.

This final study project also contributes to the analysis of the under-represented fire regime on the southern limit of the Mediterranean basin, providing valuable information on forest fires in the Tlemcen region.

Keywords: GEE, post-fire, Tlemcen forest, cartography, NBR, NRI.

ملخص

يهدف مشروع نهاية الدراسة إلى فحص سجلات حرائق الغابات بشكل نقدي على مدى ثمانية وعشرين عامًا (1992-2020) في ولاية تلمسان. الهدف الرئيسي هو تقييم موثوقية البيانات التي تقدمها المديرية العامة للغابات باستخدام أساليب مثل نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد.

لإتمام هذه الدراسة، قمنا بإنشاء برنامج بلغة جافا يستخدم منصة Google Earth Engine لرسم خرائط المناطق المتأثرة بالحرائق بناءً على صور متعددة الطيف من تقنية Landsat. أظهرت النتائج الحصول على اختلافات كبيرة في تقدير مساحات الحرائق، تصل حتى 400%.

في الختام، من الضروري تقييم جودة البيانات المستخدمة في إعادة بناء تاريخ الحرائق من الإحصاءات الوطنية بشكل معمق. هذا أمر أساسي لتجنب استنتاجات خاطئة وتعزيز مصداقية البيانات، مما يسمح باستخدامها بشكل أكثر انتشاراً في تحليل النماذج المقارنة للحرائق ودراسة أضرار الحرائق.

يساهم هذا المشروع أيضاً في تحليل نظام الحرائق الممثل بشكل غير كافٍ على الحدود الجنوبية لحوض البحر الأبيض المتوسط، من خلال توفير معلومات قيمة حول حرائق الغابات في منطقة تلمسان.

الكلمات الرئيسية: GEE، ما بعد الحريق، غابة تلمسان، رسم الخرائط، NBR، NRI.

Table des matières

DEDICACES.....	3
REMERCIEMENTS.....	4
LISTE DES ABRÉVIATIONS	I
LISTE DES TABLEAUX.....	II
LISTE DES FIGURES	III
RÉSUMÉ	IV
ABSTRACT.....	V
ملخص	VI
TABLE DES MATIERES.....	VII
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I. LES INCENDIES DE FORETS EN ALGERIE	4
I.1. Incendies de forêts en Algérie.....	4
I.2. Présentation du contexte et de l'importance de l'étude des incendies de forêt en Algérie.....	5
I.2.1. Contexte : présentation générale	5
I.2.2. Répartition de la superficie forestière.....	6
I.2.3. État des ressources forestières en Algérie.....	7
I.3. Analyse des incendies des forêts algériennes	9
I.3.1. Période de 1853-1915	9
I.3.2. Période avant l'indépendance	9
I.3.3. Période après l'indépendance	10
I.4. Répartition des incendies suivant les formations végétales.....	10
I.5. Répartition des incendies par région	11
I.6. Répartition des incendies suivant les wilayas	12
I.7. Principales causes des incendies.....	13
I.7.1. Causes naturelles.....	13
I.7.2. Causes anthropiques	13

I.7.3. Causes involontaires.....	13
CHAPITRE II. PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE.....	1
II.1. Présentation de la zone étude.....	13
II.2. Le milieu physique	15
II.2.1. Reliefs	15
II.3. Cadre climatique	16
II.4. Présentation du milieu forestier	16
II.4.1. Répartition générale des terres	17
II.4.2. Principales forêts domaniales.....	18
II.4.3. Essences forestières constitutives	20
II.4.4. Types de formations forestières	21
CHAPITRE III. MATERIEL ET METHODES	13
III.1. -Objectif du travail :	21
III.2. Matériels utilisés :	21
III.2.1. -Données des incendies de forêt.....	21
III.2.2. Données de télédétection	22
III.2.3. Logiciels utilisés :	23
III.3. Approche méthodologique.....	26
III.3.1. Organigramme du travail.....	26
III.3.2. Mise en forme des Statistiques de la DGF.....	27
III.3.3. Exportation des résultats sous Arcgis.....	28
III.3.4. Code GEE de cartographie BAMT	28
III.3.4.1. Données d’entrées.....	30
III.3.4.2. Outil de cartographie BA	32
III.3.4.2.1. Paramètres initiaux	32
III.3.4.2.2. Premières couches	34
III.3.4.2.3. Détection BA.....	35
III.3.4.2.4. Exportation des résultats	38
CHAPITRE IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS	38

IV.1. Cartes des zones incendiées de la wilaya de Tlemcen à partir des images Landsat.....	38
IV.2. Comparaison des statistiques DGF aux résultats BAMT de wilaya de Tlemcen	44
IV.3. Analyse interannuelle des incendies des forêts de la wilaya de Tlemcen (1992-2020).....	47
IV.4. Analyse intra-annuelle des incendies des forêts de la wilaya de Tlemcen (1992-2020).....	48
CONCLUSION	50
BIBLIOGRAPHIQUE	53

INTRODUCTION

Introduction

L'Algérie possède des écosystèmes diversifiés, notamment des forêts méditerranéennes, des maquis et des steppes, qui sont tous vulnérables aux incendies. Les facteurs prédisposant à ces incendies comprennent des températures élevées, des précipitations faibles, des vents forts, ainsi que des activités humaines telles que l'agriculture, le pastoralisme et la négligence en matière de sécurité incendie.

Selon les statistiques de la Direction Générale des Forêts (DGF), l'Algérie a connu une perte considérable de superficie forestière due aux incendies. Au cours des dernières années, ces incendies ont ravagé de vastes étendues de forêts, entraînant une diminution significative de la couverture forestière du pays. Les conséquences de ces incendies sont multiples, allant de la destruction des habitats naturels à la perte de biodiversité. La lutte contre les incendies de forêt est donc devenue une priorité pour les autorités algériennes, qui mettent en œuvre des mesures de prévention, de surveillance et de lutte pour tenter de freiner cette tendance alarmante. Cependant, il est impératif de sensibiliser davantage la population à l'importance de la préservation des forêts et à la nécessité de prévenir les incendies, afin de préserver ce patrimoine naturel précieux pour les générations futures.

La Wilaya de Tlemcen est particulièrement vulnérable aux incendies de forêt, faisant face à des défis importants en matière de conservation forestière. Les méthodes traditionnelles utilisées pour recueillir les statistiques sur les incendies de forêt dans cette région peuvent présenter certaines limitations qui pourraient compromettre la fiabilité des données. Ces méthodes conventionnelles comprennent la collecte manuelle des informations, l'estimation visuelle des surfaces brûlées et le décompte des incidents signalés. Cependant, il est important de prendre en compte ces limitations lors de l'analyse des statistiques afin d'avoir une compréhension plus précise de l'ampleur des incendies de forêt.

La Télédétection et les SIG, sont des outils précieux dans ce domaine. Ces technologies permettent de collecter, traiter et analyser les données spatiales de manière efficace. Grâce à des capteurs embarqués sur des satellites, avions ou drones, la télédétection fournit des images et des données en temps réel, ce qui facilite la détection des feux. Les SIG intègrent ces informations avec d'autres données géographiques, ce qui permet de créer des cartes détaillées, des modèles de propagation et des cartes des Incendies. Comparés aux méthodes traditionnelles, ces outils offrent une couverture étendue, une rapidité d'intervention, une surveillance en temps réel, une analyse avancée et une visualisation améliorée.

Google Earth Engine se distingue en tant que plateforme ouverte largement utilisée pour la cartographie et l'analyse des zones incendiées. Cette plateforme offre un accès facile à une vaste collection de données satellitaires provenant de différentes sources telles que Landsat, Sentinel, MODIS, etc. Les données sont prétraitées et prêtes à être utilisées, simplifiant ainsi leur exploitation pour la cartographie précise des zones touchées par les incendies.

Dans le cadre de notre projet de fin d'étude, nous avons pour objectif d'effectuer une analyse critique des données statistiques sur les incendies de forêt recensés par la conservation des forêts dans la wilaya de Tlemcen entre 1992 et 2020. Pour mener à bien cette tâche, nous utiliserons Google Earth Engine pour le traitement des images multi-spectrales provenant de Landsat, ce qui nous permettra de créer une base de données géographique. En exploitant les fonctionnalités avancées des Systèmes d'Information Géographique (SIG), nous serons en mesure de réaliser une analyse approfondie

Notre travail est structuré en quatre chapitres :

- ✓ Dans le premier chapitre, ont essayé d'exposer d'une manière générale une présentation sur les forêts Algériennes et l'histoire des incendies en Algérie

- ✓ Dans le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, dans laquelle nous avons fait la description des forêts de la wilaya de Tlemcen.
- ✓ Le troisième chapitre présente la description de la méthodologie et le matériel utilisé.
- ✓ Le quatrième chapitre représente l'interprétation et la discussion des résultats obtenus.

CHAPITRE I. LES INCENDIES DE FORETS EN ALGERIE

I.1. Incendies de forêts en Algérie

Le feu demeure le problème le plus redoutable et dévastateur auquel la forêt algérienne est confrontée, causant d'énormes préjudices en raison de la sensibilité élevée de nos massifs forestiers aux incendies, qui sont particulièrement fréquents en été. Les forêts, maquis et broussailles de l'Algérie couvrent une superficie totale de 4,1 millions d'hectares, représentant seulement 16,4% de taux de boisement dans le nord du pays et seulement 1,7% si l'on prend en compte l'ensemble du territoire national. Dans les deux cas, cette couverture forestière est nettement insuffisante par rapport au taux mondial de 25% considéré comme idéal. Chaque année, cette superficie déjà insuffisante diminue en moyenne de 30 000 hectares, ce qui est particulièrement préoccupant étant donné que l'Algérie se situe dans une zone au climat désertique sur une grande partie de son territoire.

Une analyse approfondie des statistiques des incendies de forêts en Algérie permettra de retracer leur historique sur une période continue de 139 ans, allant de 1876 à 2014. L'Algérie fait partie des rares pays à disposer de statistiques importantes sur les incendies de forêts Meddour-Sahar(2008). Les principales sources de données utilisées incluent GRIME et al., (1989) cité dans MEGREROUCHE,(2006)et KEBIR & ABBAS M,(2011) pour la période de 2001 à 2014. Ces données seront essentielles pour reconstituer une série chronologique couvrant deux périodes historiques distinctes du pays.

Cependant, il convient de noter, comme le soulignent ALEXANDRIAN & F,(1998), que l'interprétation des longues séries statistiques doit être prudente, car le contexte forestier a pu évoluer de manière significative et des événements politiques ont pu également influencer le pays, entraînant des modifications dans la manière de comptabiliser les incendies.

Dans le contexte de l'Algérie, sur une période aussi longue que 139 ans, les méthodes de collecte d'informations ont connu des évolutions significatives, notamment après la guerre d'indépendance et l'adoption de la loi régissant le "Régime Général des Forêts en Algérie" en 1984. Il convient également de prendre en compte la fiabilité des données collectées pendant

la période de troubles politiques connue sous le nom de "décennie noire" dans les années 1990, qui a affecté notre pays.

I.2. Présentation du contexte et de l'importance de l'étude des incendies de forêt en Algérie

I.2.1. Contexte : présentation générale

L'Algérie occupe une place importante en Afrique en termes de superficie, avec ses 2 381 741 km² sur les 30 millions de km² du continent, représentant près d'un douzième de la surface totale de l'Afrique. En tant que plus vaste pays d'Afrique, environ 84% de son territoire est constitué par le Sahara, l'un des plus grands déserts du monde. La population algérienne compte environ 37,1 millions d'habitants (ONS, 2011).

Grâce à sa position géographique, l'Algérie présente une grande diversité de milieux naturels, ce qui a conduit à l'émergence de plusieurs types d'habitats en raison de sa diversité topo-morphologique (Belkaid, 2016).

La forêt algérienne est un écosystème naturel fragile et perturbé. Sa préservation et son développement dépendent de la prise de conscience des citoyens quant à son importance écologique et économique. En se basant sur les critères bioclimatiques, l'Algérie présente tous les types de bioclimats méditerranéens, allant des zones humides aux zones sahariennes. Les zones semi-arides possèdent des caractéristiques distinctes, tant au niveau des espèces végétales qui les composent, principalement des conifères présents également en dehors de ces zones, que de la structure des formations végétales qu'elles génèrent. Ces formations sont souvent des formations arborées clairsemées, avec un sous-bois de type matorral qui correspond davantage à des structures pré-forestières, voire pré-steppiques. (Abi-saleh et al., (1976).

Présentation de la forêt algérienne

Les forêts et maquis du nord de l'Algérie couvrent une superficie de 4,1 millions d'hectares, ce qui correspond à un taux de boisement de 16,4%. Cependant, si l'on inclut les régions sahariennes arides, ce taux tombe à

seulement 1,7%. Ces chiffres indiquent clairement que le taux de boisement est insuffisant pour maintenir un équilibre physique et biologique adéquat. Le pin d'Alep est l'essence dominante, occupant 880 000 ha principalement dans les zones semi-arides. Cependant, le capital forestier de ces pineraies est relativement faible. Le chêne liège, quant à lui, s'étend sur 230 000 ha, principalement dans le nord-est du pays. Les chênes zeen et afares, occupant 48 000 hectares, se trouvent dans les milieux les plus frais de la suberaie. Les cèdres sont présents en petits groupes discontinus, couvrant 16 000 hectares dans le tell central et les Aurès. Le pin maritime est naturel dans le nord-est du pays et recouvre 32 000 hectares. Les eucalyptus, introduits dans le nord et surtout l'est du pays, occupent 43 000 hectares. Ces essences forestières constituent le premier groupe, appelé "forêts économiques", totalisant 1 249 000 hectares, dont 424 000 ha de peuplements artificiels. Le deuxième groupe, composé de chênes verts, de thuya et de genévriers, qui jouent principalement un rôle protecteur dans les zones semi-arides, ne couvre que 219 000 ha. Les surfaces forestières restantes, s'étendant sur 2 603 940 hectares, se répartissent entre les reboisements de protection (727 000 ha) et les maquis et broussailles (1 876 000 ha). Il convient de souligner que les forêts font partie du domaine public de l'État. La forêt algérienne est confrontée à des conditions de sécheresse continue, avec des mois d'été extrêmement secs, ce qui rend la lutte pour la survie des arbres permanente. Compte tenu de l'historique et des pressions exercées par l'homme et le bétail, la forêt semble malheureusement se diriger rapidement vers une dégradation progressive de ses essences principales, au profit du maquis et des broussailles. Cependant, il convient de souligner que le rôle de ces formations végétales reste extrêmement important pour le contrôle et la stabilisation des sols en terrains à forte déclivité. (Atelier, 2000).

I.2.2. Répartition de la superficie forestière

Une catégorie de formation végétale correspond à un ensemble forestier ou semi-naturel présentant une certaine homogénéité en termes de couverture et d'utilisation du sol, de densité du couvert, de structure

forestière et de composition des espèces. En ce qui concerne les types de formations, les maquis occupent la première place avec une superficie de 1 844 400 ha, suivis respectivement de 1 494 800 ha et 1 329 400 ha. En revanche, les pelouses ne couvrent que 2 800 ha (Boukerker, 2016)

I.2.3. État des ressources forestières en Algérie

La forêt en Algérie se présente comme une formation végétale constamment confrontée à la sécheresse. En raison de son histoire et des pressions exercées par l'homme et le bétail, la forêt algérienne connaît une dégradation de ses espèces principales, laissant place aux maquis et aux broussailles, qui jouent néanmoins un rôle crucial dans le contrôle et la fixation des sols en terrains pentus (A.M.T, 2019). Les forêts algériennes se caractérisent par leur hétérogénéité (historique, biogéographique, géomorphologique, climatique et physiologique), leur instabilité (sol fragile, érosion, événements climatiques violents) et leur vulnérabilité, résultant de la diversité climatique et géomorphologique.

L'état des forêts en Algérie est variable : les espèces résistantes progressent tandis que les espèces nobles régressent. Les principales caractéristiques de la forêt algérienne peuvent être résumées comme suit :

- Une forêt principalement clairsemée, irrégulière, composée principalement d'arbres feuillus ou résineux, souvent dispersés et mélangés de manière désordonnée en termes de taille et d'âge.
- La présence d'une dense végétation sous-bois composée de nombreuses espèces secondaires, limitant la visibilité et l'accessibilité, favorisant ainsi la propagation des incendies.
- Un rendement moyen en volume ligneux relativement faible.
- Une pression de pâturage excessive, notamment dans les subéraies, et un empiètement des populations riveraines sur les zones forestières.

Les forêts en Algérie couvrent environ 4 millions d'hectares, soit moins de 2% de la superficie totale du pays. La véritable forêt ne représente cependant que 1,4 million d'hectares, le reste étant constitué de maquis. La

production de bois reste modeste, atteignant 2,37 millions de mètres cubes en 1993. Le déficit forestier actuel représente environ 3,8 millions d'hectares. Pour atteindre un équilibre biologique souhaitable (20 à 25% de la superficie), il faudrait pratiquement doubler la surface forestière. Cependant, les efforts nationaux visant à étendre la couverture forestière ne parviennent même pas à compenser les pertes causées par les incendies, le surpâturage et l'exploitation anarchique de la forêt(A.M.T, 2019).

Tableau 1 : Principales essences des forêts algériennes(DGF, 2004)

Essences	Superficie (ha)	Taux %
Pin d'Alep	881 000	21,5%
Chêne liège	230 000	5,6%
Chêne vert	108 000	2,6%
Chêne zéen et Chêne Afares	48 000	1,2%
Eucalyptus	43 000	1%
Pin maritime	31 000	0,8%
Cèdre de l'Atlas	16 000	0,4%
Autres (Thuya + Genévrier + Frêne)	124 000	3%
Reboisement et protection	717 000	17,5%
Maquis et broussailles + vides	1902 000	46,4%
Totale	4100 000	100%

La végétation forestière est donc en déclin constant. Il est crucial de mener des efforts soutenus pour lutter contre la déforestation causée par des incendies récurrents, qu'ils soient accidentels ou intentionnels. Cette lutte revêt une importance particulière, car la forêt offre des opportunités d'emploi

dans un pays confronté à un taux de chômage élevé. De plus, la politique forestière joue un rôle essentiel dans la lutte contre l'érosion des sols, notamment dans les zones pentues (DGF, 2004)

I.3. Analyse des incendies des forêts algériennes

La répartition des superficies incendiées est inégale entre les trois régions du pays. La région Nord-est est la plus touchée, représentant 50,06% de la superficie incendiée. En deuxième position, la région centre-Nord compte 28,21% des incendies, tandis que la région Nord-Ouest enregistre 21,73% des superficies incendiées (MEDDOUR-SAHAR et al., 2008)

I.3.1. Période de 1853-1915

Durant cette période, la superficie incendiée s'élève à plus de 1 831 745 hectares, avec cinq années présentant des maxima relatifs très marqués et soudains :

- En 1865, la superficie brûlée atteint 163 954 Ha.
- En 1881, la superficie brûlée s'élève à 169 056 Ha.
- En 1892, la superficie brûlée est de 135 754 Ha.
- En 1902, la superficie brûlée est de 141 141 Ha.
- En 1913, la superficie brûlée est de 138 191 Ha.

Ces chiffres témoignent de l'espérance de vie moyenne des boisements, qui ne dépassait pas dix ans, surtout dans la région est du pays (Marc, 1916)

I.3.2. Période avant l'indépendance

Durant la période de 1916 à 1962, la superficie totale incendiée s'élève à 1 872 054 hectares. Ces incendies se répartissent comme suit, en ordre décroissant : en 1956, pendant la guerre de libération, 204 220 hectares ont été brûlés, ce qui représente 10,9% du total. En deuxième position, l'année 1917 avec 95 453 hectares brûlés, soit 6,24% du total. Ensuite, les années 1962 et 1943 avec respectivement 81 985 hectares et 81 678 hectares, représentant chacune 4,37% du total. (Marc, 1916).

I.3.3. Période après l'indépendance

Au cours de cette période, on observe une diminution des superficies brûlées, bien que des incendies majeurs se produisent tous les cinq ans. La superficie totale brûlée s'élève à 1 345 978 ha. L'année où l'on observe le plus grand pic dans les superficies brûlées est 1994, avec 271 597,79 ha, soit 20% du total. Ensuite, en 1983, une année particulièrement sèche, 221 367 hectares ont été brûlés, représentant 16% du total (Abedelguerfi et.. (2003)

Pour les superficies brûlées de moindre importance, on retrouve les années suivantes : en 1965, 52 732 hectares, soit 3,9% du total ; en 1971, 57 835 ha, soit 4,3% ; en 1977, 50 152 hectares, soit 3,7% ; en 1993, 58 680 ha, soit 4,3% ; et enfin, en 2000, 55 782 ha, soit 4,1% (Megrouche,2006).

Période de 1882-2001

Au cours d'une période de 12 décennies, de 1882 à 2001, la superficie totale brûlée s'élève à 4 612 063 ha.

Les années qui ont enregistré les superficies brûlées les plus importantes sont les suivantes :

De 1892 à 1901, pendant la période coloniale, avec 451 529 hectares brûlés, soit 9,79% du total (Megrouche, 2006).

En 1962, avec 660 423 hectares brûlés, représentant 14,31% du total, en raison des années de guerre pour l'indépendance.

De 1912 à 1921, avec 647 462 hectares brûlés, soit 14,03% du total, coïncidant avec la Première Guerre mondiale.

De 1991 à 2001, avec 550 440 hectares brûlés, soit 11,93% du total, en raison des événements liés au terrorisme qui ont affecté notre pays durant cette période.

I.4. Répartition des incendies suivant les formations végétales

Entre les années 1985 et 2006, une superficie totale de 779 872,11 hectares a été brûlée, résultant en 32 354 foyers d'incendies. En moyenne, chaque foyer représente une superficie de 24,10 hectares. Les forêts sont les

formations végétales les plus touchées par les incendies, représentant 60,6% de la superficie totale brûlée. Cette observation souligne la pression exercée sur les forêts en particulier. De plus, l'ampleur des superficies incendiées est liée à la densité élevée de la végétation. En effet, une quantité de combustible plus importante entraîne une intensification de l'ignition, rendant l'extinction plus difficile, d'autant plus que la plupart de nos massifs forestiers se trouvent dans des terrains marginaux difficilement accessibles et fortement pentus (Arfa, 2008).

1.5. Répartition des incendies par région

La répartition de la superficie incendiée est inégale entre les trois régions du pays. La région nord-est est la plus touchée, représentant 50,06% de la superficie incendiée, suivie de la région centre-nord avec 28,21%, et enfin la région nord-ouest avec 21,73%. Cette disparité peut s'expliquer par l'importance des massifs forestiers qui varient en fonction de la progression du nord-ouest vers le nord-est du pays. Le classement par nombre de feux par région suit la même logique que celui des superficies incendiées. Dans les autres régions, notamment la région centre-nord, la moyenne élevée de foyers incendiaires est principalement due à une concentration humaine importante dans ces massifs. En retour, cette présence humaine active la mobilisation rapide de ressources pour lutter contre les incendies afin de contrer les menaces pesant sur les populations vivant dans des zones enclavées, caractérisées par une végétation dense et une forte densité de population. Malgré la forte concentration de massifs forestiers dans la région nord-est, les incendies y demeurent un défi en raison de la topographie difficile, de l'accès limité et d'autres facteurs inhérents à cette zone Arfa, (2008).

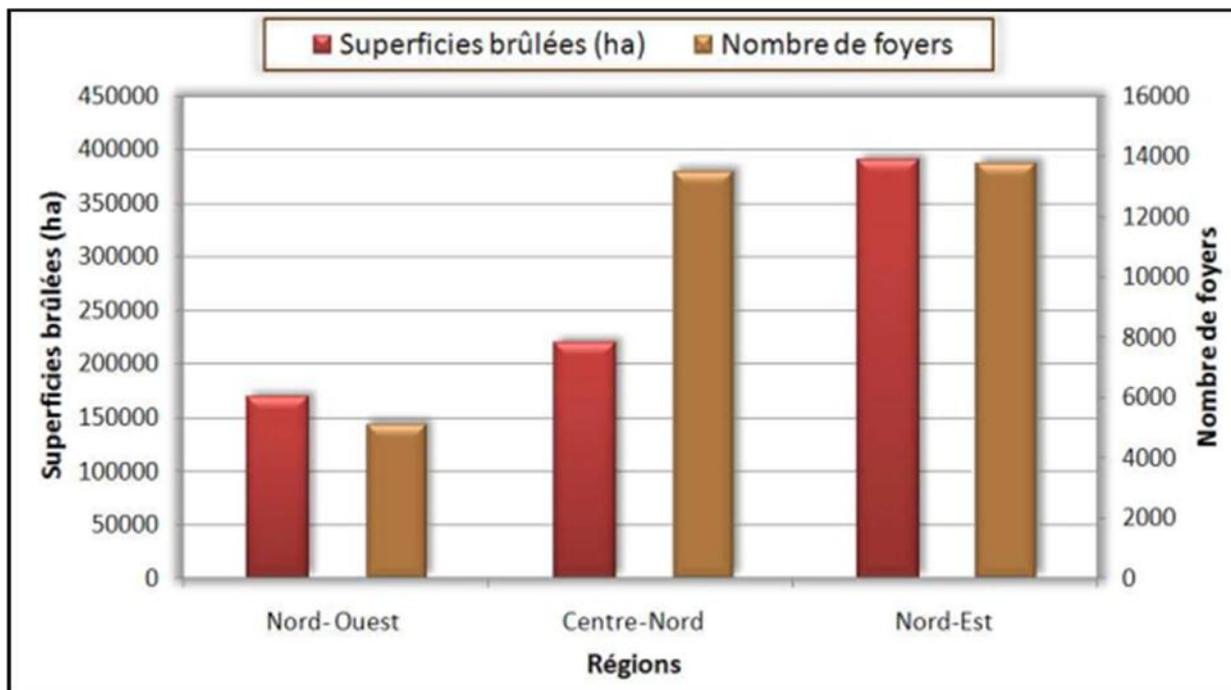


Figure 1 Répartition des incendies par région en Algérie (période 1985-2006).

I.6. Répartition des incendies suivant les wilayas

Au cours de la période allant de 1985 à 2006, les incendies de forêt ont touché régulièrement 40 wilayas. Parmi celles-ci, la wilaya de Bejaia a été la plus sévèrement touchée, avec une superficie incendiée de 84 684,11 ha. Les wilayas du Sud, quant à elles, sont moins touchées par ce phénomène en raison de l'absence de couvertures forestières dans ces régions. Sur les 10 wilayas suivantes : Bejaia, Skikda, Tizi-Ouzou, El-Tarf, Sidi-Bel-Abbès, Tlemcen, Jijel, Médéa, Guelma et Annaba, elles représentent à elles seules 552 537,95 ha, soit 70,85% de la superficie incendiée totale. Dans ces wilayas, les incendies individuels dépassent souvent les 38 000 ha. En revanche, dans les 30 autres wilayas, la superficie brûlée est inférieure à ces chiffres, atteignant parfois des valeurs négligeables, notamment dans la plupart des wilayas situées dans les zones semi-arides. En ce qui concerne le nombre de foyers, sur les 32 354

départs de feux enregistrés, 17 730 d'entre eux, soit 54,80%, concernent uniquement 9 wilayas, à savoir Bejaia, Tizi-Ouzou, Médéa, El-Tarf, Souk-Ahras, Skikda, Jijel, Tipaza et Bouira (Arfa, 2008).

I.7. Principales causes des incendies

Les causes des incendies de forêt en Algérie sont multiples et leur répartition varie à la fois d'un pays à l'autre et à l'intérieur même du pays. Dans la région méditerranéenne, la plupart des incendies sont d'origine humaine, que ce soit par accident, par négligence ou intentionnellement. Cependant, il existe encore une part significative de feux dont l'origine reste inconnue.

I.7.1. Causes naturelles

La végétation ne s'enflamme pas spontanément, même en période de sécheresse intense. Dans le bassin méditerranéen, la seule cause naturelle connue d'incendies est la foudre. Toutefois, la foudre ne représente qu'une faible proportion, de 1 à 5 %, des départs de feu dans cette région. Des exceptions peuvent être observées dans certaines régions d'Espagne, où la foudre peut être responsable de jusqu'à 30 % des incendies (Aragon : 38 % et Castille-la Manche : 29 %) (Messaferi, 2018).

I.7.2. Causes anthropiques

Les causes humaines sont responsables de la grande majorité des incendies de forêt. Dans l'ensemble des pays du bassin méditerranéen, on observe à la fois des causes accidentelles et des causes intentionnelles. La répartition de ces causes est étroitement liée au contexte social, économique, politique et législatif de chaque pays (Cherifi, 2017)

I.7.3. Causes involontaires

Les incendies de forêt sont souvent causés par des négligences humaines, qui peuvent être intentionnelles et causer des dommages considérables aux surfaces forestières chaque année. (Morandini, 1979) En plus de cela, on peut également mentionner d'autres causes telles que les brûlis agricoles visant à amender les terres agricoles et la mise à feu des sous-

bois pour améliorer et augmenter le pâturage des troupeaux des habitants locaux (O.O.M.S. (2008))

D'autre part, des causes accidentelles sont également à prendre en compte, parmi lesquelles on peut citer des comportements imprudents tels que l'échappement de véhicules, les jets de mégots de cigarette, les arcs électriques, ou encore les activités de chasseurs de miel (O.O. M.-S. (2008)) Ces facteurs accidentels contribuent également à déclencher des incendies de forêt.

CHAPITRE II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II.1. Présentation de la zone étude

La région étudiée concerne la wilaya de Tlemcen, qui occupe une position privilégiée au sein du pays (voir figure 2). Elle se trouve sur la côte nord-ouest de l'Algérie et bénéficie d'une façade maritime de 120 km. La wilaya partage une frontière de 180 km avec le Maroc et couvre une superficie de 9017,69 km². Géographiquement, elle est située à l'extrême ouest de l'Algérie, entre les longitudes ouest de 1° 27" et 1° 51", et les latitudes nord de 34° 27" et 35° 18".

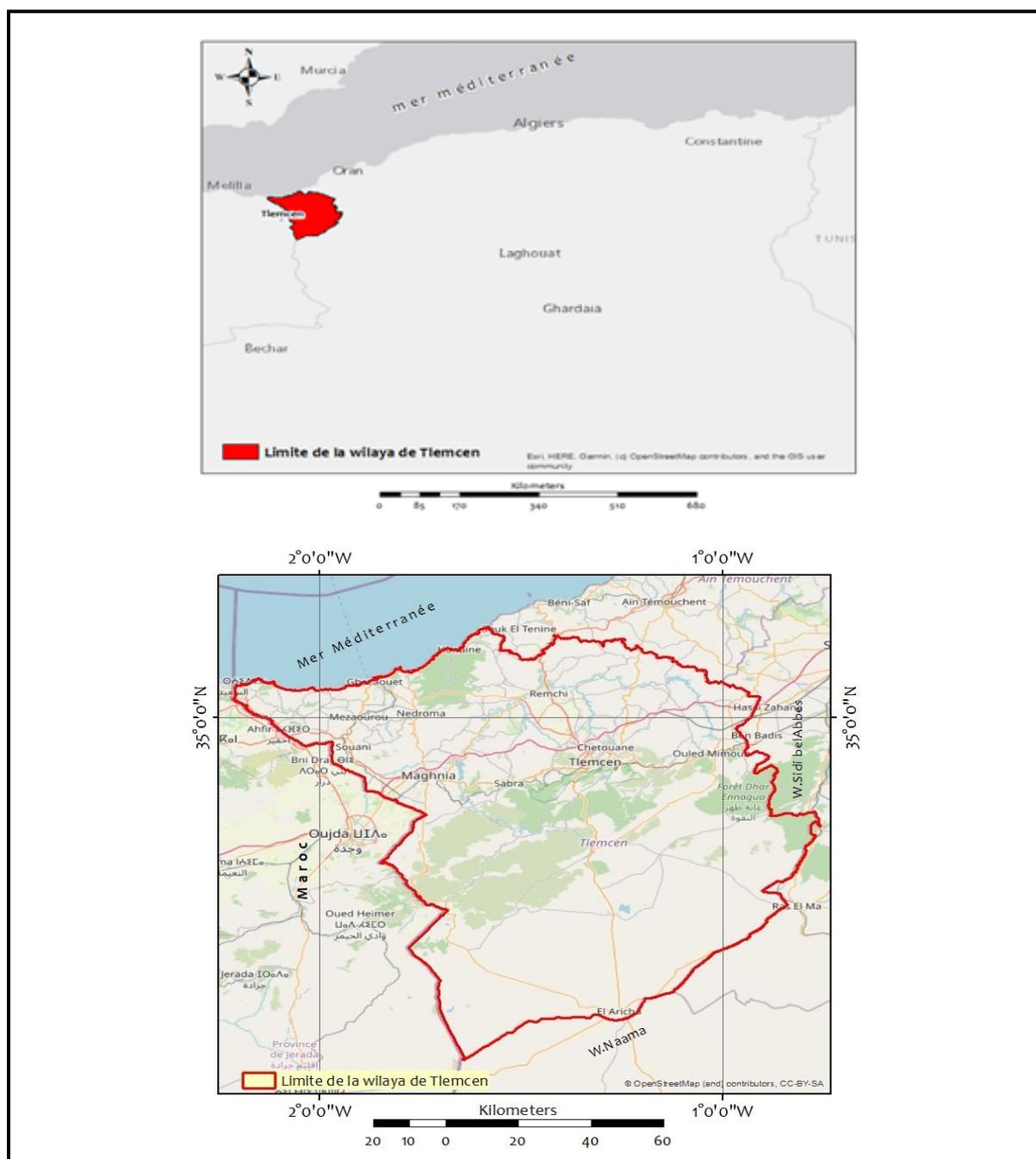


Figure 2 : Carte de situation géographique de la wilaya de Tlemcen.

Chapitre II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La wilaya de Tlemcen est composée de 20 Daïrates qui sont subdivisées en 53 Communes, dont :

- 20 communes à vocation forestière,
- 09 communes à vocation agro-sylvicole,
- 19 communes potentiellement agricoles,
- 05 communes steppiques,
- 08 communes frontalières,
- 08 communes côtières.

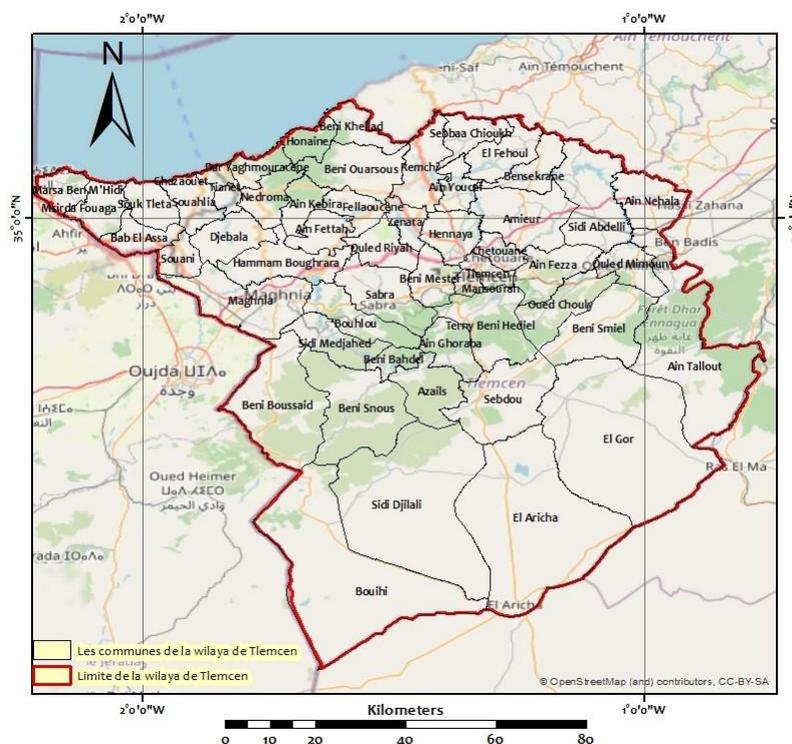


Figure 3: Découpage territorial par communes et par ensemble physique. (kerroumi et Mecheri, 2023)

II.2. Le milieu physique

II.2.1. Reliefs

La région de Tlemcen présente une diversité orographique remarquable qui confère à son paysage une grande variété. Elle peut être subdivisée en différentes zones distinctes.

Tout d'abord, le littoral occupe la partie nord de manière homogène, s'étendant sur une superficie de 211 000 hectares. Cette zone est caractérisée par le massif montagneux des Traras ainsi que des côtes sablonneuses.

Ensuite, les plaines telliennes s'étendent sur une superficie de 32 100 hectares entre le littoral et les monts de Tlemcen. Elles s'étirent d'est en ouest à travers la wilaya et abritent le cours majeur de la Tafna

Les hauts plateaux constituent de vastes étendues tabulaires couvrant 24 800 hectares, situées entre l'Atlas tellien représenté par les monts de Tlemcen au nord et l'Atlas saharien au sud. Ces hauts plateaux correspondent à la steppe (Mekkioui, 1989).

Enfin, les monts de Tlemcen, occupant 317 600 hectares, soit 34% de la superficie totale, se divisent en deux parties distinctes.

- Les Monts de Tlemcen, situés dans la partie nord de la région, se caractérisent par un relief de haute montagne avec des altitudes élevées allant de 400 à 1 600 mètres. Les pentes abruptes de ces montagnes dépassent les 25%, ce qui peut entraîner des problèmes d'enclavement et d'isolement dans certaines zones.
- En revanche, la partie sud des Monts de Tlemcen présente une topographie différente. Environ la moitié de cette zone est caractérisée par des pentes, inférieures à 12%, ce qui est favorable pour l'agriculture. Le reste du territoire est constitué de reliefs de haute montagne, avec des pentes supérieures à 25% et des altitudes élevées allant de 800 à 1 600 mètres.

II.3. Cadre climatique

La configuration topographique, la proximité de la mer, l'altitude, l'exposition et la couverture végétale jouent un rôle crucial dans la diversité des étages bioclimatiques présents dans notre zone d'étude, selon Bouguettaya (2011). Voici les différentes classifications identifiées :

- Un étage bioclimatique subhumide s'étend sur une grande partie des Monts de Tlemcen, où les précipitations annuelles moyennes dépassent les 600 mm. Les températures moyennes annuelles atteignent en moyenne 31 °C pour les maximales et 2,5 °C pour les minimales.
- Les Monts des Trara et les plaines de Tlemcen sont caractérisés par un étage bioclimatique semi-aride. On observe une pluviométrie moyenne annuelle variant de 300 à 400 mm, tandis que les températures moyennes annuelles atteignent 32 °C pour les températures maximales et 6 °C pour les températures minimales.
- Enfin, un étage bioclimatique aride prédomine dans la région steppique, qui couvre pratiquement toute la partie sud de la région de Tlemcen. Les précipitations annuelles moyennes y sont inférieures à 300 mm, tandis que les températures varient entre 31 °C et 2,6 °C en moyenne.

II.4. Présentation du milieu forestier

Les terres forestières jouent un rôle significatif dans la wilaya de Tlemcen, occupant une superficie de 217 000 hectares, y compris les zones reboisées. Cela représente environ 24% de la superficie totale de la wilaya. Il est également important de noter que plus de 79% du potentiel sylvicole est concentré dans les monts de Tlemcen.

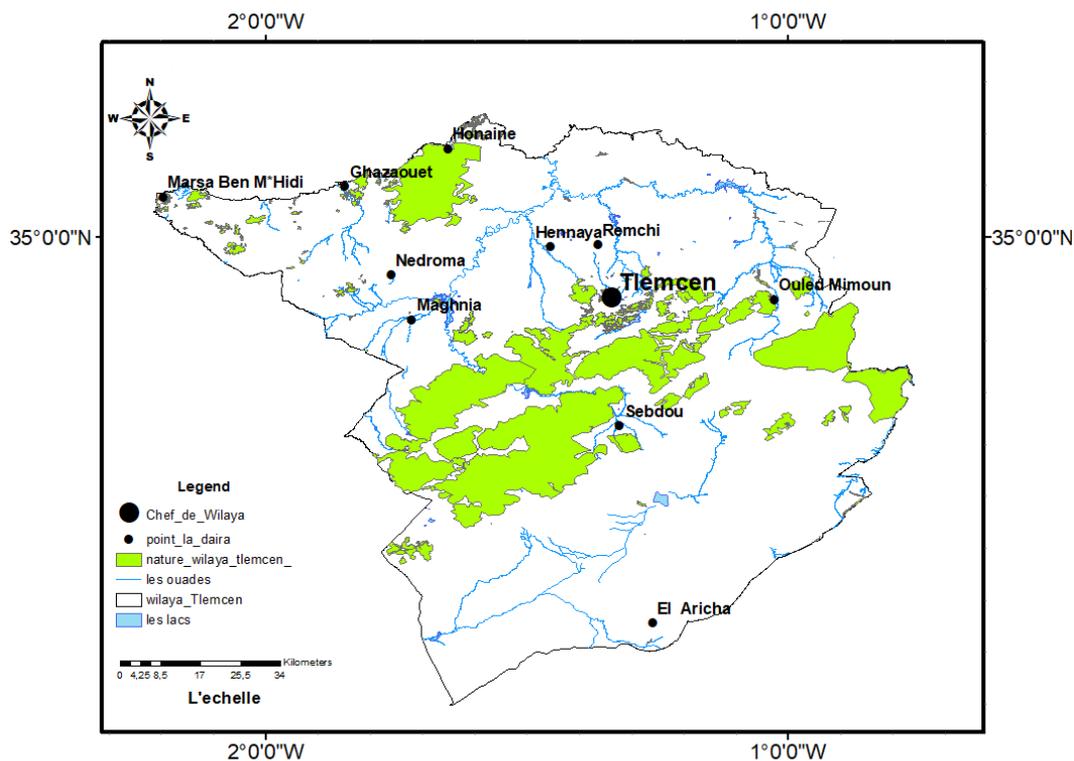


Figure 4 : Carte de Forêt de la wilaya de Tlemcen.

II.4.1. Répartition générale des terres

De manière générale, l'analyse des données recueillies auprès de la Direction des Services Agricoles de la wilaya de Tlemcen (D.S.A) (tableau 1) révèle une répartition des sols assez diversifiée dans la région de Tlemcen

Tableau 2 : Répartition générale des terres (D.S.A, 2010).

Surface totale		Surface agricole utile		Parcours et pacage		Foret et maquis		Terrain non cultivé	
Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%
901769	100	353225	39,17	166253	18,43	217000	24	165204	18,32

Dans l'ensemble, la répartition des sols dans la région de Tlemcen présente les caractéristiques suivantes, selon les données recueillies auprès de la Direction des Services Agricoles de la wilaya de Tlemcen (D.S.A, 2010) :

- La surface agricole utile (S.A.U) affiche un faible pourcentage, occupant seulement 353 225 hectares, soit 39,17% de la superficie totale. La répartition de la S.A.U est très contrastée, étant principalement concentrée dans la partie Nord de la région de Tlemcen.
- Les terres de parcours représentent 18,43% de la superficie totale et leur importance augmente avec l'altitude.
- Les terres impropres à l'activité agricole occupent une partie significative du territoire. Le domaine forestier, couvrant 217 000 hectares, représente 24% de la superficie totale. La S.A.U est principalement dominée par les cultures annuelles, avec les céréales représentant en moyenne 30% de la S.A.U, soit 116 120 hectares. Les fourrages occupent 17 320 hectares. Les autres cultures incluent les légumes secs, les cultures maraîchères et les arbres fruitiers.

II.4.2. Principales forêts domaniales

Selon les données de la Conservation des Forêts en 2018, la région de Tlemcen compte environ huit forêts domaniales principales, qui couvrent une superficie totale de 100 748 hectares. La taille de ces forêts varie considérablement d'un domaine à l'autre, certaines forêts occupant moins de 10 000 hectares (comme Hafir, Merbah, Azail, Djebel Ouargla), tandis que d'autres sont de vastes étendues dépassant les 12 000 hectares (comme Moulay Slissen, Khemis, Beni Boussaid, Ouled Nehar Gheraba). Les détails sont disponibles dans le tableau correspondant.

Tableau 3 : Les forêts domaniales de la willaya de Tlemcen (CFT 2018)

Commune	Nom de la Forêt Domaniale	Superficie (Ha)	Espèce Existante
Ghazaout-Dar Yaghmoracene	Touent	355,52	Pin d'Alep
Nedroma	Beni Menir	343,3	Pin d'Alep-Thuya
MsirdaFouagga- Marsa Ben Mhidi	Msirda Fouagga	1799,32	Pin d'Alep-Cyprès
Beni Boussaid	Beni Boussaid	13266,52	Chêne Vert- Pin d'Alep-Thuya
Sidi Medjahed	El kef	952,8182	Chêne vert- Eucalyptus-Thuya
Sabra	Hafir	101157,556	Chêne-liège- Chêne Vert - Thuya
Sabra	Tameksalet	1833,9345	Pin d'Alep-Thuya
Hammam Boughrara	Bled Chahba	293,834	Pin d'Alep- Thuya
Maghnia	Maghnia	227,91	Pin d'Alep- Eucalyptus- Cyprès
Maghnia	Groupe IntégréMaghnia	1180,3114	Pin d'Alep
Beni Ouarsous	Beni Ouarsous	1751	Pin d'Alep- Eucalyptus-Chêne Liège-Thuya
Honaine	Honaine	345	Pin d'Alep- Thuya
Remchi	Groupe IntégréRemchi	385,6076	Pin d'Alep
Tlemcen	Tlemcen	272.7005	Pin d'Alep
Ain Fezza	Ifri	1080	Pin d'Alep-Chêne vert-Thuya-Genévrier
Terny	Zariffet	989 148	Chêne vert-Chêne Zeen- Chêne liège- Pin d'Alep Genévrier
Terny	Tassemramet	809.9889	Pin d'Alep-Chêne vert-Genévrier
Terny	Titibokrane	2315.465	Pin d'Alep-Chêne vert-Genévrier
Terny	Oued Mardja	215.2505	Pin d'Alep-Chêne vert-Genévrier
Ain Ghorabu	Bouchouk	439.6824	Chêne vert- Genevrier
Azails	Azails	7776.162	Chêne vert-Thrya
Sidi Djilali	Khemis	24305	Chêne vert-Pin d'Alep
Sebdou	Sebdou	1827,87	Pin d'Alep-Chêne vert
El Bouihi	ONG (OuledNharGhraba)	11984	Pin d'Alep-Chêne vert
El Gor	Takfarct	5627,56	Pin d'Alep
El Gor	Asses	5208	Pin d'Alep
El Gor	Djebel Ourgla	8469,1	Pin d'Alep
Ouled Mimoun	Zerdeb	1383,1	Thuya-Pin d'Alep
Beni Smiel	Ain Assouk	1307	Pin d'Alep-Chêne vert- Chine Liège- Genévrier
Beni Smiel	Meurbah	5053.65	Pin d'Alep-Chêne vert- Chine Liège- Genévrier
Oued Lakhdar	Oued Chouly	1025	Pin d'Alep Cyprès- Chêne
Oued Lakhdar	Sidi Hamza	1245.35	Pin d'Alep Cyprès- Chêne
Oued Lakhdar	Groupe Intégré Oued Lakhdar	1588.7461	Pin d'Alep Cyprès- Chêne
Ain Tellout	Slissen	26550,3	Pin d'Alep Chine vert
Total		233865,9051	

II.4.3. Essences forestières constitutives

La Wilaya compte principalement des forêts naturelles, à l'exception de quelques zones reboisées avec des Pins d'Alep tels qu'Ain Fezza et Ain El Hout. Les forêts de chênes revêtent une importance économique en raison de leur utilisation dans la production de liège, qui conserve une excellente qualité malgré une production limitée.

Tableau 4 : superficie de principales essences forestières dans la région de Tlemcen (D.S.A, 2010).

Principales essences	Superficies (ha)
Pin d'Alep (<i>Pinushalepensis</i>)	86000
Chêne vert (<i>Quercus ilex</i>)	82000
Thuya (<i>Tetraclinisarticulata</i>)	16500
Genévrier (<i>Juniperusoxycedrus</i>)	13000
Chêne Liège (<i>Quercus suber</i>)	4000
Autres	1550
Total	203050

Le tableau présente les superficies en hectares (ha) des principales essences végétales présentes dans la wilaya. Deux espèces se distinguent par leur vaste étendue : le *Pinus halepensis* avec 86 000 ha et le *Quercus ilex* avec 82 000 ha. Deux autres essences occupent également une part significative du territoire : le *Tetraclinis articulata* avec 16 500 ha et le *Juniperus oxycedrus* avec 13 000 ha. Quant au chêne-liège, sa superficie est limitée à 4 000 ha. Ces espèces jouent un rôle majeur dans la structure des principales forêts de la wilaya. Il convient de noter qu'une superficie de 1 550 ha est occupée par d'autres essences telles que le (*Quercus faginea*...).

II.4.4. Types de formations forestières

D'après les informations fournies par la C.F.T (2016), les formations forestières de la Wilaya de Tlemcen se distinguent de la manière suivante :

- Les maquis clairs couvrent une superficie de 82 995 hectares.
- Les maquis denses occupent une surface de 37 669 hectares.
- Les maquis arborés s'étendent sur 89 296 hectares.
- Les forêts proprement dites, incluant les reboisements, couvrent une superficie de 28 857 hectares.

CHAPITRE III. MATERIEL ET METHODES

III.1. -Objectif du travail :

Cette étude a pour objectif principal de réaliser une analyse critique approfondie des enregistrements de la Direction Générale des Forêts (DGF) relatifs aux incendies qui se sont produits dans la wilaya de TLEMEN au cours des vingt-huit dernières années, de 1992 à 2020. Les enregistrements d'incendies ont été soumis à un rigoureux protocole de contrôle qualité, basé sur une évaluation des zones brûlées grâce à la télédétection à partir d'images Landsat et à l'utilisation d'outils de Systèmes d'Information Géographique (SIG). Pour mener à bien cette analyse critique, divers matériels ont été utilisés, comprenant :

III.2. Matériels utilisés :

III.2.1. -Données des incendies de forêt

Les données utilisées dans cette étude sont les enregistrements officiels des incendies fournis par la conservation des forêts de la wilaya de Tlemcen. Ces enregistrements, disponibles sous forme numérique, couvrent la période de 1992 à 2020. Les rapports annuels d'incendie émis par la conservation fournissent des informations détaillées sur chaque incendie, notamment sa superficie brûlée en hectares, sa date et son heure de déclaration et d'extinction. Des détails supplémentaires sur le type de végétation touchée sont également inclus, ainsi que des indications de localisation, souvent basées sur la structure administrative en unités hiérarchiques (Wilayat-Daira-commune). Dans certains cas, le nom d'un point de repère principal tel qu'une montagne, une forêt ou un lieu-dit est également mentionné. Les données sont collectées par les agents de la conservation à partir d'observations sur le terrain, permettant ainsi d'estimer avec précision la superficie brûlée et le type de végétation affecté.

Les données sont stockées sous forme de tableaux annuels.

III.2.2. Données de télédétection

Dans le cadre de notre travail, nous avons utilisé les images satellitaires Landsat à accès libre sur la plateforme de calcul GEE

(www.googleearthengine.com).

Le programme Landsat, développé conjointement par la NASA et l'USGS, est un vaste programme d'observation de la Terre qui revêt une importance primordiale pour la surveillance et la compréhension de notre planète. Son lancement en 1972 a ouvert la voie à une collecte continue et méthodique d'images satellites de la surface terrestre. Les satellites Landsat ont joué un rôle essentiel dans divers domaines tels que la cartographie, la surveillance des ressources naturelles, la gestion environnementale et la compréhension des phénomènes de changement à l'échelle globale.

Depuis 2008, l'US Geological Survey (USGS) a rendu les images satellitaires accessibles au grand public dans un format convivial, cohérent et sans frais.

Cette initiative a généré une croissance significative de la recherche scientifique et des applications Wulder et al. (2012).

Afin d'analyser les incendies de forêt survenus dans la wilaya de Tlemcen entre 1992 et 2020, trois satellites du programme Landsat ont été employés, à savoir Landsat-5, Landsat-7 et Landsat-8.

Voici les caractéristiques spectrales et géométriques des images utilisées :

Tableau 5: Description des images Landsat 5

Name	Description	Résolution	Longueur d'onde
B1	Bleu	30 mètres	0.45 - 0.52 μm
B2	Vert	30 mètres	0.52 - 0.60 μm
B3	Rouge	30 mètres	0.63 - 0.69 μm
B4	Proche infrarouge	30 mètres	0.76 - 0.90 μm
B5	Infrarouge à ondes courtes 1	30 mètres	1.55 - 1.75 μm
B6	Infrarouge thermique rééchantillonné de 60 m à 30 m	30 mètres	10.40 - 12.50 μm
B7	Infrarouge à ondes courtes 2	30 mètres	2.08 - 2.35 μm

Tableau 6: Description des images Landsat 7

Name	Description	Résolution	Longueur d'onde
B1	Bleu	30 mètres	0.45-0.52µm
B2	Vert	30 mètres	0.52-0.62 µm
B3	Rouge	30 mètres	0.63-0.69 µm
B4	Proche infrarouge	30 mètres	0.77-0.90 µm
B5	Infrarouge à ondes courtes 1	30 mètres	1.55-1.75 µm
B6-VCID-1	Infrarouge thermique à faible gain 1. Cette bande a une plage dynamique étendue et une résolution radiométrique (sensibilité) plus faible, avec moins de saturation à des valeurs numériques (DN) élevées. Rééchantillonné de 60m à 30m.	60 mètres	10.40-12.50 µm
B6- VCID-2	Infrarouge thermique à gain élevé 1. Cette bande a une résolution radiométrique plus élevée (sensibilité), bien qu'elle ait une plage dynamique plus restreinte. Rééchantillonné de 60m à 30m.	60 mètres	10.40-12.50 µm
B7	Infrarouge à ondes courtes 2	30 mètres	2.08-2.35 µm
B8	Panchromatique	15 mètres	0.52-0.92 µm

Tableau 7: Description des images Landsat 8

Name	Description	Résolution	Longueur d'onde
B1	Aérosol côtier	30 mètres	0.43-0.45 µm
B2	Bleu	30 mètres	0.45-0.51 µm
B3	Vert	30 mètres	0.53-0.59 µm
B4	Rouge	30 mètres	0.64-0.67 µm
B5	Proche infrarouge	30 mètres	0.85-0.88 µm
B6	Infrarouge à ondes courtes 1	30 mètres	1.57-1.65 µm
B7	Infrarouge à ondes courtes 2	30 mètres	2.11-2.29 µm
B8	Bande 8 Panchromatique	15 mètres	0.52-0.90 µm
B9	Cirrus	30 mètres	1.36-1.38 µm
B10	Infrarouge thermique 1, rééchantillonné de 100m à 30m	30 mètres	10.60-11.19 µm
B11	Infrarouge thermique 2, rééchantillonné de 100m à 30m	30 mètres	11.50-12.51 µm

Source : Google earth engine.com

III.2.3. Logiciels utilisés :

Nous avons sélectionné deux outils logiciels pour mettre en œuvre notre méthodologie d'évaluation des incendies, à savoir ArcGIS et Google Earth Engine.

1. ArcGIS :

ArcGIS est un système d'information géographique (SIG) développé par la société Esri. Il propose une large gamme d'outils et de fonctionnalités pour capturer, gérer, analyser et visualiser des données géospatiales. En utilisant ArcGIS, il est possible de fusionner différentes sources de données, telles que des images satellites, des cartes topographiques et des données démographiques, afin de créer des analyses et des cartes géographiques informatives. Cet outil logiciel est couramment utilisé dans de nombreux domaines, tels que l'aménagement du territoire, la gestion des ressources naturelles, la planification urbaine, l'environnement, la santé publique et la gestion des catastrophes. Il se distingue par une interface conviviale et une grande flexibilité qui permettent de manipuler les données spatiales et d'effectuer des analyses avancées. (ArcGis Online,Esri)

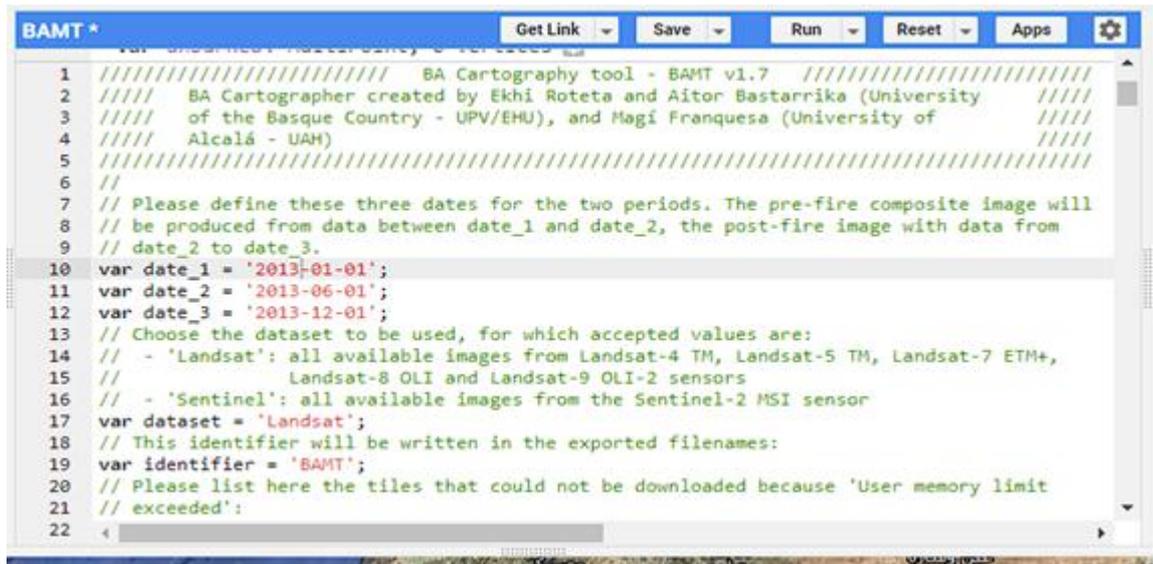
2. Google Earth Engine :

GEE est une plateforme professionnelle de traitement et d'analyse de données géospatiales développée par Google. Elle permet aux utilisateurs de manipuler, explorer et exploiter de vastes ensembles de données géospatiales provenant de différentes sources, telles que des images satellites, des données climatiques et des informations géographiques.

L'un des principaux atouts de Google Earth Engine réside dans sa capacité à gérer et à analyser de grandes quantités de données géospatiales de manière rapide et efficace. Grâce à son infrastructure de traitement distribué et à ses algorithmes avancés, les utilisateurs peuvent effectuer des analyses complexes et des modélisations sophistiquées à une échelle mondiale. Cela permet d'obtenir des résultats précis et détaillés pour une large gamme d'applications, allant de la surveillance des ressources naturelles à la modélisation climatique, en passant par la planification urbaine et la gestion des catastrophes.

Outre sa puissance de traitement, GEE offre des fonctionnalités avancées de visualisation et d'exploration des données géospatiales. Les

GEE utilise JavaScript comme langage de programmation pour interagir avec la plateforme, ainsi que pour rédiger des scripts permettant l'analyse et la manipulation des données géospatiales.



```
BAMT *
Get Link Save Run Reset Apps

1 //////////////////////////////////////////////////////////////////// BA Cartography tool - BAMT v1.7 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
2 // BA Cartographer created by Ekhi Roteta and Aitor Bastarrika (University of the Basque Country - UPV/EHU), and Magi Franquesa (University of Alcalá - UAH)
3 ////////////////////////////////////////////////////////////////////
4 //
5 // Please define these three dates for the two periods. The pre-fire composite image will be produced from data between date_1 and date_2, the post-fire image with data from date_2 to date_3.
6 //
7 //
8 //
9 //
10 var date_1 = '2013-01-01';
11 var date_2 = '2013-06-01';
12 var date_3 = '2013-12-01';
13 // Choose the dataset to be used, for which accepted values are:
14 // - 'Landsat': all available images from Landsat-4 TM, Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, Landsat-8 OLI and Landsat-9 OLI-2 sensors
15 // - 'Sentinel': all available images from the Sentinel-2 MSI sensor
16 //
17 var dataset = 'Landsat';
18 // This identifier will be written in the exported filenames:
19 var identifier = 'BAMT';
20 // Please list here the tiles that could not be downloaded because 'User memory limit exceeded':
21 //
22
```

Figure 6: Editeur de Code JavaScript de GEE

III.3. Approche méthodologique

III.3.1. Organigramme du travail

La figure suivante présente de manière synthétique l'organigramme qui illustre les différentes étapes de la méthodologie utilisée tout au long de ce travail :

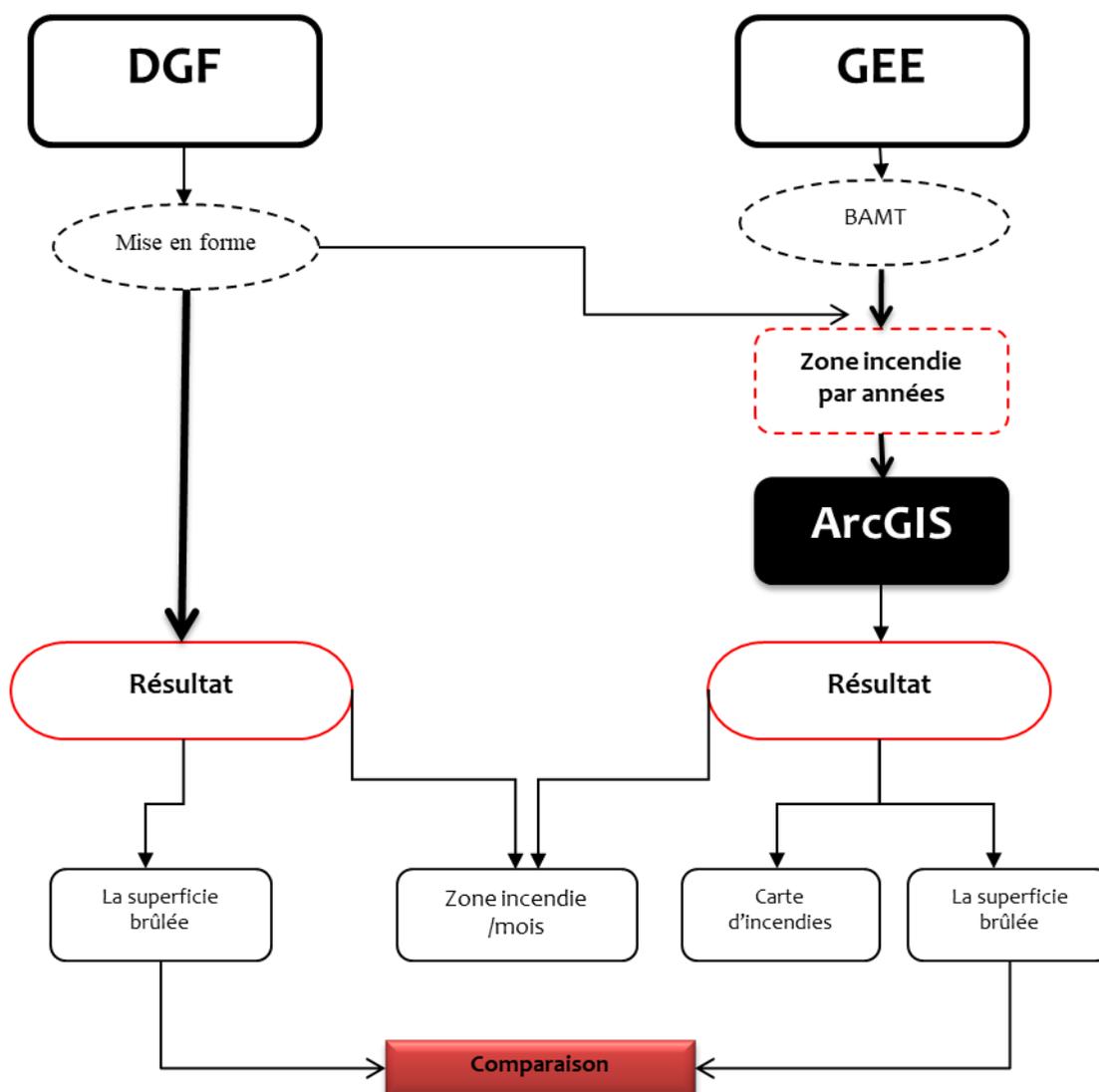


Figure 7: Organigramme du travail.

III.3.2. Mise en forme des Statistiques de la DGF

Pour mettre en forme les statistiques des incendies de la Direction Générale des Forêts (DGF) vous pouvez suivre collectez des données et préparations les données statistiques d'incendies, nettoyer, organiser et formater les données.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
année	daira	commune	nom de la foret ou lieu dit	extinction		superficie incendiée par mois (ha)						Coordonnées lambert		type de vegetation	
				date déclaration	date extinction	juin	jul	aout	sept	oct	total	X	Y		

Figure 8: formatage des données statistique des incendies.

III.3.3. Exportation des résultats sous Arcgis

En effet, les techniques de détection d'ArcGIS permettent d'obtenir la cartographie des zones incendiées.

La méthodologie adoptée a consisté à :

- Création d'un nouveau projet dans ArcGIS pour commencer à travailler sur la carte.
- Ajout des données de GEE en tant que couches d'information sur les incendies de la wilaya de Tlemcen par année, de 1992 à 2020. En important les données dans le projet ArcGIS, veillez à ce qu'elles soient correctement géoréférencées.
- Préparation des données : nettoyage, organisation et réalisation d'opérations de traitement telles que la fusion, l'extraction ou la transformation.
- Calcul des surfaces des incendies pour les années 1992-2020.
- Mise en page : ajout des marges, de la bordure, du titre, des légendes et des échelles.
- Exportation de la carte finale au format PNG.

III.3.4. Code GEE de cartographie BAMT

Aitor Bastarrika a développé un code Java dans Google Earth Engine (GEE) pour la détection des zones brûlées, connu sous le nom de BA (Bastarrika et al., 2014). Ce code était précédemment téléchargeable depuis <https://bastarrika.wordpress.com/>. Il s'agissait d'un outil de cartographie des zones brûlées.

Google a développé Google Earth Engine (GEE) <https://earthengine.google.com/>, une plate-forme de Cloud computing dédiée au traitement des données satellitaires. GEE permet d'accéder à une vaste base de données satellitaire, éliminant ainsi la nécessité de stocker de grandes quantités de données. De plus, GEE dispose d'une puissante capacité de traitement des données, exploitant pleinement ces fonctionnalités. En suivant la philosophie de BAMS, plusieurs outils ont été développés au sein de GEE. Tout le traitement s'effectue dans le Cloud, sans nécessité de

télécharger les données d'entrée. Seuls les résultats finaux sont exportés et éventuellement téléchargés. La seule exigence est d'avoir une connexion Internet stable.

Le logiciel BAMS d'origine était conçu pour générer des données de référence à partir d'une scène Landsat entre deux dates consécutives. Dans l'outil BAMT, Aitor Bastarrika a étendu ce logiciel pour couvrir l'ensemble du processus de cartographie des zones brûlées (BA), en utilisant également des images Sentinel-2 pour améliorer la résolution temporelle et spatiale. Ces outils, connus sous le nom d'outils de cartographie des zones brûlées (Burned Area Mapping Tools ou BAMT), sont accessibles à toute personne disposant d'un compte Google et inscrite sur la plateforme GEE. Les cinq principaux outils BAMT sont présentés dans la (Figure) :

- ✓ Outil BA Cartographie : permet de générer une carte BA dans une zone géographique et une période définie par l'utilisateur, en utilisant une classification supervisée.
- ✓ Outil VA : Les sites de validation ont été choisis en suivant une méthodologie d'échantillonnage aléatoire stratifié (Boschetti et coll., 2016 ; Padilla et coll., 2014), afin d'évaluer la précision de la carte des zones brûlées (BA).
- ✓ Outil VA Dates : Après avoir identifié les zones de validation à l'aide de l'outil précédent, celui-ci fournit simplement les dates à utiliser dans chaque zone de validation pour créer les périmètres de référence.
- ✓ Outil RP : Pour générer des zones brûlées de haute qualité dans un site de validation, nous avons utilisé une classification supervisée entre des dates spécifiques. Ces zones brûlées ont été créées dans le but d'être utilisées comme données de référence lors du processus de validation.
- ✓ Outil d'évaluation : Le processus de validation consiste à comparer la carte des zones brûlées (BA) avec les données de référence et à calculer des mesures de précision.
- ✓ Visionneuse d'images : pour afficher des images Landsat et sentinel-2.

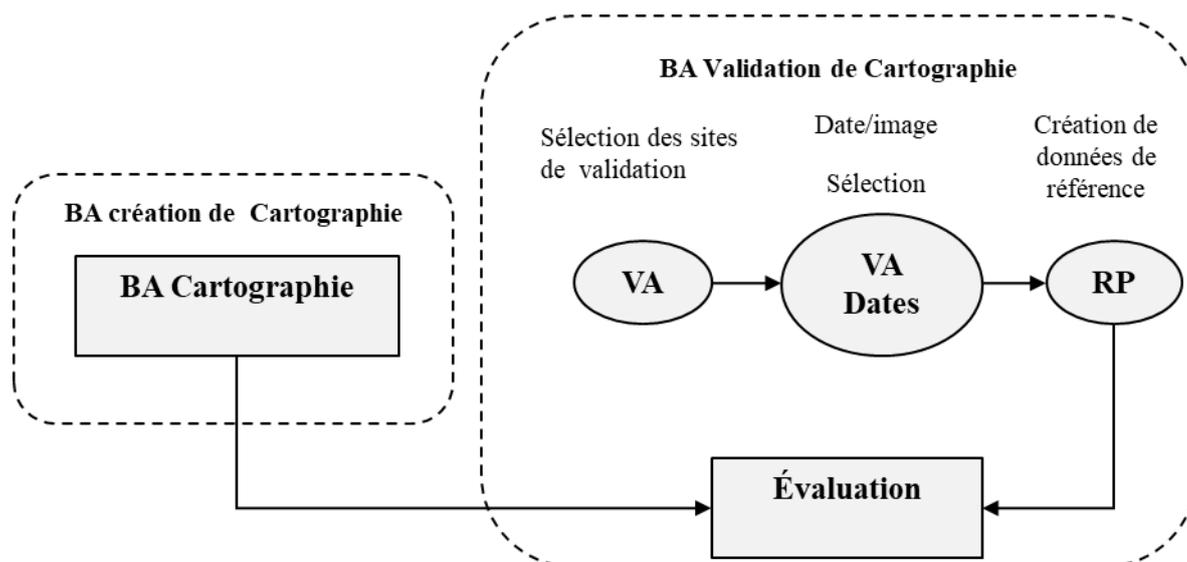


Figure9 : Organigramme des cinq outils BAMS du Maine (ref).

Tous les résultats sont exportés vers le compte Google Drive de l'utilisateur, où un dossier nommé "BAMS-GEE" est créé. Chaque fichier est accompagné d'un identifiant spécifié par l'utilisateur dans chaque outil, permettant ainsi de distinguer les fichiers provenant de différents projets.

Les outils et le présent guide de l'utilisateur peuvent être consultés à l'adresse suivante : <https://github.com/ekhiroteta/BAMS>. L'étude a été présentée sous forme d'article scientifique dans le Remote Sensing Journal, qu'il convient de consulter pour plus d'informations sur les algorithmes des outils : <https://www.mdpi.com/20224292/134/816> Cependant, veuillez garder à l'esprit que ce guide de l'utilisateur correspond à la version 1.7, alors que 1.6 était la seule version disponible lorsque le document a été publié.

III.3.4.1. Données d'entrées

Ces outils utilisent des ensembles de données multiples, tous appartenant à l'une des deux grandes missions ou programmes de satellites d'observation de la Terre : **Landsat** et **Sentinel**. Dans le cadre de notre travail, les données utilisées dans le code BAMS sont les images Landsat (5,7 et 8) par rapport à la date sélectionnée pour notre étude. Ces images sont décrites plus haut.

Les outils BAMT utilisent six bandes spectrales pour les ensembles de données Landsat et Sentinel-2 : les couleurs visibles (bleu, vert et rouge), le proche infrarouge (NIR) et deux bandes infrarouges de courte longueur d'onde (SWIR court et long). Dans la plupart des cas, la bande B8A du proche infrarouge, initialement à une résolution de 20 mètres, est utilisée pour les images Sentinel-2. Cependant, lorsque les produits de réflectance planétaire (RP) sont créés à la même résolution, la bande B8 à 10 mètres est sélectionnée comme proche infrarouge. Le tableau 5 présente les bandes correspondantes pour chaque satellite et capteur.

Tableau 8 : Bandes sélectionnées pour les outils BAMT, en fonction du satellite et du capteur

Capteur Satellitaire	Landsat-4 et 5	Landsat-7	Landsat-8	Sentinelle-2A et 2B	
Sensor	TM	ETM+	OLI et OLI-2	MSI	
	LSR c2			L1C	L2A
Bleu	B1		B2	B2	
Vert	B2		B3	B3	
Rouge	B3		B4	B4	
NIR	B4		B5	B8A (20 m) B8 (10)	
SHORT SWIR	B5		B6	B11	
LONG SWIR	B7		B7	B12	
QUALITY BAND	QA-PIXEL			QA60	SCO

Lorsque les nuages et les ombres de nuages doivent être masqués dans un outil, des bandes de qualité sont sélectionnées. Pour les ensembles de données Landsat, la bande **QA_PIXEL** est utilisée, dont les 3e et 4e bits indiquent respectivement la présence d'ombres nuageuses et de nuages. Les images Sentinel-2 ont une bande de qualité similaire appelée QA60, avec les mêmes informations dans les bits 10 et 11 (tableau) ; un seuil empirique basé sur la bande B1 est également utilisé, cependant, chaque pixel $B1 > 1500$ étant considéré comme un nuage.

Cependant, la classification de scène (**SCL**) est préférable pour les images **S2** lorsque le **L2A** est disponible, car le **SCL** a plus de catégories et est spatialement plus précis que la bande **QA60**. Cela n'est pas possible pour l'outil de cartographie **BA**, où il

peut y avoir des milliers d'images et le couplage des bandes **SCL** des produits **L2A** aux images **L1C** correspondantes dépassera la limite de mémoire de **GEE**. Mais le **SCL** est utilisé à la place des bandes **QA60** dans l'outil **RP** chaque fois que le produit **L2A** est disponible, où seulement deux images sont utilisées dans l'ensemble du processus de l'outil.

III.3.4.2. Outil de cartographie BA

<https://code.earthengine.google.com/20c4db5b2e94290aff4b3a87cdb056c2>

L'outil principal génère un produit de zones brûlées à grande échelle et sur une longue période de temps grâce à une classification supervisée. Il nécessite la définition d'un polygone pour délimiter la région d'intérêt, tandis que la période temporelle est délimitée par deux dates.

Le processus consiste à former un classificateur basé sur la forêt aléatoire en utilisant différentes bandes spectrales et indices d'image post-incendie ainsi qu'une image de différence multi-temporelle. Ce classificateur attribue à chaque pixel une valeur de probabilité allant de 0 % (non brûlé) à 100 % (brûlé). Un algorithme en deux phases est appliqué à cette image, identifiant d'abord les pixels fortement brûlés (graines brûlées), puis étendant les zones brûlées à partir de ces graines (Bastarrika et al., 2011). Les zones brûlées peuvent être exportées au format ESRI Shape file, avec un attribut indiquant la date de détection de la zone brûlée.

III.3.4.2.1. Paramètres initiaux

Avant de procéder à la détection des zones brûlées, l'utilisateur doit spécifier certains paramètres initiaux qui détermineront les périodes temporelles, la région géographique et le jeu de données à utiliser. Toutes ces variables sont définies au début du script, entre les lignes 7 et 26.

La détection des zones brûlées se fait en comparant deux ensembles d'images temporelles : l'un avant l'incendie et l'autre après l'incendie. La période post-incendie débute immédiatement après la fin de la période précédant l'incendie. Ainsi, trois dates distinctes doivent être spécifiées :

La date de début de la période pré-incendie,

La date de fin de la période pré-incendie et début de la période post-incendie,

La date de fin de la période post-incendie.

Ces dates permettent de délimiter avec précision les périodes temporelles nécessaires à la détection des zones brûlées.

Les trois dates doivent appartenir au type de données String et être écrites au format suivant : **AAAA-MM-JJ**

Où **AAAA** représente l'année, **MM** pour le mois et **JJ** pour le jour du mois, tous différenciés par des traits d'union.

La variable "jeu de données" doit être spécifié pour déterminer le jeu de données à utiliser dans le processus. Si la valeur est "Landsat", toutes les images disponibles des capteurs L4 TM, L5 TM, L7 ETM+, L8 OLI et L9 OLI-2 seront utilisées à une résolution de 30 mètres. Si la valeur est "Sentinel", les données du capteur S2 MSI, produit L1C, seront sélectionnées avec une résolution spatiale de 20 mètres.

La région géographique est définie manuellement sous la forme d'un polygone. Un calque géométrique d'entrée appelé "study Area" est utilisé à cet effet (voir Figure 10). Avant de définir une nouvelle région, tous les polygones préexistants doivent être supprimés de ce calque.

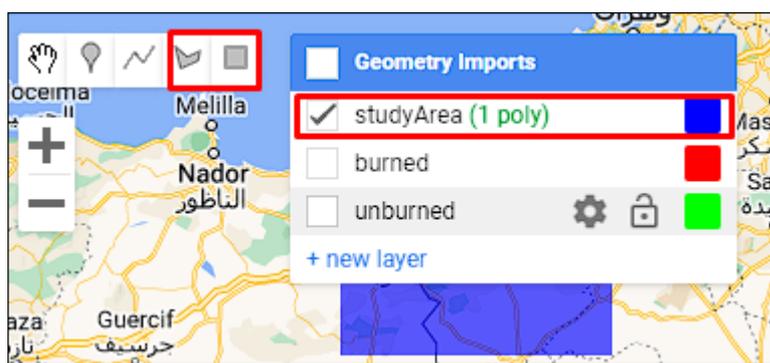


Figure 10 : Utilisation de la couche "Région manuelle" pour définir la région sous la forme d'un polygone

Enfin, l'utilisateur a la possibilité d'attribuer un identifiant à la variable d'identification afin de différencier ce produit BA des autres. Cet identifiant sera inclus dans les noms des fichiers exportés.

Les trois dernières variables, `UMLerror_tiles_1d`, `UMLerror_tiles_05d` et `UMLerror_tiles_025d` devraient être ignorées et laissées sous forme de listes vides pour l'instant.

III.3.4.2.2. Premières couches

Une fois que toutes les variables ont été définies, l'utilisateur peut appuyer sur le bouton "Exécuter" pour lancer le script.

À ce stade, les composites temporels pré-incendie et post-incendie sont générés. Pour chaque période, toutes les images disponibles dans la région entre les dates correspondantes sont sélectionnées, et les nuages ainsi que les ombres nuageuses sont masqués en utilisant la bande de qualité (`pixel_qa` pour les images Landsat, `QA60` pour les données Sentinel-2). Après avoir calculé le taux de combustion normalisé ou l'indice spectral NBR, le composite est créé en minimisant cet indice pour chaque pixel. Pour la période post-incendie, une autre image est générée, indiquant la date à laquelle la valeur NBR la plus basse a été enregistrée pour chaque pixel. Cette information sera utilisée ultérieurement comme date de détection des zones brûlées.

Les deux composites sélectionnent six bandes spectrales (tableau) : les trois bandes visibles (bleu, vert et rouge), le proche infrarouge (NIR) et les deux infrarouges de courte longueur d'onde (SWIRS court et long). En plus de ces six bandes, trois indices spectraux basés sur des différences normalisées sont également calculés pour chaque composite :

- ❖ Indice de végétation par différence normalisée (NDVI) (Rouse et al., 1974)

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

- ❖ Taux de combustion normalisé (NBR) (Key et Benson, 1999)

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

- ❖ Rapport de combustion normalisé 2 (NBR2) (García et Caselles, 1991)

$$NBR2 = \frac{Short\ SWIR - Long\ SWIR}{Short\ SWIR + Long\ SWIR}$$

Lorsque le script est exécuté et que les composites sont créés, plusieurs couches sont affichées dans le gestionnaire de couches et sur la carte :

Tuiles exportables : une grille utilisée ultérieurement pour exporter les résultats, comme expliqué dans la section 2.4.

Pré-incendie : une composition de couleur longue SWIR / NIR / Rouge du composite pré-incendie.

Post-incendie : une composition de couleur longue SWIR / NIR / Rouge du composite post-incendie.

Différence : une différence simple entre les deux compositions de couleurs, obtenue en soustrayant l'image pré-incendie de l'image post-incendie.

Les couches des zones brûlées pendant la période post-incendie, basées sur les produits MCD64A1 c6 (Giglio et al., 2018, 2009) et FireCCI51 (Lizundia-Loiola et al., 2020), à une résolution de 500 m et 250 m respectivement, sont affichées. Cependant, ces couches ne sont disponibles qu'à partir de novembre 2000 et janvier 2001, et ne sont donc pas représentées sur la carte pour les dates antérieures.

Un nouveau bouton est ajouté à la console :

- Zoom sur la région : permet de zoomer sur la région de manière générale.

III.3.4.2.3. Détection BA

Une fois que des polygones d'entraînement brûlés et non brûlés ont été définis à l'aide des couches importées de zones brûlées et non brûlées (voir Figure 11), la détection des zones brûlées peut commencer. Il est recommandé de définir des polygones plutôt que des rectangles, en ajustant leur forme pour correspondre aux zones brûlées. Cependant, il est important de noter que la définition de polygones trop grands peut ralentir le processus ultérieur, donc veillez à ne pas les rendre excessivement grands. Au moins un polygone d'entraînement est requis pour chaque classe. Si aucun polygone d'entraînement n'est défini, vous serez invité à en définir un nouveau.

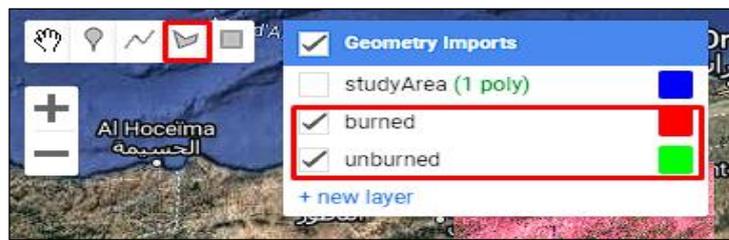


Figure 11 : Les couches à utiliser pour définir les polygones d’entraînement.

Une fois que le bouton « Exécuter » est activé, les zones brûlées sont détectées en utilisant les polygones d’entraînement définis. Cette détection est effectuée à l’aide d’un classificateur de forêt aléatoire comprenant 100 arbres de décision et des nœuds avec un minimum de 10 feuilles. Le classificateur est entraîné en utilisant tous les pixels inclus dans les polygones d’apprentissage. Au total, 18 variables sont prises en compte, comprenant les 6 bandes spectrales d’origine (bleu, vert, rouge, NIR et les deux SWIRS) ainsi que 3 indices spectraux (NDVI, NBR et NBR2), chacun étant utilisé à la fois pour la valeur post-incendie et la différence entre les valeurs avant et après l’incendie.

Le résultat fourni par le classificateur est une image de probabilité, où les valeurs varient de 0% (non brûlé) à 100% (brûlé). Les pixels les plus fortement brûlés sont extraits de cette image en utilisant un seuil basé sur la moyenne des probabilités brûlées dans chaque polygone d’entraînement brûlé. Deux nouvelles couches sont alors ajoutées à la carte pour représenter ces zones brûlées (voir Figure 12) :

L’image de probabilité BA est utilisée pour représenter les zones brûlées. Afin de faciliter sa visualisation, un seuil de 50% est appliqué à cette image avant son affichage. Les pixels ayant une probabilité inférieure à ce seuil deviennent transparents, permettant ainsi de voir l’image sous-jacente.

Les pixels brûlés sont affichés avec une palette de couleurs allant du blanc pour les valeurs de probabilité proches de 50%, jusqu’au bleu pour les probabilités de 100% de brûlé.

En outre, les graines extraites de l’image de probabilité précédente sont affichées en rouge.

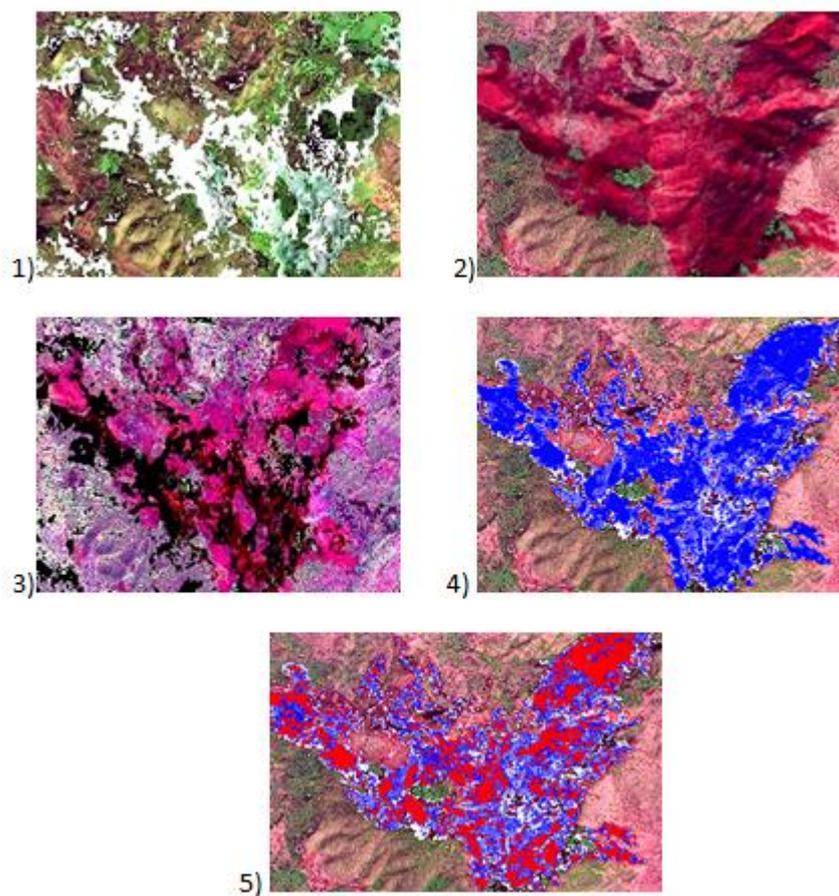


Figure 12 : Zone d'échantillonnage à Tlemcen, avec des données Landsat.

- 1) Composite pré-incendie de la période septembre-octobre **2004**,
- 2) Composite post-incendie de la période novembre-décembre **2004**,
- 3) Image de différence entre les deux périodes,
- 4) Probabilité de brûlure de l'image avec l'image satellite Google en arrière-plan,
- 5) Les graines en rouge montrées sur l'image précédente.

L'utilisateur a la possibilité de modifier ou de définir de nouveaux polygones d'entraînement afin d'obtenir les résultats souhaités. À chaque itération, l'utilisateur peut appuyer sur le bouton Exécuter pour mettre à jour le BA (l'image de probabilité des zones brûlées).

Il est important de noter que tous les pixels avec une probabilité supérieure à 50% ne seront pas exportés à la fin du processus. Les zones brûlées sont étendues à partir des graines vers l'extérieur jusqu'à ce qu'elles atteignent un seuil de 50% (tel qu'expliqué dans la section 2.4). Par conséquent, l'utilisateur doit prendre en compte le fait que les taches brûlées présentes dans la couche BA ne seront pas exportées si elles ne contiennent pas de graines.

III.3.4.2.4. Exportation des résultats

Une fois que le résultat souhaité est finalement atteint, il peut être exporté vers le compte Google Drive de l'utilisateur grâce à trois nouveaux boutons disponibles dans la console :

Exporter BA vers Google Drive : Cela permet d'exporter l'ensemble du produit BA final dans des fichiers au format ESRI Shapefile. Les polygones ne possèdent qu'un seul attribut, "Burn Date", qui représente la date de détection de la zone brûlée au format AAAAMMJJ (AAAA pour l'année, MM pour le mois et JJ pour le jour du mois). Les zones qui n'ont pas été observées avant ou après l'incendie (généralement en raison de la présence de nuages ou d'ombres nuageuses) se voient attribuer une valeur de 0 à la place d'une date. Les pixels non brûlés ne sont pas représentés dans ces fichiers.

Exporter les images de probabilité : Cette fonction permet d'exporter l'image de probabilité résultant du classificateur de forêt aléatoire au format GeoTIFF. Les valeurs de probabilité varient de 0 à 100, représentant le degré de gravure.

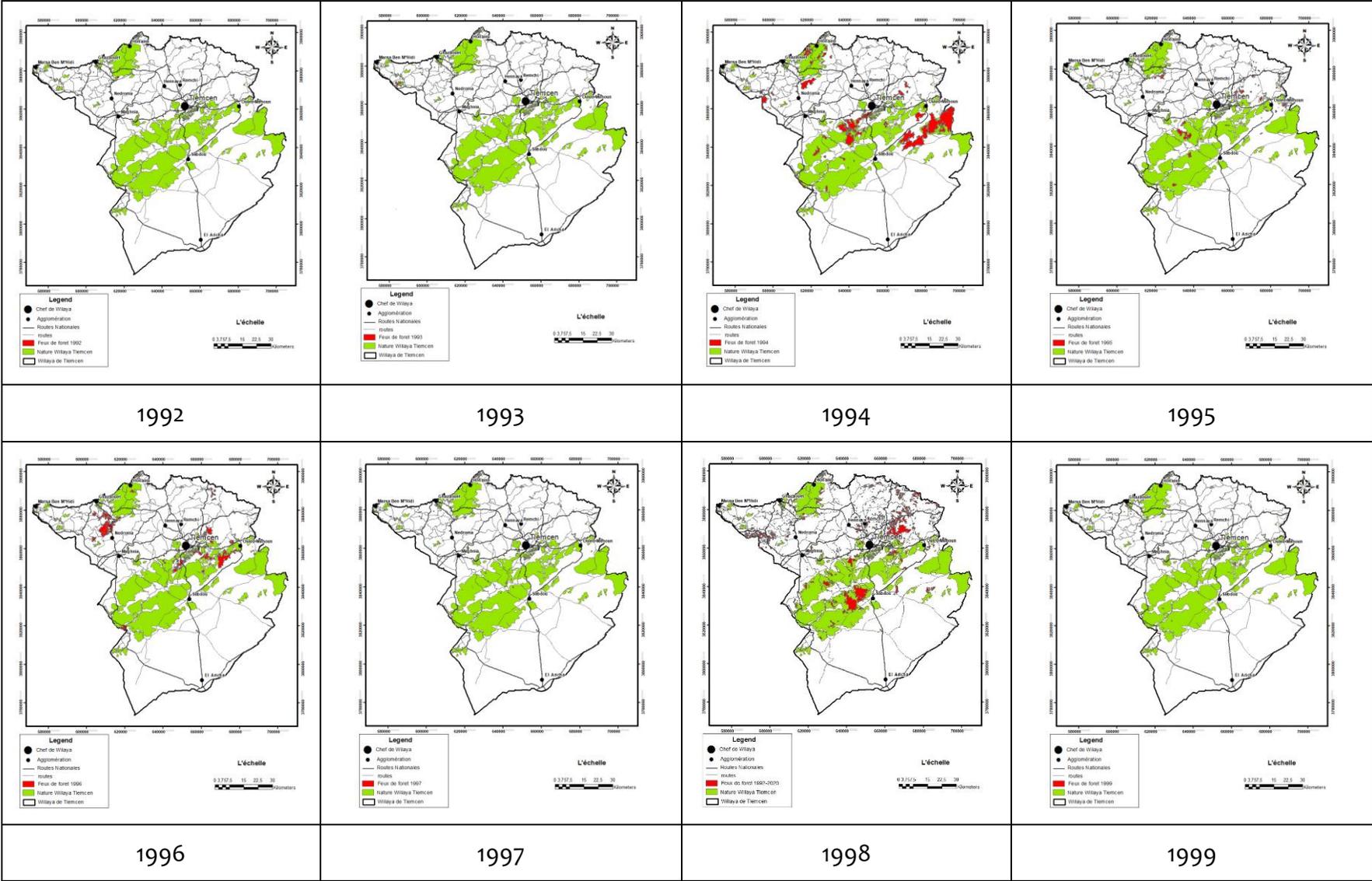
Exporter BA en tant qu'actifs GEE : Cette option permet d'exporter l'ensemble du produit BA final en tant qu'actifs Google Earth Engine (GEE), plutôt que de les exporter vers le compte Google Drive de l'utilisateur. Les données sont stockées dans un dossier appelé "BAMT_BA". Cette option est recommandée lorsque les résultats doivent être validés par l'outil d'évaluation. Dans le cas contraire, tous les fichiers Shapefile exportés vers Google Drive devront être importés dans GEE ultérieurement.

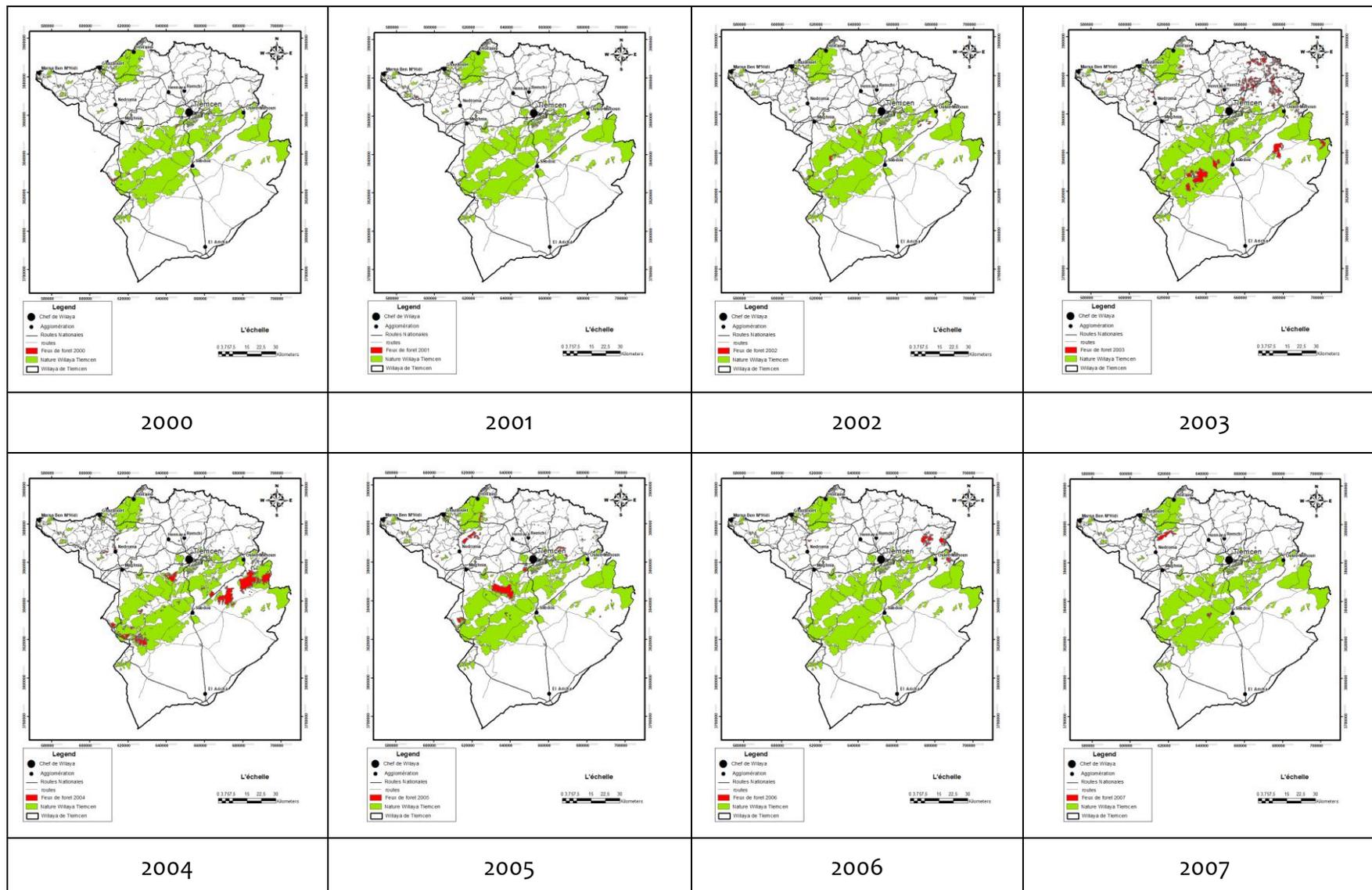
CHAPITRE IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

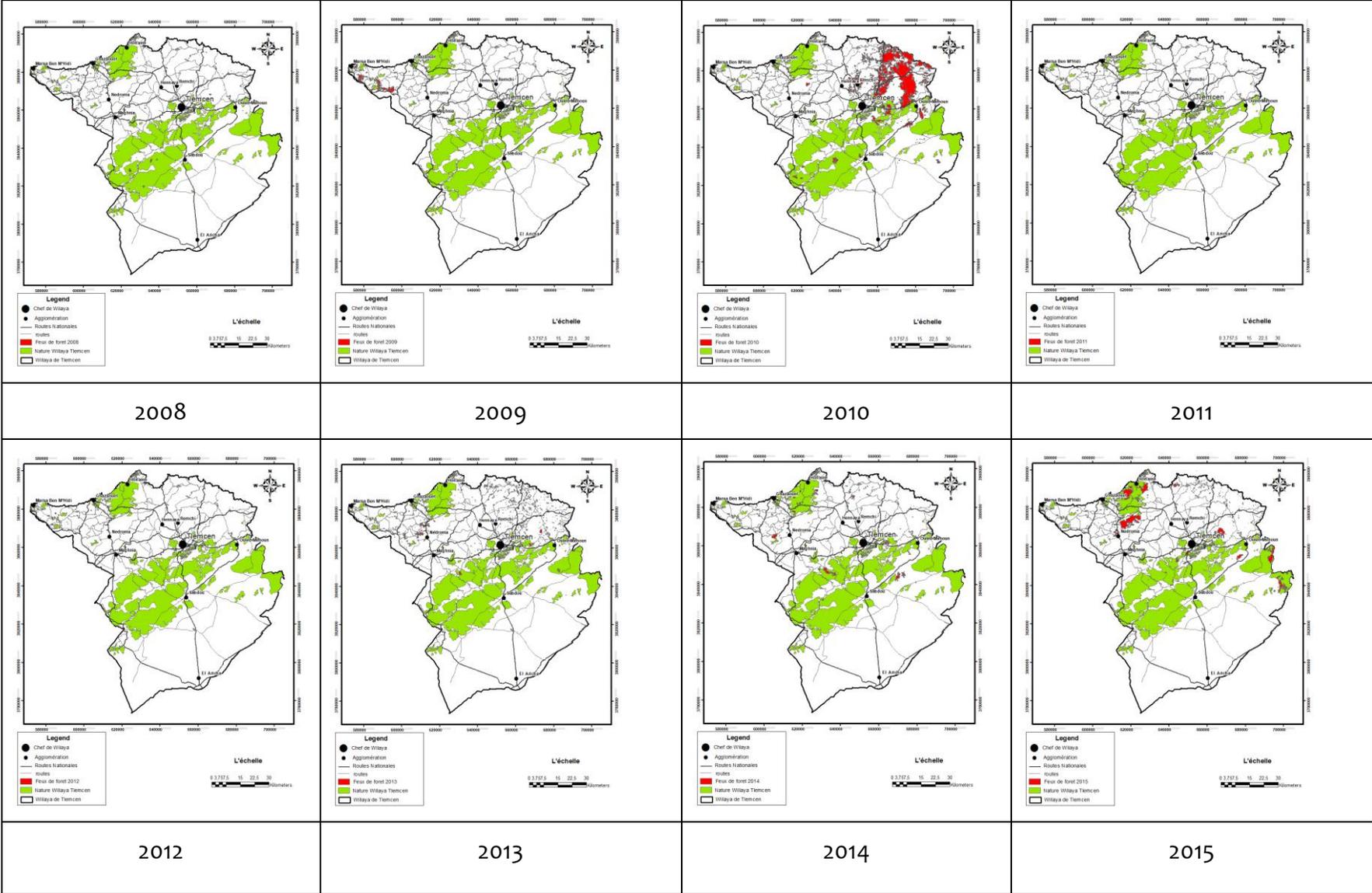
La méthode que nous avons utilisée tout au long de ce travail consistait à utiliser GEE pour établir une base de données géographique sur les incendies de forêt de la wilaya de Tlemcen durant la période de 1992-2020. Cette étude peut tout d'abord intéresser les gestionnaires de la conservation des forêts de Tlemcen en fournissant des informations spatio-temporelles fiables sur les incendies de forêt, indispensable pour évaluer le risque des feux de forêt dans la région. De plus, cela peut aider pour la prévention, la planification, la prise de décision et la sensibilisation. Il permet de mieux comprendre les facteurs qui contribuent aux incendies, de minimiser les impacts négatifs et de favoriser une gestion plus efficace des zones exposées aux risques d'incendie.

IV.1. Cartes des zones incendiées de la wilaya de Tlemcen à partir des images Landsat

Dans le cadre de notre travail de fin d'étude, nous avons créé une base de données géographique des zones incendiées dans la wilaya de Tlemcen, en utilisant le code BAMT. Nous avons traité les images Landsat pour la période allant de 1992 à 2020, ce qui nous a permis d'obtenir 29 couches d'information sur les zones brûlées, correspondant à chaque année. Grâce aux systèmes d'information géographique (SIG), nous avons pu générer des cartes détaillées des zones incendiées dans la wilaya de Tlemcen pour chaque année entre 1992 et 2020, ainsi qu'une carte de synthèse (voir la figure suivante).







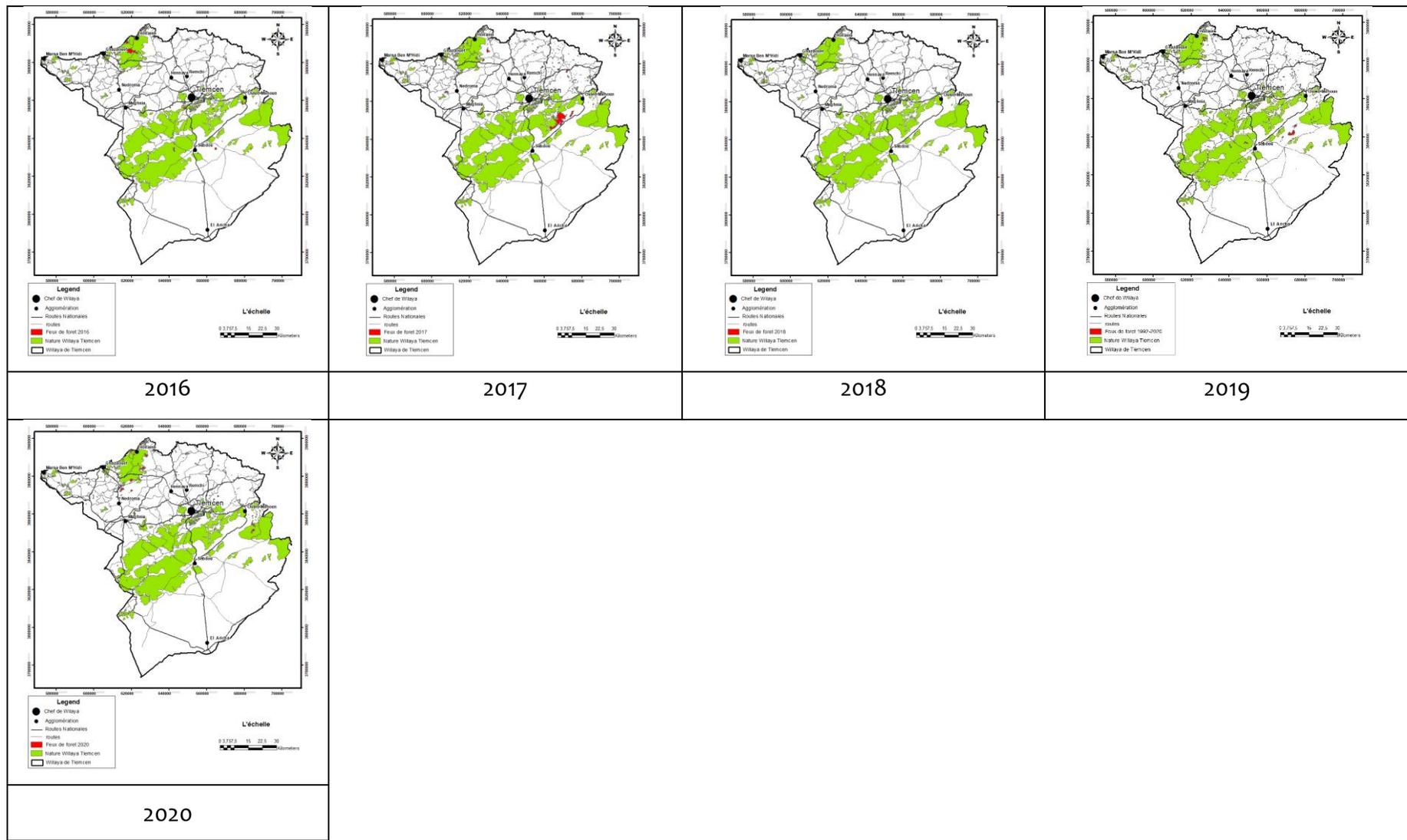


Figure 13 : les cartes des incendies de forêt pour chaque année durant la période 1992-2020 au niveau de la wilaya de Tlemcen

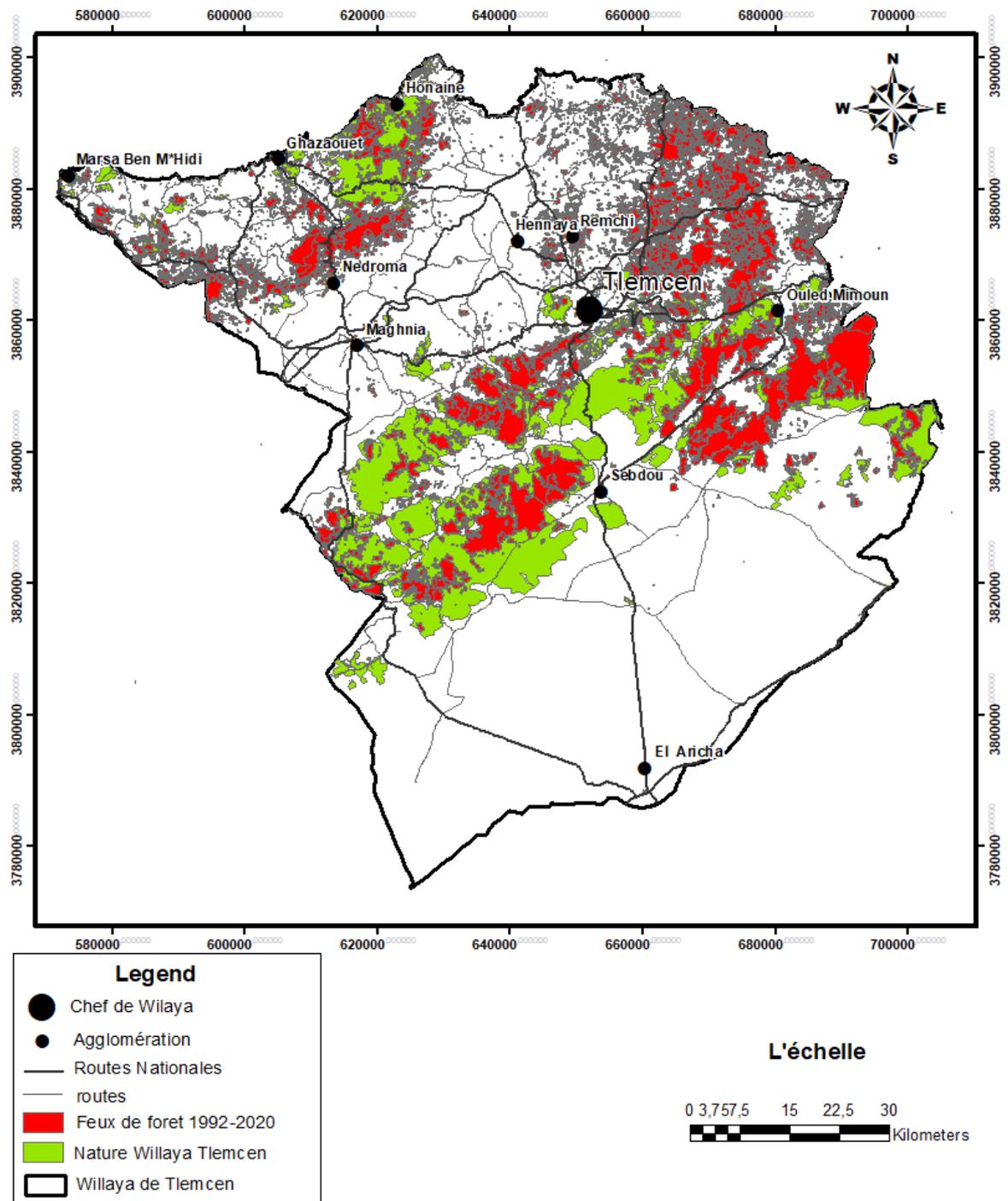


Figure 14 : La carte de synthèse des incendies de forêt entre 1992-2020 au niveau de la Wilaya de Tlemcen

IV.2. Comparaison des statistiques DGF aux résultats BAMT de wilaya de Tlemcen

Le tableau 09 et la figure 14 donnant la comparaison des Superficies des zones Brulés issue du traitement BAMT des images Landsat à celles issue des statistiques de la conservation des forêts de Telemen durant la période (1992-2020).

Tableau 9 : Comparaison des statistiques DGF aux résultats BAMT de wilaya de Tlemcen durant la période (1992-2020).

Année	Superficie des zones brulées issue du traitement BAMT des images Landsat	Superficie des zones Brulés issue des statistiques de la conservation des forêts de Tlemcen
1992	113,27	99,80
1993	313,87	99,10
1994	34 276,77	0
1995	6 081,69	0
1996	14 502,24	425,20
1997	317,07	1,50
1998	31 798,50	25,10
1999	259,38	2,20
2000	900,41	19,10
2001	379,71	1 726,20
2002	1 212,30	1 229,00
2003	21 037,22	1 540,00
2004	20 902,98	14 084,00
2005	9 508,20	1 837,50
2006	4 556,14	665,85
2007	2 024,82	757,00
2008	1 034,93	119,30
2009	2 737,31	429,82
2010	41 427,59	1 295,50
2011	161,55	459,40
2012	239,46	1 118,20
2013	4 813,09	525,20
2014	3 393,00	1 299,20
2015	12 561,63	3 581,85
2016	1 865,77	745,00
2017	5 294,59	460,05
2018	99,81	157,10
2019	2 355,42	594,59
2020	2 414,48	0

Les données du tableau 06 et de la figure 12 indiquent la superficie brûlée de chaque gouvernement pendant la période de 1992 à 2020. Ces chiffres sont établis à partir des statistiques officielles de la DGF et corrigés par le CdR (BAMT).

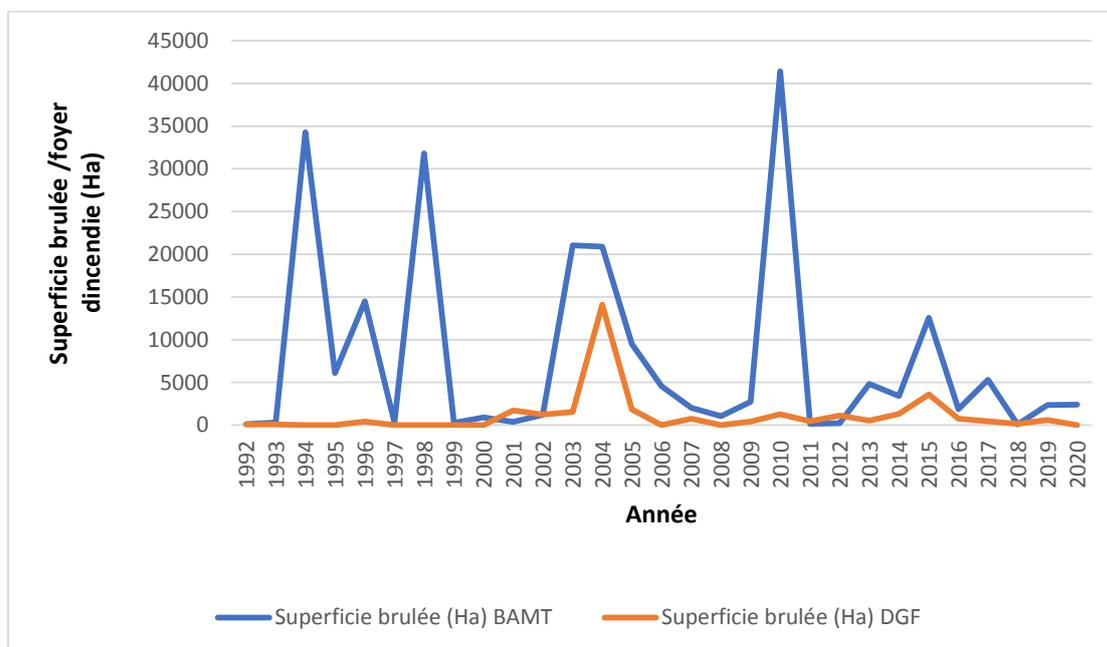


Figure 15 : Les données corrigées (BAMT - DGF) la superficie brûlée à la période 1992-2020

Nous avons étudié la répartition des tailles des incendies en analysant les images Landsat et en consultant la base de données DGF pour la période de 1992 à 2020. En observant le tableau et la courbe, nous constatons d'importantes variations dans les superficies des incendies entre les années 1992 et 1998 et nous estimons que cette différence est due au manque des données dans la statistique de DGF, principalement en raison d'instabilité sécuritaire survenus à cette époque. Il convient de noter qu'il était difficile à fiabiliser les données spécifiques sur les incendies dans la Wilaya de Tlemcen pendant cette période.

Les données fournies par le BAMT et le DGF pour la superficie brûlée dans la wilaya de Tlemcen entre 2003 et 2007 présentent aussi des différences

importantes. Ces divergences soulèvent des questions sur la fiabilité et la cohérence des sources de données.

Tout d'abord, il est envisageable que le DGF n'ait pas une couverture géographique exhaustive lors de la collecte des données, ce qui pourrait entraîner des estimations incomplètes ou sous-évaluées de la superficie brûlée. En revanche, les images multi-spectrales Landsat pourrait bénéficier d'une couverture plus étendue, ce qui pourrait contribuer à des données plus précises et complètes.

En outre, les erreurs de saisie ou de compilation des données sont une autre hypothèse à prendre en considération. Les erreurs humaines peuvent se produire lors du processus de collecte, de saisie ou de compilation des données, ce qui pourrait entraîner des inexactitudes dans les chiffres rapportés par le DGF. Si de telles erreurs sont fréquentes ou systématiques, elles pourraient expliquer les divergences observées entre les données du DGF et du BAMT.

BAMT rapporte une superficie brûlée plus importante que DGF pour l'année 2010. La différence entre les deux chiffres est assez marquée, avec BAMT signalant une superficie près de 32 fois supérieure à celle rapportée par DGF.

Cette différence peut s'expliquer par un manque d'informations concernant les superficies brûlées, en particulier pendant les mois où les incendies se produisent. Cela soulève des préoccupations quant à la fiabilité et à l'exhaustivité des données fournies par DGF.

Il est essentiel d'avoir des données précises et complètes sur les superficies brûlées afin de comprendre et de gérer efficacement les incendies. Si DGF ne dispose pas d'informations adéquates pour ces périodes critiques, cela peut affecter la prise de décision et la planification des mesures de lutte contre les incendies.

Les données de la superficie brûlée fournies par BAMT montrent une différence importante par rapport aux données statistiques enregistrées par

DGF pour la période 2013-2017. Cette différence peut s'expliquer par un manque d'informations sur les zones brûlées. Cela correspond à ce que nous avons expliqué précédemment dans la comparaison.

IV.3. Analyse interannuelle des incendies des forêts de la wilaya de Tlemcen (1992-2020)

Lors de notre analyse des images Landsat et des données de la base de données DGF pour la période 1992-2020, nous avons étudié la variabilité interannuelle de la superficie brûlée par les incendies dans la Wilaya de Tlemcen.

D'après la figure 18 et le tableau 9, il est clair que la Wilaya de Tlemcen a connu de nombreux incendies forestiers majeurs au cours de différentes années, notamment en 1994, 1998, 2003, 2004 et 2010. Ces incendies ont entraîné d'importantes pertes annuelles en termes de superficie brûlée. Selon les données de BAMT, on observe une superficie de 34 276,77 hectares brûlés en 1994, 31 798,50 hectares en 1998, 211 037,22 hectares en 2003, 1 484,00 hectares en 2004 et 20 902,10 hectares en 2010. De plus, selon BAMT, en 2004, on observe une superficie de 4 259 hectares brûlés et 44 741 hectares enregistrés.

Nous remarquons également une diminution significative des superficies incendiées ces dernières années. Par exemple, en se référant aux années 1997, 1999 et 2011 selon BAMT, ainsi qu'en 2005 selon DGF. Au cours de ces années, la Wilaya a enregistré des pertes annuelles de superficie brûlée de 317,07 hectares, 259,38 hectares et 161,55 hectares respectivement selon BAMT, et 1 837,50 hectares selon DGF.

Ces données mettent en évidence la variabilité des superficies brûlées par les incendies dans la Wilaya de Tlemcen au fil des années, avec des années marquées par de grands incendies et des pertes considérables, tandis que d'autres années ont connu une diminution significative de ces superficies brûlées. Ces informations sont

cruciales pour comprendre les tendances et prendre des mesures appropriées pour la prévention et la gestion des incendies dans la région.

IV.4. Analyse intra-annuelle des incendies des forêts de la wilaya de Tlemcen (1992-2020)

En règle générale, la saison de lutte contre les incendies forestiers débute en juin et se termine en octobre. Cependant, dans notre région d'étude, en raison des caractéristiques de la végétation, du climat et des facteurs d'origine humaine, nous avons récemment observé des incendies survenant en dehors de cette période. Bien que moins fréquents et moins dévastateurs en termes de superficie.

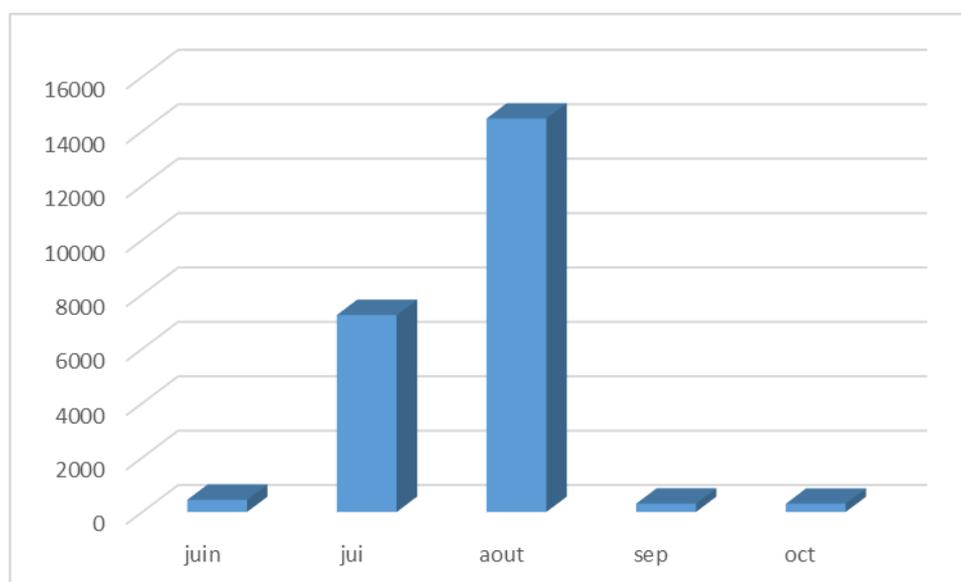


Figure 16 : Evolution des superficies des incendies de forêt selon les mois dans la Wilaya de Tlemcen durant la période 1992-2020.

Dans le cadre de cette étude, il est important de noter que le mois d'août présente des caractéristiques favorables à la propagation des incendies de forêt. Les températures élevées, la faible humidité et les périodes prolongées de sécheresse qui prévalent à cette période créent un environnement propice aux incendies. De plus, pendant les mois d'été, il y a une accumulation de matières végétales telles que l'herbe, les feuilles et les

branches sèches, ce qui fournit une quantité plus importante de combustibles disponibles pour alimenter les incendies. Les activités humaines liées aux loisirs en plein air, comme les pique-niques, les barbecues et les feux de camp, augmentent également pendant l'été, ce qui accroît les risques de départs d'incendie accidentels. Enfin, les orages électriques plus fréquents pendant les mois d'été augmentent les risques de foudre, qui peut déclencher un incendie s'il frappe un arbre ou une zone végétale sèche. Ces facteurs combinés font du mois d'août une période particulièrement propice aux incendies de forêt.

Conclusion

CONCLUSION

Dans le cadre de ce projet, nous avons utilisé les données de la Direction Générale des Forêts (DGF), ainsi que les outils GEE et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour analyser les incendies de forêt dans la wilaya de Tlemcen sur une période allant de 1992 à 2020. L'objectif principal était de cartographier les incendies et de calculer les grandes superficies touchées par ces incendies au fil des années.

Les résultats obtenus ont fourni une vision approfondie de l'évolution des incendies de forêt dans la région étudiée. Nous avons observé une tendance inquiétante à l'augmentation des superficies brûlées au fil du temps, indiquant une préoccupation majeure en termes de perte de couverture végétale et d'impact sur les écosystèmes forestiers.

Nos résultats ont révélé des schémas clairs de variations intra-annuelles des incendies de forêt dans la région étudiée. Nous avons observé une tendance marquée à une saisonnalité accrue des incendies, avec des périodes de pic d'activité inflammatoire.

Au cours de notre analyse, nous avons constaté que les incendies de forêt étaient plus fréquents pendant les mois d'été, lorsque les conditions climatiques étaient plus chaudes et plus sèches. Ces conditions augmentent la vulnérabilité des écosystèmes forestiers et favorisent la propagation rapide des incendies.

De plus, L'utilisation de GEE et des SIG s'est révélée essentielle pour la réalisation de cette analyse. Ces outils ont permis une visualisation précise et une analyse spatiale des données, facilitant ainsi la création de cartes détaillées des incendies de forêt. L'intégration des données de la DGF avec les images satellites et d'autres données géospatiales a renforcé notre compréhension des schémas d'incendies de forêt dans la région.

En conclusion, Les tâches restant à accomplir sont considérables. Il ne s'agit là que d'une modeste contribution à la maîtrise de l'utilisation des outils

CONCLUSION

géomatique comme outils d'investigations pour une problématique de taille. Elle entrouvre la porte des fantastiques perspectives enviables qui mettront en œuvre des modèles pour mieux prédire l'évolution probable des parcelles incendiées.

BIBLIOGRAPHIQUE

- A.M.T, A. (2019). *Application du SIG et de la télédétection pour un outil cartographique D'aide à la gestion des Feux de forêts dans la wilaya d'El Tarf*. Université Mentouri Constantine, Algérie.
- Abedelguerfi, L., Abdelguerfi, A., Bouzanad, Z., & Guttonneau, G. (2003). Autoécologie et distribution du complexe d'espèces *medicagociliaris-M. intertexta* en Algérie. *Acta Botanicagallica*, vol 150(n° 3), 253-265p.
- Abi-saleh, B., M, B., I, N., & P, Q. (1976). *Les séries forestières de végétation au Liban, essai d'interprétation schématique*. (No. 123, 541660; Bot. Fr.).
- ALEXANDRIAN, D., & F, E. (1998). *Politiques nationales ayant une incidence sur les incendies de forêt dans le Bassin Méditerranéen*.
- Atelier, F. O. S. A. (2000). *Atelier FOSA (Etude Prospective du Secteur Forestier en Afrique) pour l'Afrique Centrale*.
- Belkaid, H. (2016). *Analyse spatiale et environnementale du risque d'incendie de forêt en Algérie cas de la Kabylie maritime*. Universitaire de Nice - Sophia Antipolis.
- Benbouriche, R. (2005). *Analyse bilan des incendies de forêts de wilaya de Tizi Ouzo pour la période 2005-2014*. Université de Bejaia.
- Boukerker, H. (2016). *Le forêt algérien face aux feux: proposition d'un dispositif de prévention et de lutte*. *Journal Algérien Des Régions Arides (JARA)*, n° 13, 73.
- Cherifi, C. (2017). *Etude de la reprise végétative du chêne liège (Quercus suber L.) et mode de gestion après incendies de 2015- 2016. Cas de la forêt de Zarieffet (Wilaya de Tlemcen)*. Université de Tlemcen.
- Direction Générale des Forêts. *Programme d'Action National sur la lutte contre la Désertification*, 104p (2004).
- GRIME, J. ., J.G, H., & R, H. (1989). *Comparative Plant Ecology: a functional approach to common British species*.

BIBLIOGRAPHIQUE

- KEBIR, L., & ABBAS M. (2011). . Apport de l'imagerie Alsat-2A, pour l'identification, la gestion des aménagements forestiers et le suivi des incendies de forêts en Algérie (Cas de la wilaya de Tlemcen): Gestion et prévention des risques majeurs. *Actes de l'Atelier « ALSAT-2A-Utilisateurs »*, 157.
- Marc, P. (1916). Les incendies de forets en Algérie. In Notes sur les forets de l'Algérie. Typographie Adolphe Jourdan. Imprimeur-Libraire-Éditeur, Alger., 105p.
- MEDDOUR-SAHAR, O., R, M., & D, A. (2008). Analyse des feux de forêts en Algérie sur le temps long (1876-2007). *CIHEAM*, N°39, 6p.
- MEGREROUCHE, R. (2006). *Sensibilité de la végétation forestière aux incendies cas de la forêt domaniale de Chattabah-Ain Smara-Constantine*. Univ. Mentouri, Constantine.
- Messaferi, L. (2018). *Contribution à l'étude des grands feux dans la wilaya de Bejaïa*. Université de Tizi Ouzou.
- Morandini, R. (1979). *Sylviculture et incendie*. 8p.
- O., O., M.-S. (2008).). *Contribution à l'étude des feux de forêts en Algérie : approche statistique exploratoire et socio-économique dans la wilaya de Tizi Ouzou*. INA El Harrach, A. M.-S. (2008).). *Contribution à l'étude des feux de forêts en Algérie : approche statistique exploratoire et socio-économique dans la wilaya de Tizi Ouzou*. INA El Harrach, Alger.
- ONS. (2011). *Premier Recensement Economique - 2011 - Résultats Préliminaires de la première phase*. (N° 168; Série E : Statistiques Economiques).

Site internet

www.googleearthengine.com.

<http://decoupageadministratifalgerie.blogspot.com/2014/09/monographie-de-la-wilaya-de-tlemcen.html>.

(Esri. (s.d.). ArcGIS - Aide ArcGIS Online : Qu'est-ce qu'ArcGIS Online ? Récupéré sur <https://resources.arcgis.com/fr/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>).

Pour mettre en forme les statistiques des incendies de la Direction Générale des Forêts (DGF) vous pouvez suivre collectez des données et préparations les données statistiques d'incendies, nettoyer, organiser et formater les données.

<https://bastarrika.wordpress.com/>.

<https://earthengine.google.com/>.

<https://github.com/ekhiroteta/BAMT>.

<https://www.mdpi.com/20224292/134/816>.

<https://doi.org/10.3390/rs13040816>.

<https://www.usgs.gov/landsat-missions>).

(<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types/level-1c>.

(<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types/level-2a>.

<https://code.earthengine.google.com/20c4db5b2e94290aff4b3a87cdb056c2>.

<https://code.earthengine.google.com/d39add8c5de8904433500bd738f3dab6>.

<https://code.earthengine.google.com/95aaacf6b9e2c29f922c421472724c24>.

<https://code.earthengine.google.com/5864c922d6171bcb85666ddb4451f6fd>.